



# 因應極端氣候水資源系統備援能力評估規劃

Evaluation and Planning of Backup Water Supply for Climate Extremes



主辦機關：經濟部水利署水利規劃試驗所

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

中華民國 110 年 12 月

# 因應極端氣候水資源系統備援能力評估規劃

Evaluation and Planning of Backup Water Supply for Climate Extremes

主辦機關：經濟部水利署水利規劃試驗所  
執行單位：財團法人成大研究發展基金會  
計畫主持人：曾宏偉

中華民國 110 年 12 月

# 目錄

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 表目錄.....                      | 表-1  |
| 圖目錄.....                      | 圖-1  |
| 摘要.....                       | 摘-1  |
| Abstract.....                 | A-1  |
| 結論與建議.....                    | 結-1  |
| <br>                          |      |
| 第一章 前言.....                   | 1-1  |
| 一、計畫緣由與目的.....                | 1-1  |
| 二、重要分析項目與流程.....              | 1-2  |
| 三、分析範圍.....                   | 1-3  |
| 四、重要項目之定義與概念.....             | 1-4  |
| 五、分析限制與假設.....                | 1-10 |
| 第二章 基本資料蒐集與文獻整理.....          | 2-1  |
| 一、水資源基本資料蒐集.....              | 2-1  |
| 二、國內外文獻蒐集彙整.....              | 2-2  |
| 三、國內外備援方案蒐集盤點.....            | 2-27 |
| 第三章 南部區域水資源系統分析與極端氣候衝擊評估..... | 3-1  |
| 一、水資源供需模式建置與驗證.....           | 3-1  |
| 二、極端氣候影響下水資源衝擊評估.....         | 3-17 |
| 第四章 乾旱 SDF 曲線產製與分析.....       | 4-1  |
| 一、極端枯旱風險之量化方式探討.....          | 4-1  |
| 二、乾旱 SDF 曲線產製.....            | 4-5  |
| 三、設計乾旱參數(延時與頻率年)之探討.....      | 4-21 |
| 第五章 極端枯旱風險評估與備援方案建議.....      | 5-1  |
| 一、極端枯旱風險衝擊評估.....             | 5-1  |
| 二、區域極端枯旱潛勢地圖繪製(縣市尺度).....     | 5-7  |
| 三、因應極端氣候備援容量盤點與強化策略研擬.....    | 5-10 |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 四、建置極端枯旱風險評估與備援建議之操作準則..... | 5-29  |
| 參考文獻.....                   | 參-1   |
| 附錄一 備援能力評估規劃手冊.....         | 附 1-1 |
| 附錄二 水利新知.....               | 附 2-1 |
| 附錄三 頻率分析方法.....             | 附 3-1 |

## 表目錄

|        |                                       |      |
|--------|---------------------------------------|------|
| 表 2-1  | 極端事件定義與特性彙整表 .....                    | 2-3  |
| 表 2-2  | 供需系統之穩定出水量推估方法彙整表 .....               | 2-7  |
| 表 2-3  | 常用缺水指標與其適用性說明彙整表 .....                | 2-8  |
| 表 2-4  | 缺水指數(SI)應用情況彙整表 .....                 | 2-8  |
| 表 2-5  | 旱災災害等級區分表.....                        | 2-12 |
| 表 2-6  | 印度 Gosikhurd 大壩之供水能力推估結果 .....        | 2-16 |
| 表 2-7  | 國際上乾旱 SDF 曲線相關文獻彙整表.....              | 2-19 |
| 表 2-8  | 國際上韌性特徵之量化方法 .....                    | 2-21 |
| 表 2-9  | 南部區域目標年條件下備援方案盤點結果 .....              | 2-27 |
| 表 2-10 | 國內外冷凝製水應用案例 .....                     | 2-31 |
| 表 2-11 | 臺灣冷凝水回收應用案例.....                      | 2-35 |
| 表 3-1  | 南部區域各個供需系統之供水能力評估檢討成果 .....           | 3-7  |
| 表 3-2  | 南部區域各縣市現況用水量與供水系統供水量 .....            | 3-15 |
| 表 3-3  | 南部區域各縣市目標年用水需求與供水系統水源量 .....          | 3-16 |
| 表 3-4  | 南部區域各縣市目標年用水需求與供水系統水源常態供水量 ...        | 3-16 |
| 表 3-5  | 南部區域各個縣市民國 125 年枯旱時期可供水之備援水量 .....    | 3-17 |
| 表 3-6  | 雨量狀態分級對照表.....                        | 3-19 |
| 表 3-7  | 近年主要乾旱事件下南部區域各縣市之氣象乾旱頻率年 .....        | 3-25 |
| 表 4-1  | 臺南地區公共給水之供需現況缺水分析 .....               | 4-4  |
| 表 4-2  | 臺南地區公共給水之缺水事件分析(民國 103 至 104 乾旱事件) .. | 4-4  |
| 表 4-3  | 臺南地區公共用水之歷年缺水情況 .....                 | 4-10 |
| 表 4-4  | 臺南地區各年延時 120 日之最大缺水量 .....            | 4-11 |
| 表 4-5  | 常用機率分布配套年最大缺水量之 KS 檢定結果 .....         | 4-12 |
| 表 4-6  | 常用機率分布配套年最大缺水量之卡方檢定結果 .....           | 4-12 |
| 表 4-7  | 常用機率分布配套年最大缺水量之誤差指標 SE.....           | 4-13 |
| 表 4-8  | 嘉義地區於現況條件下不同延時與頻率年之對應缺水量 .....        | 4-14 |
| 表 4-9  | 臺南地區於現況條件下不同延時與頻率年之對應缺水量 .....        | 4-16 |

|        |                                  |      |
|--------|----------------------------------|------|
| 表 4-10 | 高雄地區於現況條件下不同延時與頻率年之對應缺水量 .....   | 4-18 |
| 表 4-11 | 屏東地區於現況條件下不同延時與頻率年之對應缺水量 .....   | 4-20 |
| 表 5-1  | 嘉義系統於目標年條件下不同延時與頻率年之對應缺水量 .....  | 5-2  |
| 表 5-2  | 臺南系統於目標年條件下不同延時與頻率年之對應缺水量 .....  | 5-3  |
| 表 5-3  | 高雄系統於目標年條件下不同延時與頻率年之對應缺水量 .....  | 5-4  |
| 表 5-4  | 屏東系統於目標年條件下不同延時與頻率年之對應缺水量 .....  | 5-5  |
| 表 5-5  | 南部區域各縣市於現況與目標年條件下極端乾旱缺水程度 .....  | 5-9  |
| 表 5-6  | 嘉義地區目標年條件下設計備援水量之評估規劃 .....      | 5-13 |
| 表 5-7  | 臺南地區目標年條件下設計備援水量之評估規劃 .....      | 5-13 |
| 表 5-8  | 高雄地區目標年條件下設計備援水量之評估規劃 .....      | 5-14 |
| 表 5-9  | 屏東地區目標年條件下設計備援水量之評估規劃 .....      | 5-14 |
| 表 5-10 | 南部區域各個縣市目標年條件下設計備援水量之評估規劃 .....  | 5-14 |
| 表 5-11 | 嘉義地區目標年條件下待強化備援水量之評估規劃 .....     | 5-18 |
| 表 5-12 | 臺南地區目標年條件下待強化備援水量之評估規劃 .....     | 5-18 |
| 表 5-13 | 高雄地區目標年條件下待強化備援水量之評估規劃 .....     | 5-19 |
| 表 5-14 | 屏東地區目標年條件下待強化備援水量之評估規劃 .....     | 5-19 |
| 表 5-15 | 南部區域各個縣市目標年條件下待強化備援水量之評估規劃 ..... | 5-20 |
| 表 5-16 | 南部區域各個縣市現況條件下待強化備援水量之評估規劃 .....  | 5-21 |
| 表 5-17 | 南部區域各縣市於不同供需條件之水資源韌性參數 .....     | 5-29 |

## 圖目錄

|        |                                |      |
|--------|--------------------------------|------|
| 圖 1-1  | 因應極端事件水資源系統備援評估規劃架構 .....      | 1-1  |
| 圖 1-2  | 南部區域重要流域與水資源供需系統 .....         | 1-4  |
| 圖 1-3  | 不同乾旱種類之關係與其可能造成之衝擊 .....       | 1-5  |
| 圖 1-4  | 乾旱 SDF 曲線示意圖 .....             | 1-7  |
| 圖 1-5  | 水資源供需系統之韌性曲線 .....             | 1-8  |
| 圖 2-1  | 重要分析主軸與文獻回顧項目 .....            | 2-1  |
| 圖 2-2  | 累積曲線法示意圖 .....                 | 2-5  |
| 圖 2-3  | 尖峰序列法示意圖 .....                 | 2-6  |
| 圖 2-4  | 台灣自來水股份有限公司乾旱時期各階段供水措施 .....   | 2-13 |
| 圖 2-5  | 美國戈爾特之水庫設計容量與缺水指數(SI)之關係 ..... | 2-14 |
| 圖 2-6  | 韓國安東壩各旬最佳化操作規線 .....           | 2-15 |
| 圖 2-7  | 乾旱 SDF 曲線(示意圖) .....           | 2-18 |
| 圖 2-8  | 系統效能與韌性之關係 .....               | 2-22 |
| 圖 2-9  | 供水系統之韌性概念圖 .....               | 2-24 |
| 圖 2-10 | 韌性特徵與系統效能之關係 .....             | 2-25 |
| 圖 2-11 | 韌性曲線與韌性參數之關係示意圖 .....          | 2-26 |
| 圖 2-12 | 國際上常見備援方案盤點結果 .....            | 2-28 |
| 圖 2-13 | 納米比沙漠甲蟲空氣取水與瓦爾卡水塔示意圖 .....     | 2-29 |
| 圖 2-14 | 採霧器(fog catcher)示意圖 .....      | 2-30 |
| 圖 2-15 | 工研院薄膜等溫除濕技術介紹 .....            | 2-33 |
| 圖 3-1  | GTSPM 模式分析流程 .....             | 3-2  |
| 圖 3-2  | 南部區域水資源供需架構 .....              | 3-4  |
| 圖 3-3  | 蘭潭-仁義潭水庫系統於不同缺水指數所對應之供水量 ..... | 3-8  |
| 圖 3-4  | 南化高屏系統於不同缺水指數所對應之供水量 .....     | 3-9  |
| 圖 3-5  | 鳳山水庫系統於不同缺水指數所對應之供水量 .....     | 3-10 |
| 圖 3-6  | 牡丹水庫系統於不同缺水指數所對應之供水量 .....     | 3-11 |
| 圖 3-7  | 嘉義地區公共給水供需圖 .....              | 3-12 |

|        |                                  |      |
|--------|----------------------------------|------|
| 圖 3-8  | 臺南地區公共給水供需圖 .....                | 3-13 |
| 圖 3-9  | 高雄地區公共給水供需圖 .....                | 3-13 |
| 圖 3-10 | 屏東地區公共給水供需圖 .....                | 3-14 |
| 圖 3-11 | 標準化雨量指數之計算流程示意圖.....             | 3-19 |
| 圖 3-12 | 嘉義地區近年之標準化雨量指數與氣象乾旱頻率年 .....     | 3-20 |
| 圖 3-13 | 臺南地區近年之標準化雨量指數與氣象乾旱頻率年 .....     | 3-21 |
| 圖 3-14 | 高雄地區近年之標準化雨量指數與氣象乾旱頻率年 .....     | 3-23 |
| 圖 3-15 | 屏東地區近年之標準化雨量指數與氣象乾旱頻率年 .....     | 3-24 |
| 圖 3-16 | 嘉義地區標準化雨量指數與各月份缺水率之關聯程度 .....    | 3-26 |
| 圖 3-17 | 臺南地區標準化雨量指數與各月份缺水率之關聯程度 .....    | 3-27 |
| 圖 3-18 | 高雄地區標準化雨量指數與各月份缺水率之關聯程度 .....    | 3-29 |
| 圖 3-19 | 屏東地區標準化雨量指數與各月份缺水率之關聯程度 .....    | 3-31 |
| 圖 4-1  | 缺水指數(SI)為 1.0 之可能年缺水情境組合 .....   | 4-2  |
| 圖 4-2  | 年缺水率 5% 下之可能日缺水率組合 .....         | 4-3  |
| 圖 4-3  | 乾旱 SDF 曲線產製流程圖 .....             | 4-6  |
| 圖 4-4  | 嘉義地區水資源系統現況條件下之乾旱 SDF 曲線 .....   | 4-14 |
| 圖 4-5  | 臺南地區水資源系統現況條件下之乾旱 SDF 曲線 .....   | 4-17 |
| 圖 4-6  | 高雄地區水資源系統現況條件下之乾旱 SDF 曲線 .....   | 4-19 |
| 圖 4-7  | 屏東地區水資源系統現況條件下之乾旱 SDF 曲線 .....   | 4-21 |
| 圖 4-8  | 嘉義地區現況乾旱 SDF 曲線與近年嚴重乾旱事件之缺水特性 .. | 4-23 |
| 圖 4-9  | 臺南地區現況乾旱 SDF 曲線與近年嚴重乾旱事件之缺水特性 .. | 4-23 |
| 圖 4-10 | 高雄地區現況乾旱 SDF 曲線與近年嚴重乾旱事件之缺水特性 .. | 4-23 |
| 圖 4-11 | 屏東地區現況乾旱 SDF 曲線與近年嚴重乾旱事件之缺水特性 .. | 4-24 |
| 圖 4-12 | 南部區域各縣市近年嚴重乾旱事件之缺水特性 .....       | 4-26 |
| 圖 5-1  | 嘉義地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線 .....   | 5-2  |
| 圖 5-2  | 臺南地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線 .....   | 5-3  |
| 圖 5-3  | 高雄地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線 .....   | 5-4  |
| 圖 5-4  | 屏東地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線 .....   | 5-5  |
| 圖 5-5  | 區域極端枯旱潛勢地圖繪製(縣市尺度)之繪製流程.....     | 5-7  |



|        |                                  |      |
|--------|----------------------------------|------|
| 圖 5-6  | 南部區域於現況與目標年條件下極端枯旱潛勢地圖 .....     | 5-9  |
| 圖 5-7  | 設計備援水量計算示意圖 .....                | 5-11 |
| 圖 5-8  | 待強化備援水量計算示意圖 .....               | 5-15 |
| 圖 5-9  | 南部區域各個縣市目標年條件下待強化備援水量之評估規劃 ...   | 5-20 |
| 圖 5-10 | 因應 109-110 乾旱重現之建議作為供需水量分析 ..... | 5-21 |
| 圖 5-11 | 南部區域於不同供需條件下之極端枯旱潛勢地圖 .....      | 5-23 |
| 圖 5-12 | 水資源供需系統之韌性曲線 .....               | 5-24 |
| 圖 5-13 | 韌性曲線與無因次韌性參數之因子關係圖 .....         | 5-27 |
| 圖 5-14 | 韌性提升效益評估示意圖 .....                | 5-28 |
| 圖 5-15 | 南部區域各縣市於不同供需條件之水資源韌性參數 .....     | 5-28 |

# 摘要

為評估南部區域水資源系統因應極端乾旱事件所需之備援水量，導入各縣市於不同延時與頻率年條件下枯旱潛勢地圖，瞭解其面臨之潛在極端枯旱風險(例如：50年一遇乾旱)，並依據量化風險值進行備援能力之評估規劃。其中，枯旱潛勢地圖主要係依據乾旱 SDF 曲線(drought severity-duration-frequency curve)所提供資訊進行繪製，可反映出水資源系統實際所面臨之極端枯旱風險值，期望彌補缺水指數(shortage index, SI)之不足(其僅能考慮長期平均之缺水特性)並輔助水資源經理計畫進行備援策略強化，以因應極端乾旱事件之威脅。

## 一、基本資料蒐集與文獻整理

### (一)水資源基本資料蒐集

完成南部區域(嘉義、臺南、高雄以及屏東)水資源供需資料蒐集，以作為後續水資源供需分析與極端枯旱風險評估之基礎，主要資料包含：水資源系統架構、供需情況、調適策略、水文資料、生態基流量、水庫標高-面積-容積(H-A-V)曲線、輸水與淨水損失、水庫操作規線以及計畫配水量等水源供需相關資料。

### (二)國內外文獻蒐集彙整

為強化備援能力評估規劃相關文獻基礎與分析邏輯，完成重要主軸進行相關文獻蒐集與彙整，以充分瞭解與掌握各項主軸之定義、發展情況以及應用情況。主要彙整成果包含：(1)國內外極端事件之定、(2)供需系統穩定出水量(供水能力)推估方法、(3)常用缺水指標適用性說明與缺水指數(SI)應用情況、(4)極端乾旱與乾旱 SDF 曲線以及(5)韌性特徵量化方法。

### (三)國內外備援方案蒐集盤點

#### 1、國內備援方案

參考「臺灣各區水資源經理基本計畫-核定本」(經濟部，民國 110 年)盤點與彙整南部區域各個縣市於目標年條件不同備援方案於枯水期間可穩定提供之水量，盤點結果指出：綜合現況

備援、抗旱 1.0、抗旱 2.0 以及目標年新增備援之水量，嘉義、臺南、高雄以及屏東備援總量分別為 19.0、29.0、109.2 以及 9.4 萬噸/日。其中，因高雄地區水源主要仰賴川流水且缺乏大型蓄水設施，其供水情況易受極端乾旱影響，故規劃較高備援總量加以因應。

## 2、國際備援方案

為瞭解國際上常用備援方案並借鏡國際經驗，參考國際技術報告與專書，包含：非傳統水資源(UN-Water, 2020)、替代水資源(International Water Association, 2015)、替代供水計畫(The Water Research Foundation, 2018)以及替代水源與廢水管理(Boulware, 2013)，進行國際上常見備援方案盤點與彙整。此外，亦挑選創新備援方案完成深入回顧，以提供臺灣未來備援推動參考。

## 二、南部區域水資源系統分析與極端氣候衝擊評估

### (一)水資源供需模式建置與驗證

水資源供需模式建置上係採用「108 年南部區域水資源經理計畫滾動檢討」(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 108 年)最新供需參數資料檢討南部區域各個供需系統之供水能力，並與前期計畫「臺灣南部區域水資源經理基本計畫(第 1 次檢討)-核定本」(經濟部水利署，民國 106 年)進行比較以作為模式驗證。供水能力之分析比較結果顯示：水資源供需模式可合理模擬南部區域各個供需系統之供水能力，適合運用於後續極端氣候衝擊評估。

### (二)極端氣候影響下水資源衝擊評估

#### 1、極端事件之特性分析

分析民國 103 至 104 年與民國 109 至 110 年乾旱事件對於南部區域各縣市造成之氣象乾旱頻率年(摘表-1)，以瞭解兩場乾旱事件在空間上與程度上之異同。民國 103 至 104 年乾旱事件對於嘉義、臺南、高雄以及屏東造成之氣象乾旱頻率年分別為

5.9、12.8、24.1 以及 33.0 年，其頻率年由北至南有增加情況，其中又以臺南、高雄以及屏東之頻率年較高，三者頻率年皆高於 10 年，符合極端事件之定義；而民國 109 至 110 年乾旱事件對於嘉義、臺南、高雄以及屏東造成之氣象乾旱頻率年分別為 100.0、100.0、100.0 以及 6.3 年，相較於民國 103 至 104 乾旱事件，除屏東地區以外，其餘各地區之氣象乾旱頻率年皆有顯著增幅。

若以南部區域整體而言，民國 103 至 104 年乾旱造成之氣象乾旱頻率年為 18.2 年，而民國 109 至 110 年乾旱則造成更加顯著之乾燥狀態，其氣象乾旱頻率年高達 100.0 年。此兩場事件分別在南部區域導致大約二十年一遇與百年一遇程度之乾旱事件，嚴重衝擊南部區域之供水穩定，突顯備援能力評估規劃之重要性。

## 2、極端氣候影響下水資源衝擊評估

為釐清氣象乾旱事件與水資源供需衝擊之關聯性，針對南部區域各個縣市之標準化雨量指數與各月份缺水率進行相關性分析，以探討兩者關聯程度與可預測程度。各個縣市符合乾燥(標準化雨量指數為負)與缺水條件(缺水率大於零)之資料分析結果指出：在乾燥與缺水條件下，標準化雨量指數與各月份缺水率之相關係數多屬於中高度負相關，嘉義、臺南、高雄以及屏東之相關係數分別為-0.57、-0.82、-0.61 以及-0.48。

摘表-1 近年主要乾旱事件下南部區域各縣市之氣象乾旱頻率年

| 地區 | 氣象乾旱頻率年            |                     |
|----|--------------------|---------------------|
|    | 民國 103 至 104 乾旱事件  | 民國 109 至 110 乾旱事件   |
| 嘉義 | 5.9                | <b><u>100.0</u></b> |
| 臺南 | <b><u>12.8</u></b> | <b><u>100.0</u></b> |
| 高雄 | <b><u>24.1</u></b> | <b><u>100.0</u></b> |
| 屏東 | <b><u>33.0</u></b> | 6.3                 |
| 南部 | <b><u>18.2</u></b> | <b><u>100.0</u></b> |

註：<sup>1</sup>粗體與底線標註數字代表其頻率年符合極端事件之特性(≥10年)；<sup>2</sup>南部區域氣象乾旱頻率年係依據各縣市氣象乾旱頻率年與其集水區面積占南部整體集水區面積之比例進行計算。

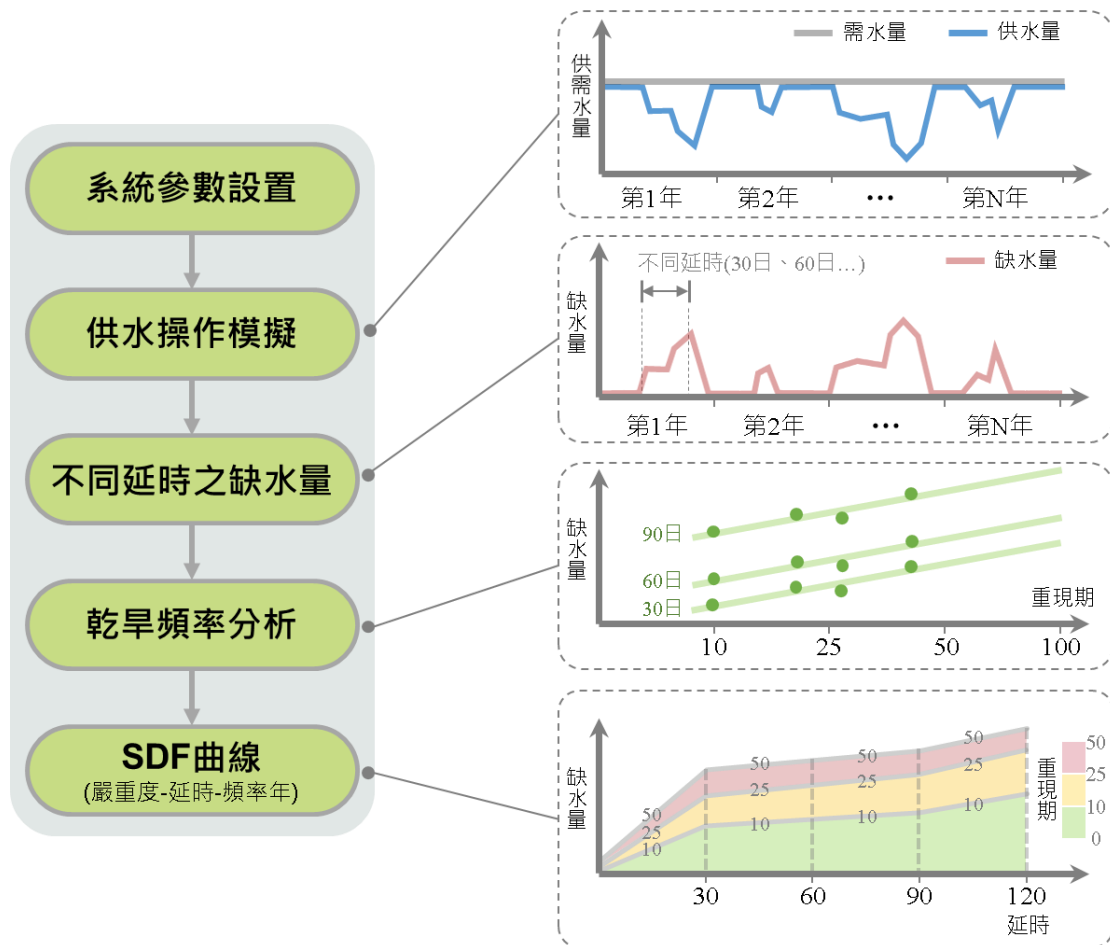
### 三、乾旱 SDF 曲線產製與分析

#### (一)極端枯旱風險之量化方式探討

臺灣一般係以缺水指數(SI)進行水資源系統之規劃設計，惟缺水指數係為長期水源規劃評估使用，其計算係以年缺水率進行計算且為多對一函數關係，並無法反應枯旱期間實際缺水情況，故枯旱期間之水源調配有必要引入其他評估指標以進行評估。因此，需導入乾旱 SDF 曲線之概念，以強化缺水指數(SI)之解釋能力，可用以描述水資源系統於枯旱期間所面臨之缺水情況，藉由查詢乾旱 SDF 曲線中特定延時與頻率年所對應之缺水量，即可瞭解水資源系統於枯旱期間之實際乾旱特性。

#### (二)乾旱 SDF 曲線產製

研提乾旱 SDF 曲線產製流程如摘圖-1，其產製主要係基於長期水資源供需模擬結果，分析缺水(供需不平衡)事件之嚴重度、延時以及頻率年間之關係，再將分析結果繪製成乾旱 SDF 曲線作為後續應用依據。針對各步驟簡要說明如下：(1)設置水資源系統參數與資料、(2)以水資源供需模式進行長期供水操作模擬，產出歷年供水量與需水量之時間序列資料、(3)依水文豐枯特性重新整理資料，挑選不同延時之年最大缺水量(嚴重度)、(4)進行年最大缺水量資料之頻率分析，並配合適合度檢定以決定最佳統計分布，計算不同延時下各頻率年乾旱事件所對應之缺水量以及(5)基於不同延時下乾旱事件各個頻率年缺水量，繪製可代表水資源系統乾旱嚴重度、延時以及頻率年之關係圖(乾旱 SDF 曲線)。



摘圖-1 乾旱 SDF 曲線產製流程圖

### (三)設計乾旱參數(延時與頻率年)之探討

「設計乾旱」係指具有特定延時與頻率年之乾旱事件，為方便理解其意義，後續將採用「極端乾旱」一詞作為代表，以進行相關概念說明與後續應用案例介紹。藉由導入極端乾旱之概念，可量化極端枯旱(嚴重乾旱)發生時水資源系統可能面臨之缺水情況，並據以決定水資源系統需提升之額外備援容量或抗旱因應作為，以強化抗旱韌性與減緩乾旱可能造成之衝擊。極端乾旱概念在實務應用上，需先選擇合適之極端乾旱參數(即延時與頻率年)，再透過乾旱 SDF 曲線查詢極端乾旱參數所對應之缺水量(即嚴重度)，並以此缺水量作為水資源系統之設計備援水量。針對極端乾旱之參數設定方法說明如下：

## 1、頻率年參數設定

民國 103 至 104 乾旱事件對於嘉義、臺南以及高雄地區之缺水頻率年較高，其頻率年約為 10 年上下，而屏東地區之缺水頻率年較低，其頻率年約莫為 2 年上下；民國 109 至 110 乾旱事件對於臺南與高雄地區之缺水頻率年較高，其頻率年約為 50 年上下，而嘉義地區之缺水頻率年次高(約為 25 年)，而屏東地區則無發生缺水事件，其水資源供需屬於正常情況。綜合以上分析建議從近年嚴重乾旱事件中挑選衝擊較大者，作為極端乾旱在頻率年設定上參考。即：嘉義地區採用 25 年之缺水頻率年、臺南與高雄地區採用 50 年之缺水頻率年、屏東地區採用 2 年之缺水頻率年。

此外，若就「氣象乾旱」頻率年與其造成之缺水頻率年而言，於民國 109 至 110 年乾旱期間，臺南地區與高雄地區之「氣象乾旱」頻率年皆為 100.0 年左右，然而其缺水頻率年則僅約 50.0 年左右，主要係受益於水庫調節供水及穩定地下水與伏流水，以減緩極端乾旱事件對於水資源供需系統造成之衝擊。

## 2、延時參數設定

民國 103 至 104 年與民國 109 至 110 年乾旱事件於南部區域分別造成之缺水延時為 90 日與 120 日，挑選兩者中較大者作為延時參數之建議值，即南部區域極端乾旱之延時參數以 120 日作為設定值。

# 四、極端枯旱風險評估與備援方案建議

## (一)極端枯旱風險衝擊評估

極端乾旱係指因雨量顯著偏少所導致之缺水情況，其造成之缺水程度通常較為嚴重，為瞭解極端事件對於水資源系統可能造成之枯旱風險，依據目標年條件下乾旱 SDF 曲線與極端乾旱參數建議值(例如：延時 120 日與頻率年 50 年)，量化南部區域各縣市所面臨之極端枯旱風險。

## 1、嘉義地區

若需評估水資源系統在極端枯旱影響下可能面對之缺水情況，可藉由查詢乾旱 SDF 曲線中「極端乾旱」所對應之缺水量。以目標年條件下嘉義地區水資源系統為例(摘圖-2)，其極端乾旱事件之延時與頻率年參數分別採用 120 日與 25 年，此組參數對應缺水量約為 1,387 萬噸。因嘉義地區之目標年需水量為 34.9 萬噸/日，將其缺水量換算為缺水率約為 33.1%左右( $1,387 \div 120 \div 34.9 = 33.1\%$ )。

## 2、臺南地區

若需評估水資源系統在極端枯旱影響下可能面對之缺水情況，可藉由查詢乾旱 SDF 曲線中「極端乾旱」所對應之缺水量。以目標年條件下臺南地區水資源系統為例(摘圖-3)，其極端乾旱事件之延時與頻率年參數分別採用 120 日與 50 年，此組參數對應缺水量約為 7,881 萬噸。因臺南地區之目標年需水量為 120.3 萬噸/日，將其缺水量換算為缺水率約為 54.6%左右( $7,881 \div 120 \div 120.3 = 54.6\%$ )。

## 3、高雄地區

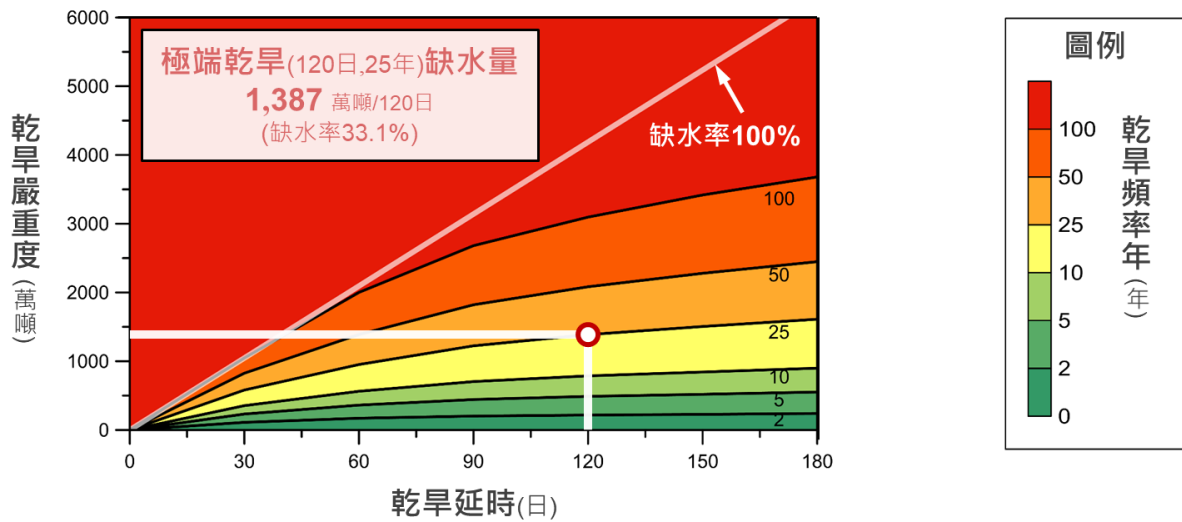
若需評估水資源系統在極端枯旱影響下可能面對之缺水情況，可藉由查詢乾旱 SDF 曲線中「極端乾旱」所對應之缺水量。以目標年條件下高雄地區水資源系統為例(摘圖-4)，其極端乾旱事件之延時與頻率年參數分別採用 120 日與 50 年，此組參數對應缺水量約為 8,343 萬噸。因高雄地區之目標年需水量為 170.1 萬噸/日，將其缺水量換算為缺水率約為 40.9%左右( $8,343 \div 120 \div 170.1 = 40.9\%$ )。

## 4、屏東地區

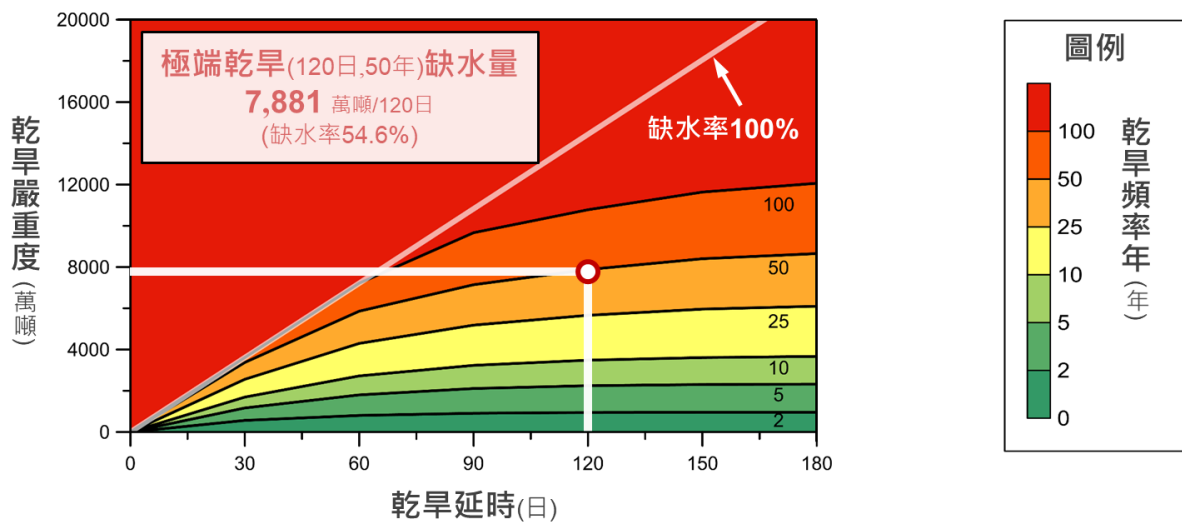
若需評估水資源系統在極端枯旱影響下可能面對之缺水情況，可藉由查詢乾旱 SDF 曲線中「極端乾旱」所對應之缺水量。以目標年條件下屏東地區水資源系統為例(摘圖-5)，其極端乾旱事件之延時與頻率年參數分別採用 120 日與 2 年，此組參數對



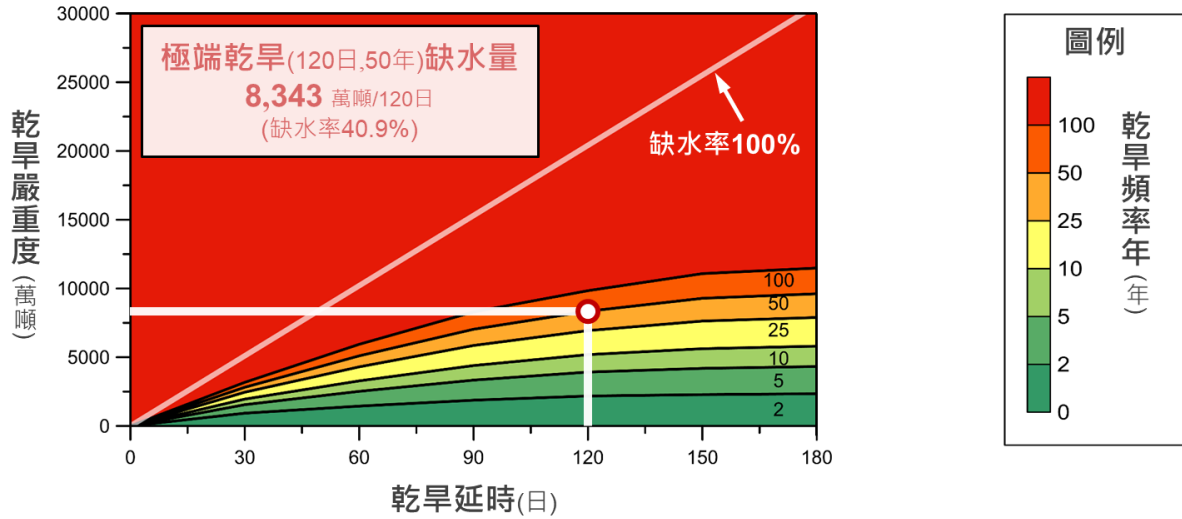
應缺水量約為 94 萬噸。因屏東地區之目標年需水量為 23.8 萬噸/日，將其缺水量換算為缺水率約為 3.3%左右( $94 \div 120 \div 23.8 = 3.3\%$ )。



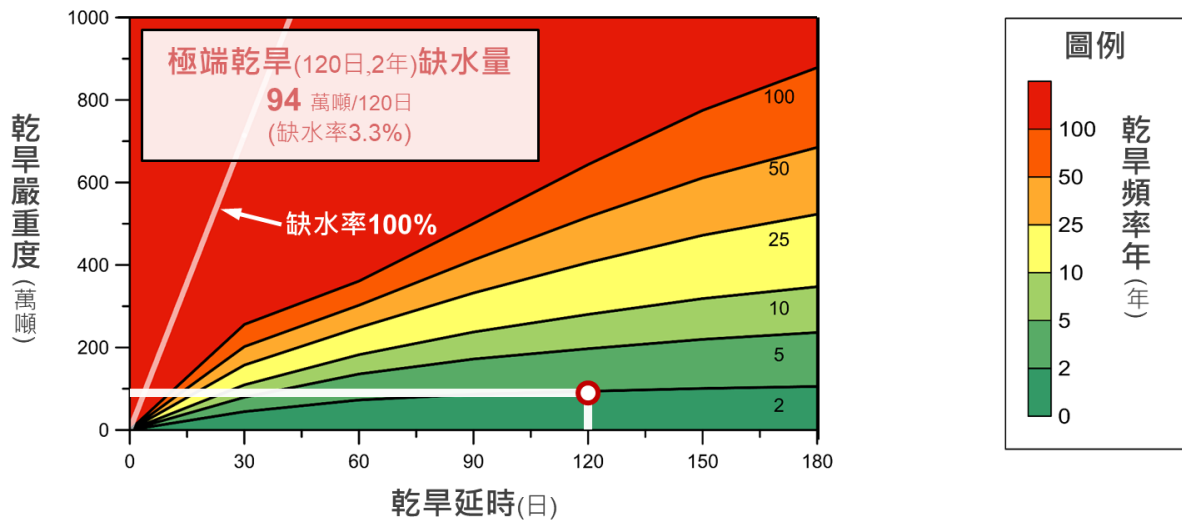
摘圖-2 嘉義地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線



摘圖-3 臺南地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線



摘圖-4 高雄地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線



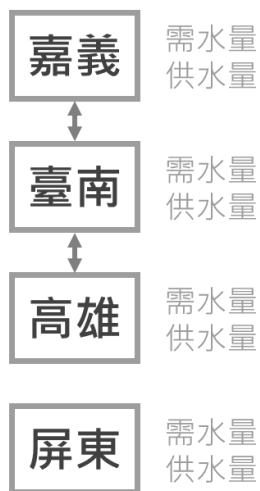
摘圖-5 屏東地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線

## (二)區域極端枯旱潛勢地圖繪製(縣市尺度)

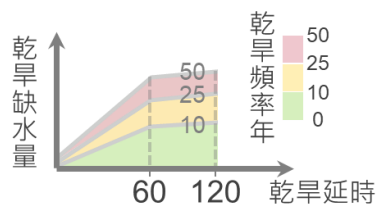
### 1、極端枯旱潛勢地圖繪製流程

為瞭解風險之空間結構，提出區域極端枯旱潛勢地圖繪製(縣市尺度)之繪製流程(摘圖-6)，將南部區域各個縣市(嘉義、臺南、高雄以及屏東)極端枯旱風險評估成果，繪製成區域枯旱潛勢地圖。

## 1 供需分析



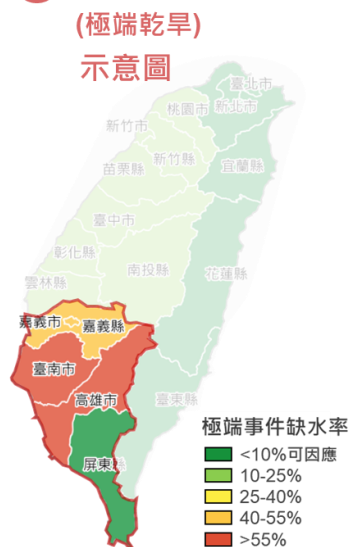
## 2 各縣市乾旱SDF曲線



## 3 極端乾旱之缺水量



## 4 枯旱潛勢地圖



摘圖-6 區域極端枯旱潛勢地圖繪製(縣市尺度)之繪製流程

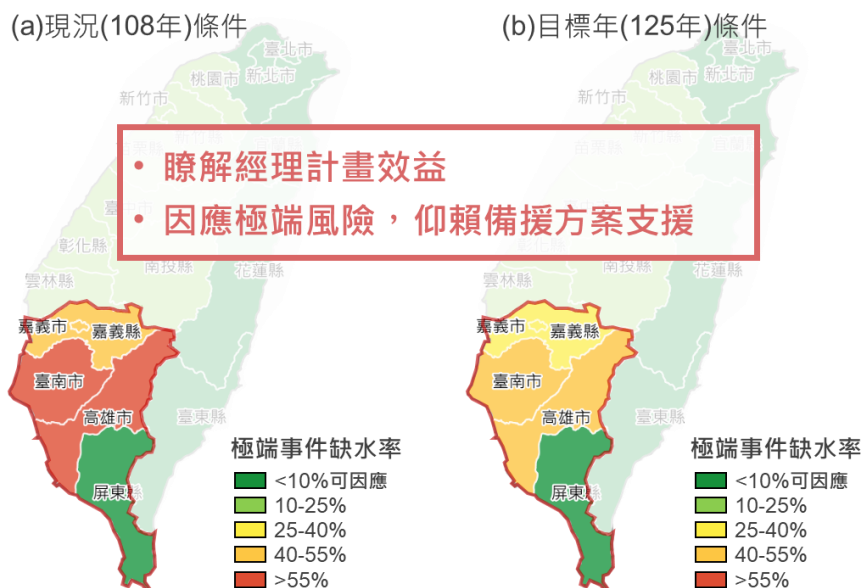
針對繪製流程主要步驟介紹如下：(1)針對南部區域各個縣市進行水資源供需分析、(2)依據缺水量推估乾旱 SDF 曲線，以瞭解不同延時與頻率年之缺水情況、(3)以極端乾旱參數查詢乾旱 SDF 曲線上所對應之缺水量，瞭解「極端乾旱」條件下所面臨之極端乾旱風險以及(4)依據各個縣市在「極端乾旱」條件下所面臨之極端乾旱風險值，進行極端枯旱潛勢地圖之繪製。

### 2、南部區域之極端枯旱潛勢地圖

以南部區域於現況條件下極端枯旱風險(摘圖-7(a))而言，各個縣市在「極端乾旱」條件下，高雄面臨之缺水程度最為嚴峻(極端缺水率 66.5%)，臺南與嘉義之缺水程度次高(極端缺水率分別為 62.5%與 46.7%)，而屏東之缺水程度則最低(極端缺水率 4.3%)；以南部區域於目標年條件下極端枯旱風險(摘圖-7(b))而言，各個縣市在「極端乾旱」條件下，臺南面臨之缺水程度最為嚴峻(極端缺水率 54.6%)，高雄與嘉義之缺水程度次高(極端缺水率分別為 40.9%與 33.1%)，而屏東之缺水程度則最低(極端缺水率 3.3%)。

## 極端枯旱潛勢地圖

(基於極端乾旱之缺水率進行繪製)



\*經理計畫可滿足水資源長期需水情況，惟於極端枯旱條件下(例如: 50年大旱)仍需仰賴備援方案之緊急支援，藉以穩定極端枯旱條件下之區域用水。

**摘圖-7** 南部區域於現況與目標年條件下極端枯旱潛勢地圖

藉由進一步比對特定縣市於現況與目標年條件下極端枯旱風險(摘表-2)，探討經理計畫之水資源方案推動，對於紓緩極端枯旱風險之成效。以目標年相較於現況之極端缺水程度而言，高雄現況極端缺水率為 66.5%，而目標年極端缺水率則為 40.9%，缺水率降低 25.6%，其紓緩效果最為顯著；嘉義現況極端缺水率為 46.7%，而目標年極端缺水率則為 33.1%，缺水率降低 13.6%，其紓緩效果次高；臺南與屏東之極端缺水率則分別降低 7.9%與 1.0%。

**摘表-2** 南部區域各縣市於現況與目標年條件下缺水程度

| 縣市 | 極端乾旱下缺水程度          |                     |                  |
|----|--------------------|---------------------|------------------|
|    | 現況條件<br>(民國 108 年) | 目標年條件<br>(民國 125 年) | 增減情況<br>(目標年-現況) |
| 嘉義 | 46.7%              | 33.1%               | -13.6%           |
| 臺南 | 62.5%              | 54.6%               | -7.9%            |
| 高雄 | 66.5%              | 40.9%               | -25.6%           |
| 屏東 | 4.3%               | 3.3%                | -1.0%            |

註：極端乾旱下缺水程度係指極端乾旱參數所對應之缺水量，再配合各縣市需水量轉換為缺水率。

### (三)因應極端氣候備援容量盤點與強化策略研擬

#### 1、設計備援水量之評估規劃

南部區域各個縣市目標年條件下設計備援水量之評估規劃彙整如摘表-3 所示，評估結果指出：針對極端乾旱事件，嘉義、臺南、高雄以及屏東每日所需之設計備援水量分別為 8.1、53.6、52.5 以及 0.0 萬噸/日(屏東地區極端乾旱之缺水量可透過管理方式加以因應，無需再增加設計備援水量)。整體而言，臺南與高雄所需備援水量皆超過 50 萬噸/日，以因應極端乾旱(50 年一遇乾旱事件)下嚴重缺水情況(臺南與高雄缺水率分別為 54.6%與 40.9%)；而嘉義因整體需水量較低，其所需備援水量僅為 8.1 萬噸/日，但其極端乾旱下嚴重缺水情況之缺水率仍可達 33.1%；屏東則受益於供水相對穩定，於極端乾旱期間其缺水率僅 3.3%，可透過管理方式加以因應，無需再增加設計備援水量。

摘表-3 南部區域各個縣市目標年條件下設計備援水量之評估規劃

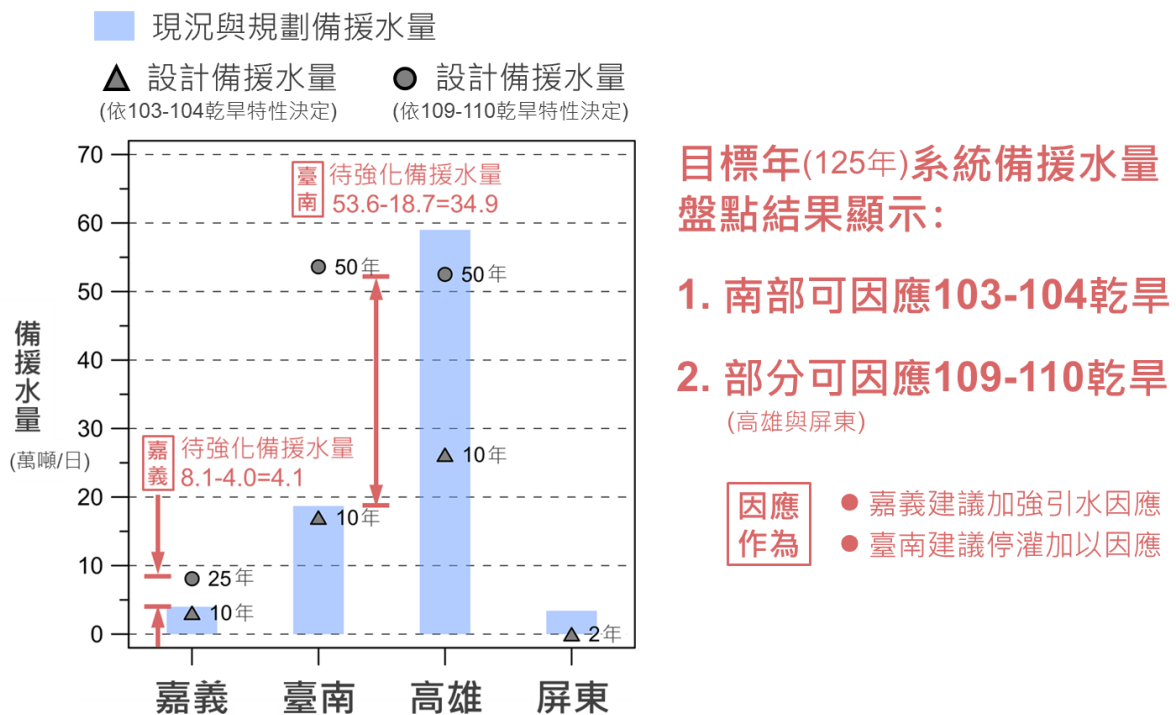
| 縣市 | 極端乾旱缺水量<br>(缺水率) | 可因應缺水量<br>(每日需水量)     | 設計備援水量<br>(每日備援水量)   |
|----|------------------|-----------------------|----------------------|
| 嘉義 | 1,387<br>(33.1%) | 419<br>(34.9 萬噸/日)    | 968<br>(8.1 萬噸/日)    |
| 臺南 | 7,881<br>(54.6%) | 1,444<br>(120.3 萬噸/日) | 6,437<br>(53.6 萬噸/日) |
| 高雄 | 8,343<br>(40.9%) | 2,041<br>(170.1 萬噸/日) | 6,302<br>(52.5 萬噸/日) |
| 屏東 | 94<br>(3.3%)     | 286<br>(23.8 萬噸/日)    | -                    |

註：<sup>1</sup>極端乾旱之延時參數採用 120 日，而頻率年參數則隨縣市而有所不同，例如：嘉義、臺南、高雄以及屏東分別採用 25 年、50 年、50 年以及 2 年；<sup>2</sup>各項水量單位皆為萬噸/120 日。

#### 2、待強化備援水量之評估規劃

南部區域各個縣市於目標年條件下因應「極端乾旱」之待強化備援水量之評估規劃如摘圖-8 所示，評估結果指出：在延時固定為 120 日前提下，若採用頻率年 10 年作為極端乾旱參數，嘉義、臺南、高雄以及屏東之設計備援水量皆低於已規劃備援水量，故無需另外增加待強化備援水量；若針對更加嚴峻之乾旱條件，採用更高頻率年作為極端乾旱參數(因應各縣市供需特

性不同，採用適合該縣市之頻率年參數，例如：嘉義採用頻率年 25 年，而臺南、高雄以及屏東則皆採用頻率年 50 年)，僅嘉義與臺南需增加待強化備援水量，其水量分別為 4.1 與 34.9 萬噸/日。綜合以上，建議未來可針對嘉義與臺南地區導入更多備援設施，以確保其於更加嚴峻乾旱期間仍可穩定供水。於增加備援水量之前，因應極端枯旱措施建議如下：嘉義地區可藉由加強引水方式盡可能增加仁義潭與蘭潭水庫之蓄水量，以因應 25 年一遇之乾旱事件；而臺南地區則需藉由大面積停灌措施，以因應 50 年一遇之乾旱事件。



註：2/10/25/50年為因應2/10/25/50年大旱所需之設計備援水量

摘圖-8 南部區域各個縣市目標年條件下待強化備援水量之評估規劃

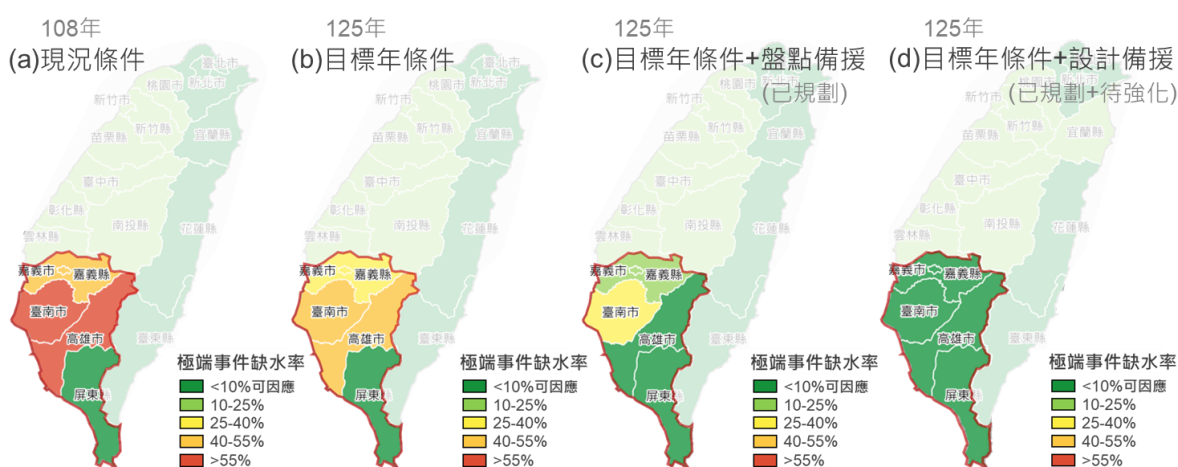
### 3、備援效益評估

為瞭解設計備援水量對於紓緩極端枯旱風險之效益，針對水資源系統供需模擬之設定分別採用：(1)現況條件、(2)目標年條件、(3)目標年條件與盤點備援(即已規劃備援水量)以及(4)目標年條件與設計備援(即已規劃備援水量與待強化備援水量)，並重新進行水資源供需分析與極端枯旱風險評估，最後藉由極端

枯旱潛勢地圖呈現不同供需條件之風險差異(摘圖-9)，探討設計備援水量之效益，以作為後續推動備援方案之說帖。整體而言，以現況條件下水資源供需情況作為比較基準，目標年條件下極端枯旱風險已有所改善，而目標年配合備援方案條件下極端枯旱風險則有更加顯著減少，突顯備援方案對於紓緩極端枯旱衝擊之重要性。

### 極端枯旱潛勢地圖

(基於極端乾旱之缺水率進行繪製)



\*經理計畫可滿足水資源長期需水情況，惟於極端枯旱條件下(例如: 50年大旱)仍需仰賴備援方案之緊急支援，藉以穩定極端枯旱條件下之區域用水。

摘圖-9 南部區域於不同供需條件下之極端枯旱潛勢地圖

#### (四)建置極端枯旱風險評估與備援建議之操作準則

為能減緩極端事件對於水資源供需系統之衝擊，研提因應極端事件水資源供需調適架構，以建置一套備援評估規劃之標準操作準則，其主要項目包含：(1)極端枯旱風險評估、(2)備援盤點與建議以及(3)備援效益評估等項目，以提供其他計畫區域在備援能力評估規劃上作為參考。此外，導入「水資源韌性」概念，藉以檢視水資源供需系統之韌性提升效益，可作為推動備援強化方案之說帖。

最後，面對極端事件頻率與強度增加之威脅，除備援評估規劃準則外，亦亟需發展枯旱監測與預警機制，從「未雨綢繆」角度切入，提早導入相關防禦性策略，以避免嚴重供需衝擊發生。其中，

水文資料扮演非常關鍵角色，係以歷史與即時水文資料作為基礎，將資料轉化為監測與預警資訊，從上游資料端即開始抗旱，以期紓緩枯旱衝擊並提升整體抗旱韌性。



# **Abstract**

## **1 、 Preface**

This work aims at evaluation and planning of backup water supply for climate extremes. The amount of backup water supply is determined based on quantified extreme drought risk provided by drought severity-duration-frequency (SDF) curves with the specific duration and frequency parameters. With drought SDF curves, the extreme drought risk can be properly addressed and then be used for the design of backup water supply to mitigate potential impact caused by climate extremes.

## **2 、 Data Collection and Paper Review**

The water demand and supply related data of Southern Taiwan were collected as the input of GT International Simulation Planning Model (GTSPM) for simulating water supply process under different conditions (i.e., current and future). The existing and planned backup water supply were also inventoried for subsequent backup water supply evaluation. Also, a number of subjects (e.g., definition of extreme events, evaluation of water supply capacity and drought indices) related to backup water supply were reviewed for better understanding of key issues.

## **3 、 Water Resources System Analysis and Impact Assessment of Southern Taiwan**

The water resources system analysis of Southern Taiwan was performed by using GTSPM. The analysis results were first verified by comparing with previous results of water resources management master plan. Then, the input data of GTSPM (e.g., runoff data, HAV curves, water demands, etc) were updated and re-simulated for conducting subsequent impact assessment.

The properties of meteorological drought of Southern Taiwan in recent

years were also investigated. The overall findings of investigation show that the frequency of the 2014-2015 meteorological drought is approximately 18.2-year and the 2020-2021 meteorological drought is more extraordinary with a frequency of 100-year.

#### **4 、 Development of Drought SDF Curves**

In Taiwan, the majority of water resources systems were designed by using shortage index (SI) as criterion. However, the calculation of SI is on annual basis and only long-term average behavior is addressed. It is necessary to introduce a new criterion (i.e., drought SDF curves) for quantifying extreme drought risk. The drought SDF curves are capable of describing the relationship between severity, duration and frequency of drought events which can be derived by drought frequency analysis of annual maximum water shortage amount.

In drought SDF curves application, given duration and frequency parameters of a representative extreme drought, a corresponding value of severity can be found. This severity value is regarded as the potential water shortage caused by the representative extreme drought. In practical practice, the duration and frequency parameters can be decided by the characteristics of the most severe drought events in recent years. In the case of Southern Taiwan, the frequencies of Chiayi, Tainan, Kaohsiung and Pingtung are 25-year, 50-year, 50-year and 2-year, respectively; and 120-day is selected as the duration parameter for the entire Southern Taiwan.

#### **5 、 Extreme Drought Risk and Backup Water Supply Evaluation**

The results of backup water supply evaluation suggest: (1) the amount of planned backup water supplies in Chiayi, Tainan, Kaohsiung and Pingtung is capable of managing the 2014-2015 drought but not for the 2020-2021 drought; (2) for Chiayi and Tainan, the gaps in backup water supplies are 4.1 and 34.9  $10^4 \times \text{CMD}$ , respectively. It is suggest taking

drought emergency response plans such as water diversion, irrigation curbs, etc for further mitigating potential drought impacts.

*Keywords: drought SDF curves, extreme drought risk, backup water supply.*

# 結論與建議

## 一、結論

- (一)臺灣水資源系統設計規劃與評估檢討上常採用缺水指數(SI)作為基準，雖其可描述長期平均缺水情況，但不易反映極端乾旱時期之缺水情況。故藉由彙整國內外常見缺水指標並評估其適合性，決定採用乾旱 SDF 曲線量化水資源系統於極端乾旱時期之缺水風險，用以輔助缺水指數(SI)強化其於極端乾旱時期之解釋能力。
- (二)基於標準化雨量指數於不同時間尺度(1 至 12 個月)之優選評估結果，擇定乾旱辨識能力較佳之 9 個月時間尺度，分析近年嚴重乾旱事件對於南部區域各縣市造成之氣象乾旱頻率年。以南部區域整體而言，民國 103 至 104 年乾旱造成之氣象乾旱頻率年約為 18.2 年，而民國 109 至 110 年乾旱則造成更加顯著之乾燥狀態，其氣象乾旱頻率年高達 100.0 年。
- (三)於民國 109 至 110 年乾旱期間，臺南地區與高雄地區之「氣象乾旱」頻率年皆為 100.0 年左右，然而其缺水頻率年則僅約 50.0 年左右，主要係受益於水庫調節供水及穩定地下水與伏流水，以減緩極端乾旱事件對於水資源供需系統造成之衝擊。
- (四)針對南部區域用以代表「極端乾旱」條件之乾旱頻率年與乾旱延時參數，其在選擇上主要係參考近年嚴重乾旱事件特性所決定。就頻率年參數而言，嘉義、臺南、高雄以及屏東係分別選擇 25、50、50 以及 2 年作為設定；就延時參數而言，則係參考民國 109 至 110 年乾旱事件期間南部區域實施減量供水之時間，採用 120 日作為設定。
- (五)若採用 103-104 乾旱特性進行目標年(125 年)條件下南部區域各個縣市之備援水量評估規劃，嘉義、臺南、高雄以及屏東之設計備援水量皆低於已規劃備援水量，故無需另外增加待強化備援水量；若針對更加嚴峻之乾旱條件，採用 109-110 乾旱特性進行目標年(125 年)條件下南部區域各個縣市之備援水量評估規劃，則嘉義與臺南需增加待

強化備援水量，其水量分別為 4.1 與 34.9 萬噸/日。

- (六)藉由比對南部區域於不同供需條件下極端枯旱潛勢地圖，可瞭解水資源經理計畫與備援方案紓緩極端乾旱風險之效益。以現況(108 年)條件下極端枯旱潛勢地圖作為基準，目標年(125 年)條件下因受益於水資源經理計畫推動，南部區域之極端缺水率已有所改善；若目標年(125 年)條件再配合不同備援方案，則其極端乾旱缺水率可再進一步減少，突顯備援方案對於紓緩極端枯旱衝擊之重要性。
- (七)為量化南部區域水資源韌性與釐清水資源經理計畫與備援方案之韌性提升效益，彙整評估國際上韌性評估架構，提出適合臺灣應用之無因次韌性參數(無因次穩健力與無因次快速力)。受益於水資源經理計畫推動，目標年條件下韌性參數相較於現況皆有所改善或者持平；若同時考慮目標年條件與不同備援設定，南部區域各個縣市韌性參數則皆能進一步改善。

## 二、建議

- (一)因乾旱 SDF 曲線可同時描述乾旱缺水量、延時以及頻率年之關係，得以輔助缺水指數(SI)強化其於極端乾旱時期之解釋能力，建議未來於水資源理計畫可納入乾旱 SDF 曲線進行備援水量評估規劃，以進一步紓緩極端乾旱事件可能造成之衝擊。
- (二)於頻繁極端事件威脅之下，除預先進行備援水量評估規劃，建議未來可搭配標準化雨量指數(SPI<sub>9</sub>)或其他合適之乾旱指標，據以研判備援水量之啟動時機，藉由提早導入相關防禦性策略，以避免嚴重供需衝擊發生。
- (三)乾旱 SDF 曲線未來應用上可搭配經濟分析方法探討不同條件下極端乾旱情況可能導致之經濟損失，從工程益本比角度切入，探討推動備援水量之經濟效益，以作為備援方案推動說帖。

# 第一章 前言

## 一、計畫緣由與目的

受到近年極端事件頻傳影響，臺灣水資源供需系統在經營與管理上皆遭受極大挑戰，例如：民國 109 年無颱風登陸臺灣，打破 56 年以來紀錄，導致民國 110 年嘉南一期稻作停灌面積高達 1 萬 9 千公頃，同時民國 109 年也在水利史上創下許多第一次：(1)第一次在夏季豐水期進行人工增雨、(2)第一次在 10 月召開旱災應變會議以及(3)第一次在 10 月水情燈號由綠燈(水情提醒)轉為黃燈(減壓供水)。在頻繁極端事件威脅之下，如何提升水資源供需系統之抗旱韌性，以減緩極端事件衝擊，為當前水資源經營與管理之重要努力目標。由於臺灣水資源供需系統之設計規劃與檢討皆係基於缺水指數(shortage index, SI)，其在計算上係採年缺水率與平均概念，不易反應出枯水期或極端枯旱時期之實際缺水情況，導致枯水期或極端枯旱時期之水資源管理較為不易。因此，每當有極端枯旱事件發生，水資源供需系統在經營與管理上更是困難重重。

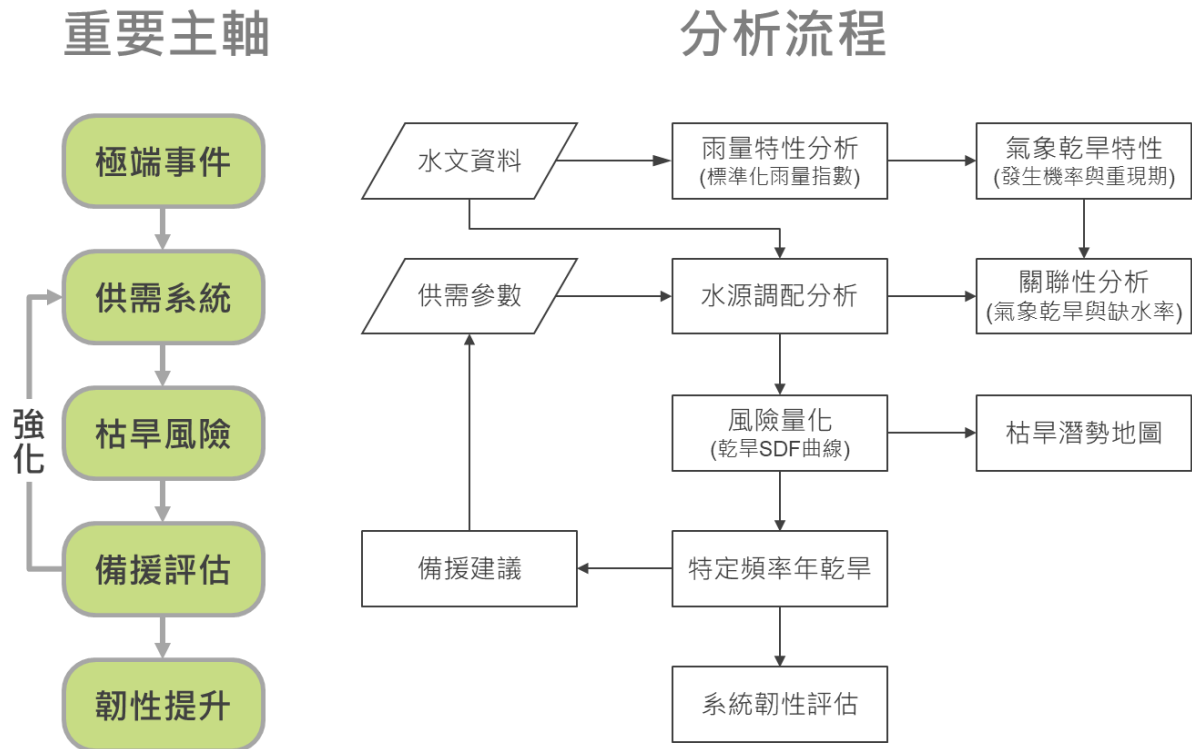


圖 1-1 因應極端事件水資源系統備援評估規劃架構

為能減緩極端事件對於水資源供需系統之衝擊，研提因應極端事件水資源系統備援評估規劃架構(圖 1-1)。首先，藉由歷史極端事件特性分析，以探討這些極端事件對於水資源供需系統之影響，並透過導入極端乾旱概念以反應枯水期與極端枯旱時期之實際枯旱風險(缺水情況)，再依據「極端乾旱」之缺水量進行備援評估與探討備援水量對於減緩極端枯旱衝擊之效益。此外，進一步導入「水資源韌性」概念，藉以檢視水資源供需系統之韌性提升效益，以作為推動備援強化方案之說帖。

## 二、重要分析項目與流程

整體架構主要聚焦因應極端氣候水資源系統備援能力評估規劃，以提升系統調適能力與抗旱韌性，期望減緩極端事件對於水資源供需系統可能造成之潛在衝擊。針對主要分析項目簡述如下：

### (一)基本資料蒐集與文獻整理

針對八掌溪流域、曾文溪流域、高屏溪流域、東港溪流域以及四重溪流域內重要水資源供需系統進行基本資料蒐集彙整，以作為後續水資源供需分析之依據。此外，為強化計畫相關文獻基礎與分析邏輯，針對計畫重要議題(例如：極端事件、供需系統、枯旱風險、備援評估以及韌性提升)進行相關文獻蒐集與彙整，以充分瞭解與掌握各項議題內容之定義、發展情況以及應用情況。

### (二)南部區域水資源系統分析與極端氣候衝擊評估

主要目的在於建置與驗證水資源供需模式，並應用其分析極端事件對於水資源供需系統可能造成之衝擊。其中，為探討極端事件與供需衝擊之因果關係，需先針對水文資料進行分析，以辨識出可能造成嚴重缺水之極端事件，有助於釐清其造成之供需衝擊。

### (三)乾旱 SDF 曲線產製與分析

聚焦於探討極端枯旱風險之合理量化方式，針對各種缺水指標之適用性進行討論，並提出合適指標以反應枯水期間與極端枯旱期間之實際缺水情況。為此，首先說明各種缺水指標與臺灣常用缺水指數(SI)於枯水期間水資源調配之適用性，並藉由導入乾旱 SDF 曲

線以合理量化實際缺水情況；然後，針對乾旱 SDF 曲線之相關概念進行說明，包含：曲線繪製流程與曲線特性說明等；最後，嘗試應用乾旱 SDF 曲線以決定水資源供需系統之「極端乾旱」(類比於防洪工程之保護標準)，並針對「極端乾旱」參數進行討論與建議。

#### (四)極端枯旱風險評估與備援方案建議

主要目的在於評估與建議水資源系統之設計備援水量，以提升極端乾旱事件下水資源系統之調適能力與抗旱韌性，進而紓緩極端事件所造成之衝擊。為此，需先應用「極端乾旱」概念量化南部區域水資源系統之極端枯旱風險，以突顯出實際枯旱情況；再藉由繪製縣市尺度之枯旱潛勢地圖，呈現極端枯旱風險在空間上之分布情況，以利辨識枯旱熱點；然後，基於「極端乾旱」推估南部區域各縣市之設計備援水量，再配合實際備援水量之盤點結果，計算強化備援水量並提出建議強化方案(例如：增加海水淡化與抗旱水井)；最後，採用設計備援水量作為備援設定，重新分析水資源供需情況，以評估新增備援水量之效益，並配合水資源韌性概念檢視南部區域水資源系統之韌性提升效益。

### 三、分析範圍

以南部區域作為分析範圍，其主要包含：嘉義、臺南、高雄以及屏東，範圍內重要流域與水資源供需系統如圖 1-2 所示。為評估規劃南部區域在極端事件潛在影響下應具有之備援能力，針對八掌溪流域、曾文溪流域、高屏溪流域、東港溪流域以及四重溪流域之重要水資源供需系統集水區進行水文資料分析，以辨識可能造成嚴重供需影響之極端事件，並評估其對於分析範圍內重要水資源供需系統可能造成之極端枯旱風險。



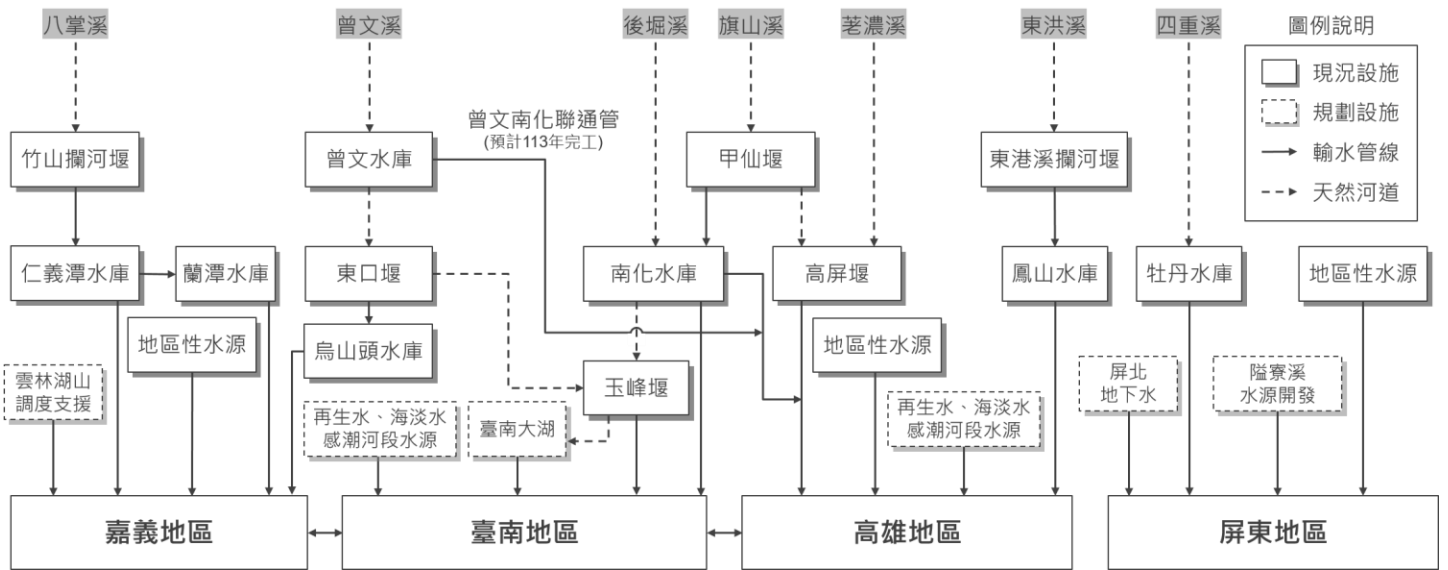


圖 1-2 南部區域重要流域與水資源供需系統

#### 四、名詞定義與重要概念

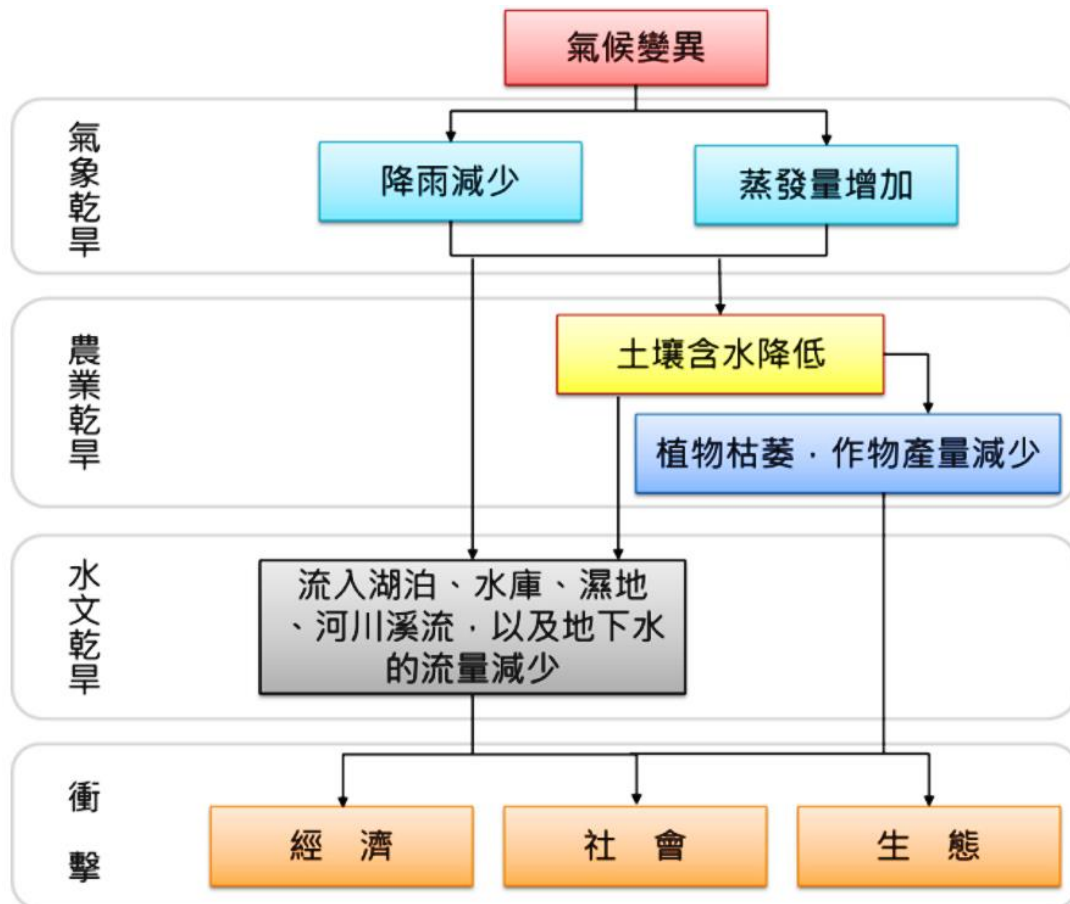
##### (一)極端事件之定義

極端事件包含時間尺度較短之極端天氣事件(一日內或數日內)與時間尺度較長之極端氣候事件，或者亦可統稱為極端氣候值 (climate extremes)。綜合考慮國內外極端事件之定義，若一場事件之頻率年大於等於 10 年，便可將其視為極端事件(即頻率年 10 年為極端事件之下限)。詳細之極端事件定義與說明請參考第 2-2 節「國內外文獻蒐集彙整」內極端事件主軸之相關文獻整理。

##### (二)乾旱之定義

乾旱依應用領域與探討對象不同而有不同定義(陳憲宗等人，民國 100 年；Sheffield and Wood, 2011；Wilhite and Glantz, 1985)，例如：在氣象方面，乾旱係指氣候異常乾燥炎熱、雨水短缺之現象；在農業方面，乾旱係指土壤含水量無法充分供應作物所需，造成作物無法正常生長；在水文方面，乾旱表示地表水量匱乏或水源設施入流量減少之情況；在社會經濟方面，乾旱係指公共或農業供水不足之缺水問題，導致社會經濟損失。其中，不同乾旱種類之關係與其可能造成之衝擊可參考圖 1-3。而本文主要探討之乾旱類型包含：「氣象乾旱」與「社會經濟乾旱」，即係藉由探討極端條件下因少雨所造成之「氣象乾旱」對於水資源供需系統所造成之「社會經濟乾旱」(即

供需不平衡之缺水事件)。



圖片來源：氣候變遷災害風險調適平台改繪自“Drought: past problems and future scenarios.” (Sheffield and Wood, 2011)

圖 1-3 不同乾旱種類之關係與其可能造成之衝擊

### (三) 枯旱風險之定義

對於枯旱風險之定義為水資源系統於水文枯旱情況下所面臨之缺水情況(例如：缺水量或缺水率)，若因遭遇極端事件而造成之高強度缺水情況(例如：頻率年 50 年之缺水量或缺水率)，則視為極端枯旱風險。

### (四) 缺水指數之概念

臺灣於民國 70 年代左右即引用缺水指數(SI)進行規劃與研判水資源設施之供水能力(經濟部水利署，民國 91 年)，後續相關水資源設施之規劃演算供水潛能亦採用缺水指數作為評估標準。SI 為美國陸軍工兵團提出，透過計算資料時段內各年缺水率平方之平均

值，將缺水程度量化為一數值，其定義如下：

$$SI = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{D_i - S_i}{D_i} \right)^2 \quad (1-1)$$

其中， $N$  為資料總年數、 $D_i$  為第  $i$  年需水量、 $S_i$  為第  $i$  年供水量。

SI 係透過推求各年缺水程度之平均值，將資料時段內缺水情況量化成單一數字，並在計算過程中透過「平方」給予較嚴重枯旱(缺水)情況較高權重。以往規劃選擇 SI 介於 0.5 至 2.0 間作為供水能力評估標準(經濟部水利署，民國 91 年)，若 SI 愈小代表用水端(需求端)可忍受之缺水程度較低，其可能遭受之平均缺水情況較為輕微；而 SI 愈大則代表用水端(需求端)可忍受之缺水程度較高，其可能遭受之平均缺水情況則較為嚴重。然而，受臺灣特殊水文環境之影響(即豐、枯水年交替頻繁與年內豐枯水期分明)，供水系統之缺水情況每年皆有所不同，基於平均年缺水率概念之 SI 應用於枯水期水資源調配計算是否合理，有必要進行深入探討。

因缺水指數係將各年缺水狀況平均化，造成缺水指數為一對多之函數關係，且於計算上係基於全年缺水率而非缺水期間之缺水率，造成缺水指數無法正確描述枯水期間之缺水特性，包含：缺水發生機率、缺水強度以及缺水延時等，故導入乾旱 SDF 曲線以選擇較為細緻之時間尺度(例如：30、60 以及 90 日)，可更適切評估枯水期間之乾旱特性，用於輔助缺水指數以強化其於枯水期間之解釋能力。

#### (五)乾旱 SDF 曲線與「極端乾旱」之定義

乾旱 SDF 曲線(drought severity-duration-frequency curve)為水資源供需系統一旦發生乾旱事件，其缺水事件之缺水量(即嚴重度)、延時以及頻率年(發生機率)之關係(圖 1-4)。透過乾旱 SDF 曲線可設定水資源供需系統之「極端乾旱」(類比於防洪工程之保護標準)。乾旱 SDF 曲線詳細說明與產製流程請參考第四章「乾旱 SDF 曲線產製與分析」。而「極端乾旱」之定義可參考第 2-2 節「國內外文

獻蒐集彙整」內備援評估主軸之相關文獻整理。

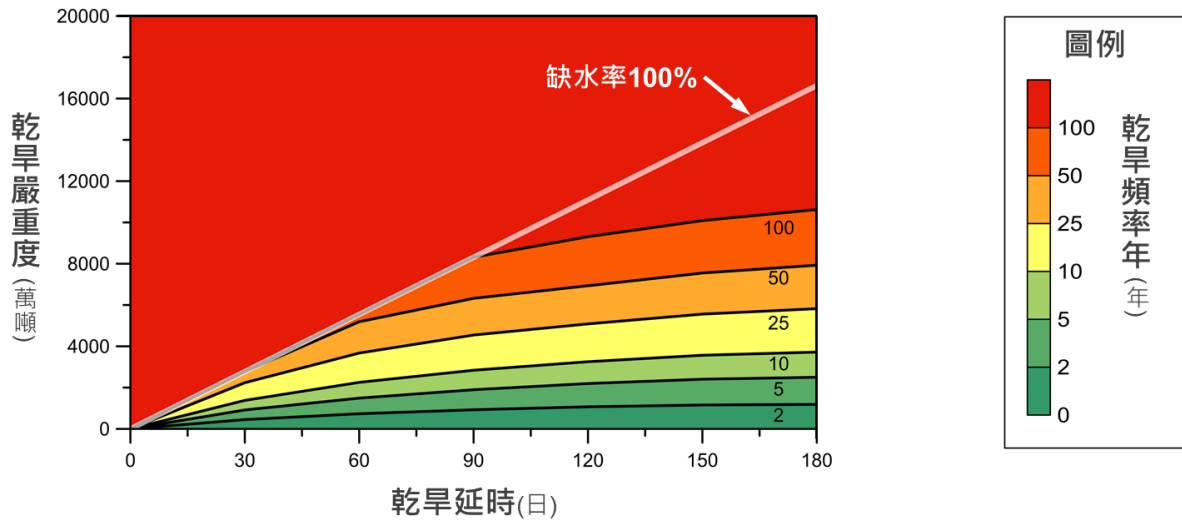


圖 1-4 乾旱 SDF 曲線示意圖

#### (六)備援之定義

水資源經理計畫中備援之定義較為廣泛，包含：管線備援、高濁度備援以及枯旱備援等，而本文則主要聚焦於枯旱備援，其定義為「因應枯旱情況而採用之水源」，僅於枯旱條件下啟用，或者為確保枯水期供水穩定而啟用，以延長水庫供水時間為主要目的。

面對極端事件對於水資源供需之威脅，亟需藉由「備援」提供額外抗旱資源，以紓緩枯旱可能造成之衝擊。而針對備援水量之決定，係從「長期評估規劃」角度切入，導入「極端乾旱」概念進行備援水量之評估與規劃，以決定合適之「設計備援水量」，其計算公式可參考第五章「極端枯旱風險評估與備援方案建議」。

針對強化備援方案之部分，主要係藉由國內外備援方案盤點，以瞭解各種潛在之可能備援方案，提供未來南部區域在推動備援措施上作為參考，而備援方案於後續推動上所需之細部設計、工程經濟分析以及法規制定或檢討，則建議可另案深入分析與探討。

### (七) 韌性之定義

韌性係指藉由預備、準備以及調適方式因應內部與外部環境變化，或是當系統內部與外部環境變化時，韌性係指承受、調適以及快速恢復之能力，以確保關鍵任務能夠維持運行。韌性可藉由韌性參數加以描述與量化，一個系統之完整韌性參數包含：穩健力、快速力、餘裕力以及資源力，韌性曲線與參數之關係如圖 1-5 所示。針對各項參數簡單說明如下(詳細之韌性定義與說明請參考第 2-2 節「國內外文獻蒐集彙整」內韌性提升主軸之相關文獻整理)：

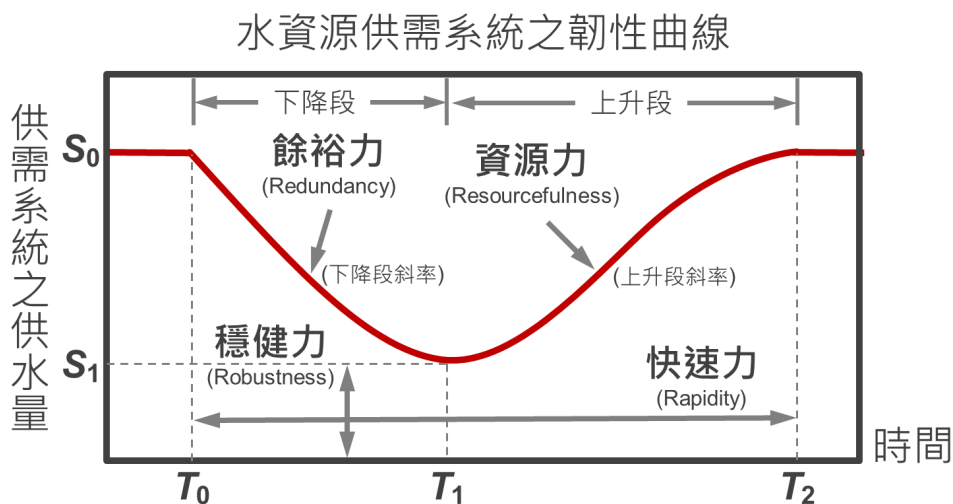


圖 1-5 水資源供需系統之韌性曲線

#### 1、穩健力(robustness)

系統在受到極端乾旱事件影響時，穩健力取決於供需系統之最低供水量(或最低蓄水量)。從水資源供需系統之韌性曲線(圖 1-5)來看，穩健力即為曲線所對應縱軸之最小值，當其數據愈大，系統穩健力即愈高。其計算公式如下：

$$robustness = S_1 \quad (1-2)$$

其中，穩健力單位為萬噸/日， $S_1$  為受到極端乾旱事件影響期間( $T_0$  至  $T_2$ ) 供需系統之供水量最小值。

#### 2、快速力(rapidity)

系統在受到極端乾旱事件影響時，其恢復至正常供水量(或

蓄水量)所需之時間。從水資源供需系統之韌性曲線(圖 1-5)來看，快速力即為韌性曲線所對應橫軸之長度，當其長度愈短，系統快速力即愈高。其計算公式如下：

$$rapidity = \frac{1}{T_2 - T_0} \quad (1-3)$$

其中，快速力單位為 1/日， $T_0$  為極端乾旱事件影響之始起時間，而  $T_2$  則為極端乾旱事件影響之結束時間。

### 3、餘裕力(redundancy)

系統在受到極端事件影響時，是否可額外增加供水量，以維持系統整體穩定性。例如：水利單位藉由跨區調度與緊急備援，增加供水量以穩定用水。從水資源供需系統之韌性曲線(圖 1-5)來看，餘裕力即為韌性曲線下降段之斜率。其計算公式如下：

$$redundancy = \frac{S_0 - S_1}{T_1 - T_0} \quad (1-4)$$

其中，餘裕力單位為萬噸/日<sup>2</sup>， $S_0$  為供需系統處於正常情況時之供水量， $S_1$  為受到極端乾旱事件影響期間( $T_0$  至  $T_2$ )供需系統之供水量最小值， $T_0$  為極端乾旱事件影響之始起時間，而  $T_1$  則為供水量最小值所對應之時間點(即極端乾旱事件影響最為嚴重之時間點)。

### 4、資源力(resourcefulness)

系統在受到極端事件影響時，是否有充足資源可供調度使用，以克服極端事件造成之供需影響。從水資源供需系統之韌性曲線(圖 1-5)來看，資源力即為韌性曲線上升段之斜率。其計算公式如下：

$$resourcefulness = \frac{S_0 - S_1}{T_2 - T_1} \quad (1-5)$$

其中，資源力單位為萬噸/日<sup>2</sup>， $S_0$  為供需系統處於正常情況時之供水量， $S_1$  為受到極端乾旱事件影響期間( $T_0$  至  $T_2$ )供需系統之供水量最小值， $T_1$  為供水量最小值所對應之時間點(即極端乾旱

事件影響最為嚴重之時間點)，而  $T_2$  為極端乾旱事件影響之結束時間。

## 五、分析限制與假設

### (一) 氣象乾旱頻率年

因氣象乾旱頻率年分析上所採雨量資料年限一般介於 30 至 50 年間，為避免過度外推導致不確定性過高(例如：以 30 年資料推估頻率年 300 年)，故設定 100 年頻率年作為上限。

### (二) 乾旱頻率分析

乾旱頻率分析為乾旱 SDF 曲線產製之重要程序，而乾旱頻率分析主要係依據不同延時之年最大缺水量資料，其推估時無法考慮年最大缺水量之物理上限(缺水率 100%)，需額外加以處理(即排除年最大缺水量超過物理上限之情況)。

### (三) 可因應缺水量

可因應缺水量於設定上係參考「早災災害防救業務計畫」(經濟部，民國 109 年)之早災災害等級區分表，當一供水區水情燈號轉為紅燈(即分區供水)，代表其對應之缺水率高於 10%，假設當缺水率小於等於 10% 可透過管理方式加以因應，故取缺水率 10% 作為可因應缺水量之上限值。例如：嘉義地區之目標年(125 年)需水量為 34.9 萬噸/日，若延時參數為 120 日，則其可因應缺水量約為 419 萬噸( $34.9 \times 120 \times 10\% = 419$ )。

## 第二章 基本資料蒐集與文獻整理

此章節主要目的在於針對八掌溪流域、曾文溪流域、高屏溪流域、東港溪流域以及四重溪流域內重要水資源供需系統進行基本資料蒐集彙整，以作為後續水資源供需分析之依據。此外，為強化計畫相關文獻基礎與分析邏輯，針對計畫重要議題(例如：極端事件、供需系統、合適指標、強化備援以及韌性提升)進行相關文獻蒐集與彙整，以充分瞭解與掌握各項議題內容之定義、發展情況以及應用情況。

### 一、水資源基本資料蒐集

主要針對南部區域(嘉義、臺南、高雄以及屏東)蒐集水資源供需資料，作為後續極端枯旱風險評估之基礎，主要資料包含：水資源系統架構、供需情況、調適策略、水文資料、生態基流量、水庫標高-面積-容積(H-A-V)曲線、輸水與淨水損失、水庫操作規線以及計畫配水量等水源供需相關資料。

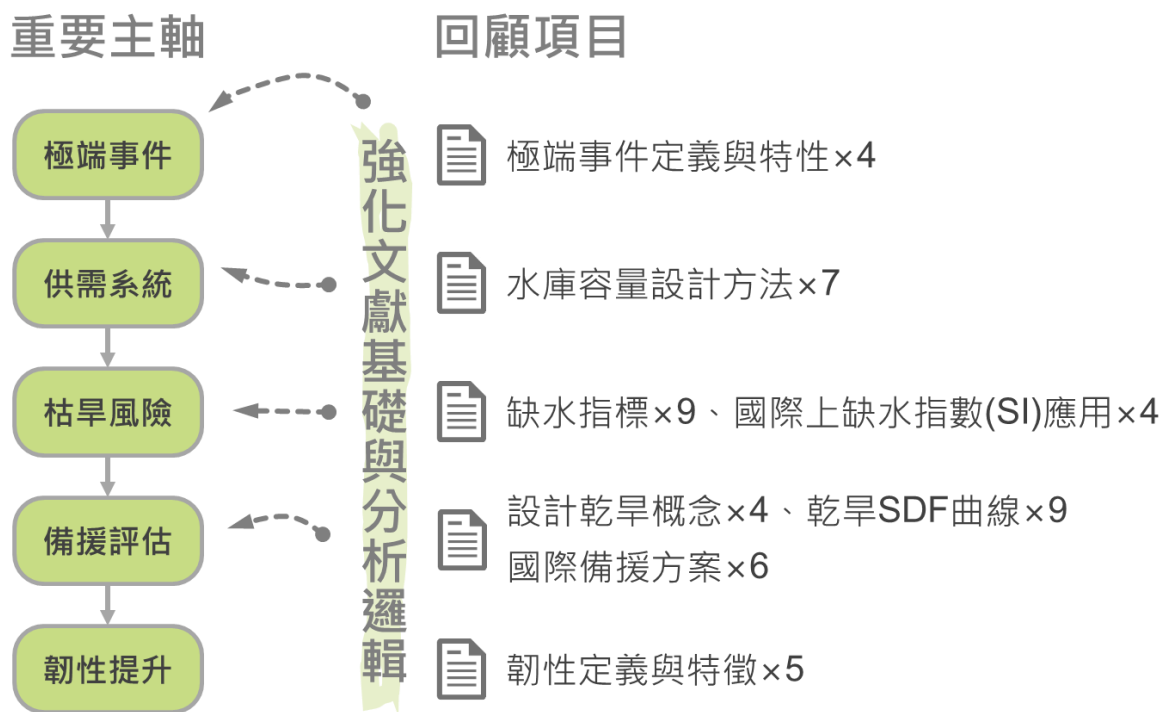


圖 2-1 重要分析主軸與文獻回顧項目



## 二、國內外文獻蒐集彙整

為強化相關文獻基礎與分析邏輯，針對各項重要主軸進行相關文獻蒐集與彙整(圖 2-1)，以瞭解並釐清各項主軸之內容(例如：定義、發展情況以及應用情況)。針對各項重要主軸之文獻回顧說明如下：

### (一)極端事件主軸之相關文獻整理

針對極端事件主軸之文獻，主要聚焦極端事件定義與特性，回顧國內外相關文獻，包含：世界氣象組織(WMO, 2015)、政府間氣候變遷委員會(IPCC, 2012)、國際學術研究(McPhillips et al., 2018)以及臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(李惠玲, 民國 107 年)，整理歸納出常見之極端事件定義(表 2-1)如下：

#### 1、世界氣象組織

世界氣象組織(WMO, 2015)定義當一場事件之天氣或氣候變量高於(或低於)特定門檻值，即可被視為極端事件。此外，具有嚴重衝擊之天氣或氣候事件亦可被視為極端事件(例如：民國 103-104 年乾旱事件)。但由於氣候條件會隨區域不同而變動，因此極端事件(天氣或氣候)之定義或其門檻值亦會隨著區域而變動。

#### 2、政府間氣候變遷委員會

政府間氣候變遷委員會(IPCC, 2012)將氣候極端值(climate extremes)視為極端天氣事件與極端氣候事件之統稱，其可採用累積機率進行定義，亦可採用門檻值進行定義。其中，累積機率經常採用 1%、5%、10%、90%、95%以及 99% (即頻率年經常採用 10 至 100 年作為設定)；而判斷是否為極端事件之門檻值則經常採用 1<sup>st</sup>、5<sup>th</sup>、10<sup>th</sup>、90<sup>th</sup>、95<sup>th</sup> 以及 99<sup>th</sup> 百分位數。

#### 3、國際學術研究

McPhillips et al. (2018)針對國際上 244 篇學術研究文獻進行回顧歸納，其分析結果指出：極端事件在定義上，經常採用門檻值法，而其門檻值一般係介於 90<sup>th</sup> 至 99<sup>th</sup> 百分位數間。若以頻率年而言，當某事件之頻率年高於 10 年或 100 年，即符合極端

事件之定義。

#### 4、臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台

臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(李惠玲，民國 107 年)，從機率角度進行極端事件定義，例如：以天氣或氣候變量之機率分布函數而言，若其累積機率低於 10%或高於 90% (相當於頻率年 10 年以上)，即可視為極端事件。

表 2-1 極端事件定義與特性彙整表

| 作者或單位                               | 極端事件定義   | 說明  |
|-------------------------------------|--|---|
| 世界氣象組織<br>(WMO, 2015)               | 當天氣或氣候變量高於(或低於)觀測數據之上(或下)邊界門檻值。                                    | 具有嚴重衝擊之天氣或氣候事件亦可被視為極端事件(例如：民國 103-104 年乾旱事件)。由於氣候條件會隨區域不同而變動，因此極端事件(天氣或氣候)之定義或其門檻值亦會隨著區域而變動。  |
| 政府間氣候變遷委員會<br>(IPCC, 2012)          | 氣候極端值(climate extremes)為極端天氣事件與極端氣候事件之統稱，其可採用累積機率進行定義，亦可採用門檻值進行定義。 | 極端天氣事件為天氣型態之變動，其時間尺度大約落在一日至數日，而極端氣候事件之時間尺度則通常較長。其中，有時候極端天氣事件與極端氣候事件難以分辨，可統稱為氣候極端值。累積機率一般經常採用 1%、5%、10%、90%、95%以及 99%；而門檻值一般則經常採用 1 <sup>st</sup> 、5 <sup>th</sup> 、10 <sup>th</sup> 、90 <sup>th</sup> 、95 <sup>th</sup> 以及 99 <sup>th</sup> 百分位數。 |
| 國際學術研究<br>(McPhillips et al., 2018) | 當天氣或氣候變量超越給定之門檻值(定值或統計值)，則可定義為極端事件。                                | 針對國際上 244 篇學術研究文獻進行回顧歸納，其分析結果指出：門檻值一般介於 90 <sup>th</sup> 至 99 <sup>th</sup> 百分位數之間，其中又以 99 <sup>th</sup> 百分位數(頻率年 100 年)最為常見。   |
| 臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台<br>(李惠玲，民國 107 年) | 當天氣事件之機率分布函數所對應之累積機率低於 10%或高於 90%                                  | 極端事件係指一年當中在某地發生之罕見事件。若以機率分布函數來描述天氣，低於 10%(PR10)或高於 90%(PR90)之事件才符合所謂罕見之基本要求。其中，一個地方罕見之極端天氣換到另一個地方去也許就不能算是罕見而是相當平常之普通天氣，因此所謂極端天氣往往沒有絕對標準，必須根據當地氣候性質決定。   |

資料來源：本研究整理

此外，極端事件在定義上，亦能參考世界氣象組織於乾旱等級劃分之作法(即利用標準化雨量指數之數值進行乾旱分級)。若以發生機率而言，當標準化雨量指數約等於-1.28時，其發生機率大約等於10% (相當於頻率年為10年)；當標準化雨量指數約等於-2.05時，其發生機率大約等於2% (相當於頻率年為50年)。整體而言，綜合考慮國內外極端事件之定義，若一場事件之頻率年大於等於10年，便可將其視為極端事件(即頻率年10年為極端事件之下限)。

## (二) 供需系統主軸之相關文獻整理

針對供需系統主軸之文獻，主要聚焦供需系統穩定出水量之推估方法，回顧國內外相關文獻，包含：美國陸軍工兵團工程手冊「水庫之水文工程規範」(Hydrologic Engineering Requirements for Reservoirs)(USACE, 2018)、McMahon et al. (2007)、Aksoy (2001)、廖培明(民國91年)以及李棕蒼(民國99年)，整理歸納出3種水庫系統穩定出水量之推估方法(表2-2)，分別說明如下：

### 1、簡易法

在電腦普遍以前，經常應用簡易方法以決定特性水庫設計容量與穩定出水量關係，常見方法為累積曲線法(mass curve method)與尖峰序列法(sequent peak method)，兩者皆係基於流量資料與給定需水量，進行最大累積缺水量之計算，以決定需要之水庫設計容量，惟簡易方法無法考慮水庫操作與其他影響因子(例如：蒸發)，僅適合應用於初步簡易分析。

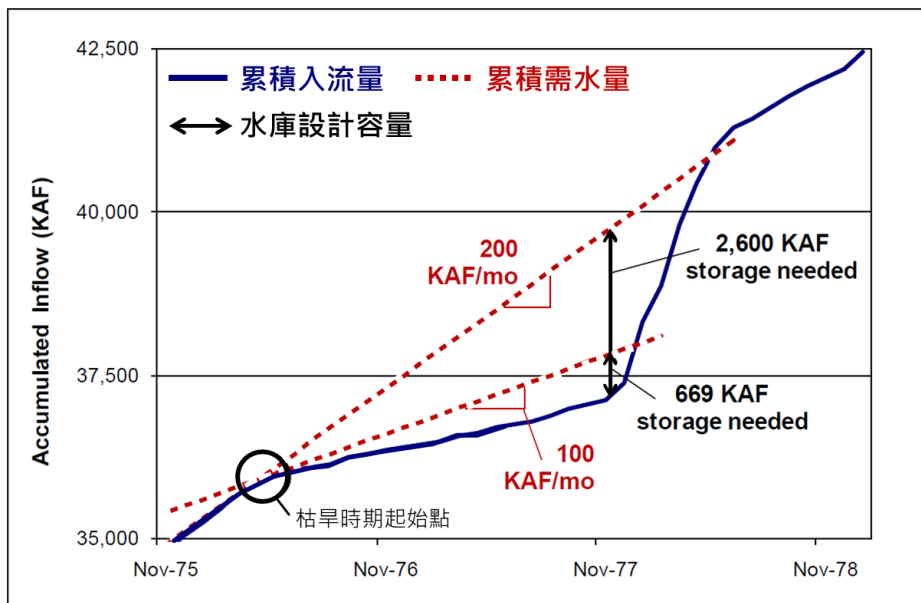
#### (1) 累積曲線法

累積曲線法為Rippl(1883)所發展，主要針對歷史流量有顯著較低情況之枯旱時期(critical period)，繪製累積入流量與累積需水量曲線(圖2-2)，再藉由簡單之曲線比對方式，找出累積入流量與累積需水量曲線之最大差距，以決定適合之水庫設計容量。其優點為無需大量計算，可快速設計出適合之水庫設計容量，惟僅適用於需水量為定值情況，且於枯旱時期仍假設完全滿足需水量，較不宜應用於實務工程設計規劃

上。

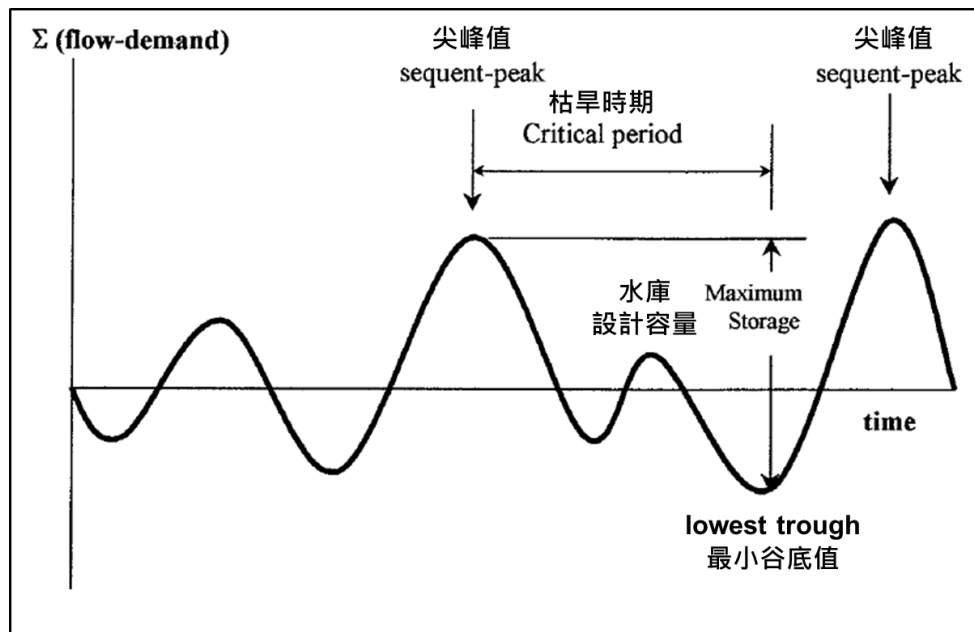
## (2)尖峰序列法

尖峰序列法為 Thomas and Burden (1963)所發展，主要針對各個時刻計算淨入流量(入流量減需水量)，繪製累積淨入流量曲線(圖 2-3)，再藉由尋找曲線中尖峰(peak)值與其後續谷底(trough)值之最大垂直差距，以決定適合之水庫設計容量。其中，最大垂直差距所對應之尖峰值與谷底值之時間即為歷史流量所對應之最枯早時期。其優點為計算量少，且需水量可隨時間變動，可快速設計出適合之水庫設計容量，惟缺點與累積曲線法相同，於枯旱時期仍假設完全滿足需水量，較不宜應用於實務工程設計規劃上。



圖片來源: US Army Corps of Engineers (2018) Hydrologic Engineering Requirements for Reservoirs: Engineer Manual. Figure A-4. Rippl mass diagram application of two demand rates for first critical period (mid-1970s).

圖 2-2 累積曲線法示意圖



圖片來源：Aksoy, H. (2001) Storage Capacity for River Reservoirs by Wavelet-based Generation of Sequent-peak Algorithm. Water Resources Management, 15, 423-437. Figure 2. The sequent-peak algorithm.

圖 2-3 尖峰序列法示意圖

## 2、模擬法

模擬法亦稱行為分析(behavior analysis)，其為針對水庫操作過程進行數值模擬分析，可考慮需水量變動與水庫操作規則等情況，模擬過程每一個時刻均需滿足連續方程式，藉由各個時刻之蓄水量、入流量、放水量、溢流量以及蒸發量來決定水庫蓄水量的變化，再配合試誤程序可以決定水庫設計容量與穩定出水量之關係。水庫系統之連續方程式如下：

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - O_t^{spill} - E_t \quad (2-1)$$

其中， $S_{t+1}$  為第  $t+1$  時期之期初蓄水量； $S_t$  為第  $t$  時期之期初蓄水量； $I_t$  為第  $t$  時期內水庫的入流量； $D_t$  為第  $t$  時期內水庫的放水量； $O_t$  為第  $t$  時期內水庫的溢流量； $E_t$  為第  $t$  時期內水庫的蒸發量。

模擬法優點為無需簡化系統且於枯旱時期亦無需假設完全滿足需水量，能夠考慮實際系統操作情況，可配合缺水指數(SI)與試誤程序進行設計規劃，例如：採用  $SI=1.0$  以決定穩定出水量(供水能力)。國內許多水資源系統規劃與檢討係採用模擬法，

例如：早期規劃之鯉魚潭水庫、仁義潭水庫、永和山水庫、士文水庫以及平溪水庫，而近期之曾文越域引水規劃與檢討等亦皆採用模擬法。

### 3、優選法

優選法係將水庫設計容量與穩定出水量之求解過程轉化成為最佳化問題，其主要由目標函數與限制式組成，而最佳化演算法包含：線性規劃、動態規劃、非線性規劃以及遺傳演算法等。以常用之線性規劃為例，如需決定適合之水庫設計容量，其目標函數可設定為最小化水庫設計容量(給定穩定出水量)，而限制式則為連續方程式、庫容限制式(小於水庫設計容量)以及非負值限制式(庫容大於等於零)。

優選法優點為無需過度簡化系統且於枯旱時期亦無需假設完全滿足需水量，其具有明確目標函數與限制式，藉由適當演算法可速求出最佳解。例如：可採用缺水指數(SI)作為目標函數，設定SI=1.0以決定穩定出水量(供水能力)。

表 2-2 供需系統之穩定出水量推估方法彙整表

| 設計方法 |      | 優點             | 缺點             | 容許缺水 | 適用規劃 | 說明   |
|------|------|----------------|----------------|------|------|--|
| 簡易法  | 累積曲線 | ●方便快捷          | ●需水固定<br>●不得缺水 | X    | X    | 針對歷史枯旱時期(critical period)，繪製累積入流量與累積需水量曲線，再藉由曲線比對方式，找出兩者最大差距，以決定適合之水庫設計容量。                             |
|      | 尖峰序列 | ●方便快捷<br>●需水可變 | ●不得缺水          | X    | X    | 計算淨入流量(入流量減需水量)，繪製累積淨入流量曲線，再藉由尋找曲線中尖峰(peak)值與其後續谷底(trough)值之最大垂直差距，以決定適合之水庫設計容量。                       |
| 模擬法  |      | ●需水可變<br>●容許缺水 | ●複雜度高          | O    | O    | 考慮需水量變動與水庫操作規則等情況，模擬過程每一個時刻均需滿足連續方程式，藉由各個時刻之蓄水量、入流量、放水量、溢流量以及蒸發量來決定水庫蓄水量的變化，配合試誤程序可以決定水庫設計容量與穩定出水量之關係。 |
| 優選法  |      | ●需水可變<br>●容許缺水 | ●不易理解          | O    | O    | 將水庫設計容量與穩定出水量之求解過程轉化成為最佳化問題，其主要由目標函數與限制式組成，而最佳化演算法包含：線性規劃、動態規劃、非線性規劃以及遺傳演算法等。                          |

資料來源：本研究整理。

### (三) 枯旱風險主軸之相關文獻整理

針對枯旱風險主軸之文獻，回顧國內外相關文獻並聚焦一般較常使用之缺水指標與臺灣水資源規劃與評估常用之缺水指數(SI)，整理歸納出常用缺水指標與其適用性說明(表 2-3)與缺水指數(SI)應用情況(表 2-4)，分別說明如下：

表 2-3 常用缺水指標與其適用性說明彙整表

| 缺水指標              | 適用性說明   |
|-------------------|---|
| 缺水指數 (SI)         | 可作為長期水資源規劃與評估使用，惟無法呈現枯水期缺水嚴重程度。   |
| 修正缺水指數 (MSI)      | 可作為長期水資源規劃與評估使用，適用於水文氣候變異較大之區域，較可反應出短時間缺水情況，惟無法反應缺水頻率。  |
| 通用缺水指數 (GSI)      | 對缺水強度與缺水延時更為敏感，可反應年度內連續缺水訊息，亦可用於評估短期(枯水期)操作之影響，惟無法反應缺水頻率。                                     |
| 缺水百分日數 (DPD)      | 可用於評估短期(枯水期)操作之影響，但不適合作為長期水資源規劃與評估使用。   |
| 修正缺水百分日數 (MDPD)   | 具備 DPD 對缺水強度與缺水延時更為敏感之優點外，同時納入缺水頻率之觀念，可適用於研究區域水文氣候變異較大之情況，亦可作為枯旱期與長期水資源規劃與評估使用，惟強度與延時之影響難以分辨。 |
| 乾旱損害指標 (DDI)      | 可用於評估短期(枯水期)操作之影響，但不適合作為長期水資源規劃與評估使用。   |
| 可靠度 (reliability) | 可用於評估缺水率落於某區間之發生機率，作為枯旱期與長期水資源規劃與評估使用。  |
| 恢復力 (resiliency)  | 可用於評估系統從無法正常運作恢復到正常運作之延時或系統無法正常運作之延時，可作為枯旱期與長期水資源規劃與評估使用。                                     |

參考資料：廖培明(民國 91 年)、蘇文瑞(民國 89 年)、王宗南(民國 95 年)、王鈺閔(民國 98 年)、蔡昉直(民國 101 年)以及連婉余與吳瑞賢(民國 100 年)。

表 2-4 缺水指數(SI)應用情況彙整表

| 國家 | 作者                  | 點地/流域                    | 水源設施                         | 說明                      |
|----|---------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 美國 | Fredrich (1968)     | 密蘇里州戈爾特 (Galt, Missouri) | 水庫系統                         | 應用缺水指數(SI)於決定水庫系統之設計容量。 |
| 韓國 | Kang et al. (2017)  | 洛東江 (Nakdong River)      | 安東壩 (Andong Dam)             | 應用缺水指數(SI)於水庫操作規線之最佳化。  |
| 印度 | Haque et al. (1992) | 哥達瓦里河 (Godavari River)   | Gosikhurd 大壩 (Gosikhurd Dam) | 應用缺水指數(SI)於推估水庫系統之供水能力。 |

資料來源：本研究整理

## 1、常用缺水指標

### (1)缺水指數

缺水指數(SI)係由美國陸軍工兵團所提出之缺水指標，其以缺水率之平方表現年缺水之程度，並以全期各年缺水率平方之平均為代表，將不同年間之缺水狀況予以平均化，對特殊之枯旱狀況給予較高之權重。SI 為臺灣評估供水系統時最常使用之缺水指標，其優點為可綜合考量缺水程度、發生頻率以及缺水嚴重性等特性，顯示出長期之缺水狀況，缺點則為無法瞭解「缺水事件」之缺水程度與缺水延時。其定義如下：

$$SI = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{S_i}{D_i} \right)^2 \quad (2-2)$$

其中， $N$  為分析總年數； $S_i$  為第  $i$  年之總缺水量； $D_i$  為第  $i$  年之總需水量。

### (2)修正缺水指數

修正缺水指數(modified shortage index, MSI)為徐享崑與蘇瑞榮(民國 88 年)提出，其建議若研究區域水文氣候變異較大時，計算時改以「旬」為時間單位，較可反應出短時間缺水情況。

$$MSI = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{S_i}{D_i} \right)^2 \quad (2-3)$$

其中， $N$  為分析總旬數； $S_i$  為第  $i$  旬之總缺水量； $D_i$  為第  $i$  旬之總需水量。

### (3)通用缺水指數

黃金山(民國 75 年)結合美國陸軍工兵團缺水指數與日本缺水百分日數之優點，提出通用缺水指數(generalized shortage index, GSI)，徐享崑(民國 77 年)應用通用缺水指數作為描述缺水情況之指標，優點為對缺水強度與缺水延時更



為敏感，可進行短期與長期之水資源規劃與評估使用，更能反應年度內之連續缺水訊息，亦可用以評估短期之即時操作，其公式如下：

$$GSI = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{SSR_i}{36} \right)^2 \quad (2-4)$$

$$SSR_i = \sum_{t=1}^{36} \left( \frac{S_t}{D_t} \right)^2 \quad (2-5)$$

其中， $N$  為分析年數； $SSR_i$  為第  $i$  年內旬缺水率之平方和； $S_t$  為第  $t$  旬之總缺水量； $D_t$  為第  $t$  旬之總需水量。

#### (4) 缺水百分日數

缺水百分日數(deficit percent day index, DPD)為日本水資源公團所提出，以日缺水率與連續缺水日數之乘積作為缺水評估之標準。依據東京世運會大缺水後之調查問卷，其缺水百分日數之忍耐值約在 1000 至 1500%-day，而溫漢章(民國 90 年)與王宗南(民國 95 年)亦以 DPD 等於 1500%-day 作為缺水容忍門檻。其優點為可顯示出缺水事件之缺水強度與缺水延時，適合作為界定缺水忍受程度之依據，缺點則為無缺水頻率之觀念，用於研判長期供水能力時並無明確之規範作用，計算式表示如下：

$$DPD = \left( \frac{VE_t}{VD_t} \times 100\% \right) \times \Delta t \quad (2-6)$$

其中， $VE_t$  為缺水事件  $t$  之缺水量； $VD_t$  為缺水事件  $t$  之需水量； $\Delta t$  為缺水事件  $t$  之持續天數。

#### (5) 修正缺水百分日數

修正缺水百分日數(modified deficit percent day index, MDPD)為「強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 100 年)所提出，其主要係參考缺水百分率之定義，並納入連續缺水事件中各日缺水率可能不同之考量，同時引入重現期概念，

找出每年缺水百分日數最大之連續缺水事件，利用韋伯法(Weibull)計算不同重現期之缺水百分日數。MDPD 除具備 DPD 對缺水強度與缺水延時更為敏感之優點外，同時納入缺水頻率之觀念，可適用於研究區域水文氣候變異較大之情況，亦可作為枯早期與長期之水資源規劃與評估使用，其定義為：

$$DPD_y = \max \left( \sum_{t=1}^N \frac{VE_t}{VD_t} \times 100\% \right)_j \quad (2-7)$$

其中， $VE_t$  為缺水事件  $j$  下之第  $t$  日缺水量； $VD_t$  為缺水事件  $j$  下之第  $t$  日需水量； $j$  為一年中第  $j$  次連續缺水事件； $DPD_y$  為第  $y$  年之最大缺水百分日數事件。

將歷年最大缺水百分率事件由大至小排列，則各事件之發生機率即可利用韋伯法(Weibull)推估，即：

$$P(DPD_R) = \frac{R}{Y+1} \quad (2-8)$$

其中， $P(DPD_R)$  為排序第  $R$  順序之最大缺水百分日數事件發生機率； $R$  為排序順位； $Y$  為分析年數。

#### (6) 乾旱損害指標

Kazuto(1991)提出乾旱損害指標(drought damage index, DDI)以突顯缺水率之嚴重性，其主要係將  $DPD$  之缺水情況改以缺水率平方表現年缺水之程度，計算公式如下：

$$DDI = \left( \frac{VE_t}{VD_t} \times 100\% \right)^2 \times \Delta t \quad (2-9)$$

其中， $VE_t$  為缺水事件  $t$  之缺水量； $VD_t$  為缺水事件  $t$  之需水量； $\Delta t$  為缺水事件  $t$  之持續天數。

#### (7) 可靠度

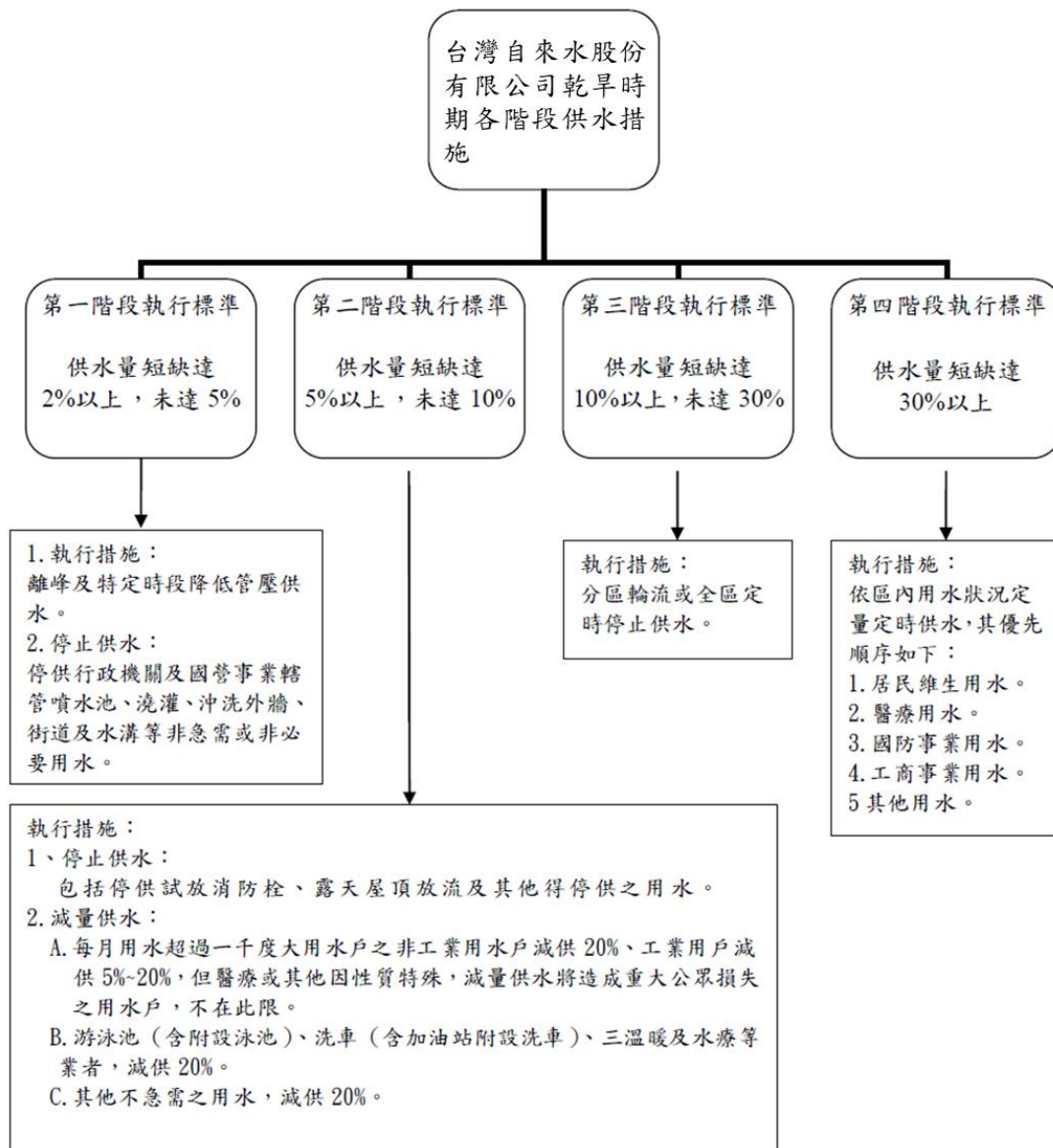
根據 Vogel and Bolognese(1995)所描述，可靠度(reliability)可視為分析年間系統正常運作之機率，並進一步將此定義延伸為供水效能落於某區間之發生機率，一般供水效能常以缺水率表示，缺水率為缺水量與需求量之比值。其中，缺水率

區間劃分係參考旱災災害等級標準(表 2-5)，依據缺水率將公共給水與農業給水之衝擊程度分為低衝擊(三級)、中衝擊(二級)以及高衝擊(一級)，計算各衝擊程度之發生機率，可作為枯早期與長期水資源規劃與評估使用。此外，台灣自來水股份有限公司乾旱時期各階段供水措施作業要點中亦依據缺水率作為各階段供水措施之執行標準(圖 2-4)，例如：(1)第一階段供水措施執行標準為 2%<缺水率<5%、(2)第二階段供水措施執行標準為 5%<缺水率<10%、(3)第三階段供水措施執行標準為 10%<缺水率<30%以及(4)第四階段供水措施執行標準為缺水率>30%。「石門水庫供水調配及水資源風險管理之探討」(財團法人維謙基金會，民國 105 年)即基於此概念將缺水率與正常供水時間百分比作為水資源短缺風險評估之依據。

表 2-5 旱災災害等級區分表

| 旱災等級 | 應變層級   | 水情燈號                                 | 缺水率     |        |
|------|--|--------------------------------------|---------|--------|
|      |  |                                      | 家用及公共給水 | 農業用水   |
| 三級   | 水利署各區水資源局、水庫管理單位、地方政府、自來水事業、農田水利會、工業區管理機構及科學園區管理局等應變小組 | 一供水區水情燈號綠燈，並經水利署各區水資源局研判水情恐有枯旱之虞     | 1~2%    | 20~30% |
| 二級   | 旱災經濟部水利署災害緊急應變小組                                       | 一供水區水情燈號黃燈，並經水利署研判水情恐持續枯旱            | 2~5%    | 30~40% |
| 一級   | 旱災經濟部災害緊急應變小組  | 二供水區水情燈號黃燈或一供水區水情燈號橙燈，並經水利署研判水情恐持續惡化 | 5~10%   | 40~50% |
|      | 旱災中央災害應變中心   | 二供水區水情燈號橙燈或一供水區水情燈號紅燈                | >10%    | >50%   |

註：<sup>1</sup> 缺水率為缺水量與需水量之百分比，缺水率(%)=(1-實際供水量/需水量)×100，X~Y%代表>X%、≤Y%；<sup>2</sup> 資料來源：旱災災害防救業務計畫(經濟部，民國 109 年)



圖片來源：台灣自來水股份有限公司乾旱時期供水措施作業要點(經濟部 108 年 11 月 13 日經授水字第 10800717780 號函備查)

圖 2-4 台灣自來水股份有限公司乾旱時期各階段供水措施

### (8)恢復力

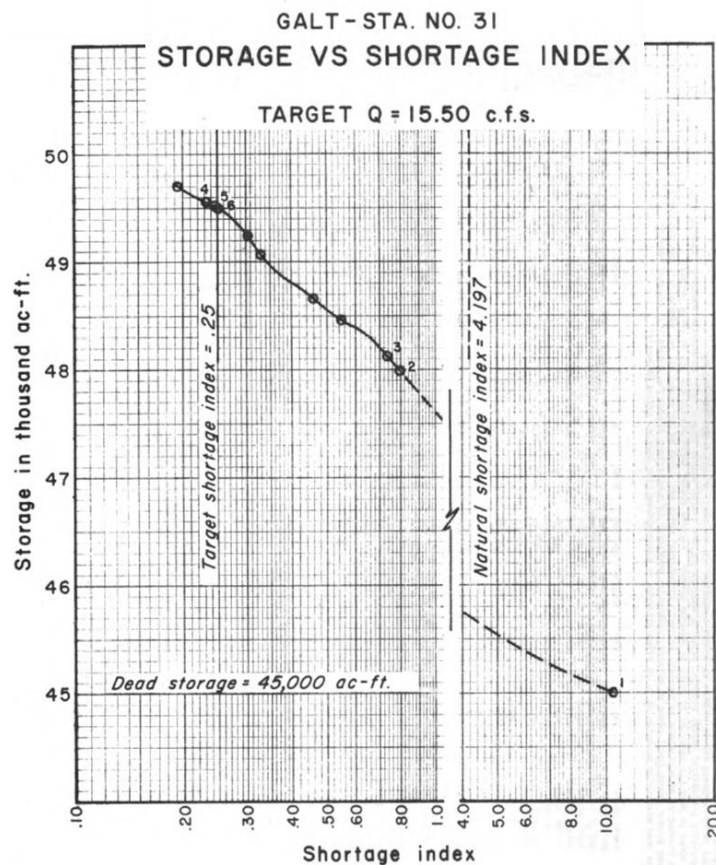
恢復力(resiliency)亦稱為回復度或彈性度，一般建議採用平均恢復時間(mean time to repair, MTTR)與平均失效時間(mean time to failure, MTTF)作為恢復力指標，可作為枯旱期與長期之水資源規劃與評估使用。其中，MTTR 代表系統每次從無法正常運作恢復到正常運作之平均延時，該值越小代表系統越能從無法正常運作之狀態下越快速地恢復；MTTF 則代表系統每次無法正常運作之平均延時，該值越大代表系

統可能要面臨長時間無法運作情況。

## 2、缺水指數(SI)應用情況

### (1)美國密蘇里州戈爾特

Fredrich (1968)針對美國密蘇里州戈爾特(Galt, Missouri)進行水庫設計規劃，以滿足當地用水需求 15.5 cfs (約 2,445 噸/日)。首先，為探討水庫設計容量與穩定出水量之關係，便以當地用水需求搭配不同水庫容量進行供需分析，並計算對應之缺水指數(圖 2-5)。由圖可知，當水庫設計容量愈大，其所對應之缺水指數則愈小，而為能進一步決定適合之水庫設計容量，設計標準採用缺水指數(SI)為 0.25，選擇對應水庫容量 49,500 ac-ft (約 6,106 萬噸)作為水庫設計容量。

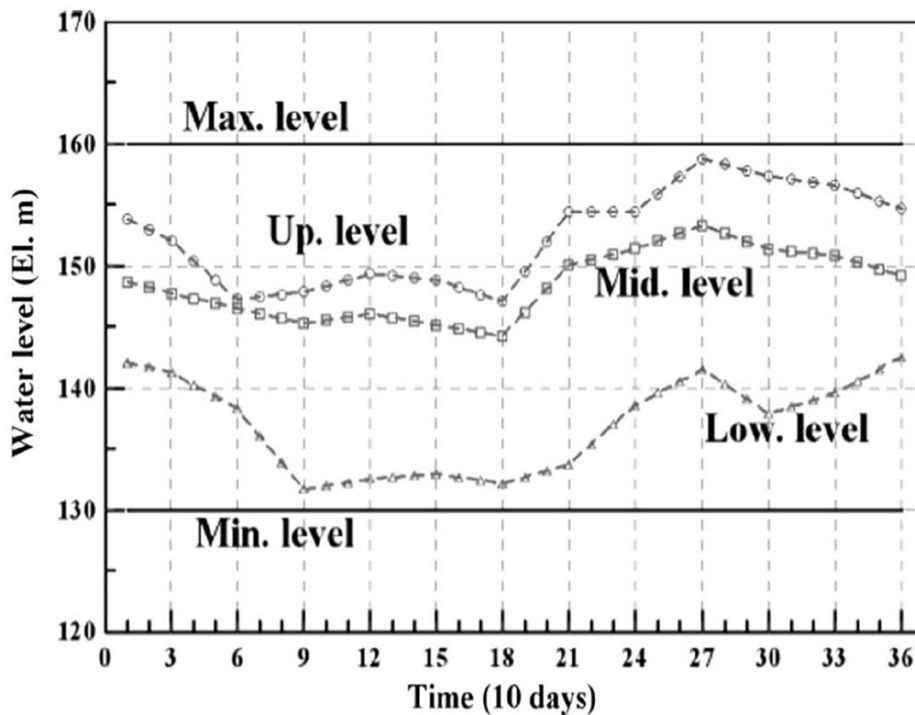


圖片來源: Fredrich, A.J. (1968) Pilot Study for Storage Requirement for Low Flow Augmentation. Technical Paper No. 7, The Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers. Exhibit 3. Storage vs. Shortage Index.

圖 2-5 美國戈爾特之水庫設計容量與缺水指數(SI)之關係

## (2) 韓國洛東江流域安東壩

韓國洛東江流域安東壩(Andong Dam, Nakdong River Basin)於 1976 年完工，為具有供水、防洪以及發電功能之多標的水庫，其有效庫容約 10 億噸。為提升洛東江流域安東壩之供水可靠度，Kang et al. (2017) 應用動態維度搜尋(dynamically dimensioned search)演算法搭配缺水指數(SI)作為目標函數(最小化)，進行水庫各旬操作規線(上限、下限以及嚴重下限)之最佳化(圖 2-6)。其中，可靠度係指水資源系統之穩定供水時間比例。安東壩若採用各旬最佳化操作規線進行運用，其可靠度可由原本 53% 提升至 64%，可改善原有可靠度約 21%。



圖片來源: Kang, S., Lee, S., Kang, T. (2017) Development and Application of Storage-zone Decision Method for Long-term Reservoir Operation Using the Dynamically Dimensioned Search Algorithm. *Water Resources Management*, 31, 219-232. Figure 11. Optimized Zones for the Andong Dam Operation.

圖 2-6 韓國安東壩各旬最佳化操作規線

## (3) 印度哥達瓦里河 Gosikhurd 大壩

印度哥達瓦里河 Gosikhurd 大壩(Gosikhurd Dam, Godavari River)設計庫容約 8.49 億噸，位於印度第二長河(哥

達瓦里河)上，其主要作用為調節與蓄存河川流量以穩定灌溉用水，為重要之農業灌溉水源。Haque et al. (1992)採用 3 種不同指標，包含：可靠度、缺水指數(SI)以及修正缺水指數(MSI)作為依據，重新推估 Gosikhurd 大壩設計庫容所對應之供水潛能(表 2-6)，而採用可靠度、缺水指數以及修正缺水指數所推估之供水潛能分別為 10.09 億噸、11.81 億噸以及 15.24 億噸。整體而言，其分析結果顯示：相較於可靠度，缺水指數與修正缺水指數更加適合應用於水庫設計規劃與檢討，可以提高水資源利用率同時兼顧工程成本考量。

表 2-6 印度 Gosikhurd 大壩之供水能力推估結果

| Annual Utilisation for a Fixed Storage Capacity Under Different Criteria |                         |                                    |                                   |              |                |                         |
|--|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------|----------------|-------------------------|
| Storage capacity (M cum)   | Criterion               | Planned annual utilisation (M cum) | Net utilisation per annum (M cum) | Failure year | Shortage index | Modified shortage index |
| 849.20   | 75% success year        | 1009                               | 994                               | 6            | 0.35           | 0.05                    |
|  | Shortage index          | 1181                               | 1126                              | 11           | 0.99           | 0.30                    |
|  | Modified shortage index | 1524                               | 1340                              | 18           | 3.60           | 0.97                    |

表格來源: Haque, M.E., Srivastava, P.L., Afshar, N.R. (1992) Criteria for Storage Capacity Fixation for Irrigation Reservoir Project. Irrigation and Power Journal, 49(1), 139-152. Table 6. Annual Utilisation for a Fixed Storage Capacity.

#### (四)備援評估主軸之相關文獻整理

針對備援評估主軸之文獻，主要聚焦「極端乾旱」概念與乾旱 SDF 曲線，回顧國內外相關文獻，例如：美國陸軍工兵團工程手冊「水庫之水文工程規範」(USACE, 2018)與「乾旱水資源管理」研究報告(USACE, 1994)，整理歸納出相關介紹說明如下：

水資源供需系統之「極端乾旱」概念源自美國國家科學院(National Academies)為了關注和討論水科學、技術和政策方面的議題，自 1985 年起引入一系列研討會且每年召開一次，旨在提供公共論壇以刺激相關研究，給予科學界和工程界交流的機會。第一次舉行專題研討會之主題為「乾旱管理及其對公共水系統的影響」

(National Academies, 1985)，主要討論水資源保護與未來用水需求之規劃。其中，「極端乾旱」概念與應用在研討會報告中第四章中提出：選擇「極端乾旱」主要為平衡增加供水成本與提升可靠度，在大部分實務應用上，「極端乾旱」通常選擇歷史最嚴重乾旱或更為嚴重的乾旱事件(例如：頻率年 50 年)為基礎，來決定水資源系統當面臨更嚴峻的乾旱事件需提升的額外容量。

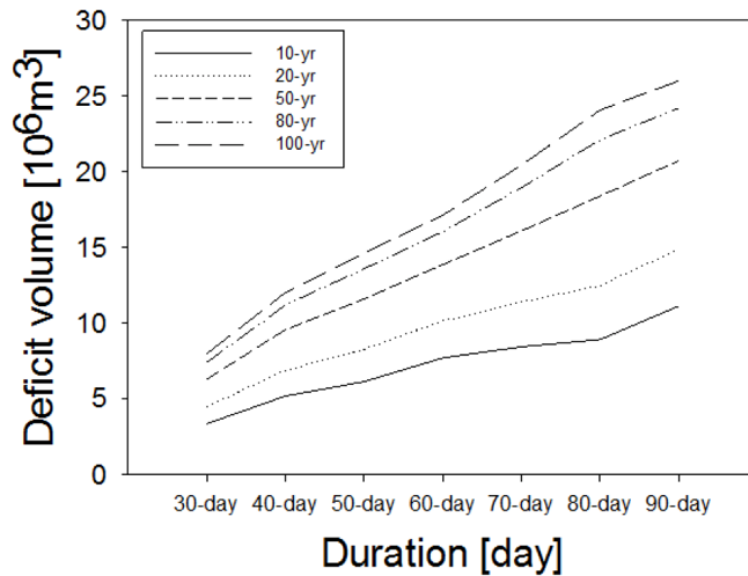
美國陸軍工兵團於 1994 年執行乾旱時期水資源管理之國家型研究計畫並發表「乾旱水資源管理」研究報告(USACE, 1994)，文中亦提及「極端乾旱」之概念與應用，並建議採用其測試水資源系統表現，而「極端乾旱」可用：(1)歷史或近年最嚴重之乾旱事件與(2)合成乾旱事件(synthetic drought)。由於歷史或近年最嚴重之乾旱事件缺少機率概念，無法瞭解未來發生相同乾旱事件之機率或頻率年。此外，乾旱事件是否具有足夠代表性亦不明確，未來是否有更為嚴重的事件會發生且其機率為何並無法得知。因此，另外建議以合成乾旱事件作為「極端乾旱」。合成乾旱係採用水文統計方式(例如：頻率分析)產出多場嚴重乾旱事件(例如：不同頻率年之乾旱事件)，以測試抗旱因應作為之成效，並可進一步探討其成本與成效之關係。

前述美國國家科學院與美國陸軍工兵團之相關文獻均建議採用「極端乾旱」概念來測試水資源系統表現，以決定水資源系統當面臨歷史最嚴重或更嚴峻的乾旱事件時所需提升之額外容量或抗旱因應作為。為考量水資源系統可能面臨較歷史最嚴重事件更為嚴峻的乾旱事件，導入「極端乾旱」之合成乾旱概念來檢視水資源系統表現，確實有其必要性。

導入「極端乾旱」之合成乾旱概念可透過頻率分析估算某特定延時下不同發生機率/頻率年之乾旱嚴重程度，來瞭解不同乾旱嚴重程度的機率特性。進一步透過頻率分析所產生之不同延時下乾旱事件嚴重程度與發生機率/頻率年之關係，可整合繪製成乾旱嚴重程度-延時-頻率關係曲線(drought severity-duration-frequency



curves)，簡稱「乾旱 SDF 曲線」(示意圖如圖 2-7)。乾旱 SDF 曲線可應用於不同的乾旱類型，例如：氣象乾旱、水文乾旱與社會經濟乾旱。以下將針對國際上乾旱 SDF 曲線之最新發展與應用進行介紹。



註：摘自 Sung and Chung (2014)；橫軸為延時、縱軸為缺水量、五條曲線分別代表不同頻率年。

圖 2-7 乾旱 SDF 曲線(示意圖)

表 2-7 為國際上乾旱 SDF 曲線相關文獻彙整表，一般國際上於氣象乾旱或水文乾旱評估分析採用之時間尺度通常會涵蓋 1 至 12 個月(時間尺度相較於年尺度更加細緻)，以描述枯水期間短延時高強度之缺水事件，而其延伸應用上亦包含許多面向，例如：整合乾旱衝擊與經濟分析、繪製空間上極端乾旱事件之等值圖以及極端乾旱事件趨勢分析等。故建議應考量臺灣水文特性，導入乾旱 SDF 曲線概念以合理描述枯水期間之缺水情況，聚焦發展乾旱 SDF 曲線並應用於評估水資源系統乾旱特性，詳細說明其產製流程與結果，並嘗試探討可能之應用方式，期望推廣其概念於臺灣水資源系統評估與管理。

表 2-7 國際上乾旱 SDF 曲線相關文獻彙整表

| 國家 | 作者                                  | 乾旱類型<br>(因子)     | 機率分布                                     | 說明   |
|----|-------------------------------------|------------------|--|--|
| 巴西 | Guzmán<br>et al.<br>(2017)          | 水文乾旱<br>(流量)     | GEV                                      | 針對不同需水情況與氣候變遷情境，以設計乾旱分析水事業於風險規避(risk aversion)需要之成本，其藉由整合 SDF 曲線與乾旱期間之經濟成本，以探討不同乾旱事件造成之經濟損失。 |
| 巴西 | Juliani<br>and<br>Okawa<br>(2017)   | 氣象乾旱<br>(雨量)     | gamma                                    | 採用 SDF 曲線作為分析工具，分析歷史乾旱事件之特性，評估潛在乾旱作為決策參考以避免嚴重衝擊，並繪製目標區域於空間上之乾旱風險(缺水等值圖)。                     |
| 希臘 | Vasiliades<br>et al.<br>(2017)      | 水文乾旱<br>(流量)     | Pareto                                   | 採用 HBV 水文模式進行流量資料補遺，並採門檻值法分析 30 年之模擬流量資料以瞭解研究區域低流量特性，再推求乾旱 SDF 曲線，以定量描述乾旱缺水量-延時-頻率之關係。       |
| 美國 | Ganguli<br>and<br>Ganguly<br>(2016) | 氣象乾旱<br>(雨量)     | 嚴重度：<br>lognormal<br>延時：<br>exponential  | 選用標準化降雨量指標(SPI)定義乾旱事件，推求不同時段之乾旱 SDF 曲線，並據以探討極端乾旱事件之增減趨勢。                                     |
| 美國 | Kwak<br>et al.<br>(2016)            | 水文乾旱<br>(流量)     | 嚴重度：<br>gamma<br>延時：<br>exponential      | 參考降雨強度-延時-頻率(IDF 曲線)之概念建置 SDF 曲線，於乾旱分析中針對設計乾旱事件提供定量估計。                                       |
| 澳洲 | Halwatura<br>et al.<br>(2015)       | 氣象乾旱<br>(雨量)     | 嚴重度：<br>gamma<br>延時：<br>logistic         | 選用乾旱 SDF 曲線作為生態復育管理與風險評估之工具，因植物對於乾旱有不同忍耐力，SDF 曲線可作為成本-效益分析時參考。                               |
| 韓國 | Sung<br>and<br>Chung<br>(2014)      | 水文乾旱<br>(流量)     | GEV                                      | 採用不同門檻值定義乾旱事件並依據線性動差圖決定最適合之機率分布，建立乾旱 SDF 曲線。此流程可應用於量化天然河川與水庫系統之缺水情況，亦可擴充進行區域化，提供未設測站之地區使用。   |
| 美國 | Rajsekhar<br>et al.<br>(2013)       | 水文乾旱<br>(流量)     | 嚴重度：<br>log normal<br>延時：<br>exponential | 採用關連函數(copula function)進行乾旱 SDF 曲線繪製，產出美國德州之水文乾旱地圖集，以作為水資源管理與設計參考。                           |
| 印度 | Reddy<br>and<br>Ganguli<br>(2012)   | 氣象乾旱<br>(雨量 SPI) | 嚴重度：<br>log normal<br>延時：<br>exponential | 選用標準化降雨量指標(SPI)定義乾旱事件，推求不同時段之乾旱 SDF 曲線，並採用關連函數(copula function)模擬乾旱事件之 SDF 關係。               |

目前已有許多研究投入乾旱 SDF 曲線之發展與應用，藉其可描述乾旱嚴重度、延時以及頻率年之關係，並應用於水資源乾旱風險評估等相關議題。其中，乾旱種類依應用領域與對象不同而有不

同定義方式，例如：氣象乾旱著重於氣候異常乾燥炎熱或降雨短缺造成之乾旱，而水文乾旱著重於流量或蓄水量不足造成之乾旱。近年國際上已有許多研究應用乾旱 SDF 曲線進行氣象乾旱與水文乾旱之探討(Kwak et al., 2016; Sung and Chung, 2014; Reddy and Ganguli, 2012)，針對重要相關文獻介紹如下：

Juliani and Okawa (2017)採用乾旱 SDF 曲線量化氣象乾旱之缺水特性，以作為乾旱風險評估基礎，瞭解未來可能面臨之乾旱威脅。其採用 12 個月為時間尺度進行雨量資料分析，計算標準化雨量指標(standardized precipitation index)並選擇-1.0 作為門檻值以辨識水文乾旱事件，針對不同延時(1、3、6、9 以及 12 個月)乾旱事件分析其嚴重度，再配合伽瑪分布推估各個頻率年嚴重度。此外，進一步研提區域化乾旱 SDF 曲線提供無測站地區於乾旱風險評估參考，並產製特定延時與頻率年下之乾旱等值圖以呈現空間上乾旱風險。

Guzmán et al. (2017)應用乾旱 SDF 曲線評估巴西東南部水資源系統之水文乾旱風險，其採用需水量作為門檻值進行乾旱事件(缺水)辨識，針對不同延時(31、90、180 以及 365 日)挑選歷年最大缺水量，再配合一般極端值分布推估各個頻率年缺水量。此外，進一步整合乾旱 SDF 曲線與經濟分析探討各種需水情況與氣候變遷情境下乾旱事件對於水公司可能造成之經濟衝擊。

Halwatura et al. (2015)採用 3 個月時間尺度進行雨量與蒸發資料分析，計算乾旱偵察指標(reconnaissance drought index)以辨識乾旱事件，再分別使用伽瑪分布與羅吉斯分布(logistic distribution)進行乾旱嚴重度與乾旱延時之擬合，以建立乾旱 SDF 曲線再應用於設計乾旱推估。其中，其將歷史資料分割為兩段 20 年資料(1972-1992 與 1993-2013)，以探討極端乾旱之變化趨勢。

Rajsekhar et al. (2013)基於月流量資料計算標準化流量指標(standardized stream flow index)並選擇-0.99 作為門檻值以辨識水文乾旱事件，其應用乾旱 SDF 曲線評估美國德州水文乾旱風險，探討延時 3、6、9、12、18、24 以及 36 個月下頻率年 5、10、25、50

以及 100 年所對應之水文乾旱嚴重度，並產製水文乾旱地圖集以呈現乾旱嚴重度之空間變異。

Vasiliades et al. (2017)以月流量資料中位數作為門檻值進行乾旱事件辨識，採用不同延時(30、60、90、180 以及 360 日)從歷年乾旱事件挑選出最大嚴重度，再配合頻率分析建構乾旱 SDF 曲線，據以探討水文乾旱之嚴重度、延時以及頻率年之關係。

Ganguli and Ganguly (2016)基於 6 個月雨量資料計算標準化雨量指標(SPI6)並選擇-0.9 作為門檻值以辨識氣象乾旱事件，分析乾旱空間結構並發展與應用乾旱 SDF 曲線探討極端乾旱事件趨勢。其中，於極端乾旱事件分析上主要係針對不同延時(1、2、3...12 個月)與頻率年(10 與 100 年)之乾旱進行探討。

表 2-8 國際上韌性特徵之量化方法

| 作者                          | 應用領域                                   | 韌性特徵  | 量化方法   |
|-----------------------------|--|---|--|
| Bonstrom and Corotis (2016) | 結構工程<br>(structural engineering)       | 穩健力<br>(robustness)<br>快速力<br>(rapidity)  | 採用韌性曲線之參數進行韌性特徵量化。                               |
| Balaei et al. (2018)        | 自然災害<br>(natural hazards)              | 吸收力<br>(absorptive capacity)<br>調適力<br>(adaptive capacity)<br>復原力<br>(restorative capacity) | 從科技面、組織面、社會面以及經濟面挑選出代表性指標，並透過權重方式結合各個指標，以進行韌性量化。 |
| Grafton et al. (2019)       | 自然永續<br>(natural sustainability)       | 抵抗力<br>(resistance)<br>恢復力<br>(recovery)<br>穩健力<br>(robustness)                             | 採用韌性曲線之參數進行韌性特徵量化。                               |
| Simonovic (2020)            | 水資源工程<br>(water resources engineering) | 穩健力<br>(robustness)<br>快速力<br>(rapidity)<br>餘裕力<br>(redundancy)<br>資源力<br>(resourcefulness) | 採用韌性曲線之參數進行韌性特徵量化。                               |

資料來源：本研究整理。

### (五) 韌性提升主軸之相關文獻整理

針對韌性提升主軸之文獻，主要聚焦韌性特徵之量化方法，因韌性具有多種特徵(例如：承受能力、調適能力以及恢復能力)，而這些韌性特徵則可藉由量化方法將其轉化為數字，以應用於韌性提升效益評估。國際上韌性特徵量化方法整理歸納如表 2-8，分別說明如下：

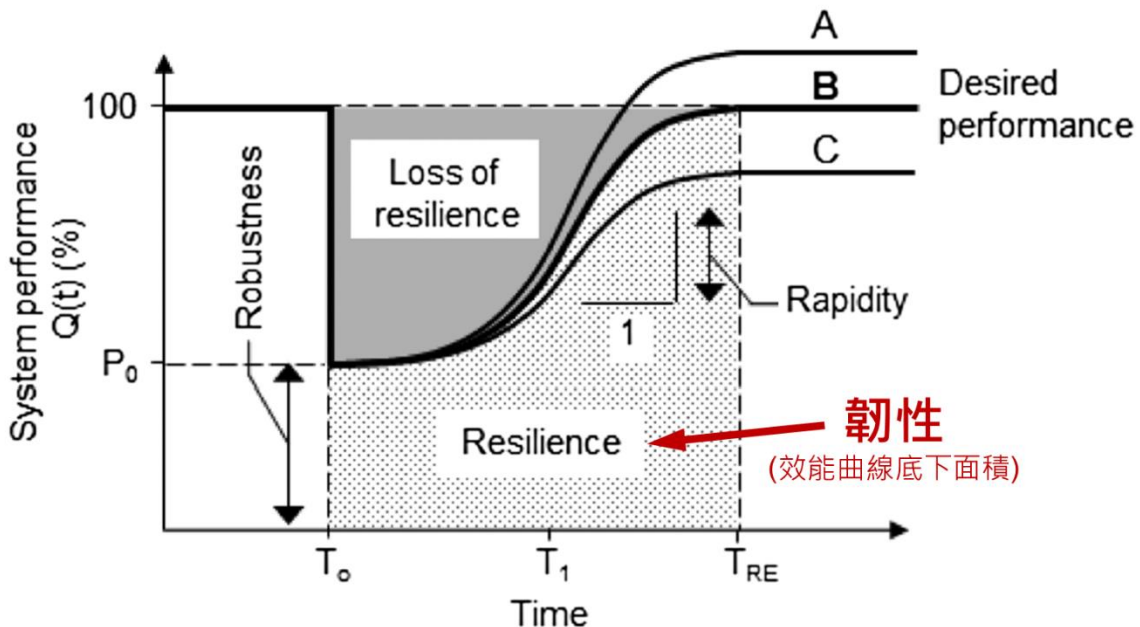
#### 1、結構工程角度

Bonstrom and Corotis (2016)從結構工程角度進行韌性(R)之定義，其可被視為系統效能之函數如下：

$$R(\%) = \int_{T_0}^{T_{RE}} \frac{Q(t)}{T_{RE}} dt \quad (2-10)$$

其中， $R$  即為韌性(位為百分比)， $Q(t)$  為第  $t$  時刻之系統效能， $T_0$  為發生外在擾動之時間， $T_{RE}$  為系統效能完全恢復之時間。

系統效能與韌性之關係如圖 2-8 所示，效能曲線以下之面積即為韌性，而效能曲線以上之面積則為韌性損失。韌性可採用不同之韌性特徵加以描述，針對韌性特徵之定義與說明如下：



圖片來源: Bonstrom, H., Corotis, R.B. (2016) First-Order Reliability Approach to Quantify and Improve Building Portfolio Resilience. Journal of Structural Engineering, 142(8), C4014001, 1-12. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001213.

圖 2-8 系統效能與韌性之關係

### (1)穩健力(robustness)

穩健力取決於系統強度，或是忍受與吸收外在擾動之能力。假設外在擾動發生之前，系統效能為 100%；擾動發生之後，系統效能最低降至  $P_0$  (圖 2-8)，而此最低系統效能即為穩健力。

### (2)快速力(rapidity)

快速力取決於系統恢復速度與恢復之能力，其可利用系統效能曲線之斜率進行計算，公式如下：

$$R_a = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (2-11)$$

其中， $R_a$  即為快速力， $dQ(t)$  為  $dt$  時刻內系統效能之變化量。

## 2、自然災害角度

Balaei et al. (2018)從自然災害角度進行韌性之定義，其與系統之強度與恢復時間有關，例如：供水系統對於地震之韌性包含：(1)當地震發生時，供水系統仍可維持一定程度之運作與(2)當地震發生且對供水系統造成損壞，其恢復至正常運作所需之時間。以韌性概念圖為例(圖 2-9)，其在數學上定義如下：

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_1} f(t)dt}{f_0 \times (t_1 - t_0)} \quad (2-12)$$

其中， $R$  即為韌性， $f(t)$  為第  $t$  時刻之系統可服務性(serviceability)， $t_0$  為發生外在擾動之時間， $t_1$  為系統可服務性完全恢復之時間， $f_0$  則為系統可服務性(發生外在擾動之前)。

系統韌性與其強度與恢復時間有關，而藉由吸收力、調適力以及復原力則可強化系統強度與恢復時間，針對上述韌性強化方法說明如下：

### (1)吸收力(absorptive capacity)

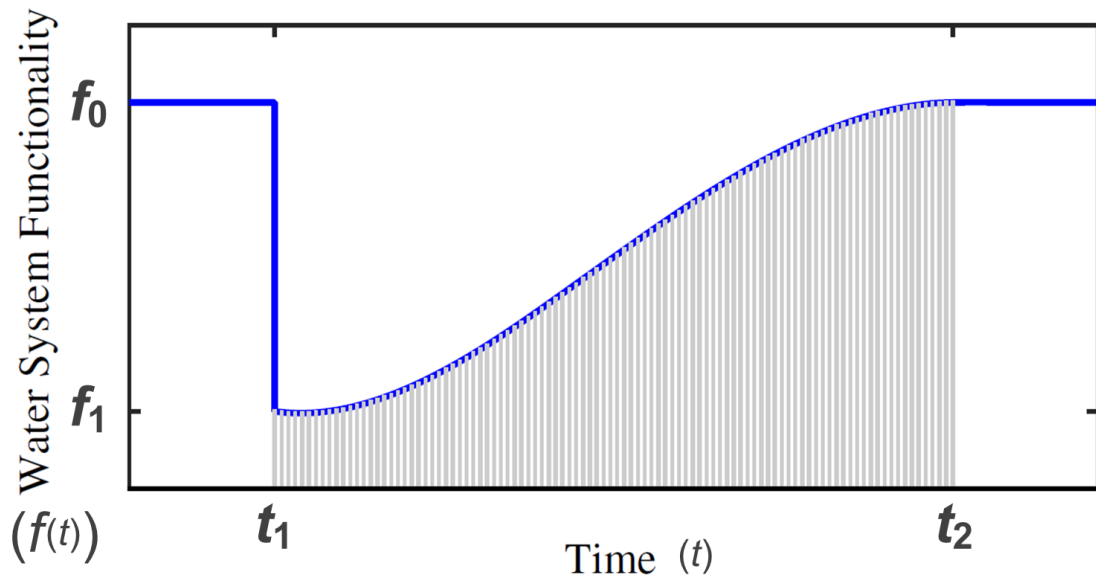
吸收力取決於系統吸收衝擊之能力，或者係藉由一定程度之付出，將可能之衝擊影響最小化之能力。

## (2)調適力(adaptive capacity)

調適力取決於系統調整外在衝擊影響之能力，其可透過災前準備之方式進行調適力提升。

## (3)復原力(restorative capacity)

復原力取決於系統可服務性恢復至可接受程度之能力，其與調適力相同，亦可透過災前準備之方式進行復原力提升。



圖片來源: Balaei, B., Wilkinson, S., Potangaroa, R., Hassani, N., Alavi-Shoshtari, M. (2018) Developing a Framework for Measuring Water Supply Resilience. *Natural Hazards Review*, 19(4), 04018013. doi: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000292.

圖 2-9 供水系統之韌性概念圖

### 3、自然永續角度

Grafton et al. (2019)從自然永續角度進行韌性之定義，其可藉由不同之韌性特徵加以描述，分別是：抵抗力、恢復力以及穩健力(簡稱 3Rs)，而這些韌性特徵與系統效能之關係如圖 2-10 所示。針對各種特徵說明如下：

#### (1)抵抗力(resistance)

當系統遭遇外在擾動事件時，其主動或被動維持系統效能之能力，其計算公式如下：

$$\text{resistance} = \frac{(M - N)}{M} \quad (2-13)$$

其中， $M$  為發生擾動事件前之系統效能，而  $N$  則為發生擾動

事件後之系統最低效能。

## (2)恢復力(recovery)

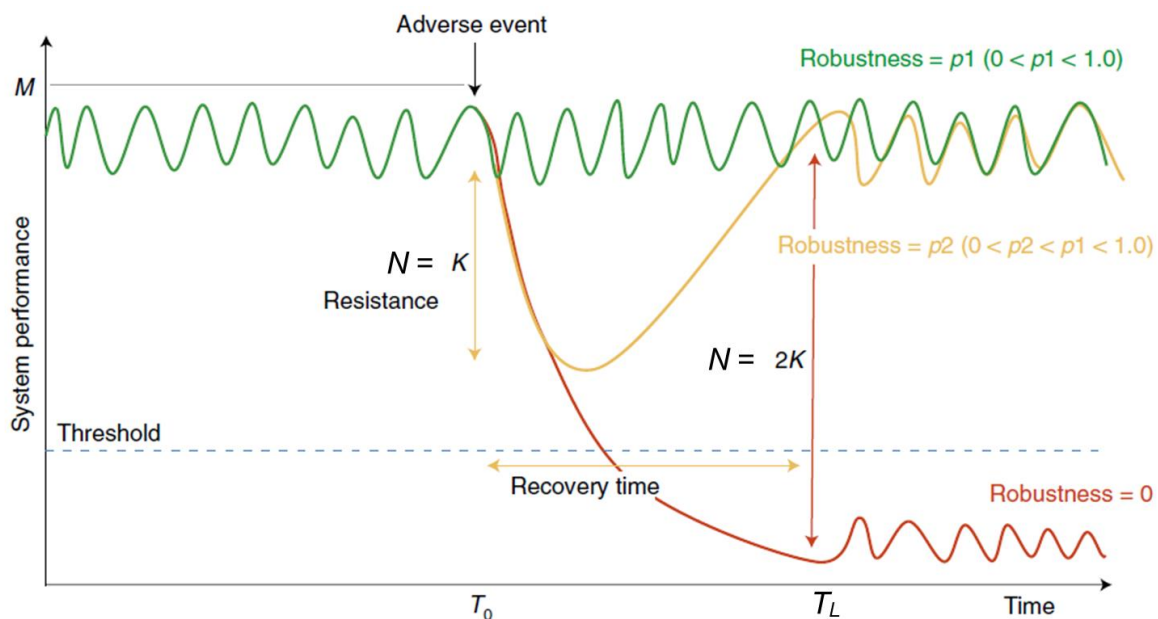
當系統遭遇外在擾動事件後，系統效能恢復至正常或可接受程度之所需時間，其計算公式如下：

$$\text{recovery} = \frac{1}{T_L - T_0 + 1} \quad (2-14)$$

其中， $T_L$  為系統效能恢復至正常或可接受程度之時間，而  $T_0$  則為遭遇外在擾動之時間。

## (3)穩健力(robustness)

當系統遭遇外在擾動事件時，系統效能維持在可接受程度之機率。



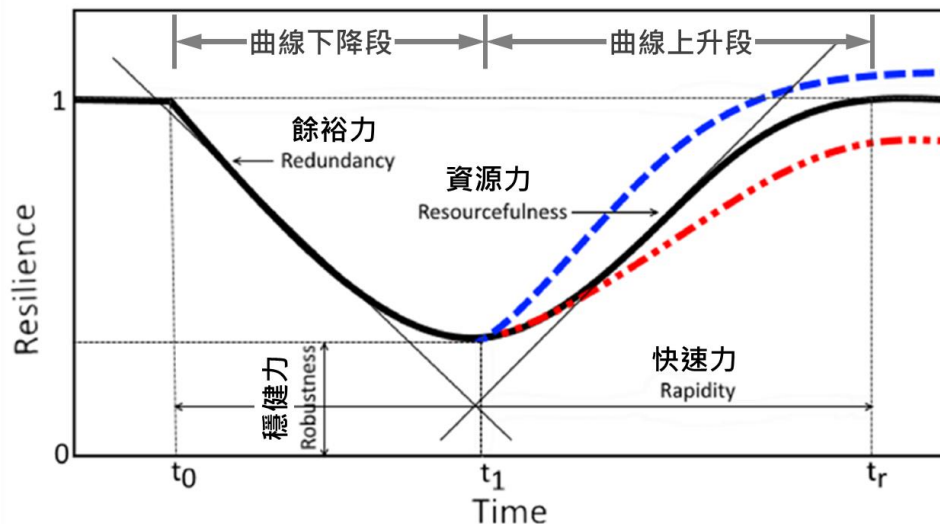
圖片來源: Grafton, R.Q., Doyen, L., Béné, C., Borgomeo, E., Brooks, K., et al. (2019) Realizing Resilience for Decision-Making. *Nature Sustainability*, 2, 907-913. doi: 10.1038/s41893-019-0376-1.

圖 2-10 韌性特徵與系統效能之關係

## 4、水資源工程角度

Simonovic (2020)採用韌性曲線上四種韌性參數進行系統之韌性特徵描述，其分別為穩健力、快速力、餘裕力以及資源力，韌性曲線與韌性參數之關係示意圖可參考圖 2-11。針對各個韌性參數所代表之曲線特徵說明如下：





圖片來源: Simonovic, S.P. (2020) System Approach to Management of Water Resources – Toward Performance Based Water Resources Engineering. Water, 12(4), 1208. doi: 10.3390/w12041208.

圖 2-11 韌性曲線與韌性參數之關係示意圖

#### (1) 穩健力(robustness)

系統在受到極端事件影響時，系統輸出之最小值。從韌性曲線來看，穩健力即為曲線所對應縱軸之最小值，當其數據愈大，系統穩健力即愈高。

#### (2) 快速力(rapidity)

系統在受到極端事件影響時，其恢復至正常系統輸出所需之時間。從韌性曲線來看，快速力即為韌性曲線所對應橫軸之長度，當其長度愈短，系統快速力即愈高。

#### (3) 餘裕力(redundancy)

系統在受到極端事件影響時，是否足以額外增加輸出，以維持系統整體穩定性。從韌性曲線來看，餘裕力即為韌性曲線下降段之斜率，當斜率愈小，代表韌性曲線下降愈慢(系統輸出下降愈慢)，系統餘裕力愈高。

#### (4) 資源力(resourcefulness)

系統在受到極端事件影響時，是否有充足資源可供調度使用，以克服極端事件造成之影響。從韌性曲線來看，資源力即為韌性曲線上升段之斜率，當斜率愈大(如圖 2-11 中韌

性曲線上方虛線)，代表韌性曲線上升愈快(系統輸出上升愈快)，系統之資源力愈高。反之，當斜率愈小(如圖 2-11 中韌性曲線下方虛線)，代表系統之資源力愈低。

### 三、國內外備援方案蒐集盤點

#### (一)國內備援方案

參考「臺灣各區水資源經理基本計畫-核定本」(經濟部，民國 110 年)盤點與彙整南部區域各個縣市於目標年條件不同備援方案於枯水期間可穩定提供之水量，盤點結果(表 2-9)指出：綜合現況備援、抗旱 1.0、抗旱 2.0 以及目標年新增備援之水量，嘉義、臺南、高雄以及屏東備援水量分別為 19.0、29.0、109.2 以及 9.4 萬噸/日。其中，因高雄地區水源主要仰賴川流水且缺乏大型蓄水設施，且其供水情況易受高濁度影響，進而設置伏流取水設施取用低濁度水源，故規劃較高備援水量加以因應。然而，備援水量可能受到豐枯水期或極端事件影響而有所變動，故後續將針對枯旱時期之穩定備援水量進行評估(詳見第 3-1-4-3 節「枯旱備援水量」)。

表 2-9 南部區域目標年條件下備援方案盤點結果

| 縣市   | 備援方案  | 供水能力<br>(萬噸/日)                     | 合計<br>(萬噸/日) |
|------|---|------------------------------------|--------------|
| 嘉義地區 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 複線雲林湖山支援</li> <li>● 餘裕水源轉備援</li> <li>● 加強灌溉管理</li> </ul>                             | 5.0<br>1.0<br>13.0                 | 19.0         |
| 臺南地區 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 臺南高雄水源</li> <li>● 餘裕水源轉備援</li> <li>● 臺南海淡</li> </ul>                                 | 13.0<br>6.0<br>10.0                | 29.0         |
| 高雄地區 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 高屏溪伏流水</li> <li>● 抗旱井</li> <li>● 水井復抽</li> <li>● 高屏堰下游增抽</li> <li>● 荖濃溪伏流</li> </ul> | 70.0<br>19.0<br>5.7<br>4.5<br>10.0 | 109.2        |
| 屏東地區 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 抗旱井</li> <li>● 抗旱井(新增)</li> <li>● 隘寮溪伏流水</li> </ul>                                  | 0.2<br>4.2<br>5.0                  | 9.4          |

註：<sup>1</sup>備援方案係包含現況備援、抗旱 1.0、抗旱 2.0 以及目標年(民國 125 年)新增備援於枯水期間可穩定提供之水量；<sup>2</sup>資料來源：「臺灣各區水資源經理基本計畫-核定本」(經濟部，民國 110 年)。

## (二)國際備援方案

為瞭解國際上常用備援方案並借鏡國際經驗，參考國際技術報告與專書，包含：非傳統水資源(UN-Water, 2020)、替代水資源(International Water Association, 2015)、替代供水計畫(The Water Research Foundation, 2018)以及替代水源與廢水管理(Boulware, 2013)，將國際上常見備援方案盤點與彙整如圖 2-12。針對前述盤點方案，將挑選創新備援方案(例如：採霧/露儲集)進行深入回顧，以提供臺灣未來備援推動參考。針對創新備援方案詳細說明如下：

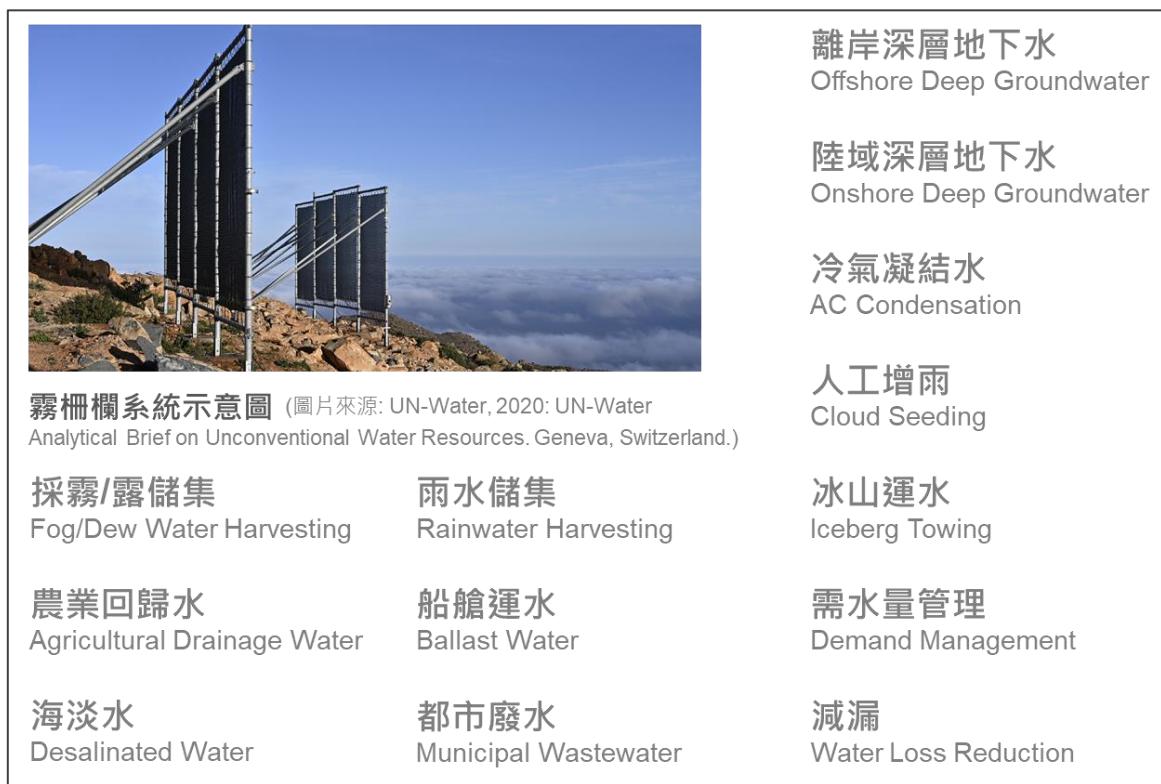


圖 2-12 國際上常見備援方案盤點結果

### 1、空氣取水(無能源使用)

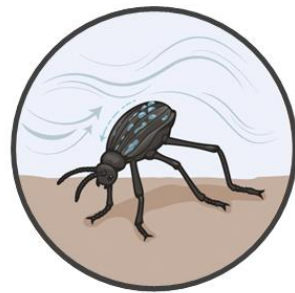
在氣候變遷影響下，地球上原本就乾燥少雨之區域可能變得更加乾燥。由於缺乏乾淨且可靠的用水，這些區域將來可能不再適合居住。為解決用水問題，工程師決定學習納米比沙漠甲蟲(又稱沐霧甲蟲)百萬年以來「從空氣中取水」的喝水方法(圖 2-13)。

位於非洲南部的納米比沙漠每年雨量僅有 12.7 毫米，但沙

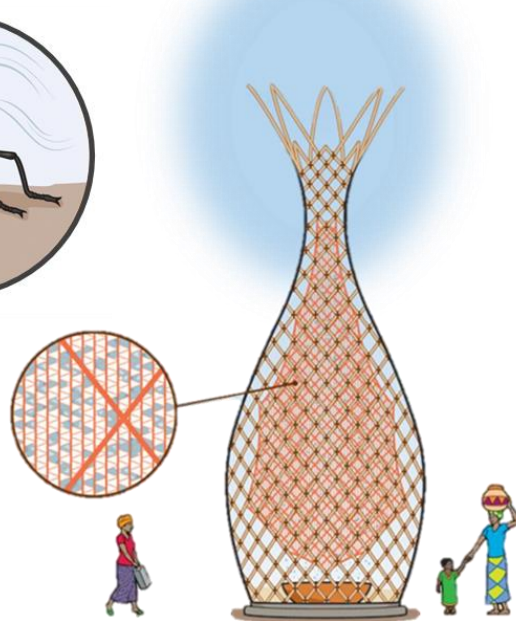
沙漠甲蟲卻能找到非常充足的飲用水。當霧汽從大西洋飄至沙漠時，沙漠甲蟲便會抬起後側身體等待水汽聚集於具有親水性的甲殼端點上，而小水滴則再順著甲殼上的蠟質溝流至嘴裡，以取得充足的飲用水。工程師學習此種甲蟲於乾燥地區喝水之方式，設計仿生系統以從空氣中取水。

在非洲許多鄉村社區都以瓦爾卡樹作為集會地點，而一種空氣中取水裝置-瓦爾卡水塔(Warka Water Tower)便以此種樹名作為命名依據。一座瓦爾卡水塔每日可製造約 95 公升的乾淨飲用水，且大部分建材皆為就地取材，其無活動元件(更為耐用)，運作上亦無需電力。

(a) 納米比沙漠甲蟲  
從空氣中取水示意圖



(b) 瓦爾卡水塔示意圖  
(Warka Water Tower)



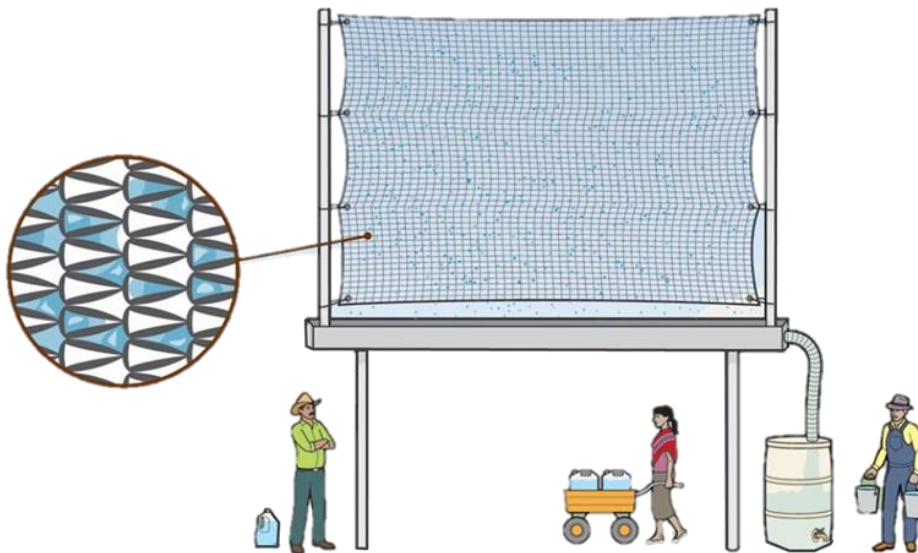
圖片來源：<https://www.sierraclub.org/sierra/2014-6-november-december/innovate/harvesting-water-thin-air>

圖 2-13 納米比沙漠甲蟲空氣取水與瓦爾卡水塔示意圖

水塔設計師為義大利工程師阿圖羅·維托里(Arturo Vittori)，曾經協助歐洲太空總署發展載人太空飛行器，進行太空居住環境設計規劃。他意識到地球上一些極端環境與太空環境都面臨相似挑戰，而這些挑戰的關鍵核心就是必須提高資源的利用效率。最後，他設計出瓦爾卡水塔(圖 2-13)，此種結構無需高科技

且可手工打造，可協助乾燥地區民眾從空氣中取水，以獲得更多水資源。此種水塔取水原理係基於自然溫差變化，讓水汽於物體表面凝結，以達成空氣取水目的，且水塔材料以就地取材為原則，先採用竹子或木材打造框架，再應用聚酯纖維作為主要集水介面。

此外，麻省理工學院的工程師團隊應用不鏽鋼鍍膜網，開發出一種簡單的空氣取水裝置-採霧器(圖 2-14)，並導入極度乾燥的智利阿他加馬沙漠，以補捉霧汽中的小水滴。此種取水裝置未來可以參考風力發電風場之形式進行配置，增加規模以提供農業灌溉用水。



圖片來源：<https://www.sierraclub.org/sierra/2014-6-november-december/innovate/harvesting-water-thin-air>

圖 2-14 採霧器(fog catcher)示意圖

## 2、空氣取水(能源使用)

空氣製水機<sup>1</sup>係一種能夠從周遭空氣取水的裝置，其一般藉由冷凝法(condensation)或乾燥劑法(desiccants)從空氣取水。其中，冷凝法係將空氣溫度降低至露點以下，讓空氣中水汽凝結為水；而乾燥劑法則係將乾燥劑暴露於空氣中，以利於吸附水汽。以下分別針對冷凝法、乾燥劑法以及精進方法進行說明：

<sup>1</sup>Wikipedia: atmospheric water generator  
([https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric\\_water\\_generator#Modern\\_technologies](https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_water_generator#Modern_technologies))

表 2-10 國內外冷凝製水應用案例

| 國家         | 臺灣  | 美國  | 以色列   | 孟買   | 印度  | 南非  |
|------------|---|---|---|--|---|---|
| 公司<br>(產品) | ARKVO <sup>[1]</sup><br>(ARK-001)   | Aquaboy <sup>[2]</sup><br>(Aquaboy Pro II)  | Watergen <sup>[3]</sup><br>(GENNY)  | Air-O-Water <sup>[4]</sup><br>(Dewpoint)   | AKVO <sup>[5]</sup><br>(akvoPOD)  | Water from Air <sup>[6]</sup><br>(AW3)  |
| 製水程序       | 1.空氣過濾<br>2.冷凝<br>3.儲水與殺菌<br>4.淨水過濾<br>5.煮沸<br>6.出水與殺菌                              | 1.空氣過濾<br>2.冷凝<br>3.儲水與殺菌<br>4.淨水過濾<br>5.儲水與殺菌<br>6.冷水與熱水桶                          | 1.空氣過濾<br>2.冷凝<br>3.淨水過濾<br>4.殺菌<br>5.低溫儲水<br>6.內循環殺菌                               | 1.空氣過濾<br>2.冷凝<br>3.儲水<br>4.加壓<br>5.淨水過濾<br>6.臭氧殺菌                                   | 1.空氣過濾<br>2.冷凝<br>3.儲水<br>4.淨水過濾<br>5.殺菌  | 1.冷凝<br>2.殺菌<br>3.活性炭過濾<br>4.逆滲透膜<br>5.添加礦物質<br>6.儲水與殺菌<br>7.出水與殺菌                    |
| 製水能力       | 16 公升/日<br>(RH60% ; 27°)  | 7.6~18.9 公升/日<br>(RH28~90% ; 13~32°)  | 19.2 公升/日<br>(RH60% ; 27°)  | 19 公升/日<br>(RH60% ; 22°)   | 50 公升/日<br>(RH80% ; 30°)  | 32 公升/日<br>(RH35~90%)   |
| 特色         | 專利冷凝塗層<br>智慧家電  | 七道簡易過濾程序  | 專利塑料<br>熱交換製程   | Air2Water<br>專利製水程序<br>(含臭氧殺菌)   | 適用離線<br>(off-grid)電力  | 整合逆滲透   |
| 用電         | 最大 750WH<br>待機 35WH   | 970WH   | 350WH/L   | 500WH  | 650WH   | 450WH   |
| 製水成本       | -   | -   | 1,734 元/噸   | -  | -   | -   |
| 介紹         |  |  |  |  |  |  |

註：<sup>1</sup>製水成本以非夏月 1 度電 5.03 元估算，而「-」代表資訊不足無法估算其製水成本；<sup>2</sup>由於冷凝製水在用電需求上係隨著規模與功能而有所不同，為能客觀比較不同產品差異，主要係針對「家用冷凝製水規模」進行相關資料整理，部分產品具有煮沸功能而較為耗電。相關冷凝製水產品之參考資料條列如下：<sup>[1]</sup>臺灣 ARKVO (<https://arkvo.com.tw/>)、<sup>[2]</sup>美國 Aquaboy (<https://www.atmosphericwatersolutions.com/>)、<sup>[3]</sup>以色列 Watergen (<https://www.watergen.com/>)、<sup>[4]</sup>孟買 Air-O-Water (<https://www.airowater.com/>)、<sup>[5]</sup>印度 AKVO (<https://akvosphere.com/>)、<sup>[6]</sup>南非 Water from Air (<https://www.waterfromair.co.za/>)。

### (1) 冷凝法

冷凝法取水主要係藉由壓縮機驅動冷媒先流經冷凝器再至蒸發器，而蒸發器則可以將周遭空氣溫度降低至露點以下，讓空氣中水汽凝結為水，再配合上抽風扇與空氣濾網，以持續補充乾淨空氣。在取得凝結水之後，通常會再導入淨水過濾與殺菌程序，以確保其能夠符合飲用標準。

冷凝法之產水效率主要取決於相對溼度、氣溫以及壓縮機尺寸，若氣溫與相對溼度較高時，其產水效率亦會較高；若氣溫與相對溼度較低，其產水效率亦會較低。從過去經驗

來看，若氣溫低於 18.3 度或相對溼度低於 30%時，冷凝法已無法有效的運作。

國內外已有許多冷凝法之應用(表 2-10)，例如：以色列 Watergen 公司製水程序為：(1)空氣過濾、(2)冷凝、(3)淨水過濾、(4)殺菌、(5)低溫儲水以及(6)內循環殺菌。其中，Watergen 藉由研發專利塑料熱交換製程，以提升空氣製水效率，每 1 度電約可產製最多 2.9 公升的水，換算 1 度水成本高達 1,734 元(以非夏月 1 度電 5.03 元估算)。

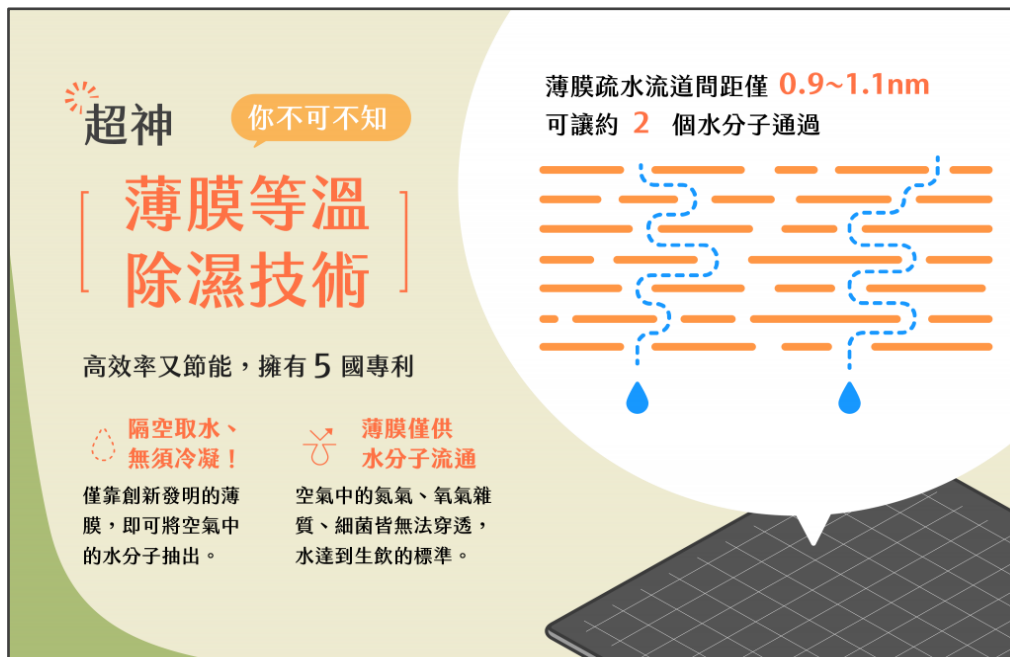
## (2) 乾燥劑法

由鹽組成的溼式乾燥劑為常見的乾燥劑，其主要係利用濃鹽水吸附周遭空氣水汽，然後再將濃鹽水內的水分萃取出來並加以淨化。乾燥劑法可設置於大型貨櫃車並搭配發電機進行製水，每日可產水 4,500 公升，每 1 公升的燃油約可產製 5 公升的水，其水油比約為 5 倍。

## (3) 空氣製水精進方法

在經濟部技術處科技專案支持下，工研院研發出「薄膜等溫除濕技術」(圖 2-15)，其主要為表面具有親水基但內含疏水微流道(僅供約 2 個水分子通過)的薄膜材料，可有效地分離出空氣中的水氣，在全球都在發展綠能節能之趨勢下，臺灣成功領先全球首創出此技術，並已擁有 5 國專利，其在空氣製水應用上潛力十足。

應用薄膜等溫除濕技術，其分離出的水汽濃度瞬間會提高 10 萬倍以上，僅需略微壓縮這些水汽，即可自然凝結成水，而且薄膜上的疏水流道間距僅 0.9 至 1.1 奈米，空氣中的氮氣、氧氣雜質以及細菌病毒等皆無法穿透，故薄膜濾出的水具有完全無菌的特性。



圖片來源：經濟部技術處([https://www.moeda.gov.tw/MNS/doi/content/Content.aspx?menu\\_id=34648](https://www.moeda.gov.tw/MNS/doi/content/Content.aspx?menu_id=34648))

圖 2-15 工研院薄膜等溫除濕技術介紹

### 3、空調冷凝水

一般空調冷凝水係直接進入排水系統，但隨著水資源與永續重要性逐漸提升，針對此種空調系統所產生之副產品「冷凝水」，在國內外已有許多研究與案例探討其水量水質或回收應用之可行性，以下分別針對國際上相關研究案例與臺灣回收應用案例進行說明：

#### (1) 國際上相關研究案例

位於奈及利亞之哈科特港大學(Noutcha et al., 2016)針對 120 台冷氣進行冷凝水蒐集實驗，每週執行五天，為期兩個月。其實驗結果指出：就水量而言，兩個月期間共計蒐集 1,5595 公升冷凝水；就水質而言，冷凝水在物理化學性質上普遍都符合世界衛生組織用水標準，但生菌數量則未達世界衛生組織建議標準。整體而言，冷凝水不建議作為飲用水，但仍可用於環境清潔、植物澆灌、實驗用水以及馬桶用水等。

印度共生國際大學(Sabnis et al., 2020)指出針對許多熱帶或亞熱帶地區之國家而言，因相對溼度經常高於 50%，其空



調製冷過程具有較高之冷凝效率。故針對冷凝水進行分析研究，檢視其水質與水量之穩定性。分析結果指出：冷凝水具有高度純淨、產水量大以及幾乎全年可用等特性，其於工業、實驗室、民生以及農業上皆可使用，使得冷凝回收系統具有發展商機。

Liu and Li (2017)指出就產業用水而言，冷卻水占整體用水比例高，應避免浪費並盡量降低用水損失，建議可配合回收水加以補充。故其以北京一處商辦大樓為例，探討以中央空調冷凝水補充冷卻水之效益。分析結果指出：冷凝水回收在技術上可行，且其益本比在經濟層面上亦具有可行性。

## (2) 臺灣冷凝水回收應用案例

臺灣因豐枯交替頻繁且趨於懸殊，多元與穩定水資源開發為未來重要方向，針對冷凝水回收應用案例(表 2-11)介紹如下：(1)經濟部水利署南區水資源局增設空調冷凝水回收設備，A棟與B棟辦公區每日各可回收150公升冷凝水，無雨時冷凝水可用於澆花，下雨時則用於拖地與擦玻璃；(2)台灣電力公司設計「智慧化水資源再利用系統」將台電大樓頂樓雨水引流至地下室筏式基礎集水坑，用以澆灌花圃與沖廁所，可大幅減少自來水用量；此外，近年更回收空調運轉產生之冷凝水，讓大樓每天都有水源進帳；(3)中華電信為強化水資源回收再利用成效，導入地下筏基雨水回收系統，收集下雨時機房屋頂與地面乾淨雨水，亦針對辦公大樓空調系統增設冷凝水回收工程，將冷凝水回收充分利用。藉由推動雨水、沐浴水以及空調冷凝水等回收再利用方案，將回收水再利用於樹木澆灌、園區與人行道清洗上；(4)傑能系統工程與康普艾節能科技針對南部某辦公大樓設計冷凝水回收系統，主要係將空調箱與送風機之冷凝水皆回收至冷凝水回收桶後，經冷凝水回收泵傳送至冷卻水塔，進而減少冷卻水塔補水量。此案例之冷凝水回收系統每月可產生約50,000公升之冷凝

水，可減少冷卻水塔自來水補水量約 50 度，每月可減少 CO2 排放約 7.5 公斤(= 0.15\*50)。

表 2-11 臺灣冷凝水回收應用案例

| 單位                                       | 案例說明  | 連結  |
|--|---|---|
| 經濟部水利署<br>南區水資源局<br>燕巢辦公區 <sup>[1]</sup> | 增設空調冷凝水回收設備，A 棟與 B 棟辦公區每日各可回收 150 公升冷凝水，無雨時冷凝水可用於澆花，下雨時則用於拖地與擦玻璃。   |    |
| 台灣電力公司<br>台電大樓 <sup>[2]</sup>            | 台電設計「智慧化水資源再利用系統」將大樓頂樓雨水引流至地下室筏式基礎集水坑，用以澆灌花園與沖廁所，可大幅減少自來水用量；此外，近年更回收空調運轉產生之冷凝水，讓大樓每天都有水源進帳。   |    |
| 中華電信 <sup>[3]</sup>                      | 為強化水資源回收再利用成效，中華電信導入地下筏基雨水回收系統，收集下雨時機房屋頂與地面乾淨雨水，亦針對辦公大樓空調系統增設冷凝水回收工程，將冷凝水回收充分利用。藉由推動雨水、沐浴水以及空調冷凝水等回收再利用方案，將回收水再利用於樹木澆灌、園區與人行道清洗上。   |   |
| 傑能系統工程與<br>康普艾節能科技 <sup>[4]</sup>        | 冷凝水回收節能案例分享：針對南部某辦公大樓設計冷凝水回收系統，主要係將空調箱與送風機之冷凝水皆回收至冷凝水回收桶後，經冷凝水回收泵傳送至冷卻水塔，進而減少冷卻水塔補水量。此案例之冷凝水回收系統每月可產生約 50,000 公升之冷凝水，可減少冷卻水塔自來水補水量約 50 度，每月可減少 CO2 排放約 7.5 公斤(= 0.15*50)。 |  |

資料來源：

[1] <https://www.facebook.com/tw.wrasb/posts/1968745690099651>

[2] <https://www.cna.com.tw/news/afe/202102060075.aspx>

[3] [https://www.cht.com.tw/home/cht/-/media/Web/PDF/Sustainability/CSR-Report-Download/CSR/2016/2016\\_CSR\\_10\\_Green\\_Enterprise.pdf](https://www.cht.com.tw/home/cht/-/media/Web/PDF/Sustainability/CSR-Report-Download/CSR/2016/2016_CSR_10_Green_Enterprise.pdf)

[4] <http://edm.jp-system.com.tw/index.php?page=38&tab=3>

### 第三章 南部區域水資源系統分析與極端氣候衝擊評估

此章節主要目的在於說明水資源供需模式之建置與驗證，並應用於分析極端氣候下雨量太少所導致之氣象乾旱對於水資源供需系統可能造成之衝擊。藉由採用標準化雨量指數作為雨量資料分析工具，辨識可能造成嚴重缺水之氣象乾旱事件，並比對不同程度氣象乾旱所導致之水資源供需衝擊，以瞭解氣象乾旱事件與供需衝擊之因果關係。詳細內容說明如下：

#### 一、水資源供需模式建置與驗證

##### (一)水資源供需模式

水資源供需模擬係採用巨廷公司 GT International Simulation Planning Model (GTSPM)模式進行供需分析，該模式主要係採用長時間序列模擬法建立水資源供需模式，其採用日演算時距，再配合各個水資源系統之特性建置模式架構，主要分析流程如圖 3-1 所示，可大致概分為川流取水系統與水庫水源系統。川流系統之模擬取水原則為在保留下游既有用水人權益與生態流量前提下，有水便取，若無水則缺；水庫系統則依據各水庫運用規線與標的間協議分配水量供水，必要時亦應保留下游既有用水人權益與生態基流量，並隨時依據修訂運用要點調整運用模式。模擬水庫之水量運用時，其蓄水過程必須滿足下列水平衡方程式：

$$S_{t+1} = S_t + I_t - D_t - E_t \quad (3-1)$$

$$S_{t+1} = \begin{cases} S_{\max}, EX_t = S_t + I_t - D_t - E_t - S_{\max}, DF_t = 0; & \text{if } S_t + I_t - D_t - E_t > S_{\max} \\ S_{t+1}, DF_t = EX_t = 0; & \text{if } S_{\min} < S_t + I_t - D_t - E_t < S_{\max} \\ S_{\min}, DF_t = S_{\min} - (S_t + I_t - D_t - E_t), EX_t = 0; & \text{if } S_t + I_t - D_t - E_t < S_{\min} \end{cases} \quad (3-2)$$

式中， $t$ ：日； $I_t$ ：入流量； $S_t$ ：第  $t$  日之期初蓄水量； $S_{t+1}$ ：第  $t+1$  日之期初蓄水量； $D_t$ ：需水量； $E_t$ ：蒸發量； $S_{\min}$ ：水庫蓄水利用之最小蓄水容量； $S_{\max}$ ：水庫蓄水利用之最大蓄水容量； $DF_t$ ：第  $t$  日之缺水量； $EX_t$ ：第  $t$  日之溢流量。

模擬條件除依照水源設施之運用要點視蓄水量多寡分配水量或取水外，尚應考慮水庫之蒸發、滲漏等損失量、各堰壩下游保留

水權量與生態基流量、水庫與攔河堰至取水點之輸水損失、越域引水之漏水損失等。

於水資源供需分析時，將視需求蒐集計畫區域各水庫、攔河堰的運用要點(包含運用規線與各用水標的之計畫需水量)、入流量、下游保留水權量、生態基流量、歷年平均或計畫蒸發深度、水庫 H-A-V 圖表、引輸水設施之輸水損失率等。而一般供需分析原則如下：

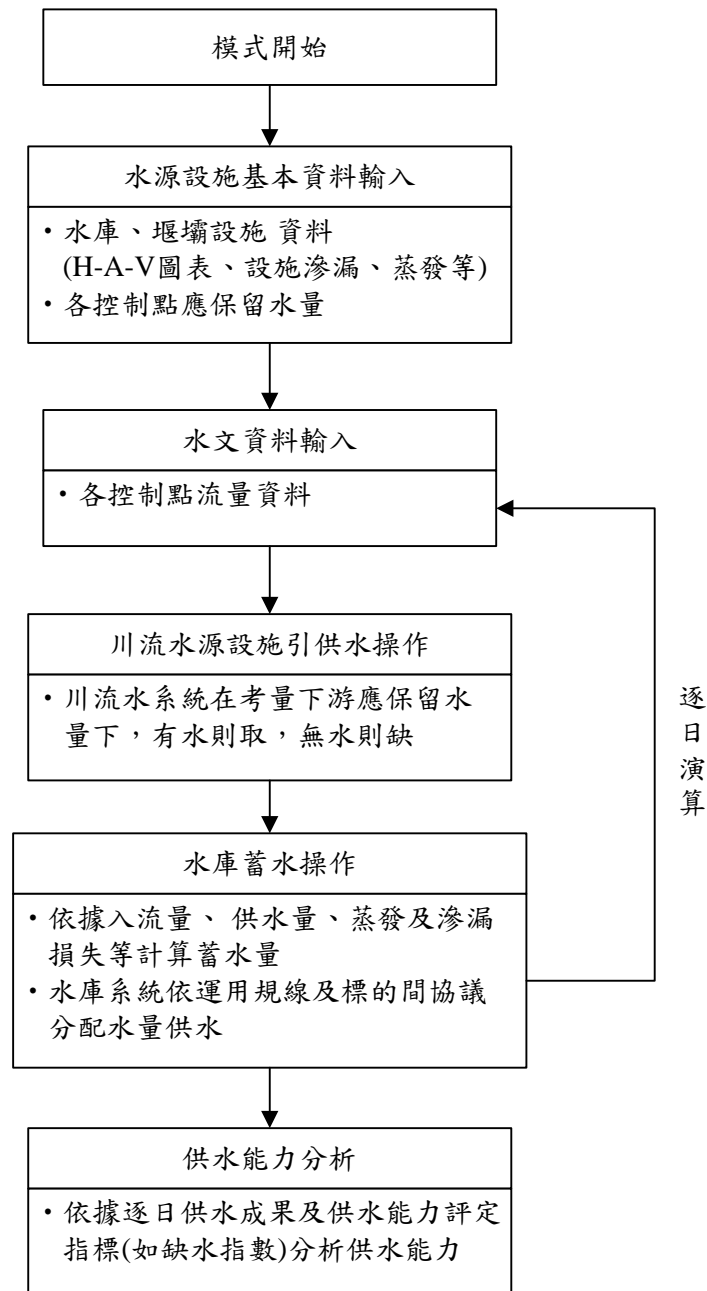


圖 3-1 GTSPM 模式分析流程

- 1、水文年限與水庫庫容採用最新資料為原則。
- 2、攔河堰與水庫均採逐日演算。
- 3、各個水源設施均保留下游生態基流量，依序採用運用要點、慣用放水量、發生機率 95%流量等規定之水量。
- 4、水源運用優先利用川流水，川流水源不足時以水庫水補充。
- 5、於颱風或暴雨期間，為避免高濁度引水導致淨水場無法處理或水庫淤積，當河川流量大時，川流水暫停引水。
- 6、離槽水庫之攔河堰引水，水庫若須溢洪操作時，攔河堰應減量引水避免造成越域排洪。
- 7、水庫呆容量不參加營運模擬。

## (二)南部區域之水資源供需系統

南部區域水資源供需分析架構如圖 3-2 所示，其重要流域包含：八掌溪、曾文流、高屏溪、東港溪以及四重溪，經盤點現有供需系統，擇定納入分析之水資源供需系統條列如下並詳細說明其運用原則於後：

- 1、蘭潭-仁義潭水庫串聯運用
- 2、曾文-烏山頭水庫串聯運用
- 3、南化水庫與高屏溪攔河堰聯合運用
- 4、鳳山水庫水源運用
- 5、牡丹水庫水源運用

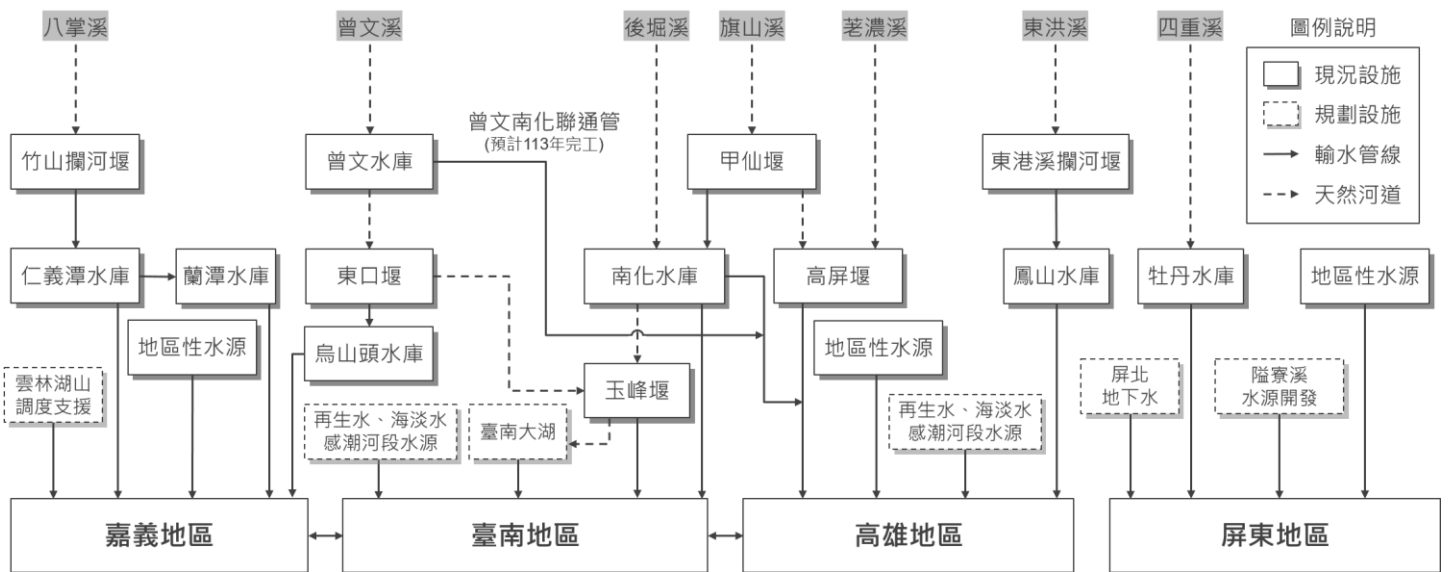


圖 3-2 南部區域水資源供需架構

### 1、蘭潭-仁義潭水庫串聯運用原則

- (1)依民國 107 年 07 月「仁義潭及蘭潭水庫串聯運用要點」之規定進行蓄水利用運轉，蘭潭與仁義潭水庫自八掌溪竹山堰引取水源蓄存利用。
- (2)蘭潭-仁義潭水庫串聯運用依規線蓄水運用，當聯合蓄水量在運用規線以上時，按正常需水量供應；當聯合蓄水量未達聯合運用規線時，依區域水源情勢縮減供水量，採用計畫供水量 90%供水。
- (3)竹山堰引取八掌溪水源至水庫蓄存，惟引水需保留下游水量並不使水庫溢流為原則，最大引水量為 25 秒立方公尺。

### 2、曾文-烏山頭水庫串聯運用原則

- (1)依民國 106 年 8 月「曾文水庫運用要點」運轉規線進行蓄水利用運轉。當蓄水量在下限以上時，依各標的基準供水量供應；蓄水量在下限與嚴重下限之間時，家用及公共給水按基準供水量供應，農業與工業用水則按基準供水量 75%供應；蓄水量在嚴重下限以下時，家用及公共給水按基準供水量 80%供應，農業與工業用水則按基準供水量 50%供應。
- (2)曾文水庫正常滿水位設定：自 5 月上旬至 8 月下旬為標高 228 公尺，9 月為標高 229 公尺，10 月上旬至次年 4 月下旬為標

高 230 公尺。

- (3)東口堰至烏山頭水庫之引水量為 56 秒立方公尺，可引水量含曾文水庫放流量、曾文水庫至東口堰間集水區側流量。
- (4)輸水損失量參考「曾文-烏山頭水庫串聯運用引水量蒸發、滲漏及輸水損失問題探討改善研究」(經濟部水利署南區水資源局，民國 89 年)之計畫成果，曾文放水口至東口堰輸水損失採用 5.3%，而東口堰至烏山頭水庫輸水損失採用 3.4%。

### 3、南化水庫與高屏堰聯合運用原則

- (1)優先利用高屏堰川流水供應高雄地區分配水量與北送臺南地區用水，不足水量由南化水庫蓄水供應；南化水庫滿庫時供應臺南地區用水，以減少高屏堰北送水量。
- (2)高雄地區分配水量係南化水庫與高屏堰聯合運用較南化水庫單獨運用(無甲仙堰引水)增加供水能力之一半。
- (3)南化水庫依民國 100 年 5 月「南化水庫運用要點」之原則進行蓄水利用運轉，其除蓄存集水區水源量外，可自旗山溪甲仙堰引水蓄存利用。其中，南化水庫集水區水源需放流下游各標的水權量。
- (4)甲仙攔河堰取水優先保留下游水權與生態基流量，為避免引水後造成南化水庫洩洪浪費，5 至 8 月引水使南化水庫蓄水至總蓄水量 95%，9 月至隔年 4 月使南化水庫蓄水至滿庫。為避免引取高濁度水量，依規定於泥砂濃度超過 1,200NTU 時暫停引水，經分析此含砂濃度之流量約 300 秒立方公尺。
- (5)高屏溪攔河堰取水優先依「高屏溪攔河堰運用要點」保留下游水權與生態基流量，惟水源不足時則依各標的用水之水權比例供水，部分水量為高雄地區自有水源不列入分析。為充分利用高屏溪水源，1 至 4 月僅於水權內取水，5 至 12 月則能儘量引取剩餘水量。為避免引取高濁度水量，依規定水源泥砂濁度超過 12,000 NTU 時原則上不取水，經分析此含砂濃度之流量約 2,000 秒立方公尺。

#### 4、鳳山水庫水源運用原則

- (1)因鳳山水庫集水區面積較小，其主要水源係來自東港溪港西抽水站抽取東港溪剩餘水量進行蓄水，以供應公共給水。
- (2)東港溪攔河堰水源係自上游測站推估，須扣除大坡圳計畫用水量，由於下游已無各標的用水取水，因此僅保留下游生態基流量 0.53 秒立方公尺。其中，港西抽水站現況抽水能力為每日 35 萬立方公尺。
- (3)現況鳳山水庫亦可由高屏堰引水蓄存，而鳳山水庫原規劃滿水位為標高 50 公尺，惟現況操作滿水位僅 44.5 公尺，可蓄存水量不大，由東港溪水源引水蓄存已相當充足，故不額外考慮由高屏堰引水之情況。

#### 5、牡丹水庫水源運用原則

- (1)牡丹水庫主要水源係攔蓄汝仍溪與牡丹溪水量，以供應家庭及公共給水、農業用水等標的使用。
- (2)牡丹水庫以發生機率 95%水量作為下游生態保留用水，其流量相當於 0.093 秒立方公尺，而農業用水則保留下游水權量合計值。
- (3)依據民國 106 年 11 月 1 日公告之牡丹水庫運用要點(含運用規線)蓄水利用。當水庫水位高於上限，視各標的用水需求供水，並增量放水；水庫水位在上限與下限之間，依各標的計畫用水量供應；水庫水位在下限與嚴重下限之間時，公共給水以計畫用水量之 80%放水，農業以計畫用水量之 50%供水；水庫水位低於嚴重下限時，公共給水以計畫用水量之 70%放水，農業以計畫用水量之 40%供水。

#### (三)供水能力評估檢討成果

採用 GTSPM 模式進行水資源供需分析，已於民國 108 年「108 年南部區域水資源經理計畫滾動檢討」(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 108 年)採用最新供需資料重新檢討南部區域各個供需系統之供水能力(表 3-1)，並與前期計畫「臺灣南部區域水資源經理基本計



畫(第 1 次檢討)-核定本」(經濟部水利署，民國 106 年)進行比較以作為模式驗證。供水能力之分析比較結果顯示：GTSPM 模式可合理模擬南部區域各個供需系統之供水能力，適合運用於後續極端氣候衝擊評估。

表 3-1 南部區域各個供需系統之供水能力評估檢討成果

| 供需系統       | 前期計畫供水能力(萬 CMD) | 「108 年南部區域水資源經理計畫滾動檢討」 <sup>1</sup><br>供水能力評估檢討成果<br>(GTSPM 模式分析成果)   |
|------------|-----------------|---|
| 蘭潭-仁義潭水庫串聯 | 16.0            | <ul style="list-style-type: none"> <li>●前期計畫供水能力為各年平均供水量，經分析現況 SI=1.5，而當 SI=1.0 時，其供水能力為 14.2 萬 CMD。</li> <li>●竹山堰年保留水量有 1.6 億噸於枯旱時期可供調度，故建議保留前期計畫供水能力 16.0 萬 CMD。</li> </ul>   |
| 曾文-烏山頭水庫串聯 | 35.0            | <ul style="list-style-type: none"> <li>●公共給水年基準分配量為 1.2 億噸，相當於 32.9 萬 CMD。</li> <li>●前期計畫供水能力含調用農業用水量 800 萬噸。</li> </ul>  |
| 南化-高屏聯合    | 65.3            | <ul style="list-style-type: none"> <li>●前期計畫相關水量包含南化水庫(高屏堰聯合) 49.6 萬 CMD、(高屏堰與南化聯合) 80.9 萬 CMD、臺南高雄水源聯合運用增加供水 10 萬 CMD，共計 140.5 萬 CMD 供水能力。其中，高屏堰供水能力含調度農業水量，而南化水庫與高屏堰聯合運用水量則僅 65.3 萬 CMD (含臺南高雄水源聯合運用水量)。</li> <li>●前期計畫供水能力以南化水庫民國 105 年蓄水量 9,500 萬噸分析，若以民國 107 年蓄水量 9,145 萬噸分析現況 SI=1.25，而當 SI=1.0 時供水能力為 62.9 萬 CMD。</li> <li>●考量甲仙堰與高屏堰之農業保留水量分別約每年 4.3 與 7.0 億噸，於缺水時期可供調度，故建議保留前期計畫供水能力。</li> </ul> |
| 鳳山水庫       | 30.0            | <ul style="list-style-type: none"> <li>●前期計畫供水能力主要係供應淨水場供水區內工業用水需求量，經分析現況 SI=0.09。</li> <li>●東港溪可供調用之大陂圳保留水量為每年 0.4 億噸，僅為原規劃供水量 30 萬 CMD (每年約 1.1 億噸)之 36%，無餘裕水量可供調度，故建議採用原規劃 SI 值較低之供水能力。</li> </ul>   |
| 牡丹水庫       | 8.0             | <ul style="list-style-type: none"> <li>●前期計畫供水能力為原核定計畫供水量，經分析現況 SI=0.44。</li> <li>●下游農業保留水量僅為計畫供水量 0.4 倍，無餘裕保留水量可供調度，故建議維持原規劃供水能力 8 萬 CMD。</li> </ul>   |

註：<sup>1</sup>「108 年南部區域水資源經理計畫滾動檢討」(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 108 年)；<sup>2</sup>前期計畫為「臺灣南部區域水資源經理基本計畫(第 1 次檢討)-核定本」(經濟部水利署，民國 106 年)。

其中，考慮南部區域因豐枯水期明顯，枯水期間經常需要協調農田水利會調度灌溉用水，其主要係考慮一期作期間灌溉用水透過加強灌溉管理，於缺水率 30%尚可維持作物生長所節餘之水量，故於民國 108 年南部經理計畫滾動檢討報告內雖然部分供需系統之供水能力有降低情況(相較於前期計畫)，但仍維持採用前期民國 106 年南部經理計畫之供水能力。為因應此種供水能力降低與農業用水亦可能不足所導致之枯旱風險，建議可導入設計備援水量概念，以

進一步穩定枯旱時期供水能力。針對各個供需系統之分析成果說明如下：

### 1、蘭潭-仁義潭水庫串聯運用系統

為瞭解蘭潭-仁義潭系統之供水能力，經分析不同缺水指數對應之供水量如圖 3-3 所示，分析結果指出：當缺水指數等於 0.1、0.5、1.0 時，其供水量分別為 10.5、12.5、14.2 萬 CMD。由蘭潭-仁義潭系統之缺水指數與供水量關係可知，其供水能力約為 14.2 萬 CMD (缺水指數為 1.0)。若以民國 106 年南部經理計畫所列供水能力 16.0 萬 CMD 進行比對分析，其對應之缺水指數則約為 1.5，即其潛在缺水風險較高，但竹山堰年保留水量有 1.6 億噸於枯旱時期可供調度，故建議保留供水能力 16.0 萬 CMD。

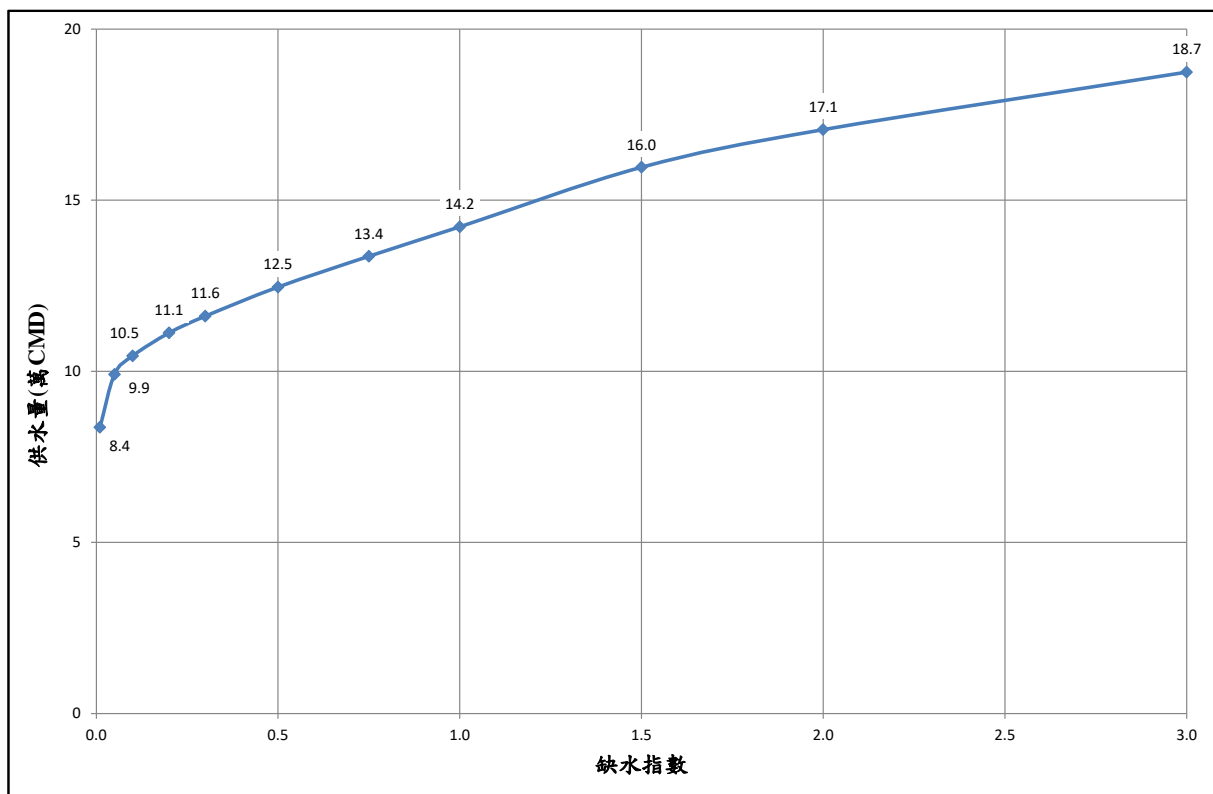


圖 3-3 蘭潭-仁義潭水庫系統於不同缺水指數所對應之供水量

## 2、曾文-烏山頭水庫串聯運用系統

由於曾文-烏山頭水庫系統係依據基準分配量進行供水，其公共給水年基準分配量為 1.2 億噸，故其供水能力約 32.9 萬 CMD。

## 3、南化水庫與高屏溪攔河堰聯合運用系統

為瞭解南化水庫與高屏溪攔河堰系統之供水能力，經分析不同缺水指數對應之供水量如圖 3-4 所示，分析結果指出：當缺水指數等於 0.1、0.5、1.0 時，南化水庫與高屏溪攔河堰聯合運用供水量則分別為 43.2、56.0、62.9 萬 CMD。由南化水庫與高屏溪攔河堰系統之缺水指數與供水量關係可知，其供水能力約為 62.9 萬 CMD (缺水指數為 1.0)。若以民國 106 年南部經理計畫所列供水能力 65.3 萬 CMD 進行比對分析，其對應之缺水指數則約為 1.25，即其潛在缺水風險較高，但甲仙堰與高屏堰之農業保留水量分別約每年 4.3 與 7.0 億噸，於缺水時期可供調度，故建議保留供水能力 65.3 萬 CMD。

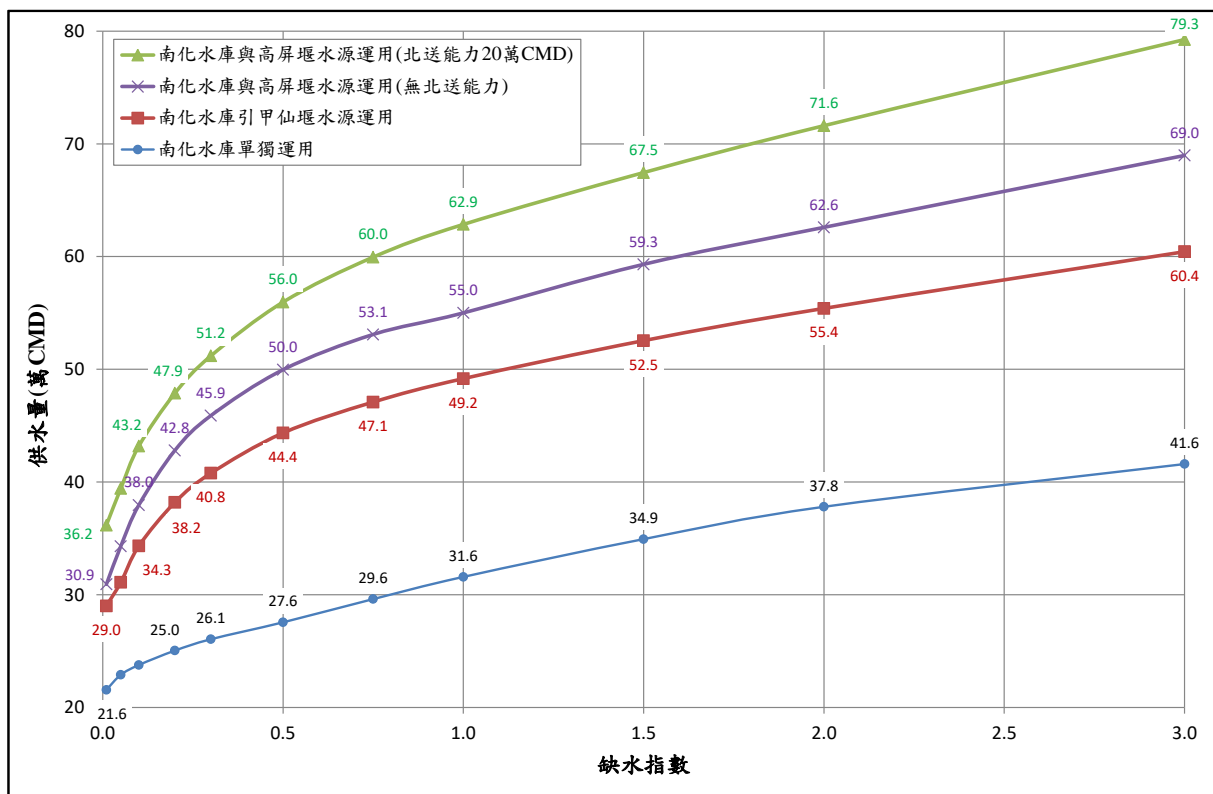


圖 3-4 南化高屏系統於不同缺水指數所對應之供水量

#### 4、鳳山水庫水源運用系統

為瞭解鳳山水庫系統之供水能力，經分析不同缺水指數對應之供水量如圖 3-5 所示，分析結果指出：當缺水指數等於 0.1、0.5、1.0 時，其供水量分別為 30.7、36.3、37.7 萬 CMD。由鳳山水庫系統之缺水指數與供水量關係可知，其供水能力約為 37.7 萬 CMD (缺水指數為 1.0)。若以民國 106 年南部經理計畫所列供水能力 30.0 萬 CMD 進行比對分析，其對應之缺水指數則約為 0.09，即其潛在缺水風險較低，考慮東港溪可供調用之大陂圳保留水量為每年 0.4 億噸，僅為原規劃供水量 30 萬 CMD (每年約 1.1 億噸)之 36%，無餘裕水量可供調度，故建議採用原規劃 SI 值較低之供水能力。

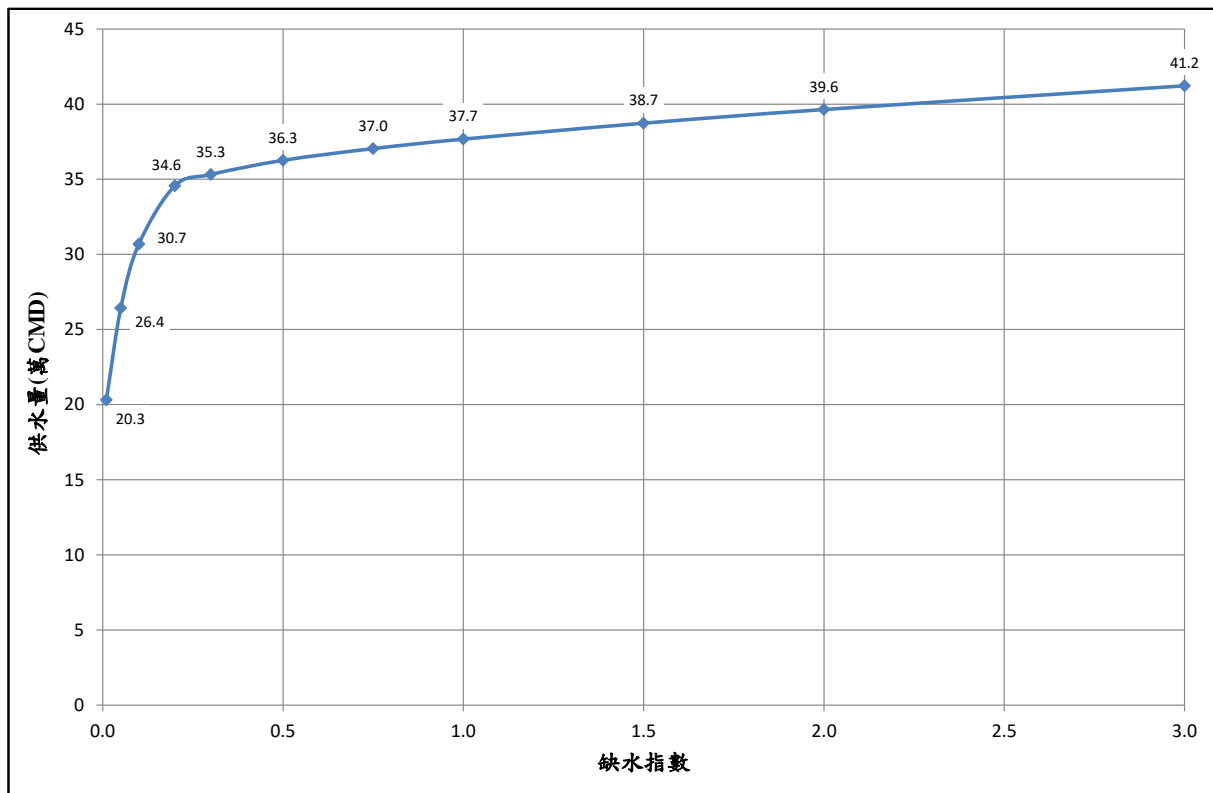


圖 3-5 鳳山水庫系統於不同缺水指數所對應之供水量

#### 5、牡丹水庫水源運用系統

為瞭解牡丹水庫系統之供水能力，經分析不同缺水指數對應之供水量如圖 3-6 所示，分析結果指出：當缺水指數等於 0.1、0.5、1.0 時，其供水量分別為 6.4、8.2、9.4 萬 CMD。由牡丹水

庫系統之缺水指數與供水量關係可知，其供水能力約為 9.4 萬 CMD (缺水指數為 1.0)。若以民國 106 年南部經理計畫所列供水能力 8.0 萬 CMD 進行比對分析，其對應之缺水指數則約為 0.44，即其潛在缺水風險較低，考慮其下游農業保留水量僅為計畫供水量 0.4 倍，無餘裕保留水量可供調度，故建議維持原規劃供水能力 8.0 萬 CMD。

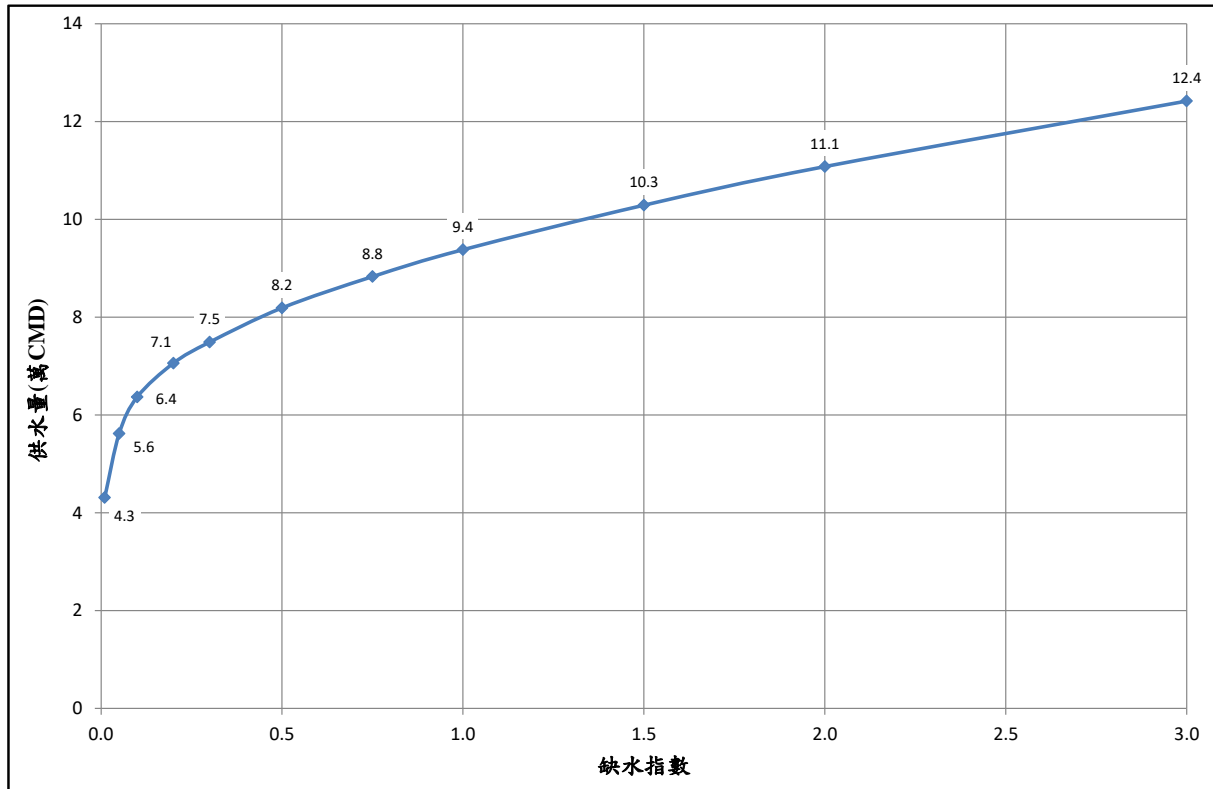


圖 3-6 牡丹水庫系統於不同缺水指數所對應之供水量

#### (四)現況與目標年南部區域水資源供需分析

採用「臺灣各區水資源經理基本計畫-核定本」(經濟部水利署，民國 110 年)內現況及目標年 125 年供需資料進行水源運用模擬，以下就各區水源供需情況進行說明。

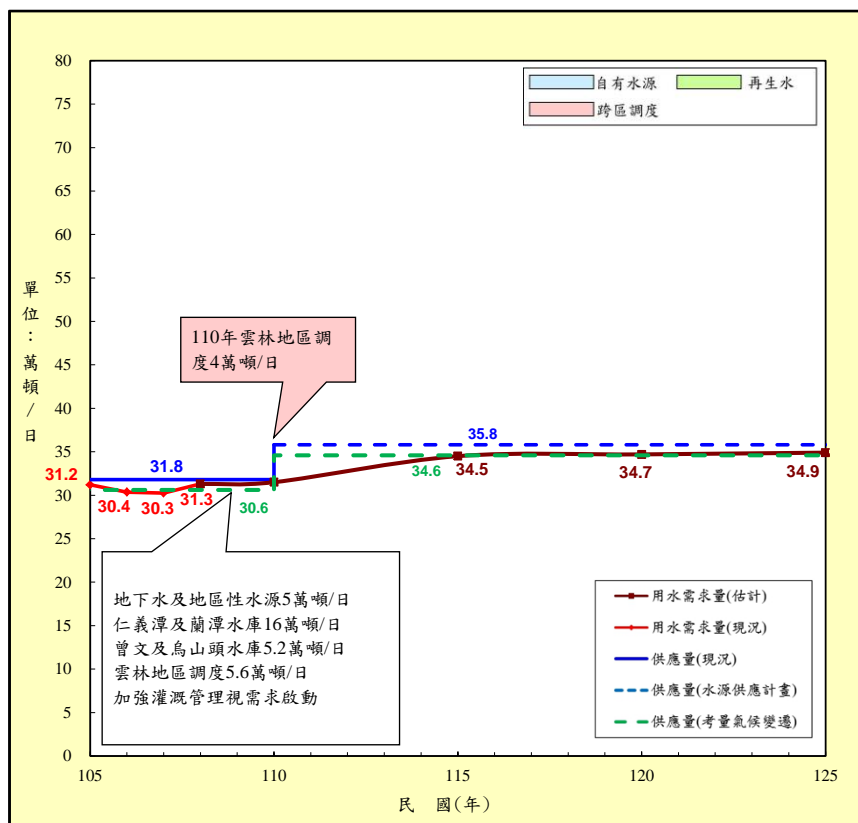
##### 1、南部區域各個縣市公共給水供需情況

嘉義地區公共給水供需如圖 3-7 所示，現況供水能力為 31.8 萬噸/日，尚可滿足現況 108 年用水需求 31.3 萬噸/日。而目標年 125 年用水需求增至 34.9 萬噸/日，將增加雲林地區水源調配 4.0 萬噸/日加以因應。

臺南地區公共給水供需如圖 3-8 所示，現況供水能力為 97.8 萬噸/日，尚可滿足現況 108 年用水需求 92.4 萬噸/日。而目標年 125 年用水需求增至 120.3 萬噸/日，將開發海淡廠、再生水、人工湖以及感潮河段水源等水源加以因應。

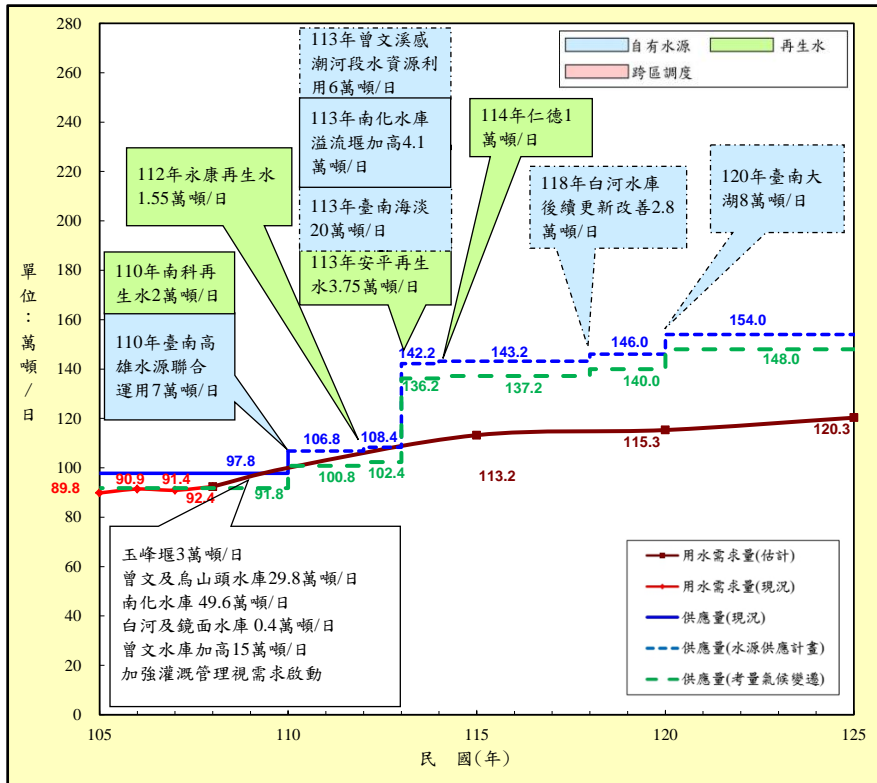
高雄地區公共給水供需如圖 3-9 所示，現況供水能力為 160.9 萬噸/日，尚可滿足現況 108 年用水需求 150.4 萬噸/日。而目標年 125 年用水需求增至 170.1 萬噸/日，將開發海淡廠、再生水以及感潮河段水源等水源加以因應。

屏東地區公共給水供需如圖 3-10 所示，現況供水能力為 19.5 萬噸/日，尚可滿足現況 108 年用水需求 18.4 萬噸/日。而目標年 125 年用水量需求增至 23.8 萬噸/日，將進一步開發地下水與隘寮溪水源加以因應。



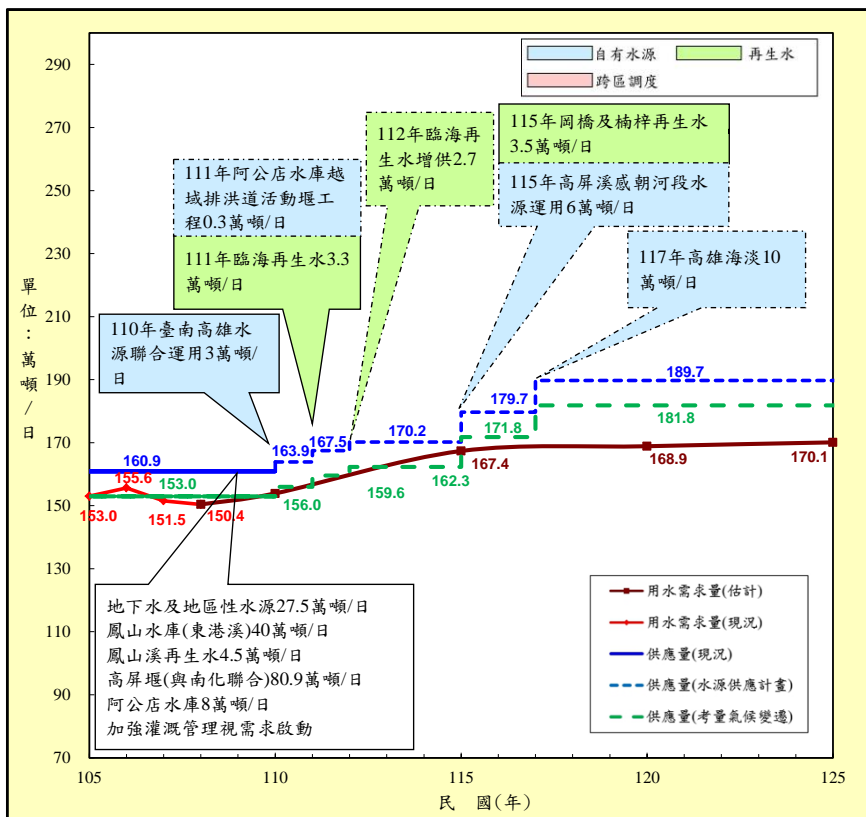
圖片來源：「臺灣各區水資源經理基本計畫-核定本」(經濟部，民國 110 年)

圖 3-7 嘉義地區公共給水供需圖



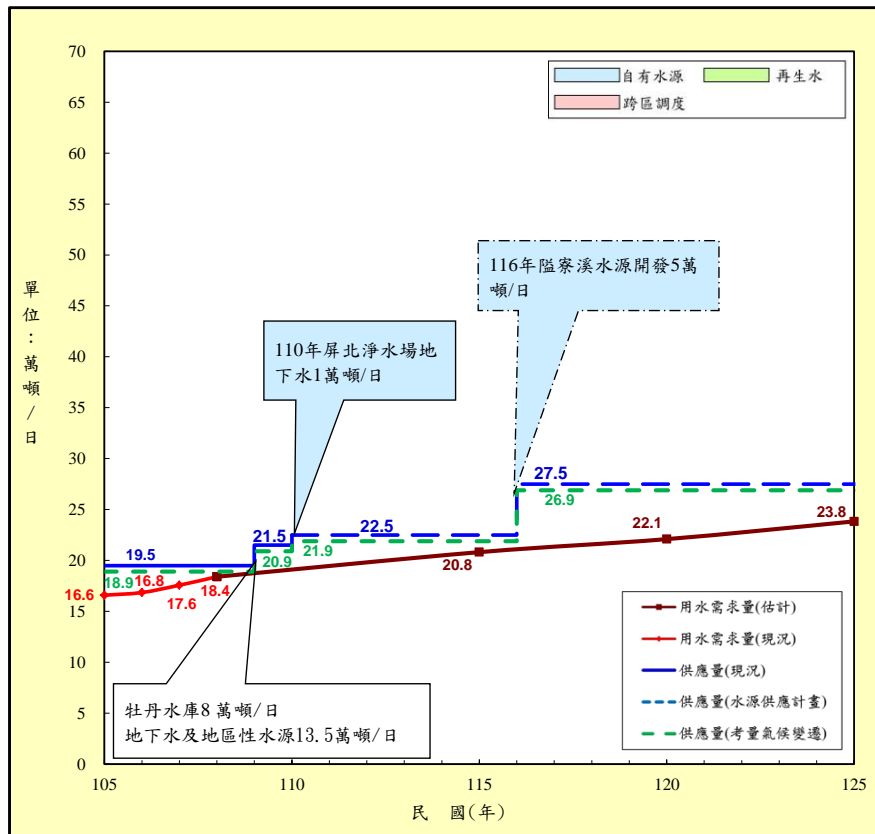
圖片來源：「臺灣各區水資源經理基本計畫-核定本」(經濟部，民國 110 年)

圖 3-8 臺南地區公共給水供需圖



圖片來源：「臺灣各區水資源經理基本計畫-核定本」(經濟部，民國 110 年)

圖 3-9 高雄地區公共給水供需圖



圖片來源：「臺灣各區水資源經理基本計畫-核定本」(經濟部，民國 110 年)

圖 3-10 屏東地區公共給水供需圖

## 2、各區水源供需調配情形

若依據台水公司 108 年實際供水量與歷史水文狀況進行供水調配，以作為枯旱風險分析之依據，南部區域各個縣市實際用水量與供水調配水量列如表 3-2 所示。

依據 108 年水資源經理計畫核定本，南部區域各個縣市於目標年 125 年水源量如表 3-3 所示。隨著經理計畫推動，許多水源設施將陸續上場，使得各個縣市供水量增加，而且相較於其需水量皆有所餘裕，以因應潛在極端事件之可能影響。針對水資源系統之餘裕水量，可將其轉為枯旱時期之穩定備援水量，並以降低供水風險為主要原則，擬定目標年 125 年南部區域各個縣市之水源調配水量如表 3-4 所示，並以供水調配後水量進行後續極端枯旱風險評估。



### 3、枯早備援水量

枯早時期穩定水量則綜合餘裕水量、高濁度備援水量、鄰近地區水源支援能力進行評估，南部區域各個縣市之枯早備援水量如表 3-5 所示。整體而言，南部區域於枯早時期尚可供水水源量約為 85 萬噸/日。

**表 3-2 南部區域各縣市現況用水量與供水系統供水量**

| 項目       |          | 嘉義          | 台南          | 高雄           | 屏東          | 合計           |
|----------|----------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 實際用水量    |          | <b>31.3</b> | <b>92.4</b> | <b>150.4</b> | <b>18.4</b> | <b>292.5</b> |
| 各水源系統供水量 | 地區性水源    | 2.8         | 0.2         | 21.5         | 10.7        | 35.2         |
|          | 濁水溪水源    | 5.0         |             |              |             | 5.0          |
|          | 蘭潭-仁義潭水庫 | 17.0        |             |              |             | 17.0         |
|          | 曾文-烏山頭水庫 | 6.5         | 39.5        |              |             | 46.0         |
|          | 玉峰堰      |             | 3.3         |              |             | 3.3          |
|          | 南化水庫-高屏堰 |             | 49.4        |              |             | 49.4         |
|          | 高屏堰      |             |             | 100.6        |             | 100.6        |
|          | 阿公店水庫    |             |             | 1.3          |             | 1.3          |
|          | 鳳山水庫     |             |             | 27.0         |             | 27.0         |
|          | 牡丹水庫     |             |             |              | 7.7         | 7.7          |
|          | 合計       | 31.3        | 92.4        | 150.4        | 18.4        | 292.5        |

註：單位為萬噸/日。

表 3-3 南部區域各縣市目標年用水需求與供水系統水源量

| 項目       |                        | 嘉義   | 台南    | 高雄    | 屏東   | 合計    |
|----------|------------------------|------|-------|-------|------|-------|
| 用水需求     |                        | 34.9 | 120.3 | 170.1 | 23.8 | 349.1 |
| 各水源系統水源量 | 地區性水源                  | 5.0  | 3.2   | 27.5  | 19.5 | 55.2  |
|          | 濁水溪水源                  | 9.6  |       |       |      | 9.6   |
|          | 蘭潭-仁義潭水庫               | 16.0 |       |       |      | 16.0  |
|          | 曾文-烏山頭水庫               | 5.2  | 44.8  |       |      | 50.0  |
|          | 玉峰堰                    |      | 3.0   |       |      | 3.0   |
|          | 南化水庫-高屏堰               |      | 60.7  | 8.7   |      | 69.4  |
|          | 台南大湖                   |      | 8.0   |       |      | 8.0   |
|          | 台南海淡廠                  |      | 20.0  |       |      | 20.0  |
|          | 臺南再生水(永康、安平、仁德)        |      | 8.3   |       |      | 8.3   |
|          | 高屏堰                    |      |       | 75.2  |      | 75.2  |
|          | 高雄再生水(臨海、楠梓2、鳳山再生水、岡橋) |      |       | 14.0  |      | 14.0  |
|          | 阿公店水庫                  |      |       | 8.3   |      | 8.3   |
|          | 感潮河段水資源利用              |      | 6.0   | 6.0   |      | 12.0  |
|          | 高雄海淡廠                  |      |       | 10.0  |      | 10.0  |
|          | 鳳山水庫                   |      |       | 40.0  |      | 40.0  |
|          | 牡丹水庫                   |      |       |       | 8.0  | 8.0   |
| 合計       |                        | 35.8 | 154.0 | 189.7 | 27.5 | 407.0 |

註：單位為萬噸/日。

表 3-4 南部區域各縣市目標年用水需求與供水系統水源常態供水量

| 項目       |                        | 嘉義   | 台南    | 高雄    | 屏東   | 合計    |
|----------|------------------------|------|-------|-------|------|-------|
| 用水需求     |                        | 34.9 | 120.3 | 170.1 | 23.8 | 349.1 |
| 各水源系統水源量 | 地區性水源                  | 5.0  | 0.4   | 27.5  | 16.1 | 49.0  |
|          | 濁水溪水源                  | 9.6  |       |       |      | 9.6   |
|          | 蘭潭-仁義潭水庫               | 15.1 |       |       |      | 15.1  |
|          | 曾文-烏山頭水庫               | 5.2  | 44.8  |       |      | 50.0  |
|          | 玉峰堰                    |      | 3.0   |       |      | 3.0   |
|          | 南化水庫-高屏堰               |      | 47.7  | 16.0  |      | 63.7  |
|          | 台南大湖                   |      | 6.0   |       |      | 6.0   |
|          | 台南海淡廠                  |      | 10.0  |       |      | 10.0  |
|          | 臺南再生水(永康、安平、仁德)        |      | 5.4   |       |      | 5.4   |
|          | 高屏堰                    |      |       | 65.6  |      | 65.6  |
|          | 高雄再生水(臨海、楠梓2、鳳山再生水、岡橋) |      |       | 12.0  |      | 12.0  |
|          | 阿公店水庫                  |      |       | 6.0   |      | 6.0   |
|          | 感潮河段水資源利用              |      | 3.0   | 3.0   |      | 6.0   |
|          | 高雄海淡廠                  |      |       | 5.0   |      | 5.0   |
|          | 鳳山水庫                   |      |       | 35.0  |      | 35.0  |
|          | 牡丹水庫                   |      |       |       | 7.7  | 7.7   |
| 合計       |                        | 34.9 | 120.3 | 170.1 | 23.8 | 349.1 |

註：單位為萬噸/日。

表 3-5 南部區域各個縣市民國 125 年枯旱時期可供水之備援水量

| 項目     |                        | 嘉義  | 台南   | 高雄   | 屏東  | 合計   |
|--------|------------------------|-----|------|------|-----|------|
| 枯旱備援水量 | 地區性水源                  |     | 2.8  |      | 3.4 | 6.2  |
|        | 亢旱水井                   |     |      | 19.0 |     | 19.0 |
|        | 雲林湖山水園支援               | 4.0 |      |      |     | 4.0  |
|        | 台南海淡廠                  |     | 10.0 |      |     | 10.0 |
|        | 臺南再生水(永康、安平、仁德)        |     | 2.9  |      |     | 2.9  |
|        | 高雄再生水(臨海、浦梓2、鳳山再生水、岡橋) |     |      | 2.0  |     | 2.0  |
|        | 感潮河段水資源利用              |     | 3.0  | 3.0  |     | 6.0  |
|        | 高雄伏流水                  |     |      | 25.0 |     | 25.0 |
|        | 高雄海淡廠                  |     |      | 5.0  |     | 5.0  |
|        | 鳳山水庫                   |     |      | 5.0  |     | 5.0  |
|        | 合計                     | 4.0 | 18.7 | 59.0 | 3.4 | 85.1 |

註：<sup>1</sup>備援水量單位為萬噸/日；<sup>2</sup>高雄伏流水 25.0 萬噸/日為枯旱時期可增供之水量(已扣除常態備援水量)。

## 二、極端氣候影響下水資源衝擊評估

因應極端事件之發生頻率與強度可能受到極端氣候影響而有所增加，有必要探討極端事件特性與其可能對於水資源供需系統造成之衝擊。為此，蒐集整理計畫區域內相關雨量資料，採用標準化雨量指數分析極端事件特性，並進一步評估極端事件對於水資源供需系統所造成之衝擊，以瞭解極端事件強度與其導致缺水特性之關係。針對極端事件之特性分析與水資源衝擊評估結果分別說明如下：

### (一)極端事件之特性分析

採用標準化雨量指數作為雨量資料分析工具，以探討極端事件之特性，詳細分析方法說明如下：

參考國際間極端事件評估方法，主要係將雨量資料轉換為標準化雨量指數，以建立乾旱事件分級程序，再決定乾旱嚴重程度(輕微、中度、嚴重、極端)，作為判斷是否發生極端事件之依據。而標準化雨量指數係依據機率分布進行雨量資料之擬合，再利用擬合之機率分布將雨量資料轉換為 Z 值(如圖 3-11)，進而決定乾旱嚴重程度，例如：中度乾燥、非常乾燥以及極度乾燥。

標準化雨量指數之計算流程可分成兩步驟：(1)以機率分布進行雨量資料之擬合，而分布參數則可藉由動差法或最大概似法等參

數推估方法進行推求，決定參數後即可得知機率分布之累積機率函數；(2)藉由常態機率分布之累積機率反函數將機率分布之累積機率函數對應至常態分布之 Z 值，其即為標準化雨量指數。其中，機率分布主要係採用伽瑪分布進行月雨量資料擬合，該分布左邊界為零，不會出現雨量為負值之不合理情況，且能夠合理描述月雨量統計特性，在國際上亦被廣泛應用於月雨量擬合。

針對乾旱嚴重程度研判之部分，參考世界氣象組織(WMO, 2012)於乾旱等級劃分之作法，依據標準化雨量指數之數值進行雨量狀態分級(表 3-6)，以辨識出可能造成嚴重缺水情況之極端事件。例如：當標準化雨量指數介於-1.99 與-1.50 之間，其雨量狀態歸類為非常乾燥情況；若以發生機率而言，剛好屬於非常乾燥情況之發生機率約為 4.40%，而發生非常乾燥以上(含)之發生機率約為 6.68%，換算其頻率年為 14.97 年。國際上應用標準化雨量指數推求乾旱頻率年相關文獻可參考 WMO (2012)與 Singleton (2012)。

此外，參考國內外對於極端事件之定義：當某事件之天氣變量低於第 10 百分位數或高於第 90 百分位數，即可將其視為極端事件。而標準化雨量指數約等於-1.28 時，其累積機率大約等於 10% (換算頻率年相當於 10 年)，其雨量狀態符合極端定義。後續將採用-1.28 作為標準化雨量指數之門檻值，以利極端事件研判與特性分析。

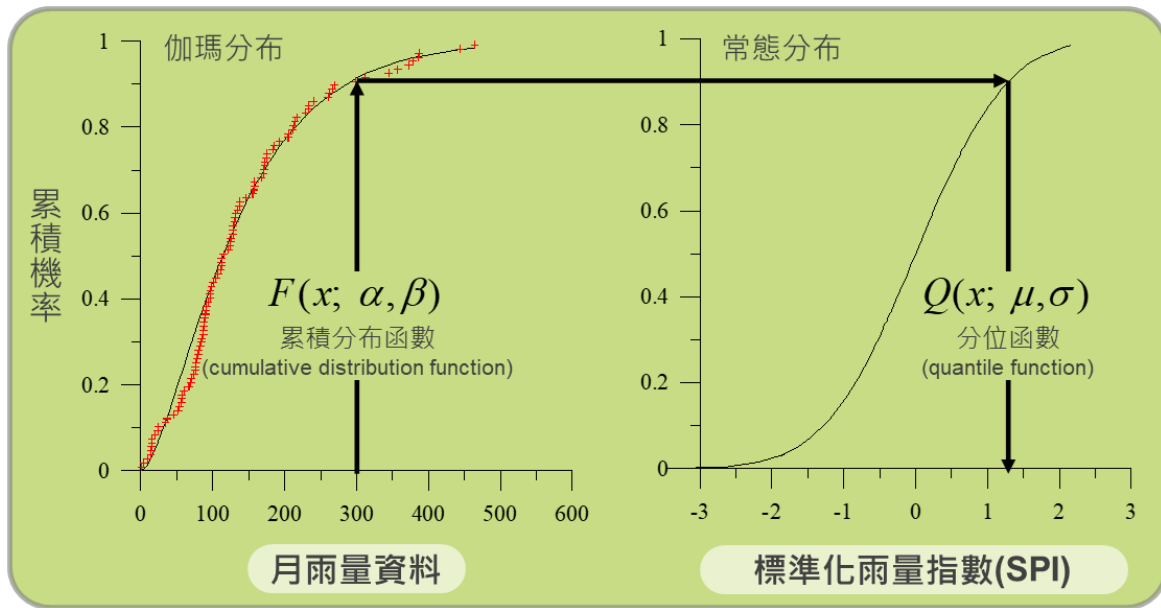


圖 3-11 標準化雨量指數之計算流程示意圖

表 3-6 雨量狀態分級對照表

| 雨量狀態 | 極度乾燥               | 非常乾燥               | 中度乾燥               | 正常狀態               | 中度溼潤               | 非常溼潤               | 極度溼潤               |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 指數範圍 | ~-2.00             | -1.99~-1.50        | -1.49~-1.00        | -0.99~0.99         | 1.00~1.49          | 1.50~1.99          | 2.00~              |
| 發生機率 | 2.28%              | 4.40%              | 9.19%              | 68.26%             | 9.19%              | 4.40%              | 2.28%              |
| 累積機率 | 2.28%<br>(43.86 年) | 6.68%<br>(14.97 年) | 15.87%<br>(6.30 年) | 83.89%<br>(1.19 年) | 93.19%<br>(1.07 年) | 97.67%<br>(1.02 年) | 97.72%<br>(1.02 年) |

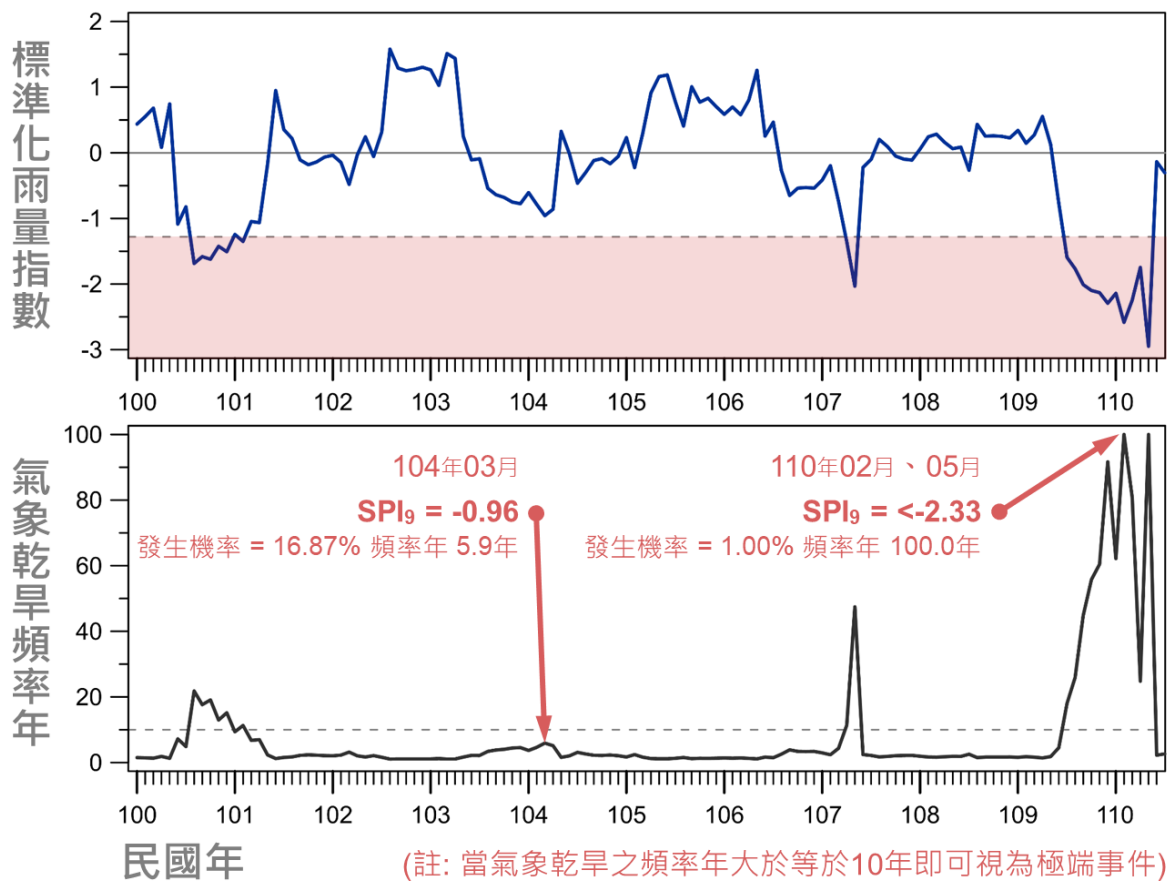
註：<sup>1</sup>括號內數字為頻率年；<sup>2</sup>國際上應用標準化雨量指數推求氣象乾旱頻率年之相關文獻可參考 WMO (2012)與 Singleton (2012)。

為探討南部區域近年(民國 100 至 110 年)之極端事件特性，依據各縣市主要水源設施之上游集水區雨量資料，進行標準化雨量指數計算，以瞭解極端事件下集水區雨量狀態(乾燥程度)與其對應之氣象乾旱頻率年，可供後續水資源衝擊評估作為參考。以臺南地區為例，其係先各別計算曾文-烏山頭水庫、南化水庫以及甲仙堰上游集水區之標準化雨量指數，再採用各個集水區面積作為權重推估臺南地區整體之標準化雨量指數。

針對南部區域而言，因民國 103 至 104 年與民國 109 至 110 年乾旱事件為近年影響層面較廣之乾旱事件，故聚焦此兩場乾旱事件進行說明與比較，針對各個縣市分析結果說明如下：

## 1、嘉義地區

圖 3-12 為嘉義地區近年各月份標準化雨量指數與對應之氣象乾旱頻率年，標準化雨量指數越小則代表集水區之雨量狀態越為乾燥，而越乾燥之雨量狀態則對應至越大之氣象乾旱頻率年。其中，圖中標準化雨量指數等於-1.28 與氣象乾旱頻率年等於 10 年分別採用虛線加以註記，若標準化雨量指數低於虛線或氣象乾旱頻率年高於虛線則可視為極端事件。



註：受限於資料長度不足，以發生機率 1.00%作為下限值，避免探討過度極端與高度不確定性之情況。

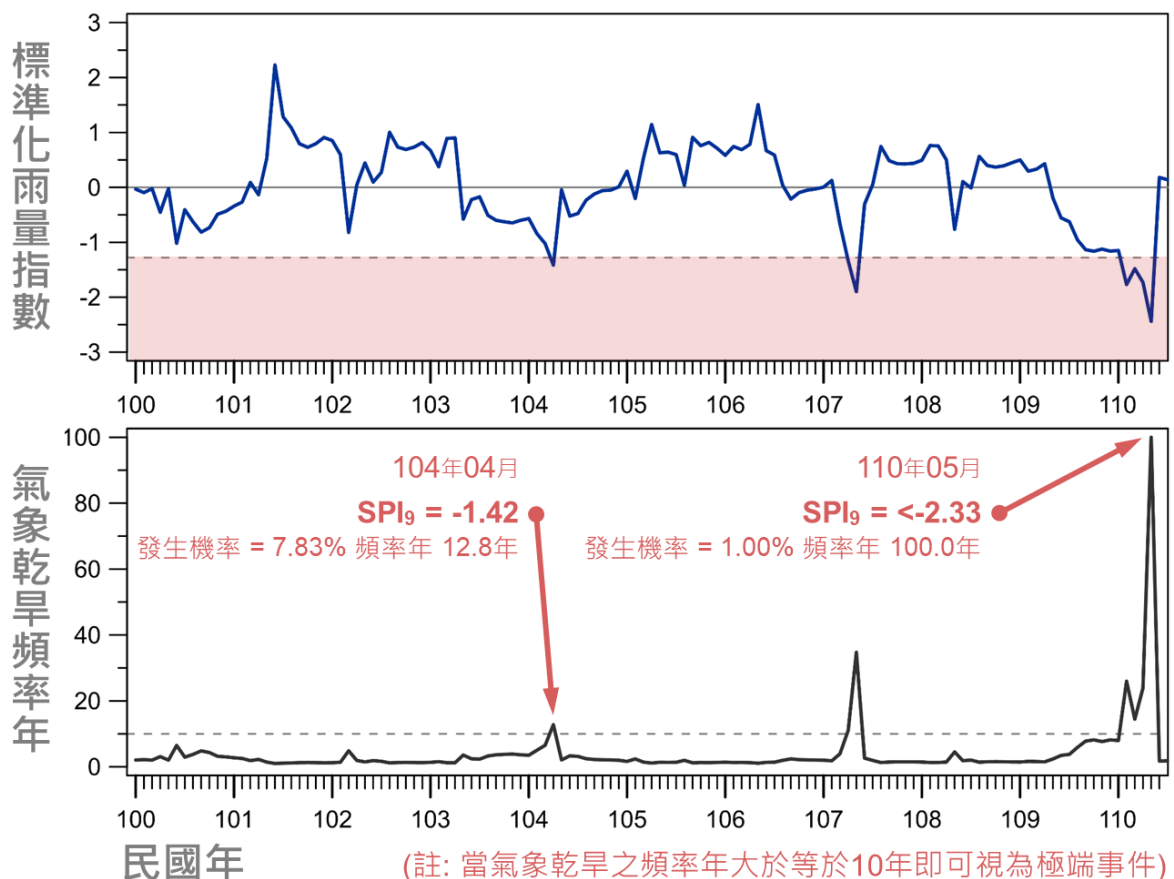
圖 3-12 嘉義地區近年之標準化雨量指數與氣象乾旱頻率年

嘉義地區於民國 103 至 104 年乾旱事件期間，標準化雨量指數最小值(-0.96)發生於 104 年 3 月，換算其發生機率約為 16.87%，而對應之氣象乾旱頻率年則約為 5.9 年；而民國 109 至 110 年乾旱事件期間，標準化雨量指數最小值(-2.33)發生於 110 年 2 月與 5 月，換算其發生機率僅約 1.00%，而對應之氣象乾

早頻率年則達 100.0 年。以極端事件標準而言，民國 103 至 104 年乾旱事件之氣象乾旱頻率年約為 5.9 年，因低於 10 年門檻值，故不屬於極端乾旱事件(強度不足)；而民國 109 至 110 年乾旱事件之氣象乾旱頻率年則明顯高於 10 年門檻值，其屬於 100.0 年一遇之極端乾旱事件。

## 2、臺南地區

圖 3-13 為臺南地區近年各月份標準化雨量指數與對應之氣象乾旱頻率年，標準化雨量指數越小則代表集水區之雨量狀態越為乾燥，而越乾燥之雨量狀態則對應至越大之氣象乾旱頻率年。其中，圖中標準化雨量指數等於-1.28 與氣象乾旱頻率年等於 10 年分別採用虛線加以註記，若標準化雨量指數低於虛線或氣象乾旱頻率年高於虛線則可視為極端事件。



註：受限於資料長度不足，以發生機率 1.00%作為下限值，避免探討過度極端與高度不確定性之情況。

圖 3-13 臺南地區近年之標準化雨量指數與氣象乾旱頻率年

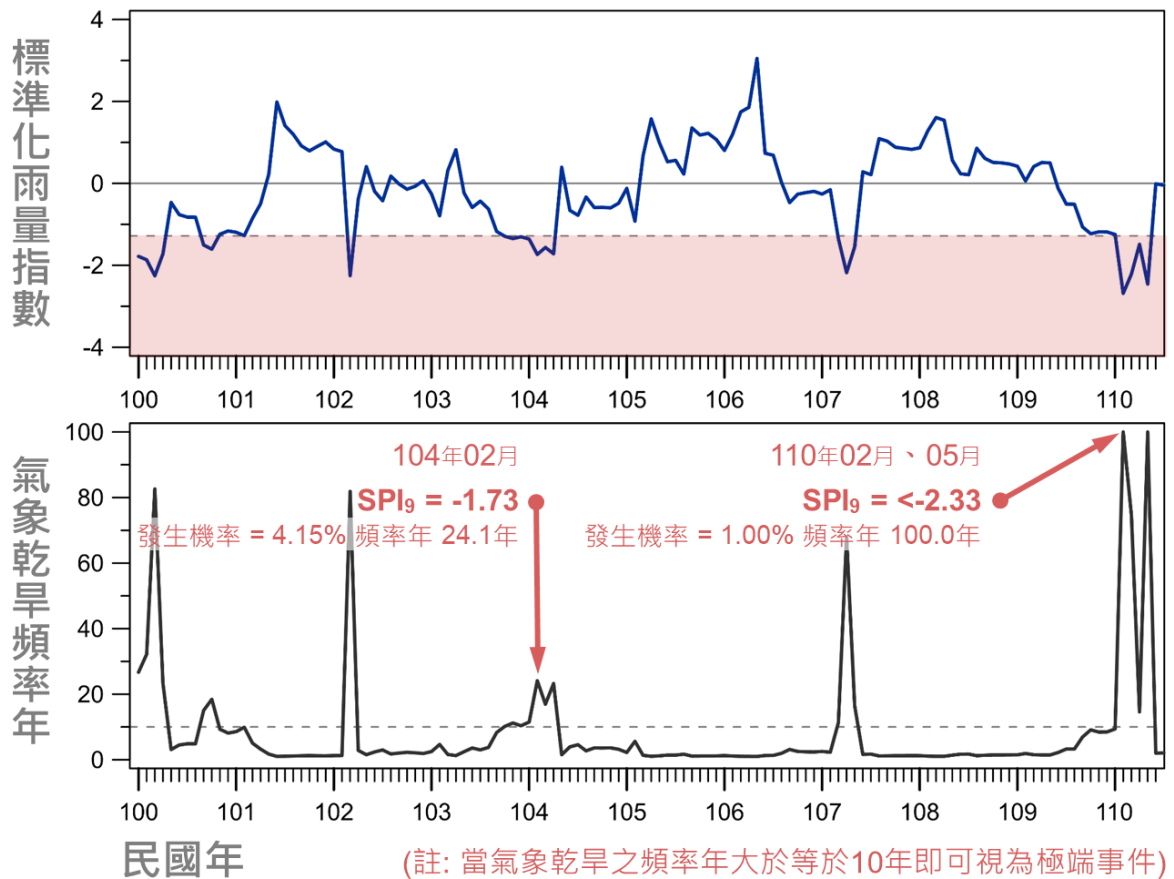
臺南地區於民國 103 至 104 年乾旱事件期間，標準化雨量指數最小值(-1.42)發生於 104 年 4 月，換算其發生機率約為 7.83%，而對應之氣象乾旱頻率年則約為 12.8 年；而民國 109 至 110 年乾旱事件期間，標準化雨量指數最小值(-2.33)發生於 110 年 5 月，換算其發生機率僅約 1.00%，而對應之氣象乾旱頻率年則達 100.0 年。以極端事件標準而言，民國 103 至 104 年乾旱事件之氣象乾旱頻率年約為 12.8 年，其頻率年高於 10 年，屬於極端乾旱事件；而民國 109 至 110 年乾旱事件之氣象乾旱頻率年則明顯高於 10 年門檻值，其屬於 100.0 年一遇之極端乾旱事件。

### 3、高雄地區

圖 3-14 為高雄地區近年各月份標準化雨量指數與對應之氣象乾旱頻率年，標準化雨量指數越小則代表集水區之雨量狀態越為乾燥，而越乾燥之雨量狀態則對應至越大之氣象乾旱頻率年。其中，圖中標準化雨量指數等於-1.28 與氣象乾旱頻率年等於 10 年分別採用虛線加以註記，若標準化雨量指數低於虛線或氣象乾旱頻率年高於虛線則可視為極端事件。

高雄地區於民國 103 至 104 年乾旱事件期間，標準化雨量指數最小值(-1.73)發生於 104 年 2 月，換算其發生機率約為 4.15%，而對應之氣象乾旱頻率年則約為 24.1 年；而民國 109 至 110 年乾旱事件期間，標準化雨量指數最小值(-2.33)發生於 110 年 2 月與 5 月，換算其發生機率僅約 1.00%，而對應之氣象乾旱頻率年則達 100.0 年。以極端事件標準而言，民國 103 至 104 年乾旱事件與民國 109 至 110 年乾旱事件之氣象乾旱頻率年皆高於 10 年門檻值，其分別屬於 24.1 年與 100.0 年一遇之極端乾旱事件。





註：受限於資料長度不足，以發生機率 1.00%作為下限值，避免探討過度極端與高度不確定性之情況。

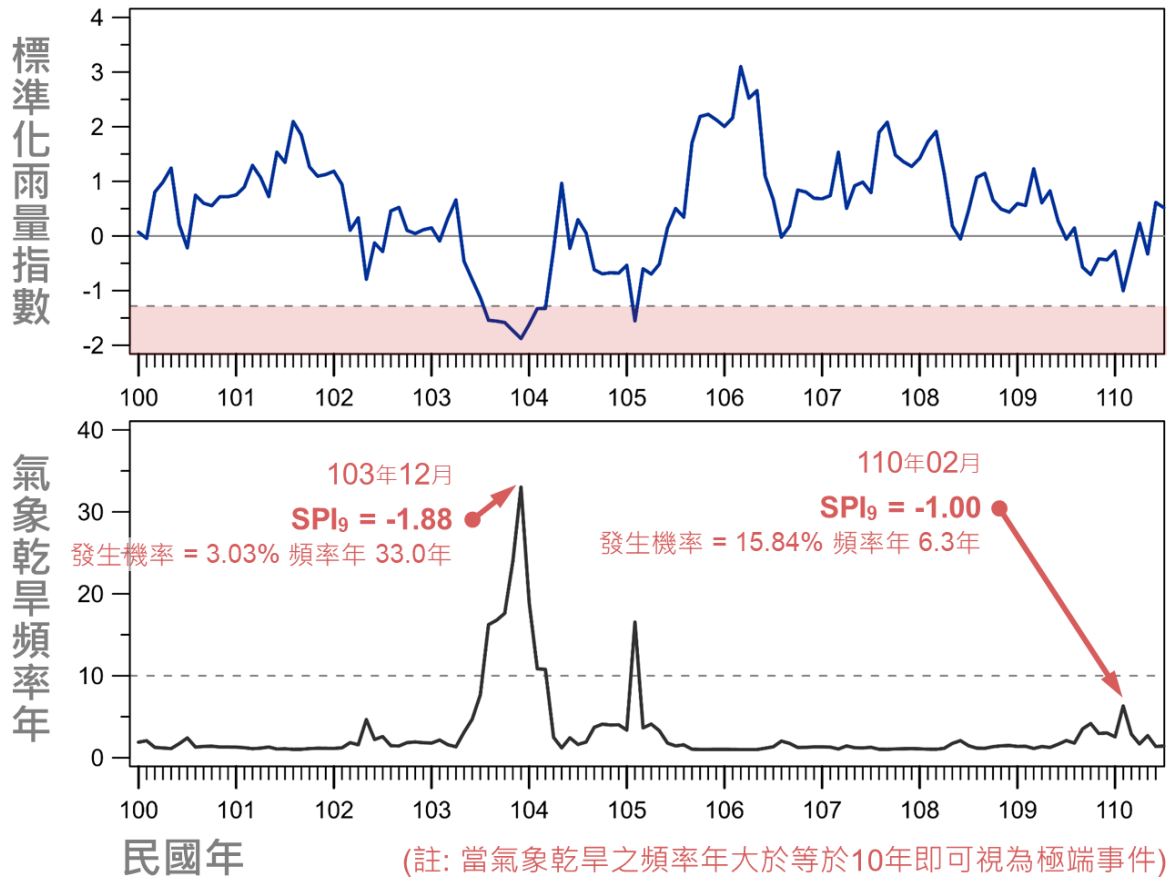
圖 3-14 高雄地區近年之標準化雨量指數與氣象乾旱頻率年

#### 4、屏東地區

圖 3-15 為屏東地區近年各月份標準化雨量指數與對應之氣象乾旱頻率年，標準化雨量指數越小則代表集水區之雨量狀態越為乾燥，而越乾燥之雨量狀態則對應至越大之氣象乾旱頻率年。其中，圖中標準化雨量指數等於-1.28 與氣象乾旱頻率年等於 10 年分別採用虛線加以註記，若標準化雨量指數低於虛線或氣象乾旱頻率年高於虛線則可視為極端事件。

屏東地區於民國 103 至 104 年乾旱事件期間，標準化雨量指數最小值(-1.88)發生於 103 年 12 月，換算其發生機率約為 3.03%，而對應之氣象乾旱頻率年則約為 33.0 年；而民國 109 至 110 年乾旱事件期間，標準化雨量指數最小值(-1.00)發生於 110 年 2 月，換算其發生機率約為 15.84%，而對應之氣象乾旱頻率年則約為 6.3 年。以極端事件標準而言，民國 103 至 104 年乾

旱事件之氣象乾旱頻率年約為 33.0 年，因明顯高於 10 年門檻值，故屬於極端乾旱事件；而民國 109 至 110 年乾旱事件之氣象乾旱頻率年則低於 10 年門檻值，其不屬於極端乾旱事件(強度不足)。



註：受限於資料長度不足，以發生機率 1.00% 作為下限值，避免探討過度極端與高度不確定性之情況。

圖 3-15 屏東地區近年之標準化雨量指數與氣象乾旱頻率年

藉由分析民國 103 至 104 年與民國 109 至 110 年乾旱事件對於南部區域各縣市造成之氣象乾旱頻率年(表 3-7)，以瞭解兩場乾旱事件在空間上與程度上之異同。民國 103 至 104 年乾旱事件對於嘉義、臺南、高雄以及屏東造成之氣象乾旱頻率年分別為 5.9、12.8、24.1 以及 33.0 年，其頻率年由北至南有增加情況，其中又以臺南、高雄以及屏東之頻率年較高，三者頻率年皆高於 10 年，符合極端事件之定義；而民國 109 至 110 年乾旱事件對於嘉義、臺南、高雄以及屏東造成之氣象乾旱頻率年分別為 100.0、100.0、100.0

以及 6.3 年，相較於民國 103 至 104 乾旱事件，除屏東地區以外，其餘各地區之氣象乾旱頻率年皆有顯著增幅。

若以南部區域整體而言，民國 103 至 104 年乾旱造成之氣象乾旱頻率年為 18.2 年，而民國 109 至 110 年乾旱則造成更加顯著之乾燥狀態，其氣象乾旱頻率年高達 100.0 年。此兩場事件分別在南部區域導致大約二十年一遇與百年一遇程度之乾旱事件，嚴重衝擊南部區域之供水穩定，突顯備援能力評估規劃之重要性。

表 3-7 近年主要乾旱事件下南部區域各縣市之氣象乾旱頻率年

| 地區 | 氣象乾旱頻率年           |                   |
|----|-------------------|-------------------|
|    | 民國 103 至 104 乾旱事件 | 民國 109 至 110 乾旱事件 |
| 嘉義 | 5.9               | <b>100.0</b>      |
| 臺南 | <b>12.8</b>       | <b>100.0</b>      |
| 高雄 | <b>24.1</b>       | <b>100.0</b>      |
| 屏東 | <b>33.0</b>       | 6.3               |
| 南部 | <b>18.2</b>       | <b>100.0</b>      |

註：<sup>1</sup>氣象乾旱頻率年係基於 SPI<sub>9</sub>(9 個月累積雨量)分析而得，其單位為年；<sup>2</sup>針對時間尺度別採用 1 至 12 個月進行測試，分析結果指出 9 個月之時間尺度最適合應用於辨識氣象乾旱；<sup>3</sup>粗體與底線標註數字代表其頻率年符合極端事件之特性；<sup>4</sup>南部區域氣象乾旱頻率年係依據各縣市氣象乾旱頻率年與其集水區面積占南部整體集水區面積之比例進行計算。

## (二)極端氣候影響下水資源衝擊評估

為釐清氣象乾旱事件與水資源供需衝擊之關聯性，針對南部區域各個縣市之標準化雨量指數與各月份缺水率進行相關性分析，以探討兩者關聯程度與可預測程度。各縣市分析結果說明如下：

### 1、嘉義地區

嘉義地區標準化雨量指數與各月份缺水率之關聯分析結果(圖 3-16(a))指出：若採用全部資料進行相關性分析，因資料中包含雨量豐沛、無缺水或少量缺水情況，導致標準化雨量指數與各月份缺水率之相關係數僅為-0.26，屬於低度(相關係數之絕對值小於 0.3)負相關。

進一步評估標準化雨量指數於不同延遲時間與各月份缺水率之關係(圖 3-16(b))，以探討當月標準化雨量指數對於未來 1 至 12 個月缺水率之預測能力，結果顯示：隨著延遲時間提前愈

多，其預測能力愈低，相關係數由-0.26 先逐漸遞增至 0.0 (無相關)再持續增加至 0.15 左右。

此外，篩選出同時符合乾燥(標準化雨量指數為負)與缺水條件(缺水率大於零)之資料，並將符合條件之資料劃分為許多等間距之網格，以搜尋方式找出標準化雨量指數與缺水率相關係數最高之範圍，並將該範圍以虛線標示，以探討兩者之關聯性(圖 3-16(c))，其分析結果指出：在乾燥與缺水條件下，標準化雨量指數與各月份缺水率之相關係數可達為-0.57，屬於高度(相關係數之絕對值大於 0.5)負相關。

整體而言，若採用全部資料進行相關性分析，標準化雨量指數與各月份缺水率屬於低度負相關，而標準化雨量指數對於未來 1 至 12 個月缺水率之預測能力，隨著延遲時間拉長其預測能力愈低；若在乾燥與缺水條件下，標準化雨量指數與各月份缺水率則屬於高度負相關。

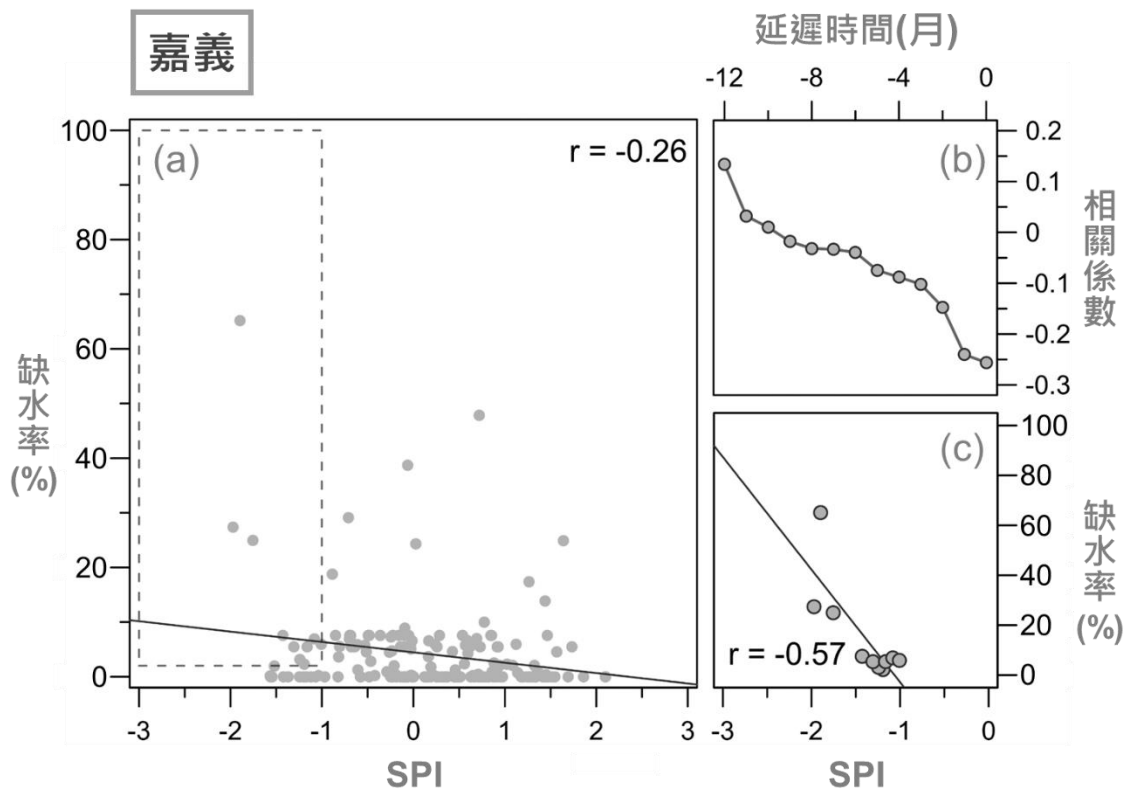


圖 3-16 嘉義地區標準化雨量指數與各月份缺水率之關聯程度

## 2、臺南地區

臺南地區標準化雨量指數與各月份缺水率之關聯分析結果(圖 3-17(a))指出：若採用全部資料進行相關性分析，因資料中包含雨量豐沛、無缺水或少量缺水情況，導致標準化雨量指數與各月份缺水率之相關係數僅為 $-0.33$ ，屬於中度(相關係數之絕對值介於 0.3 至 0.5)負相關。

進一步評估標準化雨量指數於不同延遲時間與各月份缺水率之關係(圖 3-17(b))，以探討當月標準化雨量指數對於未來 1 至 12 個月缺水率之預測能力，結果顯示：隨著延遲時間提前愈多，其預測能力愈低，相關係數由 $-0.33$  逐漸遞增至 0.0 (無相關)。

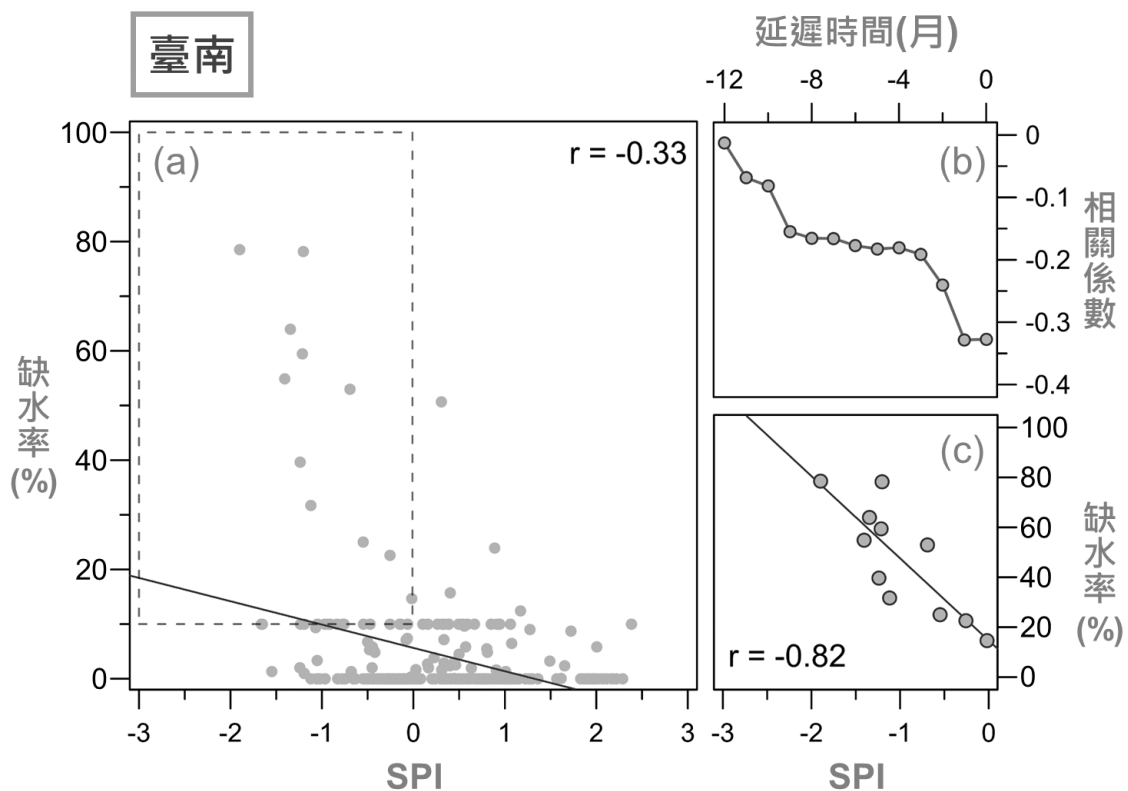


圖 3-17 臺南地區標準化雨量指數與各月份缺水率之關聯程度

此外，篩選出同時符合乾燥(標準化雨量指數為負)與缺水條件(缺水率大於零)之資料，並將符合條件之資料劃分為許多等間距之網格，以搜尋方式找出標準化雨量指數與缺水率相關係數

最高之範圍，並將該範圍以虛線標示，以探討兩者之關聯性(圖 3-17(c))，其分析結果指出：在乾燥與缺水條件下，標準化雨量指數與各月份缺水率之相關係數可達為 $-0.82$ ，屬於高度(相關係數之絕對值大於 0.5)負相關。

整體而言，若採用全部資料進行相關性分析，標準化雨量指數與各月份缺水率屬於中度負相關，而標準化雨量指數對於未來 1 至 12 個月缺水率之預測能力，隨著延遲時間拉長其預測能力愈低；若在乾燥與缺水條件下，標準化雨量指數與各月份缺水率則屬於高度負相關。

### 3、高雄地區

高雄地區標準化雨量指數與各月份缺水率之關聯分析結果(圖 3-18(a))指出：若採用全部資料進行相關性分析，因資料中包含雨量豐沛、無缺水或少量缺水情況，導致標準化雨量指數與各月份缺水率之相關係數僅為 $-0.09$ ，屬於低度(相關係數之絕對值小於 0.3)負相關。

進一步評估標準化雨量指數於不同延遲時間與各月份缺水率之關係(圖 3-18(b))，以探討當月標準化雨量指數對於未來 1 至 12 個月缺水率之預測能力，結果顯示：隨著延遲時間提前愈多，其預測能力愈低，相關係數由 $-0.09$  先逐漸遞增至 0.0(無相關)再持續增加至 0.1 左右後而開始減少。

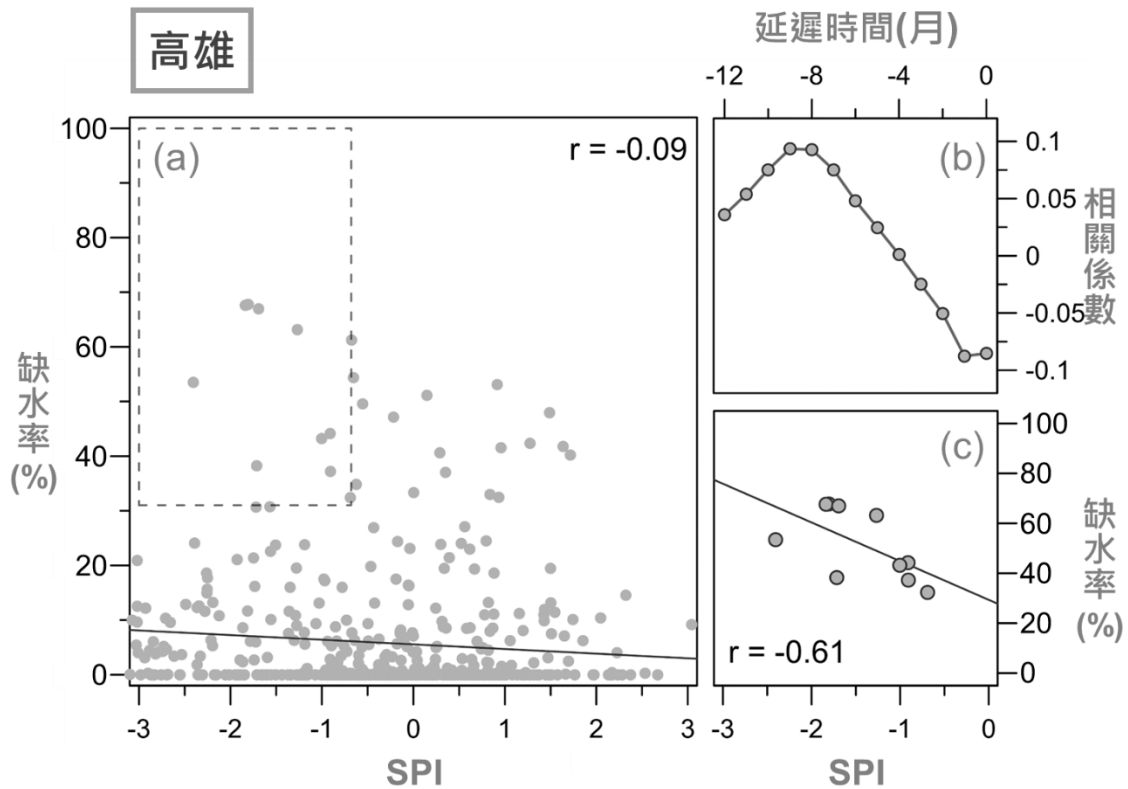


圖 3-18 高雄地區標準化雨量指數與各月份缺水率之關聯程度

此外，篩選出同時符合乾燥(標準化雨量指數為負)與缺水條件(缺水率大於零)之資料，並將符合條件之資料劃分為許多等間距之網格，以搜尋方式找出標準化雨量指數與缺水率相關係數最高之範圍，並將該範圍以虛線標示，以探討兩者之關聯性(圖 3-18(c))，其分析結果指出：在乾燥與缺水條件下，標準化雨量指數與各月份缺水率之相關係數可達為-0.61，屬於高度(相關係數之絕對值大於 0.5)負相關。

整體而言，若採用全部資料進行相關性分析，標準化雨量指數與各月份缺水率屬於低度負相關，而標準化雨量指數對於未來 1 至 12 個月缺水率之預測能力，隨著延遲時間拉長其預測能力愈低；若在乾燥與缺水條件下，標準化雨量指數與各月份缺水率則屬於高度負相關。

#### 4、屏東地區

屏東地區標準化雨量指數與各月份缺水率之關聯分析結果(圖 3-19(a))指出：若採用全部資料進行相關性分析，因資料中包含雨量豐沛、無缺水或少量缺水情況，導致標準化雨量指數與各月份缺水率之相關係數僅為-0.31，屬於中度(相關係數之絕對值介於 0.3 至 0.5)負相關。

進一步評估標準化雨量指數於不同延遲時間與各月份缺水率之關係(圖 3-19(b))，以探討當月標準化雨量指數對於未來 1 至 12 個月缺水率之預測能力，結果顯示：隨著延遲時間提前，相關係數由-0.31 逐漸減少至-0.40 左右，在延遲時間提前 2 個月時預測能力最高，隨著延遲時間提前愈多，相關係數逐漸遞增至 0.0 (無相關)再持續增加至 0.05 左右。

此外，篩選出同時符合乾燥(標準化雨量指數為負)與缺水條件(缺水率大於零)之資料，並將符合條件之資料劃分為許多等間距之網格，以搜尋方式找出標準化雨量指數與缺水率相關係數最高之範圍，並將該範圍以虛線標示，以探討兩者之關聯性(圖 3-19(c))，其分析結果指出：在乾燥與缺水條件下，標準化雨量指數與各月份缺水率之相關係數可達為-0.48，屬於中度(相關係數之絕對值介於 0.3 至 0.5)負相關。

整體而言，若採用全部資料進行相關性分析，標準化雨量指數與各月份缺水率屬於中度負相關，而標準化雨量指數對於未來 1 至 12 個月缺水率之預測能力，在延遲時間提前 2 個月時預測能力最高，然後隨著延遲時間拉長其預測能力愈低；若在乾燥與缺水條件下，標準化雨量指數與各月份缺水率亦屬於中度負相關。



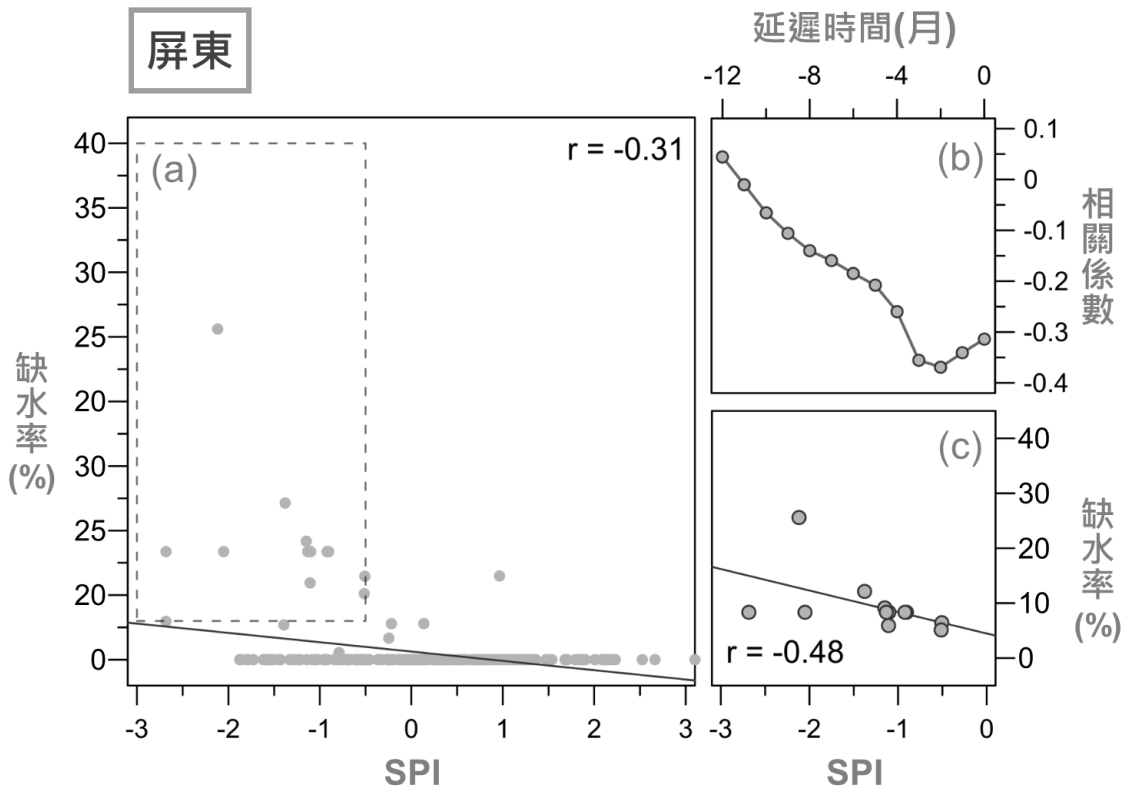


圖 3-19 屏東地區標準化雨量指數與各月份缺水率之關聯程度

## 第四章 乾旱 SDF 曲線產製與分析

此章節目的在於探討極端枯旱風險之合理量化方式，針對各種缺水指標之適用性進行探討，並提出合適指標以反應枯水期間或極端枯旱期間之實際缺水情況。為此，首先說明臺灣常用缺水指數(SI)於枯水期間水資源調配之適用性，並藉由導入乾旱 SDF 曲線以合理量化實際缺水情況；然後，針對乾旱 SDF 曲線之相關概念進行說明，包含：曲線繪製流程與曲線特性說明等；最後，嘗試應用乾旱 SDF 曲線以決定水資源供需系統之「極端乾旱」(類比於防洪工程之保護標準)，以提供後續備援水量評估規劃作為參考。此章節主要內容包含：(1)極端枯旱風險之量化方式探討、(2)乾旱 SDF 曲線產製以及(3)設計乾旱參數(延時與頻率年)之探討。針對各項內容詳細說明如下：

### 一、極端枯旱風險之量化方式探討

先採用不同缺水指標(例如：缺水指數(SI)、年缺水率、缺水百分日數以及乾旱事件缺水率)進行水資源供需面臨缺水風險之量化分析，並特別探討缺水指數(SI)與枯水期間缺水情況之關聯性，以瞭解其於枯水期水源調配之適用性。為強化缺水指數(SI)解釋能力並量化「極端枯旱風險」，導入乾旱 SDF 曲線，用以描述水資源系統於極端枯旱期間所造成之缺水情況(即極端乾旱所對應之缺水量)，並據以推估水資源系統之應有備援水量。

假設某供水系統之供水能力係以缺水指數(SI)等於 1.0 (即平均年缺水率為 10%)作為條件進行推估，其係基於全年缺水率而非枯水期缺水率，故缺水指數(SI)未必能反應枯水期間或極端枯旱期間水源供給實際情況。因此，有必要探討缺水指數(SI)與其他缺水指標是否能適切反應出枯水期間或極端枯旱期間較為嚴重之缺水情形。以下先針對缺水指數(SI)特性進行說明：

#### (一)缺水指數(SI)特性：多對一函數關係

由於缺水指數於計算過程會將各年缺水狀況平均化，造成缺水指數為多對一之函數關係，無法正確描述缺水時期的缺水特性，包

含缺水發生機率、缺水強度與缺水延時等。以分析期距為 25 年且 SI = 1.0 之設定為案例，其可能的缺水情境組合為(圖 4-1)：

### 1、均勻缺水

25 年內每年皆發生缺水，每年之年缺水率為 10%。雖然每年皆有缺水情況，但其缺水率較低，可透過一般管理方式加以因應，民眾對於缺水造成之不便性較為無感。

### 2、集中缺水

25 年內僅 4 年發生缺水，每年之年缺水率為 25%。此種集中缺水情況下，水資源供需系統之不缺水年份較多，雖然缺水年份僅有 4 年，但其缺水率較高，需透過加強管理方式加以因應，對於民眾、用水大戶以及農業已有顯著之限水衝擊。

### 3、極端集中缺水

25 年內僅 1 年發生缺水，其年缺水率為 50%。此種極端集中缺水情況下，水資源供需系統之不缺水年份占多數，雖然缺水年份僅有 1 年，但其缺水率極高，已無法透過一般管理或加強管理方式加以因應。因缺水情況嚴峻，既有供水系統已無水源支應，需透過區域調度大量水源或全面移用農業用支援，對於全民皆產生重大衝擊。

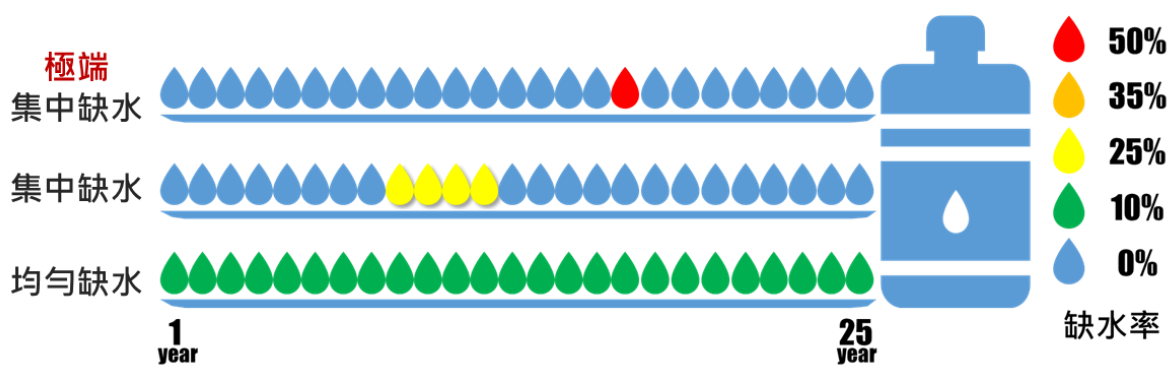


圖 4-1 缺水指數(SI)為 1.0 之可能年缺水情境組合

### (二)缺水指數(SI)特性：以年缺水率為計算基準

前述案例顯示缺水指數多對一函數特性，無法反映出豐水年與枯水年之差異變化，若進一步探討事件缺水率與年缺水率之差異，

亦發現年缺水率亦呈現多對一函數關係，以日用水需求為 100 萬噸與年缺水率為 5%之條件為案例，其年缺水量達 1,825 萬噸，可能之事件缺水率組合為(圖 4-2)：

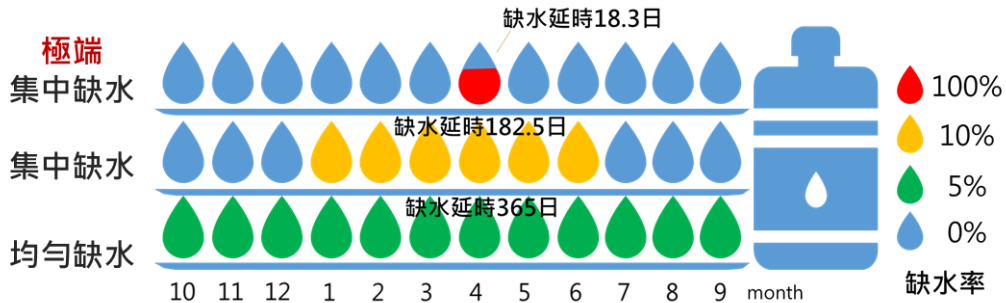


圖 4-2 年缺水率 5%下之可能日缺水率組合

### 1、均勻缺水

每日缺水率皆為 5%(缺水量為 5 萬噸)，其缺水延時達 365 日，雖然缺水延時長，然因缺水量較低，一般可透過離峰時段減壓供水進行應變，民眾對於缺水造成之不便性較為無感。

### 2、集中缺水

每日缺水率皆為 10%(缺水量為 10 萬噸)，其缺水延時達 182.5 日，其餘日數不缺水，缺水延時長，缺水量提高，一般可透過減量供水進行應變，對於大用水戶已有顯著的限水衝擊。

### 3、極端集中缺水

每日缺水率皆為 100%(缺水量為 100 萬噸)，其缺水延時為 18.3 日，其餘日數不缺水，雖然缺水延時明顯縮短，然因缺口過大，既有供水系統已無水源支應，需透過大量外部水源或全面移用農業用支援，缺水情況對於全民皆產生重大衝擊。

## (三)實際缺水案例分析

缺水指數對於枯水期缺水事件之強度可能會產生低估現象，例如：以臺南地區公共給水之供需現況來看(表 4-1)，臺南全年需水量約為 33,749 萬噸，全年供水量約為 32,001 萬噸，其年缺水率約為 5.18%。然而，若分別單就豐枯水期來看，雖然豐水期間缺水率僅為 3.64%，但是枯水期間之缺水率卻為 6.74%。

為探討不同缺水評估指標於描述缺水事件強度上有何差異，以臺南地區公共給水之供需現況為例，在考量水庫操作規線但不納入因應水情燈號之限水規則前提下，分析臺南地區之缺水情況，分別計算各年之缺水率、缺水指數(SI)以及缺水百分日數(DPD)，分析結果如表 4-2 所示。

表 4-1 臺南地區公共給水之供需現況缺水分析

| 時段  | 需水量<br>(萬噸) | 供水量<br>(萬噸) | 缺水率<br>(%) |
|-----|-------------|-------------|------------|
| 全年  | 33,749      | 32,001      | 5.18       |
| 豐水期 | 17,002      | 16,383      | 3.64       |
| 枯水期 | 16,748      | 15,618      | 6.74       |

註：<sup>1</sup>每年 5 至 10 月為豐水期，而其餘月份則為枯水期；<sup>2</sup>資料來源：本研究整理。

表 4-2 臺南地區公共給水之缺水事件分析(民國 103 至 104 乾旱事件)

| 民國年 | 年需求量<br>(萬噸) | 年供水量<br>(萬噸) | 年缺水率<br>(%) | SI    | DPD<br>(%-day) | 缺水事件  |           |            |
|-----|--------------|--------------|-------------|-------|----------------|-------|-----------|------------|
|     |              |              |             |       |                | 開始日期  | 延時<br>(日) | 缺水率<br>(%) |
| 103 | 33,726       | 32,260       | 4.35        | 0.189 | 1,587          | 01/01 | 138       | 9.98       |
|     |              |              |             |       |                | 12/11 | 21        | 9.98       |
| 104 | 33,726       | 30,336       | 10.05       | 1.010 | 3,669          | 01/01 | 144       | 25.48      |

缺水指數(SI)係以年缺水率作為計算基準，故無法適切描述枯水期間缺水事件之強度，較適用於長期分析使用。臺南地區於現況(民國 108 年)條件下全年需水量為 33,726 萬噸，民國 103 年全年供水量為 32,260 萬噸，年缺水率為 4.35%，該年度缺水指數與 DPD 分別為 0.189 與 1,587；民國 104 年全年供水量為 30,336 萬噸，年缺水率為 10.05%，該年度缺水指數與 DPD 分別為 1.010 與 3,669。進一步比較年缺水率與缺水事件缺水率，結果顯示：民國 103 年全年缺水率僅 4.35%，但該年度兩場缺水事件之缺水率皆達 9.98%；民國 104 年全年缺水率為 10.05%，而該年度缺水事件之缺水率則高達 25.48%。

藉由上述比較結果可知，缺水指數於計算上採用年缺水率，容易造成枯水期缺水情況之低估。臺灣枯水期一般為每年 11 月至隔年 4 月，而缺水情況亦較容易發生於此段時間。然而，年缺水率與缺水指數(SI)受限於日曆年，分析過程常會將缺水事件拆開而有低估情況，且其在計算上係基於年時間尺度，亦會導致無法反應實際缺水情況。因此，在挑選或應用缺水指標時需特別注意是否能夠避免類似問題。

整體而言，臺灣一般係以缺水指數(SI)進行水資源系統之規劃設計，惟缺水指數係為長期水源規劃評估使用，其計算係以年缺水率進行計算且為多對一函數關係，並無法反應枯旱期間實際缺水情況，故枯旱期間之水源調配有必要引入其他評估指標以進行評估。因此，需導入乾旱 SDF 曲線之概念，以強化缺水指數(SI)之解釋能力，可用以描述水資源系統於枯旱期間所面臨之缺水情況，藉由查詢乾旱 SDF 曲線中特定延時與頻率年所對應之缺水量，即可瞭解水資源系統於枯旱期間之實際乾旱特性。

## 二、乾旱 SDF 曲線產製

### (一)曲線繪製流程

研提乾旱 SDF 曲線產製流程如圖 4-3，其產製主要係基於長期水資源供需模擬結果，分析缺水(供需不平衡)事件之嚴重度、延時以及頻率年間之關係，再將分析結果繪製成乾旱 SDF 曲線作為後續應用依據。針對各步驟說明如下：

- 1、設置水資源系統參數與資料，包含：流量資料、需水量、水庫有效庫容、正常滿水位、水庫操作規線、輸水損失以及引水限制等相關資料。
- 2、採用供水操作模式進行水資源系統之長期供水操作分析，並產出歷年供水量與需水量之時間序列資料。其中，長期供水操作分析採用至少 30 年以上資料，以確保後續乾旱頻率分析結果之合理性。

3、計算水資源系統之缺水量，而缺水(乾旱事件)之定義係指供水量無法滿足需水量之情況，其量為需水量與供水量兩者之差異。再以缺水量作為乾旱事件之嚴重度，依水文豐枯特性重新整理資料，進一步探討不同延時下乾旱事件之特性，並針對不同延時(例如：30、60、90...180日)進行年最大缺水量(嚴重度)挑選，提供後續分析使用。

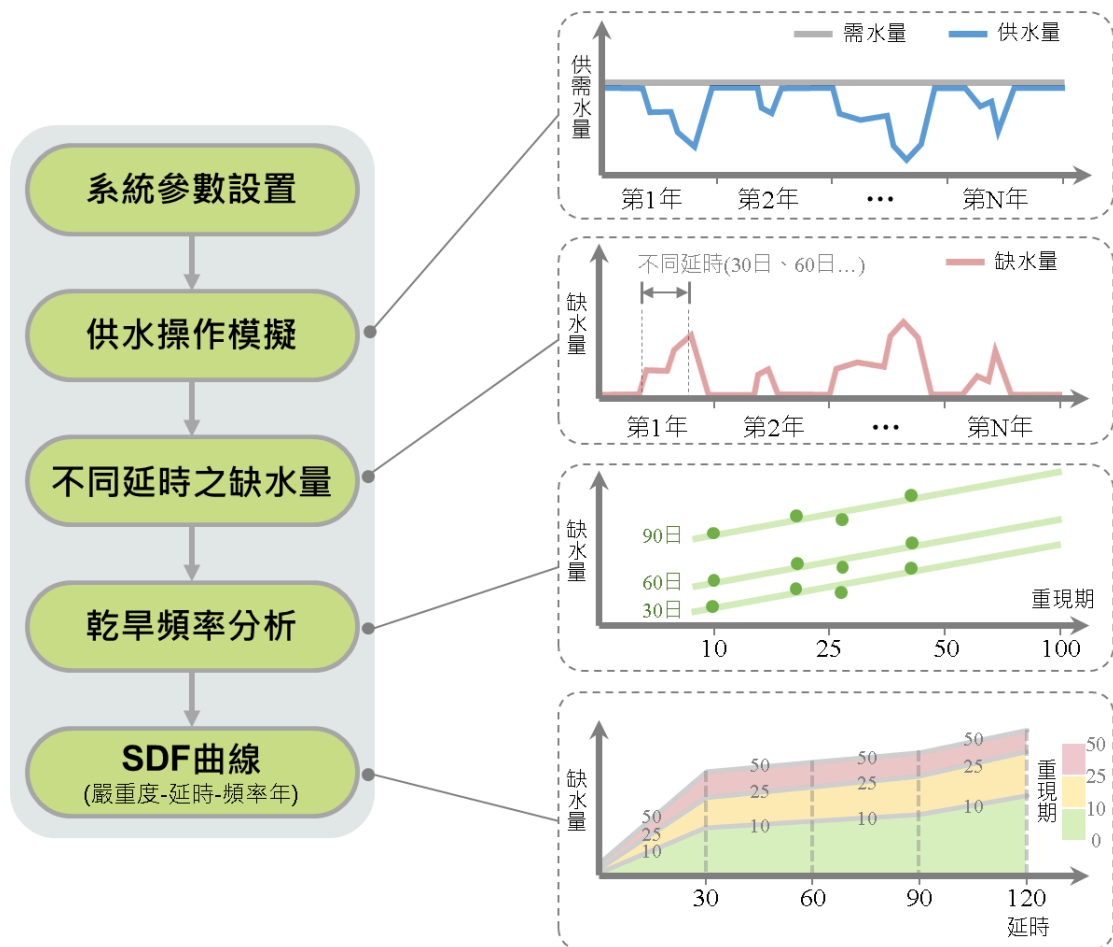


圖 4-3 乾旱 SDF 曲線產製流程圖

4、針對不同延時之年最大缺水量資料進行頻率分析，以計算不同延時下各頻率年乾旱事件所對應之缺水量。其中，頻率分析採用之統計分布係以臺灣常用之水文統計分布為主(經濟部水資源局，民國 90 年)，例如：一般極端值分布(GEV)、極端值一型分布(EV1)、皮爾遜第三型分布(PT3)、對數皮爾遜第三型分布(LPT3)、三參數對數常態分布(LN3)以及常態分布(N)，再配合適合度檢定以決定

最佳統計分布。

5、基於不同延時下乾旱事件各個頻率年缺水量，繪製可代表水資源系統乾旱嚴重度、延時以及頻率年之關係圖(乾旱 SDF 曲線)。

## (二)乾旱頻率分析方法

於頻率分析所採用之機率分布主要係參考「水文設計應用手冊」(經濟部水資源局，民國 90 年)，選擇臺灣經常使用之機率分布，包含：(1)一般極端值分布(GEV)、(2)極端值一型分布(EV1)、(3)皮爾遜第三型分布(PT3)、(4)對數皮爾遜第三型分布(LPT3)、(5)三參數對數常態分布(LN3)以及(6)常態分布(N)等常用於極端事件之機率分布進行極端值頻率分析，以推求不同頻率年之缺水情況，詳細之頻率分析說明請參考附錄。此外，除傳統單變量頻率分析方法之外，建議未來亦可採用雙變量頻率分析方法，以更貼切的模擬缺水事件之特性(例如：缺水量與延時)。

## (三)適合度檢定

為瞭解乾旱頻率分析中採用機率分布之適合度，採用 Kolmogorov-Smirnov (KS)檢定與卡方檢定以檢驗各種機率分布是否適用於計畫區域之乾旱頻率分析，針對兩種檢定方法說明如下：

### 1、KS 適合度檢定法

KS 檢定法主要係檢驗理論分布函數  $F_0(x)$  與經驗分布函數  $F_n(x)$  之間差異，而其經驗分布函數可表示為：

$$F_n(x) = \begin{cases} 0, & x < y_1 \\ \frac{k}{n}, & y_k \leq x < y_{k+1} \quad k=1,2,\dots,n-1 \\ 1, & y_n \leq x \end{cases} \quad (4-1)$$

其中， $x$  為  $n$  個隨機樣本  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，而  $y$  為隨機樣本對應順序之統計量觀測值，其解釋為經驗分布函數在每發生一個觀測值時跳升  $1/n$ ，若觀測值皆相同情況( $x_k$  皆相同)，而當  $x_k$  發生時， $F_n(x)$  便由  $(k-1)/n$  跳升  $n_k/n$ 。



KS 檢定之統計量可表示為下式：

$$D_n = \sup_x [|F_n(x) - F_0(x)|] \quad (4-2)$$

其中， $D_n$  為所有差  $|F_n(x) - F_0(x)|$  最大值，即經驗分布  $F_n(x)$  與理論分布  $F_0(x)$  之所有差異量絕對值中最大者。

## 2、卡方適合度檢定法

為探討乾旱頻率分析中採用機率分布之適合度，一般可採卡方檢定(chi-square test)驗證各種機率分布是否適用於計畫區域之乾旱頻率分析，其係基於樣本機率與理論機率之差異進行檢定，其統計量( $\chi^2$ )計算方式如下：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (4-3)$$

$$k = 1 + 3.3 \times \log n \quad (4-4)$$

其中， $n$  為資料筆數； $k$  為資料組數； $O_i$  為觀測次數； $E_i$  為理論次數。

若統計量大於  $\chi_{\alpha, k-p-1}^2$  則拒絕虛無假設，表示假設之機率分布並不適合用於乾旱頻率分析。其中， $\alpha$  為顯著水準； $k$  為資料組數； $p$  為機率分布之參數數量。

## 3、誤差指標 Standard Error (SE)

當乾旱頻率分析中採用機率分布皆通上述統計檢定時，可進一步選用誤差指標 SE 進行定量誤差分析，以決定乾旱頻率分析中最為適合之機率分布，其計算方式如下：

$$SE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (4-5)$$

其中， $n$  為資料筆數； $x_i$  為第  $i$  個觀測樣本料資， $\hat{x}_i$  為利用點繪公式計算第  $i$  個觀測樣本  $x_i$  累積機率，再由選用之統計分布估算對應該累積機率之水文量  $\hat{x}_i$ 。

#### (四)乾旱 SDF 曲線與缺水指數(SI)之連結

以臺南地區水資源系統為例，探討不同分析時間尺度對於缺水特性造成之影響，並說明乾旱 SDF 曲線與臺灣常用缺水指數(SI)之差異。為此，採用臺南地區水資源系統長達 63 年(民國 48 年至 110 年)流量資料作為供水操作模式之輸入並依現況(民國 108 年)條件進行水資源系統參數設置，分析水資源系統之長期供水操作情況，並基於歷年供需水量資料探討水資源系統之乾旱特性。其中，臺南地區水資源系統給水標的包含：農業用水、工業用水以及家用及公共給水，主要聚焦公共用水(工業用水與家用及公共給水)之缺水特性分析。

表 4-3 為臺南地區水資源系統公共用水歷年之年缺水日、年缺水量以及年缺水率，分析結果指出：公共用水之長期平均年缺水日與年缺水量分別為 112 日與 1,748 萬噸。由長期平均資料可知其並非均勻缺水，而係屬於集中缺水型態，缺水量集中發生於 112 日內，突顯出短延時缺水分析之必要性。臺南地區水資源系統之公共用水需水量約為 92.4 萬噸/日，若將 1,748 萬噸缺水量分配至全年，其缺水率約為 5.18% ( $1,748 \div 365 \div 92.4 \approx 5.18\%$ )；若依平均年缺水日進行缺水量分配，則其缺水率增加至 16.89% ( $1,748 \div 112 \div 92.4 \approx 16.89\%$ )。整體而言，分析時間尺度不同可能導致顯著缺水特性差異，選擇過長時間尺度可能低估缺水事件強度，故在時間尺度挑選上需考慮能否合理量化枯水期間之缺水特性。

若以臺灣於評估水資源系統缺水情況常用之缺水指數(SI)來看，臺南地區公共用水之缺水指數約為 0.46，其計算公式如下：

$$SI = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{S_i}{D_i} \right)^2 \quad (4-6)$$

其中， $N$  為分析總年數； $S_i$  為第  $i$  年之總缺水量； $D_i$  為第  $i$  年之總需水量。

因缺水指數係將各年缺水狀況平均化，造成缺水指數為一對多

之函數關係，且於計算上係基於全年缺水率而非缺水期間之缺水率，造成缺水指數無法正確描述枯水期間之缺水特性，包含：缺水發生機率、缺水強度以及缺水延時等，故導入乾旱 SDF 曲線以選擇較為細緻之時間尺度(例如：30、60 以及 90 日)，可更適切評估枯水期間之乾旱特性，用於輔助缺水指數以強化其於枯水期間之解釋能力。

表 4-3 臺南地區公共用水之歷年缺水情況

| 年份 | 年缺水日<br>(日) | 年缺水量<br>(萬噸) | 年缺水率<br>(%) | 年份  | 年缺水日<br>(日) | 年缺水量<br>(萬噸) | 年缺水率<br>(%) |
|----|-------------|--------------|-------------|-----|-------------|--------------|-------------|
| 48 | 159         | 1,337        | 3.96        | 80  | 117         | 1,070        | 3.17        |
| 49 | 161         | 1,814        | 5.36        | 81  | 34          | 295          | 0.87        |
| 50 | 140         | 1,291        | 3.83        | 82  | 245         | 2,213        | 6.56        |
| 51 | 171         | 2,146        | 6.36        | 83  | 136         | 5,972        | 17.71       |
| 52 | 157         | 3,605        | 10.69       | 84  | 239         | 2,285        | 6.77        |
| 53 | 129         | 1,636        | 4.84        | 85  | 203         | 4,673        | 13.82       |
| 54 | 140         | 2,756        | 8.17        | 86  | 123         | 1,116        | 3.31        |
| 55 | 48          | 442          | 1.31        | 87  | 51          | 470          | 1.39        |
| 56 | 186         | 2,479        | 7.35        | 88  | 19          | 157          | 0.46        |
| 57 | 103         | 950          | 2.81        | 89  | 17          | 92           | 0.27        |
| 58 | 92          | 1,175        | 3.49        | 90  | 127         | 1,440        | 4.27        |
| 59 | 99          | 913          | 2.71        | 91  | 205         | 2,260        | 6.70        |
| 60 | 128         | 2,823        | 8.37        | 92  | 161         | 6,916        | 20.51       |
| 61 | 0           | 0            | 0.00        | 93  | 184         | 4,605        | 13.62       |
| 62 | 163         | 1,479        | 4.38        | 94  | 70          | 627          | 1.86        |
| 63 | 68          | 581          | 1.72        | 95  | 82          | 673          | 2.00        |
| 64 | 0           | 0            | 0.00        | 96  | 149         | 1,792        | 5.31        |
| 65 | 40          | 350          | 1.04        | 97  | 76          | 781          | 2.31        |
| 66 | 118         | 1,236        | 3.66        | 98  | 82          | 719          | 2.13        |
| 67 | 13          | 120          | 0.36        | 99  | 10          | 55           | 0.16        |
| 68 | 72          | 645          | 1.91        | 100 | 69          | 618          | 1.83        |
| 69 | 366         | 8,126        | 24.03       | 101 | 6           | 55           | 0.16        |
| 70 | 152         | 7,750        | 22.98       | 102 | 112         | 1,014        | 3.01        |
| 71 | 132         | 1,153        | 3.42        | 103 | 161         | 1,466        | 4.35        |
| 72 | 91          | 839          | 2.49        | 104 | 145         | 3,390        | 10.05       |
| 73 | 178         | 1,641        | 4.85        | 105 | 0           | 0            | 0.00        |
| 74 | 115         | 1,626        | 4.82        | 106 | 174         | 1,586        | 4.70        |
| 75 | 91          | 839          | 2.49        | 107 | 184         | 4,067        | 12.06       |
| 76 | 48          | 443          | 1.31        | 108 | 131         | 1,171        | 3.47        |
| 77 | 118         | 1,079        | 3.19        | 109 | 74          | 933          | 2.76        |
| 78 | 42          | 369          | 1.09        | 110 | 142         | 5,925        | 17.57       |
| 79 | 9           | 74           | 0.22        |     |             |              |             |

註：平均年缺水日為 112 日；平均年缺水量為 1,748 萬噸；平均年缺水率為 5.18%；缺水指數(SI)為 0.46。

### (五)乾旱 SDF 曲線之特性探討

為避免乾旱事件受到日曆年轉換而被切割，依據水文豐枯特性重新整理水源供需資料，再針對各年挑選不同延時之年最大缺水量進行乾旱頻率分析，以建立缺水事件缺水量(即嚴重度)、延時以及頻率年(發生機率)之關係，可更合理反應枯水期間或極端枯旱期間之乾旱特性。

表 4-4 臺南地區各年延時 120 日之最大缺水量

| 年份 | 最大缺水量<br>(萬噸/120 日) | 開始日期     | 結束日期     | 年份  | 最大缺水量<br>(萬噸/120 日) | 開始日期      | 結束日期      |
|----|---------------------|----------|----------|-----|---------------------|-----------|-----------|
| 48 | 1,482               | 49/01/20 | 49/05/18 | 79  | 1,070               | 80/01/03  | 80/05/02  |
| 49 | 1,106               | 50/01/05 | 50/05/04 | 80  | 295                 | 80/10/14  | 81/02/10  |
| 50 | 1,676               | 51/03/25 | 51/07/22 | 81  | 1,106               | 82/01/26  | 82/05/25  |
| 51 | 3,264               | 52/03/18 | 52/07/15 | 82  | 5,834               | 83/01/04  | 83/05/03  |
| 52 | 1,184               | 53/02/10 | 53/06/08 | 83  | 1,225               | 84/01/18  | 84/05/17  |
| 53 | 2,572               | 54/01/18 | 54/05/17 | 84  | 3,908               | 85/01/10  | 85/05/08  |
| 54 | 443                 | 55/01/12 | 55/05/11 | 85  | 1,106               | 85/10/19  | 86/02/15  |
| 55 | 1,916               | 56/01/22 | 56/05/21 | 86  | 609                 | 86/10/24  | 87/02/20  |
| 56 | 1,106               | 56/11/10 | 57/03/08 | 87  | 157                 | 88/01/10  | 88/05/09  |
| 57 | 1,175               | 58/01/31 | 58/05/30 | 88  | 92                  | 88/12/31  | 89/04/28  |
| 58 | 765                 | 59/03/09 | 59/07/06 | 89  | 1,394               | 90/01/19  | 90/05/18  |
| 59 | 2,749               | 60/02/04 | 60/06/03 | 90  | 1,357               | 91/02/05  | 91/06/04  |
| 60 | 0                   | -        | -        | 91  | 6,547               | 92/02/06  | 92/06/05  |
| 61 | 1,165               | 62/02/11 | 62/06/10 | 92  | 4,043               | 93/02/10  | 93/06/08  |
| 62 | 581                 | 63/01/16 | 63/05/15 | 93  | 627                 | 93/11/30  | 94/03/29  |
| 63 | 0                   | -        | -        | 94  | 673                 | 95/01/15  | 95/05/14  |
| 64 | 350                 | 65/01/12 | 65/05/10 | 95  | 1,543               | 96/01/19  | 96/05/18  |
| 65 | 1,236               | 66/01/29 | 66/05/28 | 96  | 781                 | 97/02/06  | 97/06/04  |
| 66 | 120                 | 66/11/22 | 67/03/21 | 97  | 304                 | 98/04/03  | 98/07/31  |
| 67 | 562                 | 68/01/28 | 68/05/27 | 98  | 415                 | 98/09/09  | 99/01/06  |
| 68 | 4,999               | 69/04/03 | 69/07/31 | 99  | 618                 | 100/03/20 | 100/07/17 |
| 69 | 6,661               | 70/01/13 | 70/05/12 | 100 | 0                   | -         | -         |
| 70 | 1,033               | 71/01/07 | 71/05/06 | 101 | 931                 | 101/12/07 | 102/04/05 |
| 71 | 507                 | 71/10/15 | 72/02/11 | 102 | 1,106               | 102/12/28 | 103/04/26 |
| 72 | 1,106               | 72/11/27 | 73/03/25 | 103 | 3,169               | 104/01/24 | 104/05/23 |
| 73 | 1,350               | 74/01/28 | 74/05/27 | 104 | 0                   | -         | -         |
| 74 | 839                 | 75/01/16 | 75/05/15 | 105 | 691                 | 106/01/28 | 106/05/27 |
| 75 | 443                 | 76/01/18 | 76/05/17 | 106 | 3,495               | 107/02/19 | 107/06/18 |
| 76 | 1,079               | 77/01/24 | 77/05/22 | 107 | 1,106               | 108/01/01 | 108/04/30 |
| 77 | 369                 | 77/12/07 | 78/04/05 | 108 | 933                 | 109/01/23 | 109/05/21 |
| 78 | 74                  | 78/10/26 | 79/02/22 | 109 | 5,759               | 110/01/30 | 110/05/29 |

註：<sup>1</sup>為避免乾旱事件受到日曆年轉換而被切割(例如：民國 56、66、71 以及 72 年等年份，其延時 120 日最大缺水量之開始日期皆落於年末)，依據水文豐枯特性整理水源供需資料，再針對各年挑選不同延時之年最大缺水量；<sup>2</sup>針對無缺水之情況，開始與結束日期皆以「-」註記。

以臺南地區 120 日之最大缺水量為例，首先依據水文豐枯特性整理水源供需資料，再針對各年挑選 120 日最大缺水量(如表 4-4)，將挑選出來之年最大缺水量資料以臺灣常用統計分布進行配套，並配合統計檢定與誤差指標 SE 判斷統計分布之適合度，然後使用最佳統計分布推估不同頻率年之最大缺水量。最後，重覆上述流程完成各延時(30、60、90…180 日)不同頻率年最大缺水量推估。

表 4-5 與表 4-6 分別為常用機率分布配套不同延時年最大缺水量之 KS 檢定結果與卡方檢定結果。統計檢定分析結果指出：無論何種機率分布，KS 檢定之通過數量普遍高於卡方檢定通過數量，其主要係因 KS 檢定僅考慮經驗與理論分布之最大誤差，而卡方檢定則綜合考慮經驗與理論分布之組別誤差，其檢定標準相對嚴苛，故造成通過數量較低。其中，統計檢定分析結果中可能發生檢定通過數量相同之情況，而此種情況則可藉由誤差指標 SE 分析結果(表 4-7)研判何者更為適合。

表 4-5 常用機率分布配套年最大缺水量之 KS 檢定結果

| 延時(日) | GEV | EV1 | PT3 | LPT3 | LN3 | N |
|-------|-----|-----|-----|------|-----|---|
| 嘉義    | 6   | 6   | 6   | 6    | 3   | 2 |
| 臺南    | 5   | 3   | 5   | 5    | 3   | 0 |
| 高雄    | 6   | 6   | 6   | 6    | 6   | 1 |
| 屏東    | 6   | 6   | 6   | 6    | 6   | 6 |

註：<sup>1</sup>表格內數字代表統計檢定通過次數；<sup>2</sup>GEV 為一般極端值分布、EV1 為極端值一型分布、PT3 為皮爾遜第三型分布、LPT3 為對數皮爾遜第三型分布、LN3 為三參數對數常態分布以及 N 為常態分布；<sup>3</sup>檢定顯著水準採用  $\alpha=0.01$ ；<sup>4</sup>在特定機率分布下各縣市之通過次數最多為 6 次(乾旱頻率分析係針對 6 種不同延時之年最大缺水量)。

表 4-6 常用機率分布配套年最大缺水量之卡方檢定結果

| 延時(日) | GEV | EV1 | PT3 | LPT3 | LN3 | N |
|-------|-----|-----|-----|------|-----|---|
| 嘉義    | 4   | 1   | 4   | 4    | 4   | 1 |
| 臺南    | 4   | 1   | 4   | 4    | 4   | 0 |
| 高雄    | 6   | 5   | 5   | 6    | 6   | 1 |
| 屏東    | 6   | 6   | 5   | 5    | 5   | 4 |

註：<sup>1</sup>表格內數字代表統計檢定通過次數；<sup>2</sup>GEV 為一般極端值分布、EV1 為極端值一型分布、PT3 為皮爾遜第三型分布、LPT3 為對數皮爾遜第三型分布、LN3 為三參數對數常態分布以及 N 為常態分布；<sup>3</sup>檢定顯著水準採用  $\alpha=0.01$ ；<sup>4</sup>在特定機率分布下各縣市之通過次數最多為 6 次(乾旱頻率分析係針對 6 種不同延時之年最大缺水量)。

表 4-7 常用機率分布配套年最大缺水量之誤差指標 SE

| 延時(日) | GEV          | EV1        | PT3   | LPT3  | LN3   | N |
|-------|--------------|------------|-------|-------|-------|---|
| 嘉義    | <b>641</b>   | -          | 662   | 660   | 652   | - |
| 臺南    | <b>1,759</b> | -          | 1,820 | 1,855 | 1,792 | - |
| 高雄    | <b>2,851</b> | -          | -     | 2,972 | 2,895 | - |
| 屏東    | 150          | <b>146</b> | -     | -     | -     | - |

註：<sup>1</sup>GEV 為一般極端值分布、EV1 為極端值一型分布、PT3 為皮爾遜第三型分布、LPT3 為對數皮爾遜第三型分布、LN3 為三參數對數常態分布以及 N 為常態分布；<sup>2</sup>SE 誤差指標分析僅針對卡方檢定通過次數同為最高者進行分析。

於機率分布之適合度分析上，採用卡方檢定結果(表 4-6)與誤差指標 SE(表 4-7)作為研判基準，以決定最為適合南部區域之機率分布。研判結果指出：嘉義、臺南以及高雄地區皆以一般極端值分布(GEV)最為適合，而屏東地區雖然以極端值一型分布(EV1)之誤差指標 SE 最小，惟其與一般極端值分布(GEV)之誤差指標 SE 相差無幾，故建議南部區域整體以採用一般極端值分布(GEV)為主。針對南部區域各縣市於不同延時下各頻率年對應缺水量說明如下：

#### 1、嘉義地區

表 4-8 為嘉義地區水資源系統於不同延時下各頻率年對應缺水量，缺水量下面括號內數字則為對應之缺水率，而延時欄位括號內數字代表年最大缺水量之長期平均，例如：以延時 30 日之年最大缺水量為例，其長期平均為 294 萬噸(供水操作模擬結果中歷年各延時最大缺水量之平均值)。在固定延時情況下，以延時 90 日為例，頻率年 2 年對應之缺水量約為 334 萬噸(缺水率 11.9%)，隨著頻率年增加其缺水率亦會快速增加，當頻率年增加至 100 年，其對應之缺水率則已達 98.0%，已經幾乎無法提供任何公共用水。若在固定頻率年情況下，以頻率年 5 年為例，延時 30 日對應之缺水量約為 391 萬噸(缺水率 41.7%)，隨著延時增加其缺水率則有降低情況，當延時增加至 180 日，其對應之缺水率則降低至 15.7%。整體而言，以特定延時來看，當頻率年愈高其對應之缺水率有增加趨勢(缺水強度愈強)；但若以極端乾旱缺水量來看，當延時愈長其缺水率則有降低之趨勢(缺水強

度愈低)。

表 4-8 嘉義地區於現況條件下不同延時與頻率年之對應缺水量

| 延時(日)<br>(平均缺水量 <sup>1</sup> ) | 頻率年(年)         |                |                  |                  |                  |                   |
|--------------------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
|                                | 2              | 5              | 10               | 25               | 50               | 100               |
| 30<br>(294)                    | 197<br>(21.0%) | 391<br>(41.7%) | 544<br>(57.9%)   | 769<br>(81.9%)   | 939<br>(100.0%)  | 939<br>(100.0%)   |
| 60<br>(418)                    | 278<br>(14.8%) | 558<br>(29.7%) | 807<br>(43.0%)   | 1,216<br>(64.7%) | 1,607<br>(85.6%) | 1,878<br>(100.0%) |
| 90<br>(504)                    | 334<br>(11.9%) | 674<br>(23.9%) | 989<br>(35.1%)   | 1,531<br>(54.3%) | 2,071<br>(73.5%) | 2,761<br>(98.0%)  |
| 120<br>(564)                   | 372<br>(9.9%)  | 755<br>(20.1%) | 1,118<br>(29.8%) | 1,755<br>(46.7%) | 2,404<br>(64.0%) | 3,249<br>(86.5%)  |
| 150<br>(611)                   | 403<br>(8.6%)  | 820<br>(17.5%) | 1,217<br>(25.9%) | 1,917<br>(40.8%) | 2,632<br>(56.1%) | 3,565<br>(75.9%)  |
| 180<br>(658)                   | 433<br>(7.7%)  | 883<br>(15.7%) | 1,311<br>(23.3%) | 2,062<br>(36.6%) | 2,827<br>(50.2%) | 3,822<br>(67.8%)  |

註：<sup>1</sup>平均缺水量係依據供水操作模擬結果推求而得(即：供水操作模擬結果中歷年各延時最大缺水量之平均值)；<sup>2</sup>嘉義地區(民國 108 年)之公共用水需水量約 31.3 萬噸/日；<sup>3</sup>括號內數字為缺水率；<sup>4</sup>單位：萬噸。

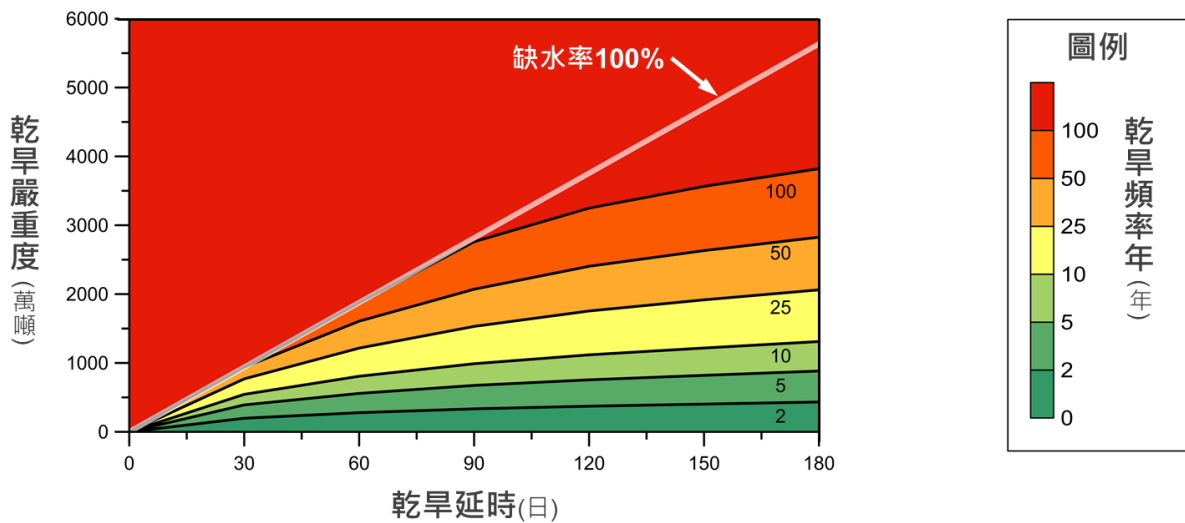


圖 4-4 嘉義地區水資源系統現況條件下之乾旱 SDF 曲線

此外，進一步比對特定延時下年最大缺水量長期平均值與特定延時下各頻率年缺水量，以便後續應用參考。分析結果發現：不同延時下年最大缺水量長期平均值約介於頻率年 2 年缺水量至頻率年 5 年缺水量之間，約略等於兩者平均。以延時 90 日為例，其平均年最大缺水量約為 504 萬噸，缺水量介於頻率年 2 年缺水量(334 萬噸)至 5 年缺水量(674 萬噸)之間，與兩者

平均值接近 $((334+674)\times 0.5=504)$ 。

基於上述不同延時下各頻率年對應缺水量(即嚴重度)之資訊，可探討嘉義地區水資源系統一旦發生乾旱事件時，其乾旱事件嚴重度、延時、頻率年之關係，有助於合理量化枯水期間之缺水情況，並可依據其成果繪製嘉義地區水資源系統現況條件下乾旱 SDF 曲線(圖 4-4)。圖中橫軸為延時、縱軸為缺水量、等值線則代表不同頻率年，而斜粗線則代表最大缺水量之上限(即缺水率 100%)。由乾旱 SDF 曲線圖可知：在延時固定情況下，頻率年增加將導致最大缺水量增加；同樣地，在頻率年固定情況下，延時增加將導致最大缺水量增加，惟其增加幅度(斜率)會隨延時增加而有所趨緩。

## 2、臺南地區

表 4-9 為臺南地區水資源系統於不同延時下各頻率年對應缺水量，缺水量下面括號內數字則為對應之缺水率，而延時欄位括號內數字代表年最大缺水量之長期平均，例如：以延時 30 日之年最大缺水量為例，其長期平均為 706 萬噸(供水操作模擬結果中歷年各延時最大缺水量之平均值)。在固定延時情況下，以延時 90 日為例，頻率年 2 年對應之缺水量約為 925 萬噸(缺水率 11.1%)，隨著頻率年增加其缺水率亦會快速增加，當頻率年增加至 100 年，其對應之缺水率則已達 100.0%，已經無法提供任何公共用水。若在固定頻率年情況下，以頻率年 5 年為例，延時 30 日對應之缺水量約為 916 萬噸(缺水率 33.0%)，隨著延時增加其缺水率則有降低情況，當延時增加至 180 日，其對應之缺水率則降低至 15.0%。整體而言，以特定延時來看，當頻率年愈高其對應之缺水率有增加趨勢(缺水強度愈強)；但若以極端乾旱缺水量來看，當延時愈長其缺水率則有降低之趨勢(缺水強度愈低)。



此外，進一步比對特定延時下年最大缺水量長期平均值與特定延時下各頻率年缺水量，以便後續應用參考。分析結果發現：不同延時下年最大缺水量長期平均值約介於頻率年 2 年缺水量至頻率年 5 年缺水量之間，約略等於兩者平均。以延時 90 日為例，其平均年最大缺水量約為 1,426 萬噸，缺水量介於頻率年 2 年缺水量(925 萬噸)至 5 年缺水量(1,896 萬噸)之間，與兩者平均值接近 $((925+1,896)\times 0.5=1,411)$ 。

基於上述不同延時下各頻率年對應缺水量(即嚴重度)之資訊，可探討臺南地區水資源系統一旦發生乾旱事件時，其乾旱事件嚴重度、延時、頻率年之關係，有助於合理量化枯水期間之缺水情況，並可依據其成果繪製臺南地區水資源系統現況條件下乾旱 SDF 曲線(圖 4-5)。圖中橫軸為延時、縱軸為缺水量、等值線則代表不同頻率年，而斜粗線則代表最大缺水量之上限(即缺水率 100%)。由乾旱 SDF 曲線圖可知：在延時固定情況下，頻率年增加將導致最大缺水量增加；同樣地，在頻率年固定情況下，延時增加將導致最大缺水量增加，惟其增加幅度(斜率)會隨延時增加而有所趨緩。

表 4-9 臺南地區於現況條件下不同延時與頻率年之對應缺水量

| 延時(日)<br>(平均缺水量 <sup>1</sup> ) | 頻率年(年)          |                  |                  |                  |                   |                   |
|--------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|                                | 2               | 5                | 10               | 25               | 50                | 100               |
| 30<br>(706)                    | 451<br>(16.3%)  | 916<br>(33.0%)   | 1,380<br>(49.8%) | 2,237<br>(80.7%) | 2,772<br>(100.0%) | 2,772<br>(100.0%) |
| 60<br>(1,155)                  | 733<br>(13.2%)  | 1,492<br>(26.9%) | 2,255<br>(40.7%) | 3,672<br>(66.2%) | 5,191<br>(93.6%)  | 5,544<br>(100.0%) |
| 90<br>(1,426)                  | 925<br>(11.1%)  | 1,896<br>(22.8%) | 2,842<br>(34.2%) | 4,546<br>(54.7%) | 6,322<br>(76.0%)  | 8,316<br>(100.0%) |
| 120<br>(1,600)                 | 1,070<br>(9.7%) | 2,198<br>(19.8%) | 3,254<br>(29.3%) | 5,088<br>(45.9%) | 6,933<br>(62.5%)  | 9,310<br>(84.0%)  |
| 150<br>(1,730)                 | 1,157<br>(8.3%) | 2,408<br>(17.4%) | 3,567<br>(25.7%) | 5,561<br>(40.1%) | 7,548<br>(54.5%)  | 10,089<br>(72.8%) |
| 180<br>(1,794)                 | 1,188<br>(7.1%) | 2,500<br>(15.0%) | 3,719<br>(22.4%) | 5,824<br>(35.0%) | 7,929<br>(47.7%)  | 10,627<br>(63.9%) |

註：<sup>1</sup>平均缺水量係依據供水操作模擬結果推求而得(即：供水操作模擬結果中歷年各延時最大缺水量之平均值)；<sup>2</sup>臺南地區(民國 108 年)之公共用水需水量約 92.4 萬噸/日；<sup>3</sup>括號內數字為缺水率；<sup>4</sup>單位：萬噸。

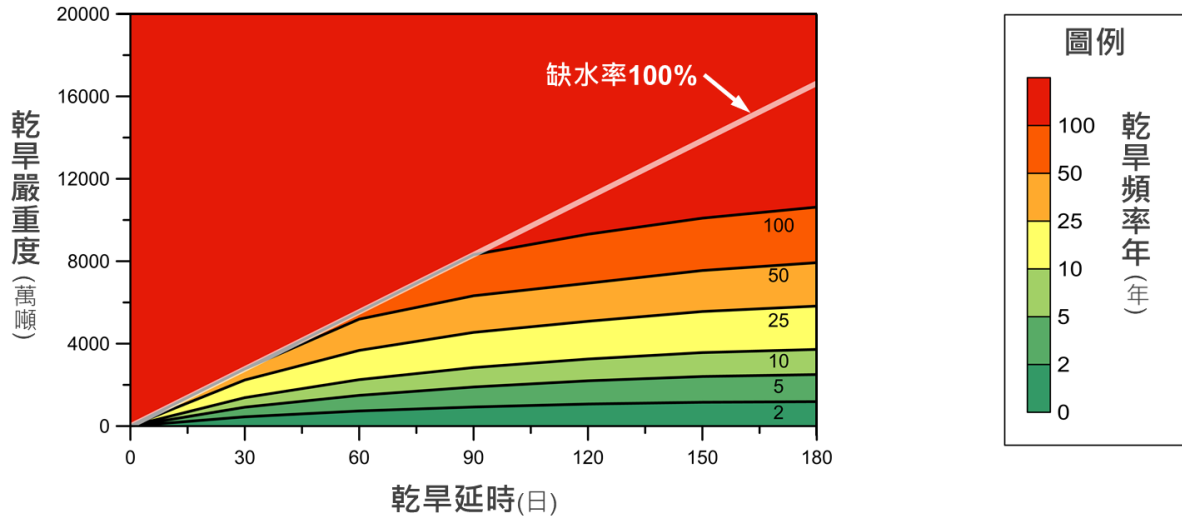


圖 4-5 臺南地區水資源系統現況條件下之乾旱 SDF 曲線

### 3、高雄地區

表 4-10 為高雄地區水資源系統於不同延時下各頻率年對應缺水量，缺水量下面括號內數字則為對應之缺水率，而延時欄位括號內數字代表年最大缺水量之長期平均，例如：以延時 30 日之年最大缺水量為例，其長期平均為 1,175 萬噸。在固定延時情況下，以延時 90 日為例，頻率年 2 年對應之缺水量約為 1,772 萬噸(缺水率 13.1%)，隨著頻率年增加其缺水率亦會快速增加，當頻率年增加至 100 年，其對應之缺水率則已達 94.2%，僅能滿足少部分公共用水。若在固定頻率年情況下，以頻率年 5 年為例，延時 30 日對應之缺水量約為 1,795 萬噸(缺水率 39.8%)，隨著延時增加其缺水率則有降低情況，當延時增加至 180 日，其對應之缺水率則降低至 17.0%。整體而言，以特定延時來看，當頻率年愈高其對應之缺水率有增加趨勢(缺水強度愈強)；但若以極端乾旱缺水量來看，當延時愈長其缺水率則有降低之趨勢(缺水強度愈低)。

此外，進一步比對特定延時下年最大缺水量長期平均值與特定延時下各頻率年缺水量，以便後續應用參考。分析結果發現：不同延時下年最大缺水量長期平均值約介於頻率年 2 年缺水量至頻率年 5 年缺水量之間，約略等於兩者平均。以延時 90

日為例，其平均年最大缺水量約為 2,463 萬噸，缺水量介於頻率年 2 年缺水量(1,772 萬噸)至 5 年缺水量(3,635 萬噸)之間，與兩者平均值接近 $((1,772+3,635)\times 0.5=2,704)$ 。

基於上述不同延時下各頻率年對應缺水量(即嚴重度)之資訊，可探討高雄地區水資源系統一旦發生乾旱事件時，其乾旱事件嚴重度、延時、頻率年之關係，有助於合理量化枯水期間之缺水情況，並可依據其成果繪製高雄地區水資源系統現況條件下乾旱 SDF 曲線(圖 4-6)。圖中橫軸為延時、縱軸為缺水量、等值線則代表不同頻率年，而斜粗線則代表最大缺水量之上限(即缺水率 100%)。由乾旱 SDF 曲線圖可知：在延時固定情況下，頻率年增加將導致最大缺水量增加；同樣地，在頻率年固定情況下，延時增加將導致最大缺水量增加，惟其增加幅度(斜率)會隨延時增加而有所趨緩。

表 4-10 高雄地區於現況條件下不同延時與頻率年之對應缺水量

| 延時(日)<br>(平均缺水量 <sup>1</sup> ) | 頻率年(年)           |                  |                  |                  |                   |                   |
|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|                                | 2                | 5                | 10               | 25               | 50                | 100               |
| 30<br>(1,175)                  | 948<br>(21.0%)   | 1,795<br>(39.8%) | 2,426<br>(53.8%) | 3,313<br>(73.4%) | 4,042<br>(89.6%)  | 4,512<br>(100.0%) |
| 60<br>(1,878)                  | 1,393<br>(15.4%) | 2,795<br>(31.0%) | 3,947<br>(43.7%) | 5,720<br>(63.4%) | 7,309<br>(81.0%)  | 9,024<br>(100.0%) |
| 90<br>(2,463)                  | 1,772<br>(13.1%) | 3,635<br>(26.9%) | 5,212<br>(38.5%) | 7,707<br>(56.9%) | 10,004<br>(73.9%) | 12,746<br>(94.2%) |
| 120<br>(2,883)                 | 2,038<br>(11.3%) | 4,244<br>(23.5%) | 6,136<br>(34.0%) | 9,168<br>(50.8%) | 11,993<br>(66.5%) | 15,401<br>(85.3%) |
| 150<br>(3,059)                 | 2,139<br>(9.5%)  | 4,500<br>(19.9%) | 6,540<br>(29.0%) | 9,828<br>(43.6%) | 12,911<br>(57.2%) | 16,648<br>(73.8%) |
| 180<br>(3,128)                 | 2,199<br>(8.1%)  | 4,603<br>(17.0%) | 6,672<br>(24.6%) | 9,997<br>(36.9%) | 13,105<br>(48.4%) | 16,863<br>(62.3%) |

註：<sup>1</sup>平均缺水量係依據供水操作模擬結果推求而得(即：供水操作模擬結果中歷年各延時最大缺水量之平均值)；<sup>2</sup>高雄地區(民國 108 年)之公共用水需水量約 150.4 萬噸/日；<sup>3</sup>括號內數字為缺水率；<sup>4</sup>單位：萬噸。

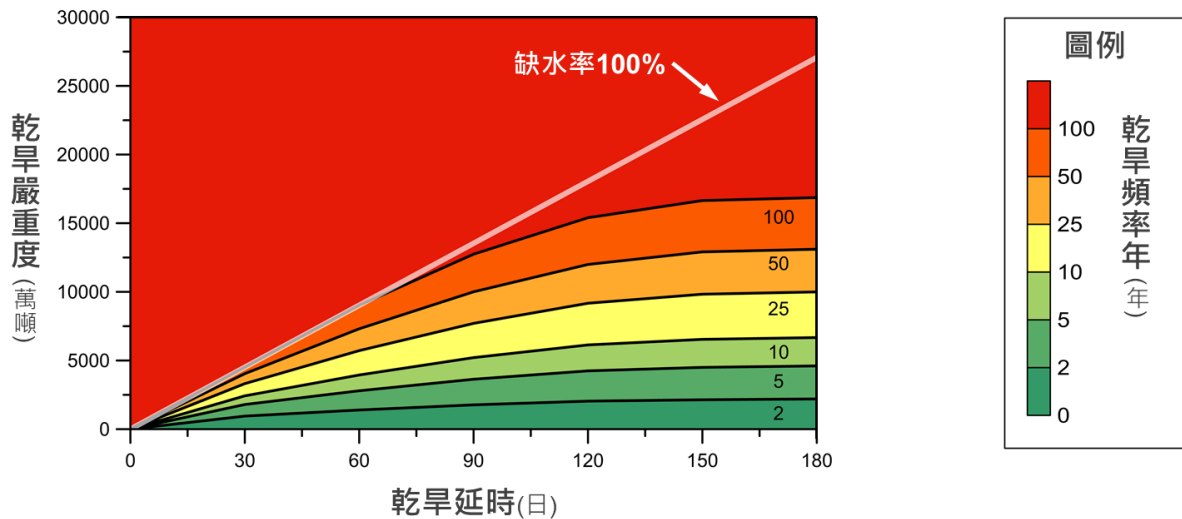


圖 4-6 高雄地區水資源系統現況條件下之乾旱 SDF 曲線

#### 4、屏東地區

表 4-11 為屏東地區水資源系統於不同延時下各頻率年對應缺水量，缺水量下面括號內數字則為對應之缺水率，而延時欄位括號內數字代表年最大缺水量之長期平均，例如：以延時 30 日之年最大缺水量為例，其長期平均為 58 萬噸。在固定延時情況下，以延時 90 日為例，頻率年 2 年對應之缺水量約為 87 萬噸(缺水率 5.2%)，隨著頻率年增加其缺水率亦會快速增加，當頻率年增加至 100 年，其對應之缺水率則已達 30.2%，有明顯增加情況。若在固定頻率年情況下，以頻率年 5 年為例，延時 30 日對應之缺水量約為 79 萬噸(缺水率 14.4%)，隨著延時增加其缺水率則有降低情況，當延時增加至 180 日，其對應之缺水率則降低至 7.1%。整體而言，以特定延時來看，當頻率年愈高其對應之缺水率有增加趨勢(缺水強度愈強)；但若以極端乾旱缺水量來看，當延時愈長其缺水率則有降低之趨勢(缺水強度愈低)。

此外，進一步比對特定延時下年最大缺水量長期平均值與特定延時下各頻率年缺水量，以便後續應用參考。分析結果發現：不同延時下年最大缺水量長期平均值約介於頻率年 2 年缺水量至頻率年 5 年缺水量之間，約略等於兩者平均。以延時 90 日為例，其平均年最大缺水量約為 111 萬噸，缺水量介於頻率

年 2 年缺水量(87 萬噸)至 5 年缺水量(172 萬噸)之間，與兩者平均值接近 $((87+172)\times 0.5=130)$ 。

基於上述不同延時下各頻率年對應缺水量(即嚴重度)之資訊，可探討屏東地區水資源系統一旦發生乾旱事件時，其乾旱事件嚴重度、延時、頻率年之關係，有助於合理量化枯水期間之缺水情況，並可依據其成果繪製屏東地區水資源系統現況條件下乾旱 SDF 曲線(圖 4-7)。圖中橫軸為延時、縱軸為缺水量、等值線則代表不同頻率年，而斜粗線則代表最大缺水量之上限(即缺水率 100%)。由乾旱 SDF 曲線圖可知：在延時固定情況下，頻率年增加將導致最大缺水量增加；同樣地，在頻率年固定情況下，延時增加將導致最大缺水量增加，惟其增加幅度(斜率)會隨延時增加而有所趨緩。

表 4-11 屏東地區於現況條件下不同延時與頻率年之對應缺水量

| 延時(日)<br>(平均缺水量 <sup>1</sup> ) | 頻率年(年)        |                |                |                |                |                |
|--------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                | 2             | 5              | 10             | 25             | 50             | 100            |
| 30<br>(58)                     | 44<br>(8.0%)  | 79<br>(14.4%)  | 109<br>(19.8%) | 157<br>(28.5%) | 202<br>(36.6%) | 256<br>(46.4%) |
| 60<br>(90)                     | 73<br>(6.6%)  | 136<br>(12.3%) | 183<br>(16.5%) | 248<br>(22.5%) | 302<br>(27.4%) | 361<br>(32.7%) |
| 90<br>(111)                    | 87<br>(5.2%)  | 172<br>(10.4%) | 237<br>(14.3%) | 332<br>(20.1%) | 412<br>(24.9%) | 501<br>(30.2%) |
| 120<br>(128)                   | 94<br>(4.3%)  | 197<br>(8.9%)  | 280<br>(12.7%) | 406<br>(18.4%) | 516<br>(23.4%) | 643<br>(29.1%) |
| 150<br>(143)                   | 101<br>(3.6%) | 220<br>(8.0%)  | 318<br>(11.5%) | 472<br>(17.1%) | 611<br>(22.1%) | 775<br>(28.1%) |
| 180<br>(154)                   | 106<br>(3.2%) | 236<br>(7.1%)  | 347<br>(10.5%) | 523<br>(15.8%) | 685<br>(20.7%) | 878<br>(26.5%) |

註：<sup>1</sup>平均缺水量係依據供水操作模擬結果推求而得(即：供水操作模擬結果中歷年各延時最大缺水量之平均值)；<sup>2</sup>屏東地區(民國 108 年)之公共用水需水量約 18.4 萬噸/日；<sup>3</sup>括號內數字為缺水率；<sup>4</sup>單位：萬噸。

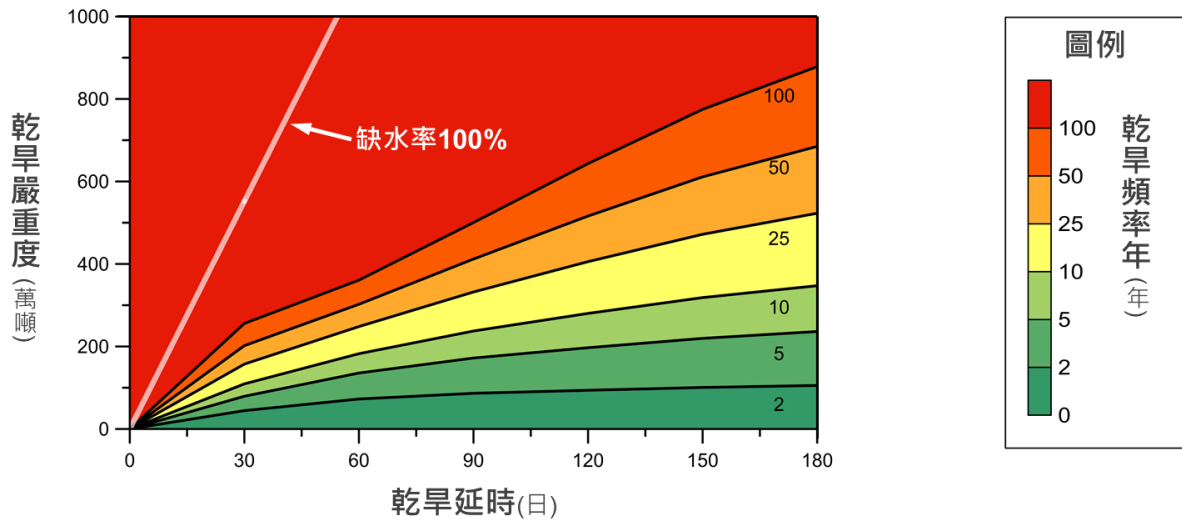


圖 4-7 屏東地區水資源系統現況條件下之乾旱 SDF 曲線

### 三、設計乾旱參數(延時與頻率年)之探討

「設計乾旱」係指具有特定延時與頻率年之乾旱事件，為方便理解其意義，後續將採用「極端乾旱」一詞作為代表，以進行相關概念說明與後續應用案例介紹。藉由導入極端乾旱之概念，量化極端枯旱(嚴重乾旱)發生時水資源系統可能面臨之缺水情況，並據以決定水資源系統需提升之額外備援容量或抗旱因應作為，以強化抗旱韌性與減緩乾旱可能造成之衝擊。極端乾旱概念在實務應用上，需先選擇合適之極端乾旱參數(即延時與頻率年)，再透過乾旱 SDF 曲線查詢極端乾旱參數所對應之缺水量(即嚴重度)，並以此缺水量作為水資源系統之設計備援水量。針對極端乾旱之參數設定方法說明如下：

#### (一) 頻率年參數設定

參考相關國際文獻於極端乾旱之作法，針對頻率年參數之設定，建議兩種主要設定方式，分別為：(1)採用歷史乾旱事件與(2)採用極端事件之定義。分別說明如下：

##### 1、採用歷史乾旱事件

極端乾旱主要係應用於測試水資源系統遭遇嚴峻乾旱事件時之表現，而在實務作法上可從歷史事件中選擇出嚴重乾旱事件作為極端乾旱，彙整美國國家科學院與美國陸軍工兵團之設定方式，介紹其作法如下：

### (1)美國國家科學院

水資源系需系統之極端乾旱概念最早係由美國國家科學院提出，其建議可選擇歷史嚴重乾旱或更加嚴重之乾旱作為極端乾旱，以決定水資源系統在面臨嚴峻乾旱發生時需提升之額外容量。

### (2)美國陸軍工兵團

美國陸軍工兵團導入極端乾旱概念(USACE, 1994)，以測試水資源系統面臨乾旱事件之表現，其建議極端乾旱可採用：歷史嚴重乾旱事件或者合成乾旱事件。

### (3)參數設定之建議

藉由回顧美國國家科學院與美國陸軍工兵團之作法可知：一般在極端乾早上經常採用歷史嚴重乾旱事件。以臺灣水資源系統而言，歷史嚴重乾旱可選用近年嚴重乾旱事件，例如：民國 103 至 104 年乾旱事件與民國 109 至 110 年乾旱事件，再配合乾旱 SDF 曲線決定合適之頻率年參數，詳細作法說明如下：

為瞭解歷史嚴重乾旱事件於南部區域水資源供需系統造成之影響，採用民國 103 至 104 年乾旱事件與民國 109 至 110 年乾旱事件為案例，從該時段供水操作模擬結果內挑選延時 30、60、90、120、150 以及 180 日之最大缺水量，並將其點繪至各縣市現況條件下乾旱 SDF 曲線，以瞭解近年兩場嚴重乾旱事件之頻率年。

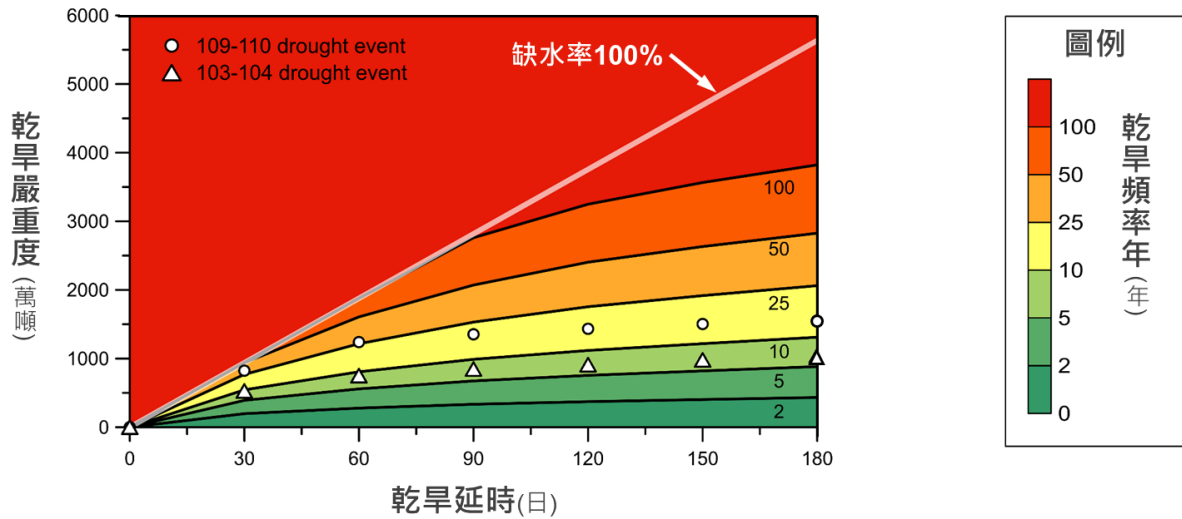


圖 4-8 嘉義地區現況乾旱 SDF 曲線與近年嚴重乾旱事件之缺水特性

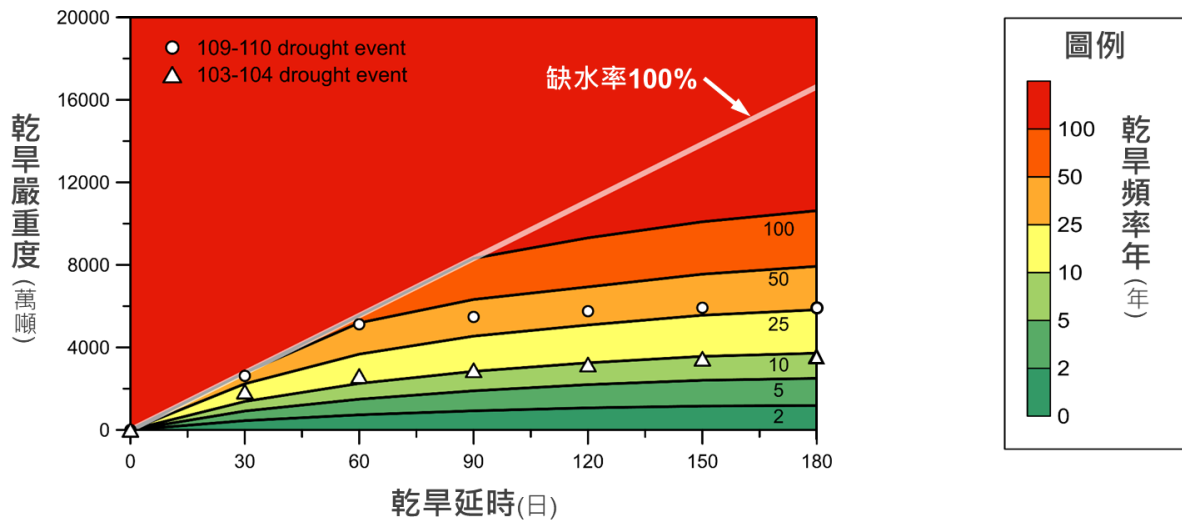


圖 4-9 臺南地區現況乾旱 SDF 曲線與近年嚴重乾旱事件之缺水特性

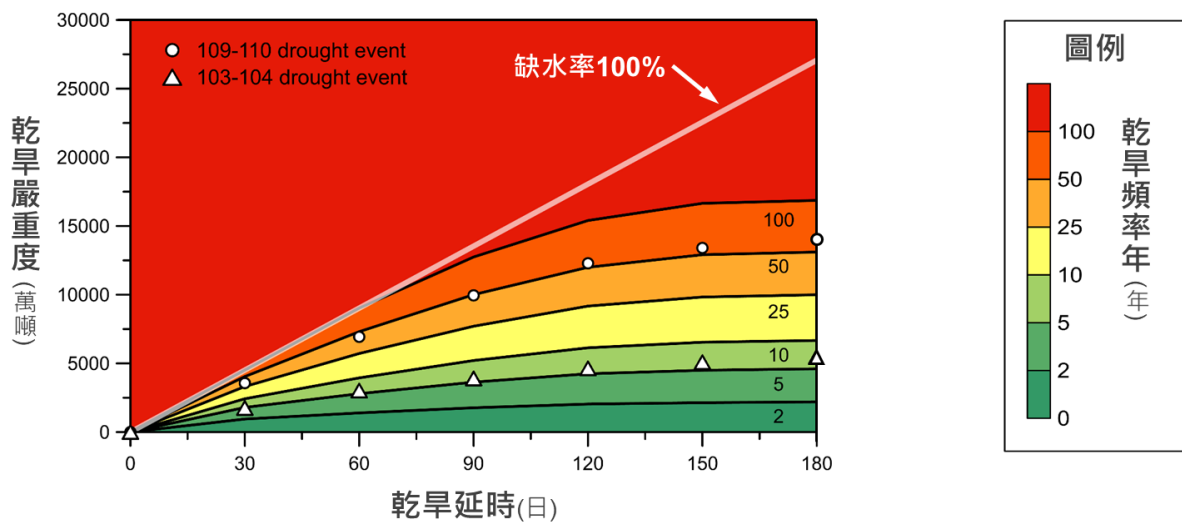


圖 4-10 高雄地區現況乾旱 SDF 曲線與近年嚴重乾旱事件之缺水特性



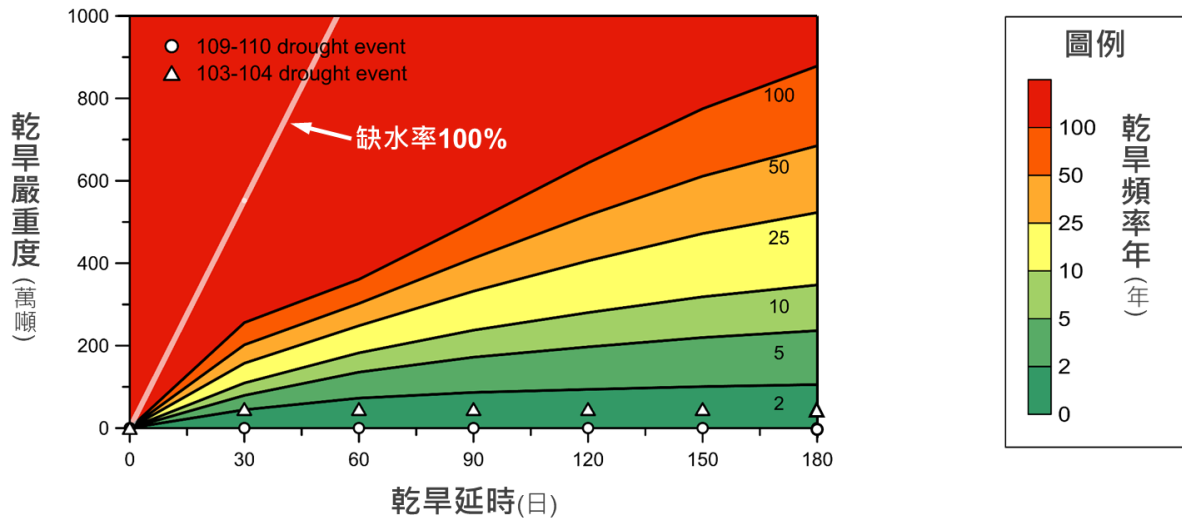


圖 4-11 屏東地區現況乾旱 SDF 曲線與近年嚴重乾旱事件之缺水特性

圖 4-8 為嘉義地區現況乾旱 SDF 曲線與近年嚴重乾旱事件之缺水特性，分析結果顯示：針對民國 103 至 104 年乾旱事件，延時 30 與 60 日缺水事件之頻率年約為 10 年上下，而較長延時(90 至 180 日)缺水事件之頻率年則介於 5 至 10 年之間，且隨著延時增加，其對應之頻率年出現緩慢減少情況；針對民國 109 至 110 年乾旱事件，延時 30 與 60 日缺水事件之頻率年約為 25 年上下，而較長延時(90 至 180 日)缺水事件之頻率年則介於 10 至 25 年之間，且隨著延時增加，其對應之頻率年出現緩慢減少情況。整體而言，民國 103 至 104 年乾旱於嘉義地區造成之缺水事件頻率年約莫為 5 至 10 年之間，保守起見採用 10 年作為代表；而民國 109 至 110 年乾旱於嘉義地區造成之缺水事件頻率年約莫為 10 至 25 年之間，保守起見採用 25 年作為代表。

圖 4-9 為臺南地區現況乾旱 SDF 曲線與近年嚴重乾旱事件之缺水特性，分析結果顯示：針對民國 103 至 104 年乾旱事件，延時 30 與 60 日缺水事件之頻率年約介於 10 至 25 年之間，而較長延時(90 至 180 日)缺水事件之頻率年則約為 10 年左右；針對民國 109 至 110 年乾旱事件，延時 30 與 60 日缺水事件之頻率年約為 50 年上下，而較長延時(90 至 180 日)

缺水事件之頻率年則約為 25 至 50 年左右。整體而言，民國 103 至 104 年乾旱於臺南地區造成之缺水事件頻率年約莫為 10 年上下；而民國 109 至 110 年乾旱於臺南地區造成之缺水事件頻率年則約莫為 50 年上下。

圖 4-10 為高雄地區現況乾旱 SDF 曲線與近年嚴重乾旱事件之缺水特性，分析結果顯示：針對民國 103 至 104 年乾旱事件，延時 30 至 90 日缺水事件之頻率年約為 5 年上下，而較長延時(120 至 180 日)缺水事件之頻率年則介於 5 至 10 年之間；針對民國 109 至 110 年乾旱事件，延時 30 至 60 日缺水事件之頻率年約為 25 至 50 年之間，而較長延時(90 至 180 日)缺水事件之頻率年則為 50 年上下。整體而言，民國 103 至 104 年乾旱事件於高雄地區造成之缺水事件頻率年約莫為 5 至 10 年之間，保守起見採用 10 年作為代表；而民國 109 至 110 年乾旱事件於高雄地區造成之缺水事件頻率年約莫為 50 年上下。

圖 4-11 為屏東地區現況乾旱 SDF 曲線與近年嚴重乾旱事件之缺水特性，分析結果顯示：針對民國 103 至 104 年乾旱事件，延時 30 日缺水事件之頻率年約為 2 年上下，而較長延時(60 至 180 日)缺水事件之頻率年則皆低於 2 年，且隨著延時增加，其對應之頻率年出現緩慢減少情況；針對民國 109 至 110 年乾旱事件，屏東地區並無發生缺水事件，其水資源供需屬於正常情況。整體而言，民國 103 至 104 年乾旱事件於屏東地區造成之缺水事件頻率年約莫為 2 年上下；而民國 109 至 110 年乾旱事件於屏東地區則無造成缺水情況。

整理民國 103 至 104 年乾旱事件與民國 109 至 110 年乾旱事件在各個縣市造成缺水事件之頻率年(圖 4-12)，以瞭解近年歷史嚴重乾旱事件於南部區域整體水資源供需系統造成之影響。分析結果顯示：(1)民國 103 至 104 乾旱事件對於南部區域各縣市造成不同程度之缺水頻率年，其中以嘉義、

臺南以及高雄地區之缺水頻率年較高，其頻率年約為 10 年上下，而屏東地區之缺水頻率年較低，其頻率年約莫為 2 年上下；(2)民國 109 至 110 乾旱事件對於南部區域各縣市造成不同程度之缺水頻率年，其中以臺南與高雄地區之缺水頻率年較高，其頻率年約為 50 年上下，而嘉義地區之缺水頻率年次高(約為 25 年)，而屏東地區則無發生缺水事件，其水資源供需屬於正常情況。

整體而言，建議從近年嚴重乾旱事件中挑選衝擊較大者，作為極端乾旱在頻率年設定上參考。即：嘉義地區採用 25 年之缺水頻率年、臺南與高雄地區採用 50 年之缺水頻率年、屏東地區採用 2 年之缺水頻率年。

|    | 103-104<br>乾旱事件 | 109-110<br>乾旱事件 | 頻率年<br>採用參數<br>(兩者取大) |
|----|-----------------|-----------------|-----------------------|
| 嘉義 | 10 年            | 25 年            | 25 年                  |
| 臺南 | 10 年            | 50 年            | 50 年                  |
| 高雄 | 10 年            | 50 年            | 50 年                  |
| 屏東 | 2 年             | -               | 2 年                   |

註：<sup>1</sup>本計畫係將歷史嚴重乾旱事件於不同延時之最大缺水量點繪至乾旱 SDF 曲線上，以決定南部區域各縣市之乾旱頻率年參數；<sup>2</sup>「-」代表乾旱事件期間該縣市無缺水情況發生。

圖 4-12 南部區域各縣市近年嚴重乾旱事件之缺水特性

## 2、採用極端事件之定義

彙整國內外文獻對於極端事件之定義，以作為極端乾早在頻率年參數設定上參考，相關文獻介紹如下：

### (1)世界氣象組織

世界氣象組織(WMO, 2015)定義當一場事件之天氣或氣候變量高於(或低於)特定門檻值，即可被視為極端事件。此外，具有嚴重衝擊之天氣或氣候事件亦可被視為極端事件(例如：民國 103 至 104 年乾旱事件與民國 109 至 110 年乾旱事件)。

### (2)政府間氣候變遷委員會

政府間氣候變遷委員會(IPCC, 2012)將氣候極端值(climate extremes)視為極端天氣事件與極端氣候事件之統稱，其可採用累積機率進行定義，亦可採用門檻值進行定義。其中，累積機率經常採用 1%、5%、10%、90%、95%以及 99% (即頻率年經常採用 10 至 100 年作為設定)；而判斷是否為極端事件之門檻值則經常採用 1<sup>st</sup>、5<sup>th</sup>、10<sup>th</sup>、90<sup>th</sup>、95<sup>th</sup> 以及 99<sup>th</sup> 百分位數。

### (3)國際學術研究

McPhillips et al. (2018)針對國際上 244 篇學術研究文獻進行回顧歸納，其分析結果指出：極端事件在定義上，經常採用門檻值法，而其門檻值一般係介於 90<sup>th</sup> 至 99<sup>th</sup> 百分位數間。若以頻率年而言，當某事件之頻率年高於 10 年或 100 年，即符合極端事件之定義。

### (4)臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(TCCIP)

臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(李惠玲，民國 107 年)，從機率角度進行極端事件定義，例如：以天氣或氣候變量之機率分布函數而言，若其累積機率低於 10%或高於 90% (相當於頻率年 10 年)，即可視為極端事件。

### (5) 參數設定之建議

藉由回顧政府間氣候變遷委員會、臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台以及國際上學術研究作法可知：在極端事件定義上經常以累積機率為基礎，若累積機率低於 1 至 10% 區間或超過 90 至 99% 區間，則可視為極端事件(相當於採用頻率年 10 至 100 年)。

### 3、南部區域之頻率年參數設定

針對頻率年參數設定，整理回顧兩種不同作法：(1)參考近年嚴重乾旱事件之頻率年進行設定；(2)參考國內外對於極端事件之定義，可選擇 10 至 100 年頻率年作為設定。綜合上述兩種作法，建議嘉義、臺南、高雄以及屏東分別可擇定 25、50、50 以及 2 年作為極端乾旱之頻率年參數，以作為決定後續設計備援水量之依據。

### (二) 延時參數設定

針對極端乾旱之延時參數設定，建議可參考近年嚴重乾旱事件之缺水延時進行設定，例如：(1)民國 103 至 104 年乾旱事件與(2)民國 109 至 110 年乾旱事件，針對兩場事件之缺水特性說明如下：

#### 1、民國 103 至 104 年乾旱事件之延時

南部區域於民國 103 至 104 年乾旱期間，以臺南與高雄之水情較為嚴峻，臺南實施 88 日(民國 104 年 2 月 26 日至 5 月 24 日)「減量供水」，而高雄缺水情況更加嚴重，其分別實施 67 日(民國 104 年 2 月 26 日至 5 月 3 日)「減量供水」與 21 日(民國 104 年 5 月 4 日至 5 月 24 日)「分區供水」。依據民國 103 至 104 年乾旱事件對於水資源供需之影響，臺南與高雄公共用水在乾旱期間可感受到明顯缺水影響之天數約為 88 日，故建議可採用 90 日作為延時設定。

## 2、民國 109 至 110 年乾旱事件之延時

南部區域於民國 109 至 110 年乾旱期間，以嘉義、臺南以及高雄之水情較為嚴峻，嘉義與臺南實施 117 日(民國 110 年 2 月 25 日至 6 月 21 日)「減量供水」，而高雄則藉由啟動伏流水方式穩定供水，其受乾旱影響期間較短，僅實施 58 日(民國 110 年 4 月 1 日至 5 月 28 日)「減量供水」。依據民國 109 至 110 年乾旱事件對於水資源供需之影響，嘉義與臺南公共用水在乾旱期間可感受到明顯缺水影響之天數約為 117 日，故建議可採用 120 日作為延時設定。

## 3、延時參數設定小結

民國 103 至 104 年與民國 109 至 110 年乾旱事件於南部區域分別造成之缺水延時為 90 日與 120 日，挑選兩者中較大者作為延時參數之建議值，即南部區域極端乾旱之延時參數建議以 120 日作為設定值。

### (三)近年嚴重乾旱事件之代表性探討

在「極端乾旱」參數設定上，主要係參考近年嚴重乾旱事件(103-104 乾旱與 109-110 乾旱)特性進行決定，而為瞭解近年嚴重乾旱事件之代表性，以臺南地區為例，藉由比較「極端乾旱」之缺水量與歷史上嚴重乾旱事件之缺水量評估其代表性：

從臺南地區各年延時 120 日之最大缺水量(表 4-4)可知，歷史上 5 場最嚴重乾旱事件之缺水量依年份排序分別為：(1)民國 68 年 4,999 萬噸/120 日、(2)民國 69 年 6,661 萬噸/120 日、(3)民國 82 年 5,834 萬噸/120 日、(4)民國 91 年 6,547 萬噸/120 日以及(5)民國 109 年 5,759 萬噸/120 日。而依據臺南地區於現況條件下不同延時與頻率年之對應缺水量(表 4-9)，當「極端乾旱」參數為延時 120 日與頻率年 50 年時，其對應之缺水量為 6,933 萬噸/120 日。缺水量比對結果指出：臺南地區歷史上 5 場最嚴重乾旱事件之缺水量皆小於「極端乾旱」之缺水量(延時 120 日與頻率年 50 年)，突顯所建議之「極端乾旱」參數除可反映出極端缺水情況，亦具有一定程度之代表性。

## 第五章 極端枯旱風險評估與備援方案建議

此章節重點在於評估與建議水資源系統之設計備援水量，以提升極端乾旱事件下水資源系統之調適能力與抗旱韌性，進而紓緩極端事件所造成之衝擊。為此，提出極端枯旱風險評估與備援方案建議之主要步驟如下：(1) 首先，應用「極端乾旱」概念量化南部區域水資源系統之極端枯旱風險，以突顯出實際枯旱情況；(2) 再藉由繪製縣市尺度之枯旱潛勢地圖，呈現極端枯旱風險在空間上之分布情況，以利辨識枯旱熱點；(3) 然後，基於「極端乾旱」推估南部區域各縣市之設計備援水量，再配合實際備援水量之盤點結果，計算強化備援水量並提出建議強化方案(例如：增加海水淡化與抗旱水井)；(4) 最後，採用設計備援水量作為備援設定，重新分析水資源供需情況，以評估新增備援水量之效益，並配合水資源韌性概念檢視南部區域水資源系統之韌性提升效益。針對各項分析內容詳細說明如下：

### 一、極端枯旱風險衝擊評估

承接第四章「乾旱 SDF 曲線產製與分析」，應用南部區域各個縣市水資源系統之目標年條件下乾旱 SDF 曲線，進行極端枯旱風險量化，以合理反應出系統於「極端枯旱事件」可能面臨之缺水情況。表 5-1 至表 5-4 分別為嘉義、臺南、高雄以及屏東地區水資源系統於目標年條件下不同延時與頻率年之對應缺水量，而圖 5-1 至圖 5-4 則分別為嘉義、臺南、高雄以及屏東地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線，針對南部區域各縣市面對極端枯旱事件之量化風險說明如下：

表 5-1 嘉義系統於目標年條件下不同延時與頻率年之對應缺水量

| 延時(日)<br>(平均缺水量 <sup>1</sup> ) | 頻率年(年)         |                |                |                  |                  |                   |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|
|                                | 2              | 5              | 10             | 25               | 50               | 100               |
| 30<br>(171)                    | 111<br>(10.6%) | 232<br>(22.1%) | 354<br>(33.8%) | 581<br>(55.5%)   | 826<br>(78.9%)   | 1,047<br>(100.0%) |
| 60<br>(266)                    | 171<br>(8.2%)  | 362<br>(17.3%) | 563<br>(26.9%) | 952<br>(45.5%)   | 1,388<br>(66.3%) | 2,001<br>(95.6%)  |
| 90<br>(322)                    | 202<br>(6.4%)  | 443<br>(14.1%) | 704<br>(22.4%) | 1,224<br>(39.0%) | 1,821<br>(58.0%) | 2,681<br>(85.4%)  |
| 120<br>(353)                   | 217<br>(5.2%)  | 489<br>(11.7%) | 787<br>(18.8%) | 1,387<br>(33.1%) | 2,083<br>(49.7%) | 3,096<br>(73.9%)  |
| 150<br>(373)                   | 227<br>(4.3%)  | 519<br>(9.9%)  | 843<br>(16.1%) | 1,505<br>(28.7%) | 2,279<br>(43.5%) | 3,418<br>(65.3%)  |
| 180<br>(396)                   | 240<br>(3.8%)  | 552<br>(8.8%)  | 899<br>(14.3%) | 1,611<br>(25.6%) | 2,448<br>(39.0%) | 3,680<br>(58.6%)  |

註：<sup>1</sup>平均缺水量係依據供水操作模擬結果推求而得(即：供水操作模擬結果中歷年各延時最大缺水量之平均值)；<sup>2</sup>嘉義地區(民國 125 年)之公共用水需水量約 34.9 萬噸/日，其採用供水方案設定與水資源經理計畫一致(圖 3-7)；<sup>3</sup>括號內數字為缺水率；<sup>4</sup>單位：萬噸。

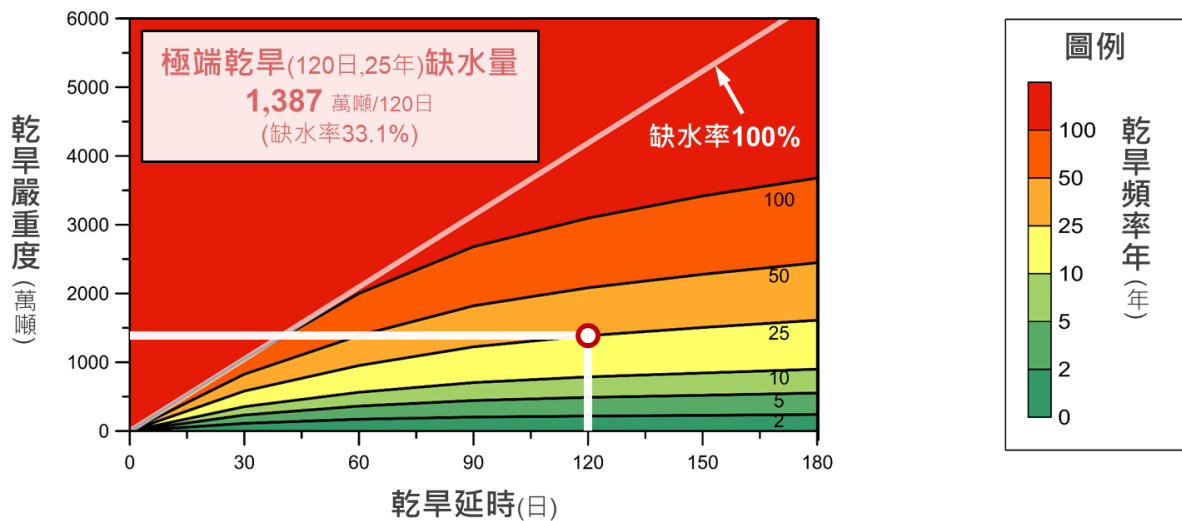


圖 5-1 嘉義地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線



表 5-2 臺南系統於目標年條件下不同延時與頻率年之對應缺水量

| 延時(日)<br>(平均缺水量 <sup>1</sup> ) | 頻率年(年)         |                  |                  |                  |                  |                   |
|--------------------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
|                                | 2              | 5                | 10               | 25               | 50               | 100               |
| 30<br>(805)                    | 562<br>(15.6%) | 1,166<br>(32.3%) | 1,694<br>(46.9%) | 2,557<br>(70.8%) | 3,375<br>(93.5%) | 3,609<br>(100.0%) |
| 60<br>(1,256)                  | 803<br>(11.1%) | 1,800<br>(24.9%) | 2,720<br>(37.7%) | 4,295<br>(59.5%) | 5,860<br>(81.2%) | 7,218<br>(100.0%) |
| 90<br>(1,474)                  | 911<br>(8.4%)  | 2,111<br>(19.5%) | 3,234<br>(29.9%) | 5,183<br>(47.9%) | 7,143<br>(66.0%) | 9,666<br>(89.3%)  |
| 120<br>(1,581)                 | 948<br>(6.6%)  | 2,247<br>(15.6%) | 3,482<br>(24.1%) | 5,659<br>(39.2%) | 7,881<br>(54.6%) | 10,779<br>(74.7%) |
| 150<br>(1,644)                 | 955<br>(5.3%)  | 2,303<br>(12.8%) | 3,611<br>(20.0%) | 5,961<br>(33.0%) | 8,402<br>(46.6%) | 11,637<br>(64.5%) |
| 180<br>(1,673)                 | 956<br>(4.4%)  | 2,324<br>(10.7%) | 3,666<br>(16.9%) | 6,100<br>(28.2%) | 8,655<br>(40.0%) | 12,065<br>(55.7%) |

註：<sup>1</sup>平均缺水量係依據供水操作模擬結果推求而得(即：供水操作模擬結果中歷年各延時最大缺水量之平均值)；<sup>2</sup>臺南地區(民國 125 年)之公共用水需水量約 120.3 萬噸/日，其採用供水方案設定與水資源經理計畫一致(圖 3-8)；<sup>3</sup>括號內數字為缺水率；<sup>4</sup>單位：萬噸。

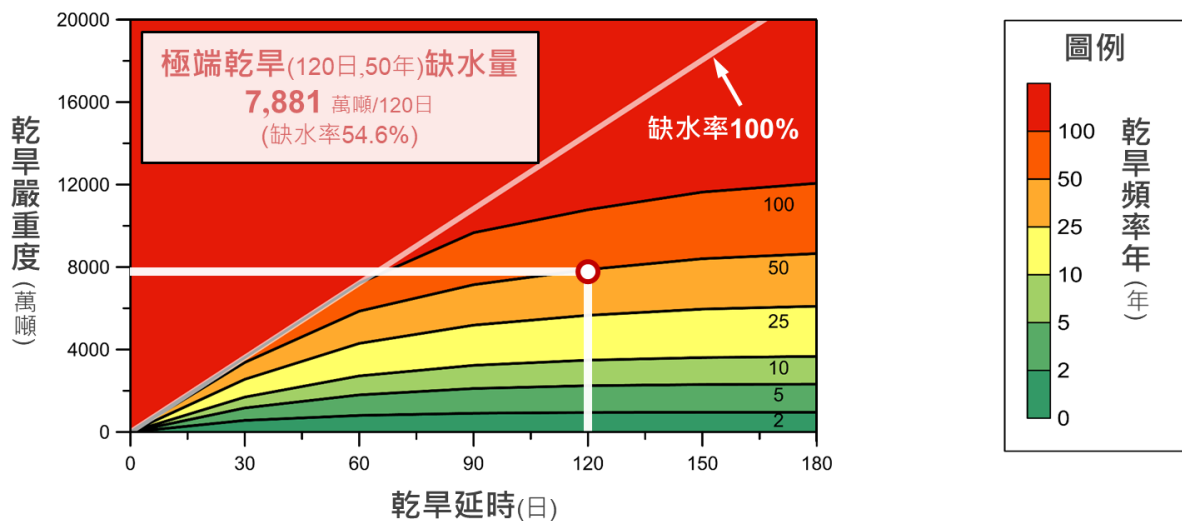


圖 5-2 臺南地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線

表 5-3 高雄系統於目標年條件下不同延時與頻率年之對應缺水量

| 延時(日)<br>(平均缺水量 <sup>1</sup> ) | 頻率年(年)           |                  |                  |                  |                  |                   |
|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
|                                | 2                | 5                | 10               | 25               | 50               | 100               |
| 30<br>(1.037)                  | 930<br>(18.2%)   | 1,552<br>(30.4%) | 1,954<br>(38.3%) | 2,454<br>(48.1%) | 2,817<br>(55.2%) | 3,173<br>(62.2%)  |
| 60<br>(1.695)                  | 1,447<br>(14.2%) | 2,521<br>(24.7%) | 3,281<br>(32.1%) | 4,300<br>(42.1%) | 5,102<br>(50.0%) | 5,938<br>(58.2%)  |
| 90<br>(2.245)                  | 1,877<br>(12.3%) | 3,333<br>(21.8%) | 4,394<br>(28.7%) | 5,856<br>(38.3%) | 7,036<br>(46.0%) | 8,294<br>(54.2%)  |
| 120<br>(2.617)                 | 2,178<br>(10.7%) | 3,921<br>(19.2%) | 5,190<br>(25.4%) | 6,936<br>(34.0%) | 8,343<br>(40.9%) | 9,842<br>(48.2%)  |
| 150<br>(2.796)                 | 2,280<br>(8.9%)  | 4,192<br>(16.4%) | 5,619<br>(22.0%) | 7,628<br>(29.9%) | 9,283<br>(36.4%) | 11,079<br>(43.4%) |
| 180<br>(2,881)                 | 2,343<br>(7.7%)  | 4,324<br>(14.1%) | 5,805<br>(19.0%) | 7,892<br>(25.8%) | 9,615<br>(31.4%) | 11,486<br>(37.5%) |

註：<sup>1</sup>平均缺水量係依據供水操作模擬結果推求而得(即：供水操作模擬結果中歷年各延時最大缺水量之平均值)；<sup>2</sup>高雄地區(民國 125 年)之公共用水需水量約 170.1 萬噸/日，其採用供水方案設定與水資源經理計畫一致(圖 3-9)；<sup>3</sup>括號內數字為缺水率；<sup>4</sup>單位：萬噸。

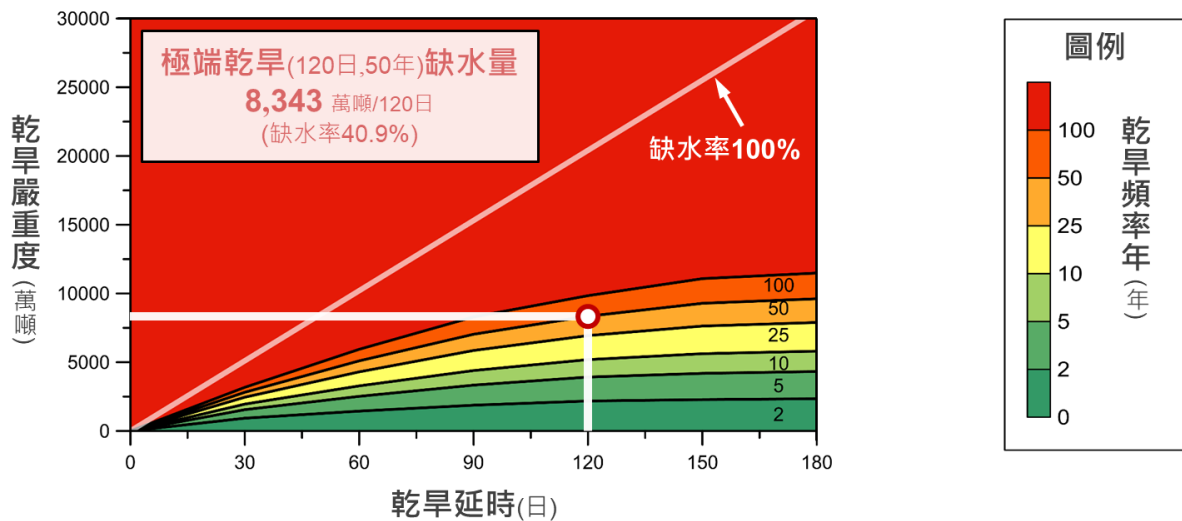


圖 5-3 高雄地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線

表 5-4 屏東系統於目標年條件下不同延時與頻率年之對應缺水量

| 延時(日)<br>(平均缺水量 <sup>1</sup> ) | 頻率年(年)        |               |                |                |                |                |
|--------------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                | 2             | 5             | 10             | 25             | 50             | 100            |
| 30<br>(58)                     | 44<br>(6.2%)  | 79<br>(11.1%) | 109<br>(15.3%) | 157<br>(22.0%) | 202<br>(28.3%) | 256<br>(35.8%) |
| 60<br>(90)                     | 73<br>(5.1%)  | 136<br>(9.5%) | 183<br>(12.8%) | 248<br>(17.4%) | 302<br>(21.2%) | 361<br>(25.3%) |
| 90<br>(111)                    | 87<br>(4.0%)  | 172<br>(8.0%) | 237<br>(11.1%) | 332<br>(15.5%) | 412<br>(19.2%) | 501<br>(23.4%) |
| 120<br>(128)                   | 94<br>(3.3%)  | 197<br>(6.9%) | 280<br>(9.8%)  | 406<br>(14.2%) | 516<br>(18.1%) | 643<br>(22.5%) |
| 150<br>(143)                   | 101<br>(2.8%) | 220<br>(6.2%) | 318<br>(8.9%)  | 472<br>(13.2%) | 611<br>(17.1%) | 775<br>(21.7%) |
| 180<br>(154)                   | 106<br>(2.5%) | 236<br>(5.5%) | 347<br>(8.1%)  | 523<br>(12.2%) | 685<br>(16.0%) | 878<br>(20.5%) |

註：<sup>1</sup>平均缺水量係依據供水操作模擬結果推求而得(即：供水操作模擬結果中歷年各延時最大缺水量之平均值)；<sup>2</sup>屏東地區(民國 125 年)之公共用水需水量約 23.8 萬噸/日，其採用供水方案設定與水資源經理計畫一致(圖 3-10)；<sup>3</sup>括號內數字為缺水率；<sup>4</sup>單位：萬噸。

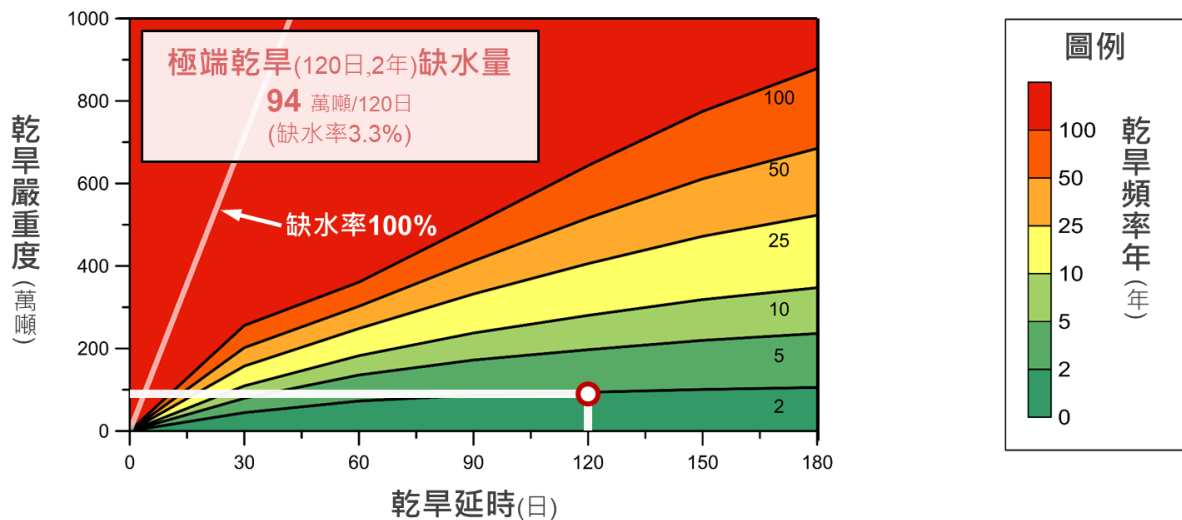


圖 5-4 屏東地區水資源系統目標年條件下乾旱 SDF 曲線

極端乾旱事件係指因雨量顯著偏少所導致之缺水情況，其造成之缺水程度通常較為嚴重，為瞭解極端事件對於水資源系統可能造成之枯旱風險，導入「極端乾旱」概念，依據目標年條件下乾旱 SDF 曲線與極端乾旱參數建議值(例如：延時 120 日與頻率年 50 年)，以量化南部區域各縣市所面臨之極端枯旱風險。

### (一)嘉義地區

若需評估水資源系統在極端枯旱影響下可能面對之缺水情況，可藉由查詢乾旱 SDF 曲線中「極端乾旱」所對應之缺水量。以目標年條件下嘉義地區水資源系統為例，其極端乾旱事件之延時與頻率年參數分別採用 120 日與 25 年(詳細參數設定之說明可參考第 4-3 節參數探討)，此組參數對應缺水量約為 1,387 萬噸。因嘉義地區之目標年需水量為 34.9 萬噸/日，將其缺水量換算為缺水率約為 33.1% 左右( $1,387 \div 120 \div 34.9 = 33.1\%$ )。

### (二)臺南地區

若需評估水資源系統在極端枯旱影響下可能面對之缺水情況，可藉由查詢乾旱 SDF 曲線中「極端乾旱」所對應之缺水量。以目標年條件下臺南地區水資源系統為例，其極端乾旱事件之延時與頻率年參數分別採用 120 日與 50 年(詳細參數設定之說明可參考第 4-3 節參數探討)，此組參數對應缺水量約為 7,881 萬噸。因臺南地區之目標年需水量為 120.3 萬噸/日，將其缺水量換算為缺水率約為 54.6% 左右( $7,881 \div 120 \div 120.3 = 54.6\%$ )。

### (三)高雄地區

若需評估水資源系統在極端枯旱影響下可能面對之缺水情況，可藉由查詢乾旱 SDF 曲線中「極端乾旱」所對應之缺水量。以目標年條件下高雄地區水資源系統為例，其極端乾旱事件之延時與頻率年參數分別採用 120 日與 50 年(詳細參數設定之說明可參考第 4-3 節參數探討)，此組參數對應缺水量約為 8,343 萬噸。因高雄地區之目標年需水量為 170.1 萬噸/日，將其缺水量換算為缺水率約為 40.9% 左右( $8,343 \div 120 \div 170.1 = 40.9\%$ )。

### (四)屏東地區

若需評估水資源系統在極端枯旱影響下可能面對之缺水情況，可藉由查詢乾旱 SDF 曲線中「極端乾旱」所對應之缺水量。以目標年條件下屏東地區水資源系統為例，其極端乾旱事件之延時與頻率年參數分別採用 120 日與 2 年(詳細參數設定之說明可參考第 4-3 節參

數探討)，此組參數對應缺水量約為 94 萬噸。因屏東地區之目標年需水量為 23.8 萬噸/日，將其缺水量換算為缺水率約為 3.3%左右 ( $94 \div 120 \div 23.8 = 3.3\%$ )。

## 二、區域極端枯旱潛勢地圖繪製(縣市尺度)

以乾旱 SDF 曲線作為評估工具，量化水資源供需系統面臨之極端枯旱風險，再進一步彙整各縣市於「極端乾旱」條件下之可能缺水情況，呈現南部區域極端枯旱風險之空間分布，有助於辨識面臨極端枯旱事件時之高風險區域，並提出對應之備援措施以降低高風險區域之極端枯旱風險。

### (一)極端枯旱潛勢地圖繪製流程

為瞭解風險之空間結構，提出區域極端枯旱潛勢地圖繪製(縣市尺度)之繪製流程(圖 5-5)，將南部區域各個縣市(嘉義、臺南、高雄以及屏東)極端枯旱風險評估成果，繪製成區域枯旱潛勢地圖。步驟說明如下：

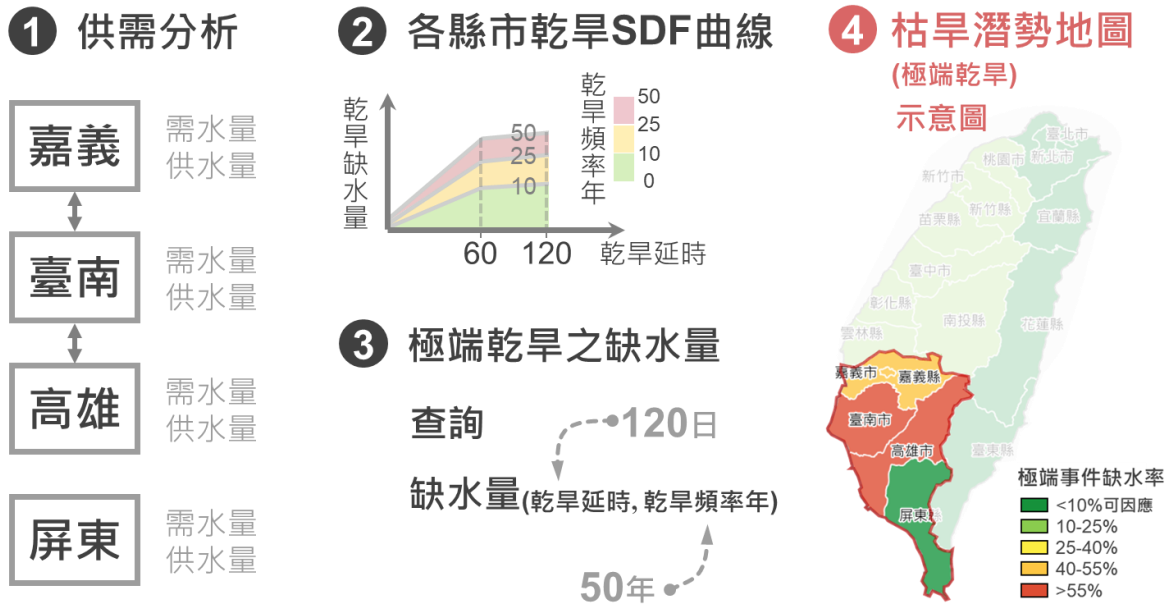


圖 5-5 區域極端枯旱潛勢地圖繪製(縣市尺度)之繪製流程

## 1、供需分析

針對南部各個縣市(嘉義、臺南、高雄以及屏東)進行水資源供需分析，以瞭解各個縣市之水資源供需情況(包含水資源聯合運用)，再藉由需水量與供水量進行缺水量之計算。

## 2、乾旱 SDF 曲線

依據各個縣市之缺水量資料推估乾旱 SDF 曲線，瞭解不同延時與頻率年之缺水情況，以量化極端枯旱風險。

## 3、極端乾旱

基於南部區域各縣市「極端乾旱」之參數條件(例如：臺南地區參數為延時 120 日與頻率年 50 年)，查詢乾旱 SDF 曲線上所對應之缺水量，瞭解各個縣市在「極端乾旱」條件下所面臨之極端枯旱風險。

## 4、極端枯旱潛勢地圖

依據各個縣市在「極端乾旱」條件下所面臨之極端枯旱風險值，進行極端枯旱潛勢地圖之繪製，呈現極端枯旱風險在空間上之分布，以辨識面臨極端枯旱事件時之高風險區域，有助於提出對應之備援措施以降低高風險區域之極端枯旱風險。

### (二)南部區域之極端枯旱潛勢地圖

依據上述極端枯旱潛勢地圖之繪製流程，產製南部區域於現況與目標年條件下極端枯旱潛勢地圖(圖 5-6)，並藉由潛勢地圖探討風險空間結構並辨識出高風險區域。其中，各縣市詳細之缺水程度(極端缺水率)資料列於表 5-5。

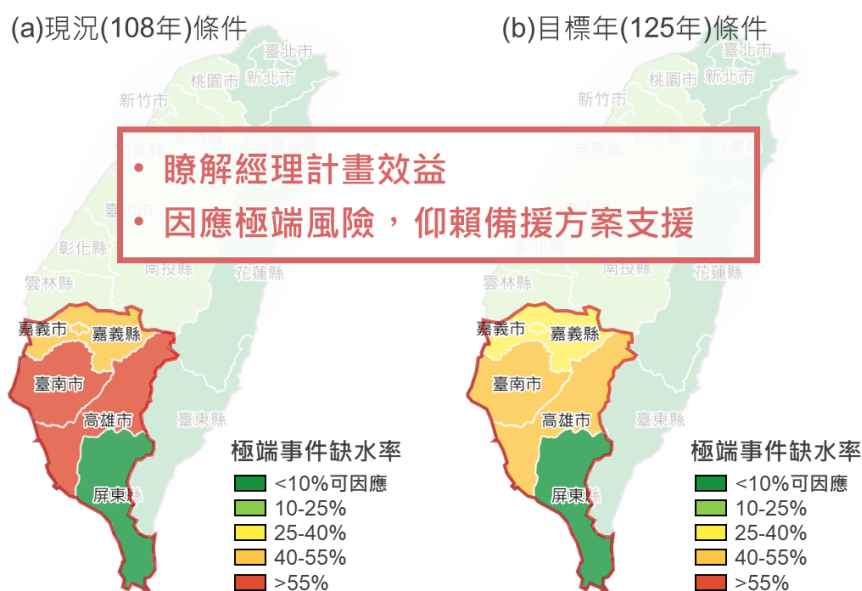
以南部區域於現況條件下極端枯旱風險而言，各個縣市在「極端乾旱」條件下，高雄面臨之缺水程度最為嚴峻(極端缺水率 66.5%)，臺南與嘉義之缺水程度次高(極端缺水率分別為 62.5%與 46.7%)，而屏東之缺水程度則最低(極端缺水率 4.3%);以南部區域於目標年條件下極端枯旱風險而言，各個縣市在「極端乾旱」條件下，臺南面臨之缺水程度最為嚴峻(極端缺水率 54.6%)，高雄與嘉義之缺水程度次高(極端缺水率分別為 40.9%與 33.1%)，而屏東之缺水程度

則最低(極端缺水率 3.3%)。

進一步比對特定縣市於現況與目標年條件下極端枯旱風險，探討經理計畫之水資源方案推動，對於紓緩極端枯旱風險之成效。以目標年相較於現況之極端缺水程度而言，高雄現況極端缺水率為 66.5%，而目標年極端缺水率則為 40.9%，缺水率降低 25.6%，其紓緩效果最為顯著；嘉義現況極端缺水率為 46.7%，而目標年極端缺水率則為 33.1%，缺水率降低 13.6%，其紓緩效果次高；臺南與屏東之極端缺水率則分別降低 7.9%與 1.0%。

### 極端枯旱潛勢地圖

(基於極端乾旱之缺水率進行繪製)



\*經理計畫可滿足水資源長期需水情況，惟於極端枯旱條件下(例如: 50年大旱)仍需仰賴備援方案之緊急支援，藉以穩定極端枯旱條件下之區域用水。

圖 5-6 南部區域於現況與目標年條件下極端枯旱潛勢地圖

表 5-5 南部區域各縣市於現況與目標年條件下極端乾旱缺水程度

| 縣市 | 極端乾旱缺水程度           |                     |                  |
|----|--------------------|---------------------|------------------|
|    | 現況條件<br>(民國 108 年) | 目標年條件<br>(民國 125 年) | 增減情況<br>(目標年-現況) |
| 嘉義 | 46.7%              | 33.1%               | -13.6%           |
| 臺南 | 62.5%              | 54.6%               | -7.9%            |
| 高雄 | 66.5%              | 40.9%               | -25.6%           |
| 屏東 | 4.3%               | 3.3%                | -1.0%            |

註：極端枯旱情境係採用極端乾旱條件，查詢南部區域各縣市於極端乾旱之缺水量，再配合各縣市需水量轉換為缺水率。

### 三、因應極端氣候備援容量盤點與強化策略研擬

為因應上述「極端乾旱」條件下極端枯旱風險，此章節主要聚焦「設計備援水量」之評估規劃與「待強化備援水量」之建議，用以提升水資源系統面臨極端枯旱事件之抗旱韌性，紓緩極端事件之可能衝擊。為此，首先採用「極端乾旱」決定南部區域各縣市之合理「設計備援水量」，再配合已規劃備援水量之盤點結果，評估水資源系統因應極端事件需再增加之「待強化備援水量」，並提出相關建議方案(例如：增加海水淡化與抗旱水井)。此外，依據盤點備援水量作為備援設定，重新分析水資源供需情況，以探討備援水量之效益，並配合水資源韌性概念檢視南部區域水資源系統之韌性提升效益。

#### (一)設計備援水量之評估規劃

為避免類似「極端乾旱」之嚴重缺水情況發生，建議可藉由設計備援水量探討水資源系統應具有之合理備援水量，其計算公式如下(各項水量關係如圖 5-7 所示)：

$$\text{設計備援水量} = \text{極端乾旱缺水量} - \text{可因應缺水量} \quad (5-1)$$

其中，極端乾旱缺水量係乾旱 SDF 曲線中特定延時與頻率年參數所對應之缺水量；而可因應缺水量則係參考「早災災害防救業務計畫」(經濟部，民國 109 年)之早災災害等級區分表，當一供水區水情燈號轉為紅燈(即分區供水)，代表其對應之缺水率高於 10%，假設當缺水率小於等於 10%可透過管理方式加以因應，故取缺水率 10%作為可因應缺水量之上限值。例如：嘉義地區之目標年需水量為 34.9 萬噸/日，若延時參數為 120 日，則其可因應缺水量約為 419 萬噸(34.9 × 120 × 10% = 419)。南部區域各縣市設計備援水量之評估規劃說明如下：



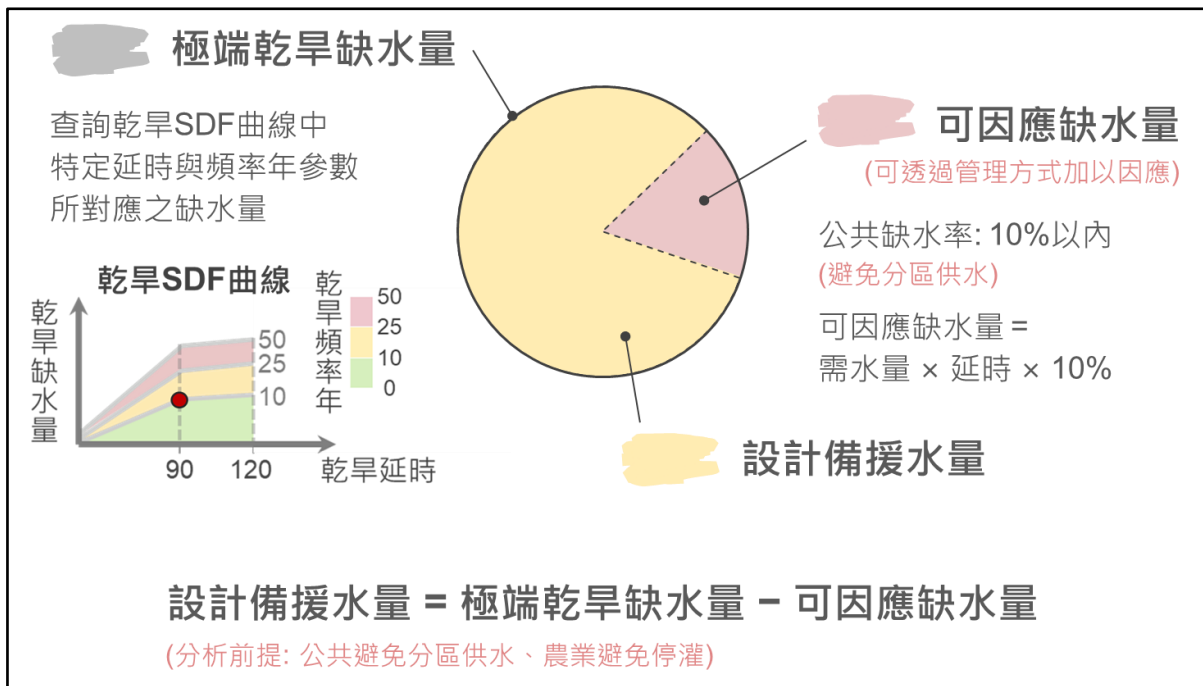


圖 5-7 設計備援水量計算示意圖

### 1、嘉義地區

嘉義地區目標年條件下設計備援水量之評估規劃如表 5-6 所示，評估結果指出：極端乾旱(延時 120 日與頻率年 25 年)之缺水量約為 1,387 萬噸/120 日，可因應缺水量則約為 419 萬噸/120 日，而兩者差值即為設計備援水量 968 萬噸/120 日，換算每日設計備援水量約為 8.1 萬噸/日。藉由設計備援水量評估規劃可決定合適之設計備援水量，一旦發生嚴重枯旱事件(極端事件)，則可透過備援水量啟用以因應極端枯旱風險可能導致之缺水情況。

### 2、臺南地區

臺南地區目標年條件下設計備援水量之評估規劃如表 5-7 所示，評估結果指出：極端乾旱(延時 120 日與頻率年 50 年)之缺水量約為 7,881 萬噸/120 日，可因應缺水量則約為 1,444 萬噸/120 日，而兩者差值即為設計備援水量 6,437 萬噸/120 日，換算每日設計備援水量約為 53.6 萬噸/日。藉由設計備援水量評估規劃可決定合適之設計備援水量，一旦發生嚴重枯旱事件(極端事件)，則可透過備援水量啟用以因應極端枯旱風險可能導致之缺水情況。

### 3、高雄地區

高雄地區目標年條件下設計備援水量之評估規劃如表 5-8 所示，評估結果指出：極端乾旱(延時 120 日與頻率年 50 年)之缺水量約為 8,343 萬噸/120 日，可因應缺水量則約為 2,041 萬噸/120 日，而兩者差值即為設計備援水量 6,302 萬噸/120 日，換算每日設計備援水量約為 52.5 萬噸/日。藉由設計備援水量評估規劃可決定合適之設計備援水量，一旦發生嚴重枯旱事件(極端事件)，則可透過備援水量啟用以因應極端枯旱風險可能導致之缺水情況。

### 4、屏東地區

屏東地區目標年條件下設計備援水量之評估規劃如表 5-9 所示，評估結果指出：極端乾旱(延時 120 日與頻率年 2 年)之缺水量約為 94 萬噸/120 日，可因應缺水量則約為 286 萬噸/120 日，因特定率年乾旱之缺水量小於可因應缺水量，其缺水量可透過管理方式加以因應，無需再增加設計備援水量。

### 5、南部區域

南部區域各個縣市目標年條件下設計備援水量之評估規劃彙整如表 5-10 所示，評估結果指出：針對極端乾旱事件，嘉義、臺南、高雄以及屏東每日所需之設計備援水量分別為 8.1、53.6、52.5 以及 0.0 萬噸/日(屏東地區極端乾旱之缺水量可透過管理方式加以因應，無需再增加設計備援水量)。整體而言，臺南與高雄所需備援水量皆超過 50 萬噸/日，以因應極端乾旱(50 年一遇乾旱事件)下嚴重缺水情況(臺南與高雄缺水率分別為 54.6%與 40.9%)；而嘉義因整體需水量較低，其所需備援水量僅為 8.1 萬噸/日，但其極端乾旱下嚴重缺水情況之缺水率仍可達 33.1%；屏東則受益於供水相對穩定，於極端乾旱期間其缺水率僅 3.3%，可透過管理方式加以因應，無需再增加設計備援水量。

表 5-6 嘉義地區目標年條件下設計備援水量之評估規劃

| 編號  | 項目      | 總量<br>(萬噸/120 日)  | 說明   |
|-----|---------|-------------------|--|
| (A) | 極端乾旱缺水量 | 1,387             | 嘉義地區目標年需水量為 34.9 萬噸/日，而目標年條件下極端乾旱(延時參數為 120 日而頻率年參數為 25 年)所對應之缺水量為 1,387 萬噸/120 日，換算缺水率約為 33.1%。                                   |
| (B) | 可因應缺水量  | 419               | 嘉義地區目標年條件下延時 120 日期間總需水量為 $34.9 \times 120 = 4,188$ 萬噸/120 日，以分區供水措施所對應之缺水率 10%作為可因應缺水量之上限，其水量為 $4,188 \times 0.1 = 419$ 萬噸/120 日。 |
| (C) | 設計備援水量  | 968<br>(8.1 萬噸/日) | 設計備援水量(C) = 極端乾旱缺水量(A) - 可因應缺水量(B)，嘉義地區目標年條件下設計備援水量為 $1,387 - 419 = 968$ 萬噸/120 日，換算每日設計備援水量約為 8.1 萬噸/日。                           |

註：可因應缺水量於計算上係參考分區供水措施所對應之缺水率 10%，其主要係透過管理方式加以因應。

表 5-7 臺南地區目標年條件下設計備援水量之評估規劃

| 編號  | 項目      | 總量<br>(萬噸/120 日)     | 說明  |
|-----|---------|----------------------|---|
| (A) | 極端乾旱缺水量 | 7,881                | 臺南地區目標年需水量為 120.3 萬噸/日，而目標年條件下極端乾旱(延時參數為 120 日而頻率年參數為 50 年)所對應之缺水量為 7,881 萬噸/120 日，換算缺水率約為 54.6%。                                       |
| (B) | 可因應缺水量  | 1,444                | 臺南地區目標年條件下延時 120 日期間總需水量為 $120.3 \times 120 = 14,436$ 萬噸/120 日，以分區供水措施所對應之缺水率 10%作為可因應缺水量之上限，其水量為 $14,436 \times 0.1 = 1,444$ 萬噸/120 日。 |
| (C) | 設計備援水量  | 6,437<br>(53.6 萬噸/日) | 設計備援水量(C) = 極端乾旱缺水量(A) - 可因應缺水量(B)，臺南地區目標年條件下設計備援水量為 $7,881 - 1,444 = 6,437$ 萬噸/120 日，換算每日設計備援水量約為 53.6 萬噸/日。                           |

註：可因應缺水量於計算上係參考分區供水措施所對應之缺水率 10%，其主要係透過管理方式加以因應。

表 5-8 高雄地區目標年條件下設計備援水量之評估規劃

| 編號  | 項目      | 總量<br>(萬噸/120 日)     | 說明   |
|-----|---------|----------------------|--|
| (A) | 極端乾旱缺水量 | 8,343                | 高雄地區目標年需水量為 170.1 萬噸/日，而目標年條件下極端乾旱(延時參數為 120 日而頻率年參數為 50 年)所對應之缺水量為 8,343 萬噸/120 日，換算缺水率約為 40.9%。  |
| (B) | 可因應缺水量  | 2,041                | 高雄地區目標年條件下延時 120 日期間總需水量為 $170.1 \times 120 = 20,412$ 萬噸/120 日，以分區供水措施所對應之缺水率 10% 作為可因應缺水量之上限，其水量為 $20,412 \times 0.1 = 2,041$ 萬噸/120 日。 |
| (C) | 設計備援水量  | 6,302<br>(52.5 萬噸/日) | 設計備援水量(C) = 極端乾旱缺水量(A) - 可因應缺水量(B)，高雄地區目標年條件下設計備援水量為 $8,343 - 2,041 = 6,302$ 萬噸/120 日，換算每日設計備援水量約為 52.5 萬噸/日。                            |

註：可因應缺水量於計算上係參考分區供水措施所對應之缺水率 10%，其主要係透過管理方式加以因應。

表 5-9 屏東地區目標年條件下設計備援水量之評估規劃

| 編號  | 項目      | 總量<br>(萬噸/120 日) | 說明  |
|-----|---------|------------------|---|
| (A) | 極端乾旱缺水量 | 94               | 屏東地區目標年需水量為 23.8 萬噸/日，而目標年條件下極端乾旱(延時參數為 120 日而頻率年參數為 2 年)所對應之缺水量為 94 萬噸/120 日，換算缺水率約為 3.3%。   |
| (B) | 可因應缺水量  | 286              | 屏東地區目標年條件下延時 120 日期間總需水量為 $23.8 \times 120 = 2,856$ 萬噸/120 日，以分區供水措施所對應之缺水率 10% 作為可因應缺水量之上限，其水量為 $2,856 \times 0.1 = 286$ 萬噸/120 日。 |
| (C) | 設計備援水量  | -                | 設計備援水量(C) = 極端乾旱缺水量(A) - 可因應缺水量(B)，由於屏東地區目標年條件下極端乾旱之缺水量(A)小於可因應缺水量(B)，其缺水量可透過管理方式加以因應，無需再增加設計備援水量。                                  |

註：可因應缺水量於計算上係參考分區供水措施所對應之缺水率 10%，其主要係透過管理方式加以因應。

表 5-10 南部區域各個縣市目標年條件下設計備援水量之評估規劃

| 縣市 | 極端乾旱缺水量<br>(缺水率) | 可因應缺水量<br>(每日需水量)     | 設計備援水量<br>(每日備援水量)   |
|----|------------------|-----------------------|----------------------|
| 嘉義 | 1,387<br>(33.1%) | 419<br>(34.9 萬噸/日)    | 968<br>(8.1 萬噸/日)    |
| 臺南 | 7,881<br>(54.6%) | 1,444<br>(120.3 萬噸/日) | 6,437<br>(53.6 萬噸/日) |
| 高雄 | 8,343<br>(40.9%) | 2,041<br>(170.1 萬噸/日) | 6,302<br>(52.5 萬噸/日) |
| 屏東 | 94<br>(3.3%)     | 286<br>(23.8 萬噸/日)    | -                    |

註：<sup>1</sup>極端乾旱之延時參數採用 120 日，而頻率年參數則隨縣市而有所不同，例如：嘉義、臺南、高雄以及屏東分別採用 25 年、50 年、50 年以及 2 年；<sup>2</sup>各項水量單位皆為萬噸/120 日。

## (二)待強化備援水量之評估規劃

上述評估規劃流程重點在於評估水資源系統之「設計備援水量」，然而「設計備援水量」係包涵已規劃備援水量與待強化備援水量，其關係如下：

$$\text{待強化備援水量} = \text{設計備援水量} - \text{已規劃備援水量} \quad (5-2)$$

其中，各項水量關係如圖 5-8 所示，若「已規劃備援水量」大於等於「設計備援水量」，則「待強化備援水量」為零。已規劃備援水量為系統現況與未來規劃上場之總備援水量，可藉由蒐集盤點相關備援策略以釐清其總量；而待強化備援水量則為系統需要再增加之備援水量，其水量係採用上述公式加以計算。南部區域各縣市待強化備援水量之評估規劃說明如下：

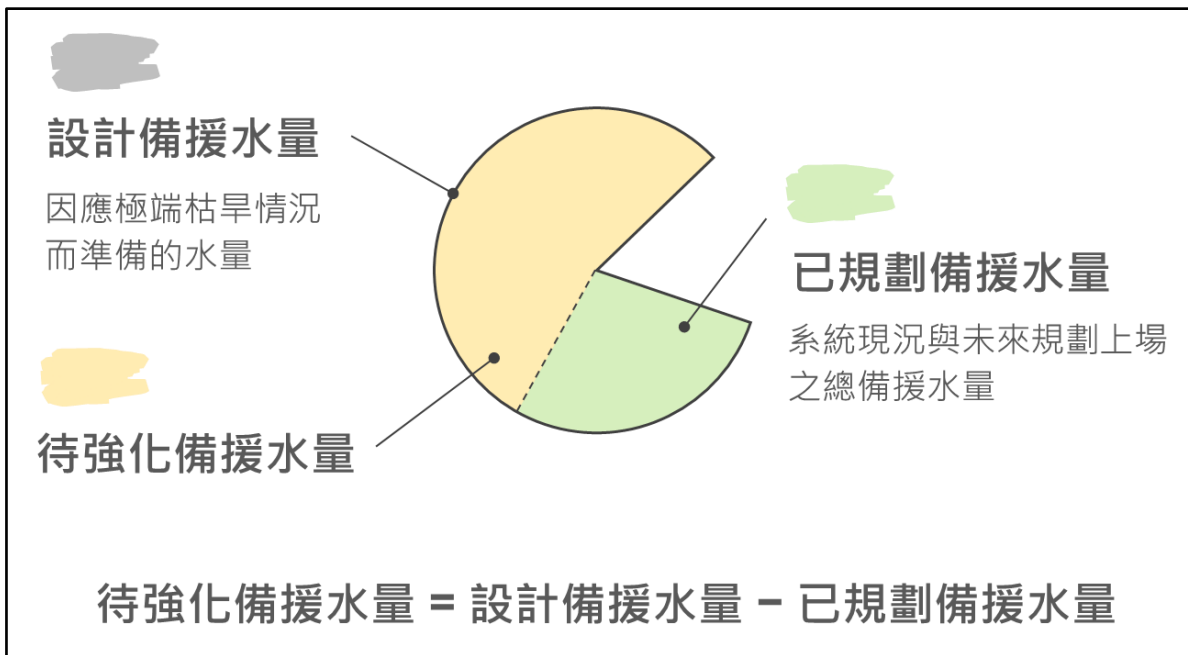


圖 5-8 待強化備援水量計算示意圖

### 1、嘉義地區

嘉義地區於目標年條件下因應「極端乾旱」之待強化備援水量之評估規劃如表 5-11 所示，評估結果指出：在延時固定為 120 日前提下，若採用頻率年 10 年(民國 103 至 104 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，其設計備援水量約為 3.1 萬噸/日，經盤點相關備援策略其已規劃備援水量可達 4.0 萬噸/日，因已規劃

備援水量已高於設計備援水量，無需另外增加待強化備援水量；若針對更加嚴峻之乾旱條件，採用頻率年 25 年(民國 109 至 110 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，其設計備援水量將增加至 8.1 萬噸/日，相較於已規劃備援水量 4.0 萬噸/日，待強化備援水量約為 4.1 萬噸/日。

## 2、臺南地區

臺南地區於目標年條件下因應「極端乾旱」之待強化備援水量之評估規劃如表 5-12 所示，評估結果指出：在延時固定為 120 日前提下，若採用頻率年 10 年(民國 103 至 104 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，其設計備援水量約為 17.0 萬噸/日，經盤點相關備援策略其已規劃備援水量可達 18.7 萬噸/日，因已規劃備援水量已高於設計備援水量，無需另外增加待強化備援水量；若針對更加嚴峻之乾旱條件，採用頻率年 50 年(民國 109 至 110 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，其設計備援水量將增加至 53.6 萬噸/日，相較於已規劃備援水量 18.7 萬噸/日，待強化備援水量約為 34.9 萬噸/日。

## 3、高雄地區

高雄地區於目標年條件下因應「極端乾旱」之待強化備援水量之評估規劃如表 5-13 所示，評估結果指出：在延時固定為 120 日前提下，若採用頻率年 10 年(民國 103 至 104 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，其設計備援水量約為 26.2 萬噸/日，經盤點相關備援策略其已規劃備援水量可達 59.0 萬噸/日，因已規劃備援水量已高於設計備援水量，無需另外增加待強化備援水量；若針對更加嚴峻之乾旱條件，採用頻率年 50 年(民國 109 至 110 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，其設計備援水量將增加至 52.5 萬噸/日，已規劃備援水量仍高於設計備援水量，無需另外增加待強化備援水量。

#### 4、屏東地區

屏東地區於目標年條件下因應「極端乾旱」之待強化備援水量之評估規劃如表 5-14 所示，評估結果指出：在延時固定為 120 日前提下，若採用頻率年 2 年(民國 103 至 104 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，其設計備援水量約為 0.0 萬噸/日，經盤點相關備援策略其已規劃備援水量可達 3.4 萬噸/日，因已規劃備援水量已高於設計備援水量，無需另外增加待強化備援水量；因民國 109 至 110 年乾旱事件期間屏東地區水資源供需正常，並無發生缺水情況，故不探討民國 109 至 110 年乾旱事件特性所對應之極端乾旱情況。

#### 5、南部區域

南部區域各個縣市於目標年條件下因應「極端乾旱」之待強化備援水量之評估規劃如表 5-15 與圖 5-9 所示(現況條件下評估規劃表彙整如表 5-16 所示)，評估結果指出：在延時固定為 120 日前提下，若參考 103-104 乾旱特性決定極端乾旱之頻率年參數(因應各縣市供需特性不同，採用適合該縣市之頻率年參數，例如：嘉義、臺南以及高雄皆採用頻率年 10 年，而屏東則採用頻率年 2 年)，嘉義、臺南、高雄以及屏東之設計備援水量皆低於已規劃備援水量，故無需另外增加待強化備援水量；若針對更加嚴峻之乾旱條件，參考 109-110 乾旱特性決定極端乾旱之頻率年參數(因應各縣市供需特性不同，採用適合該縣市之頻率年參數，例如：嘉義採用頻率年 25 年，而臺南與高雄皆採用頻率年 50 年，屏東則因無發生缺水情況不參與分析)，僅嘉義與臺南需增加待強化備援水量，其水量分別為 4.1 與 34.9 萬噸/日。綜合以上，建議未來可針對嘉義與臺南地區導入更多備援設施，以確保其於更加嚴峻乾旱期間仍可穩定供水。於增加備援水量之前，因應極端枯旱措施建議如下：嘉義地區可藉由加強引水方式盡可能增加仁義潭與蘭潭水庫之蓄水量，以因應 25 年一遇之乾旱事件；而臺南地區則需藉由大面積停灌措施，以因應 50 年一遇之乾旱事件。其中，嘉義地區與臺南地區因應

109-110 乾旱重現之建議作為供需水量分析結果如圖 5-10 所示。

表 5-11 嘉義地區目標年條件下待強化備援水量之評估規劃

| 編號  | 項目      | 總量<br>(萬噸/日) |     | 說明   |
|-----|---------|--------------|-----|--|
| (A) | 設計備援水量  | 3.1          | 8.1 | 在延時固定為 120 日前提下，若採用頻率年 10 年(民國 103 至 104 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，扣除可因應缺水量後，嘉義地區目標年條件下設計備援水量約為 3.1 萬噸/日；若針對更加嚴峻之乾旱條件，採用頻率年 25 年(民國 109 至 110 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，扣除可因應缺水量後，嘉義地區目標年條件下設計備援水量約為 8.1 萬噸/日。 |
| (B) | 已規劃備援水量 | 4.0          |     | 嘉義地區已規劃備援水量蒐集盤點成果如下：複線雲林湖山支援 4.0 萬噸/日。   |
| (C) | 待強化備援水量 | 0.0          | 4.1 | 待強化備援水量(C) = 設計備援水量(A) - 已規劃備援水量(B)，若採用延時 120 日與頻率年 10 年作為極端乾旱參數，由於嘉義地區已規劃備援水量已經高於設計備援水量，無需另外增加待強化備援水量。而針對更加嚴峻之乾旱條件(109-110 乾旱事件)，採用延時 120 日與頻率年 25 年作為極端乾旱參數，則需增加待強化備援水量約 4.1 萬噸/日。         |

註：因已規劃備援水量滾動檢討速度快，後續將配合相關策略進行已規劃備援水量調整。

表 5-12 臺南地區目標年條件下待強化備援水量之評估規劃

| 編號  | 項目      | 總量<br>(萬噸/日) |      | 說明   |
|-----|---------|--------------|------|--|
| (A) | 設計備援水量  | 17.0         | 53.6 | 在延時固定為 120 日前提下，若採用頻率年 10 年(民國 103 至 104 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，扣除可因應缺水量後，臺南地區目標年條件下設計備援水量約為 17.0 萬噸/日；若針對更加嚴峻之乾旱條件，採用頻率年 50 年(民國 109 至 110 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，扣除可因應缺水量後，臺南地區目標年條件下設計備援水量約為 53.6 萬噸/日。 |
| (B) | 已規劃備援水量 | 18.7         |      | 臺南地區已規劃備援水量蒐集盤點成果如下：地區性水源 2.8 萬噸/日、臺南海淡 10.0 萬噸/日、臺南再生水(永康、安平、仁德)2.9 萬噸/日以及感潮河段水資源利用 3.0 萬噸/日，共計 18.7 萬噸/日。  |
| (C) | 待強化備援水量 | 0.0          | 34.9 | 待強化備援水量(C) = 設計備援水量(A) - 已規劃備援水量(B)，若採用延時 120 日與頻率年 10 年作為極端乾旱參數，由於臺南地區已規劃備援水量已經高於設計備援水量，無需另外增加待強化備援水量。而針對更加嚴峻之乾旱條件(109-110 乾旱事件)，採用延時 120 日與頻率年 50 年作為極端乾旱參數，則需增加待強化備援水量約 34.9 萬噸/日。          |

註：因已規劃備援水量滾動檢討速度快，後續將配合相關策略進行已規劃備援水量調整。



表 5-13 高雄地區目標年條件下待強化備援水量之評估規劃

| 編號  | 項目      | 總量<br>(萬噸/日) |      | 說明   |
|-----|---------|--------------|------|--|
| (A) | 設計備援水量  | 26.2         | 52.5 | 在延時固定為 120 日前提下，若採用頻率年 10 年(民國 103 至 104 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，扣除可因應缺水量後，高雄地區目標年條件下設計備援水量約為 26.2 萬噸/日；若針對更加嚴峻之乾旱條件，採用頻率年 50 年(民國 109 至 110 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，扣除可因應缺水量後，高雄地區目標年條件下設計備援水量約為 52.5 萬噸/日。 |
| (B) | 已規劃備援水量 | 59.0         |      | 高雄地區已規劃備援水量蒐集盤點成果如下：抗旱井 19.0 萬噸/日、高雄再生水 2.0 萬噸/日、感潮河段水資源利用 3.0 萬噸/日、高屏溪伏流水 25.0 萬噸/日、高雄海淡 5.0 萬噸/日以及鳳山水庫 5.0 萬噸/日，共計 59.0 萬噸/日。  |
| (C) | 待強化備援水量 | 0.0          | 0.0  | 待強化備援水量(C) = 設計備援水量(A) - 已規劃備援水量(B)，無論係採用延時 120 日與頻率年 10 年作為極端乾旱參數或是採用延時 120 日與頻率年 50 年作為極端乾旱參數，因高雄地區已規劃備援水量皆已高於上述兩種條件之設計備援水量，無需另外增加待強化備援水量。   |

註：因已規劃備援水量滾動檢討速度快，後續將配合相關策略進行已規劃備援水量調整。

表 5-14 屏東地區目標年條件下待強化備援水量之評估規劃

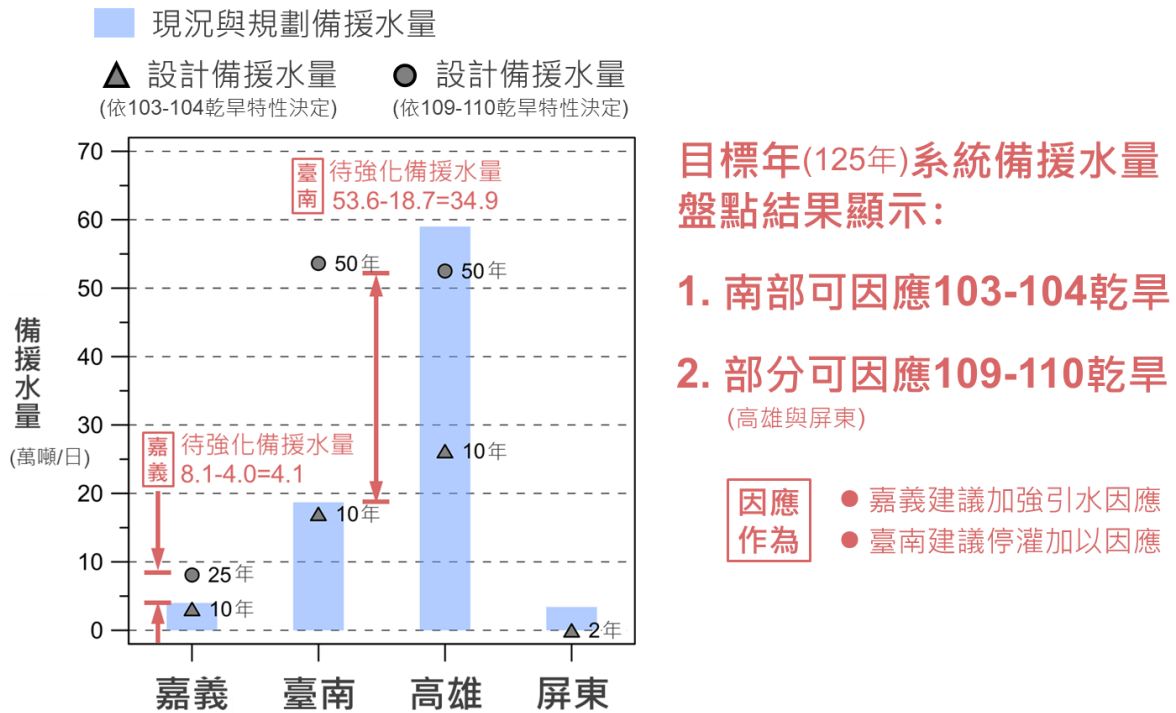
| 編號  | 項目      | 總量<br>(萬噸/日) |   | 說明   |
|-----|---------|--------------|---|--|
| (A) | 設計備援水量  | 0.0          | - | 在延時固定為 120 日前提下，若採用頻率年 2 年(民國 103 至 104 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，扣除可因應缺水量後，屏東地區目標年條件下設計備援水量約為 0.0 萬噸/日；因民國 109 至 110 年乾旱事件期間屏東地區水資源供需正常，並無發生缺水情況，故不探討民國 109 至 110 年乾旱事件特性所對應之極端乾旱情況。 |
| (B) | 已規劃備援水量 | 3.4          |   | 屏東地區已規劃備援水量蒐集盤點成果如下：地區性水源 3.4 萬噸/日。  |
| (C) | 待強化備援水量 | 0.0          | - | 待強化備援水量(C) = 設計備援水量(A) - 已規劃備援水量(B)，若採用延時 120 日與頻率年 2 年(民國 103 至 104 年乾旱事件特性)作為極端乾旱參數，由於屏東地區已規劃備援水量已經高於設計備援水量，無需另外增加待強化備援水量。   |

註：因已規劃備援水量滾動檢討速度快，後續將配合相關策略進行已規劃備援水量調整。

表 5-15 南部區域各個縣市目標年條件下待強化備援水量之評估規劃

| 縣市 | 頻率年<br>(年) | 設計備援水量<br>(萬噸/日) | 已規劃備援水量<br>(萬噸/日) | 待強化備援水量<br>(萬噸/日) |
|----|------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 嘉義 | 10         | 3.1              | 4.0               | 0.0               |
|    | 25         | 8.1              |                   | 4.1               |
| 臺南 | 10         | 17.0             | 18.7              | 0.0               |
|    | 50         | 53.6             |                   | 34.9              |
| 高雄 | 10         | 26.2             | 59.0              | 0.0               |
|    | 50         | 52.5             |                   | 0.0               |
| 屏東 | 2          | 0.0              | 3.4               | 0.0               |

註：<sup>1</sup>極端乾旱之延時參數採用 120 日，而頻率年參數則隨縣市而有所不同；<sup>2</sup>嘉義、臺南以及高雄地區之頻率年參數係依據民國 103 至 104 年乾旱事件與民國 109 至 110 年乾旱事件進行設定，僅屏東地區因於民國 109 至 110 年乾旱事件期間無發生缺水情境，故不考慮民國 109 至 110 年乾旱事件；<sup>3</sup>各項水量單位皆為萬噸/日。



註：2/10/25/50年為因應2/10/25/50年大旱所需之設計備援水量

圖 5-9 南部區域各個縣市目標年條件下待強化備援水量之評估規劃

表 5-16 南部區域各個縣市現況條件下待強化備援水量之評估規劃

| 縣市 | 頻率年<br>(年) | 設計備援水量<br>(萬噸/日) | 現況備援水量<br>(萬噸/日) | 待強化備援水量<br>(萬噸/日) |
|----|------------|------------------|------------------|-------------------|
| 嘉義 | 10         | 6.2              | 0.0              | 6.2               |
|    | 25         | 11.5             |                  | 11.5              |
| 臺南 | 10         | 17.9             | 2.8              | 15.1              |
|    | 50         | 48.5             |                  | 45.7              |
| 高雄 | 10         | 36.1             | 49.0             | 0.0               |
|    | 50         | 84.9             |                  | 35.9              |
| 屏東 | 2          | 0.0              | 3.4              | 0.0               |

註：<sup>1</sup>極端乾旱之延時參數採用 120 日，而頻率年參數則隨縣市而有所不同；<sup>2</sup>嘉義、臺南以及高雄地區之頻率年參數係依據民國 103 至 104 年乾旱事件與民國 109 至 110 年乾旱事件進行設定，僅屏東地區因於民國 109 至 110 年乾旱事件期間無發生缺水情境，故不考慮民國 109 至 110 年乾旱事件；<sup>3</sup>各項水量單位皆為萬噸/日。

### 目標年(125年)條件下嘉義地區與臺南地區因應109-110乾旱重現之建議作為：

**嘉** 待強化備援水量  
**義**  $8.1 - 4.0 = 4.1$  (萬噸/日)

建議 (1) 加強引水轉備援水量  
2.4 (萬噸/日)

竹山堰下游保留水量為5cms，若於加強引水期間改為保留3cms，換算備援水量約為 2.4 萬噸/日。

(2) 仍需增加備援水量  
 $4.1 - 2.4 = 1.7$  (萬噸/日)

**臺** 待強化備援水量  
**南**  $53.6 - 18.7 = 34.9$  (萬噸/日)

建議 (1) 停灌轉備援水量  
30.7 (萬噸/日)

供需模式分析結果指出：109年1至5月農業用水可供水量約共 4,600萬噸，若平均分配至150日，約為30.7 萬噸/日。

(2) 仍需增加備援水量  
 $34.9 - 30.7 = 4.2$  (萬噸/日)

圖 5-10 因應 109-110 乾旱重現之建議作為供需水量分析

### (三)備援效益評估

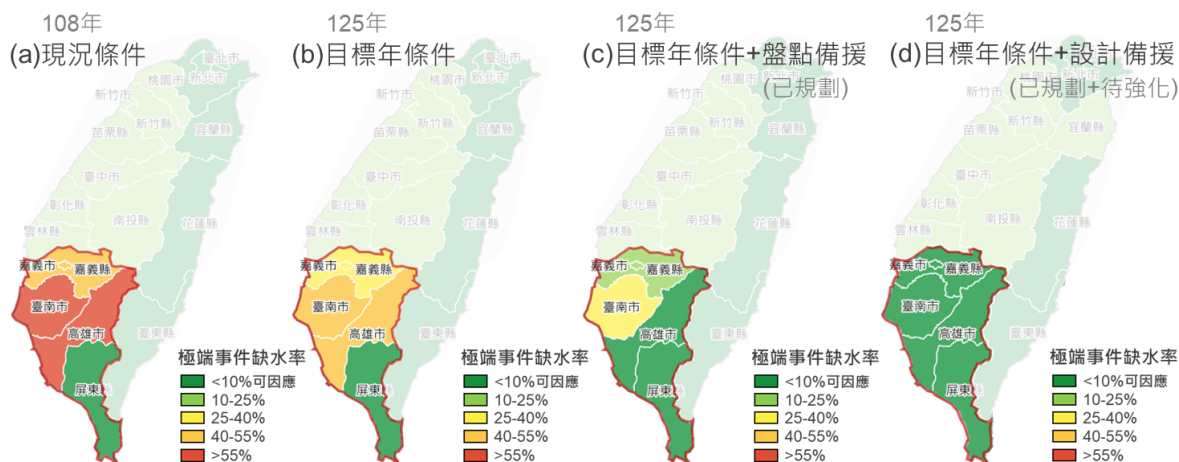
為瞭解設計備援水量對於紓緩極端枯旱風險之效益，針對水資源系統供需模擬之設定分別採用：(1)現況條件、(2)目標年條件、(3)目標年條件與盤點備援(即已規劃備援水量)以及(4)目標年條件與設計備援(即已規劃備援水量與待強化備援水量)，並重新進行水資源供需分析與極端枯旱風險評估，最後藉由極端枯旱潛勢地圖呈現不同供需條件之風險差異(圖 5-11)，探討設計備援水量之效益，以作為後續推動備援方案之說帖。

圖 5-11(a)僅考慮現況系統之水資源方案，其分析結果指出：面臨「極端乾旱」情況，臺南與高雄面臨之極端缺水程度最為嚴峻(缺水率皆大於 55%)，嘉義之極端缺水程度次高(缺水率介於 40 至 55%)，而屏東之極端缺水程度則最低(缺水率低於 10%)；圖 5-11(b)係考慮現況系統之水資源方案與經理計畫規劃上場之水資源方案，其分析結果指出：面臨「極端乾旱」情況，臺南與高雄之極端缺水程度接近(缺水率介於 40 至 55%之間)，嘉義之極端缺水程度則較小(缺水率介於 25 至 40%之間)，而屏東之極端缺水程度則最低(缺水率小於 10%)；圖 5-11(c)除考慮現況系統之水資源方案與經理計畫規劃上場之水資源方案外，亦導入盤點備援(即已規劃備援水量)以因應極端枯旱情況，其分析結果指出：面臨「極端乾旱」情況，南部區域各個縣市缺水情況皆有所改善，相較於圖 5-11(b)，以高雄地區之極端缺水程度降低幅度最大，其缺水率由 40 至 55%之間降低至 10%以下；臺南與嘉義地區之極端缺水程度降低幅度其次，臺南缺水率由 40 至 55%之間降低至 25 至 40%之間，嘉義缺水率由 25 至 40%之間降低至 10 至 25%之間；屏東地區之極端缺水率仍維持低於 10%；最後，圖 5-11(d)除考慮現況系統之水資源方案與經理計畫規劃上場之水資源方案外，亦導入設計備援(即已規劃備援水量與待強化備援水量)以因應極端枯旱情況，其分析結果指出：面臨「極端乾旱」情況，南部區域各個縣市缺水情況皆有所改善，嘉義、臺南、高雄以及屏東地區之極端缺水率皆低於 10%。

整體而言，以現況條件下水資源供需情況作為比較基準，目標年條件下極端枯旱風險已有所改善，若目標年條件下再配合不同備援設定(即盤點備援與設計備援)則極端枯旱風險有更加顯著減少，突顯備援方案對於紓緩極端枯旱衝擊之重要性。

## 極端枯旱潛勢地圖

(基於極端乾旱之缺水率進行繪製)



\*經理計畫可滿足水資源長期需求情況，惟於極端枯旱條件下(例如：50年大旱)仍需仰賴備援方案之緊急支援，藉以穩定極端枯旱條件下之區域用水。

圖 5-11 南部區域於不同供需條件下之極端枯旱潛勢地圖

### (四) 量化韌性提升效益

面對極端氣候之潛在威脅，韌性概念逐漸受到重視與推廣，故嘗試導入水資源韌性概念，以韌性角度評估新增備援水量之韌性效益，針對韌性定義、韌性量化方法以及韌性提升效益說明如下：

#### 1、韌性定義

美國陸軍工兵團氣候韌性手冊(Army Climate Resilience Handbook) (Pinson et al., 2020)參考美國國防授權法(2019年修訂版第 2805 節)，提出韌性定義如下：

“anticipation, preparation for, and adaptation to utility disruptions and changing environmental conditions and the ability to withstand, respond to, and recover rapidly from utility disruptions while ensuring the sustainment of mission-critical operations.”

基於上述美國陸軍工兵團對韌性之定義可知：所謂韌性係指藉由預備、準備以及調適方式因應內部與外部環境變化，或是當系統內部與外部環境變化時，韌性係指承受、調適以及快速恢復之能力，以確保關鍵任務能夠維持運行。

## 2、韌性量化架構

從美國陸軍工兵團對於韌性之定義可知，韌性具有多種特徵(例如：承受能力、調適能力以及恢復能力)，而這些韌性特徵可藉由量化方法將其轉化為數字，以應用於韌性提升效益評估。為能全面描述韌性特徵，回顧整理 Simonovic (2020)作法，其採用韌性曲線上四種韌性參數進行系統之韌性特徵描述(圖 5-12)，其分別為穩健力、快速力、餘裕力以及資源力。針對各個韌性參數所代表之曲線特徵說明如下：

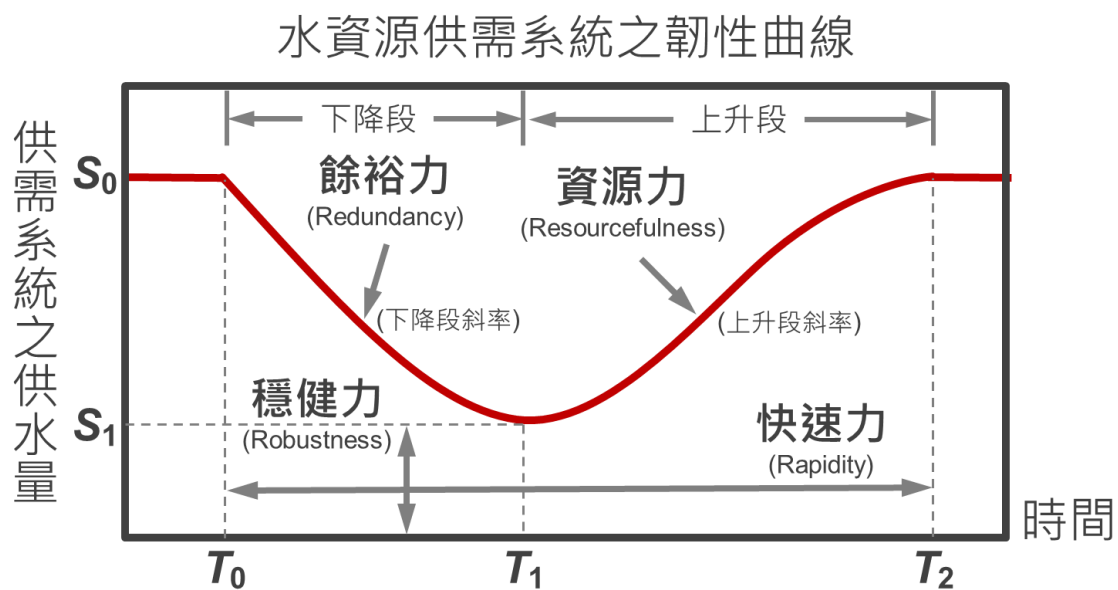


圖 5-12 水資源供需系統之韌性曲線

### (1) 穩健力(robustness)

系統在受到極端乾旱事件影響時，穩健力取決於供需系統之最低供水量(或最低蓄水量)。從水資源供需系統之韌性曲線來看，穩健力即為曲線所對應縱軸之最小值，當其數據愈大，系統穩健力即愈高。其計算公式如下：

$$robustness = S_1 \quad (5-3)$$

其中，穩健力單位為萬噸/日， $S_1$  為受到極端乾旱事件影響期間( $T_0$  至  $T_2$ ) 供需系統之供水量最小值。

## (2)快速力(rapidity)

系統在受到極端乾旱事件影響時，其恢復至正常供水量(或蓄水量)所需之時間。從水資源供需系統之韌性曲線來看，快速力即為韌性曲線所對應橫軸之長度，當其長度愈短，系統快速力即愈高。其計算公式如下：

$$rapidity = \frac{1}{T_2 - T_0} \quad (5-4)$$

其中，快速力單位為 1/日， $T_0$  為極端乾旱事件影響之始起時間，而  $T_2$  則為極端乾旱事件影響之結束時間。

## (3)餘裕力(redundancy)

系統在受到極端事件影響時，是否足以額外增加供水量，以維持系統整體穩定性。例如：水利單位藉由跨區調度與緊急備援，增加供水量以穩定用水。從水資源供需系統之韌性曲線來看，餘裕力即為韌性曲線下降段之斜率。其計算公式如下：

$$redundancy = \frac{S_0 - S_1}{T_1 - T_0} \quad (5-5)$$

其中，餘裕力單位為萬噸/日<sup>2</sup>， $S_0$  為供需系統處於正常情況時之供水量， $S_1$  為受到極端乾旱事件影響期間( $T_0$  至  $T_2$ )供需系統之供水量最小值， $T_0$  為極端乾旱事件影響之始起時間，而  $T_1$  則為供水量最小值所對應之時間點(即極端乾旱事件影響最為嚴重之時間點)。

## (4)資源力(resourcefulness)

系統在受到極端事件影響時，是否有充足資源可供調度使用，以克服極端事件造成之供需影響。從水資源供需系統之韌性曲線來看，資源力即為韌性曲線上升段之斜率。其計算公式如下：

$$resourcefulness = \frac{S_0 - S_1}{T_2 - T_1} \quad (5-6)$$

其中，資源力單位為萬噸/日<sup>2</sup>， $S_0$  為供需系統處於正常情況時之供水量， $S_1$  為受到極端乾旱事件影響期間( $T_0$  至  $T_2$ ) 供需系統之供水量最小值， $T_1$  為供水量最小值所對應之時間點(即極端乾旱事件影響最為嚴重之時間點)，而  $T_2$  為極端乾旱事件影響之結束時間。

### 3、韌性量化指標

針對上述韌性量化架構所採用之四種韌性參數進行篩選，挑選穩健力與快速力作為評估臺灣水資源韌性特徵之參數。此外，考慮水資源系統在現況與目標年條件下供需水量之差異，針對穩健力與快速力進行無因次化與微調，以更客觀呈現現況與目標年條件下之韌性特徵，韌性曲線與無因次韌性參數之因子關係圖如圖 5-13 所示。針對無因次穩健力與無因次快速力之定義說明如下：

#### (1)無因次穩健力(dimensionless robustness)

系統在受到極端乾旱事件影響時，無因次穩健力為極端枯旱期間水資源系統可穩定提供之水量(相較於需水量之百分比)，當其數據愈大，系統無因次穩健力即愈高。其計算公式如下：

$$\text{dimensionless robustness} = \frac{S_1}{S_0} \quad (5-7)$$

其中， $S_0$  為最高供水量(即需水量)，而  $S_1$  為極端乾旱事件影響期間之最低供水量。

#### (2)無因次快速力(dimensionless rapidity)

系統在受到極端乾旱事件影響時，快速力為從缺水回復至穩定供水之速度(相較於全年日數之百分比)，當其數據愈大，系統無因次快速力即愈高。其計算公式如下：

$$\text{dimensionless rapidity} = 1 - \frac{T_1}{T_0} \quad (5-8)$$

其中， $T_0$  為全年日數 365 日，而  $T_1$  則為受到極端乾旱事件影



響而導致之缺水日數。

水資源供需系統韌性曲線與無因次韌性參數之因子

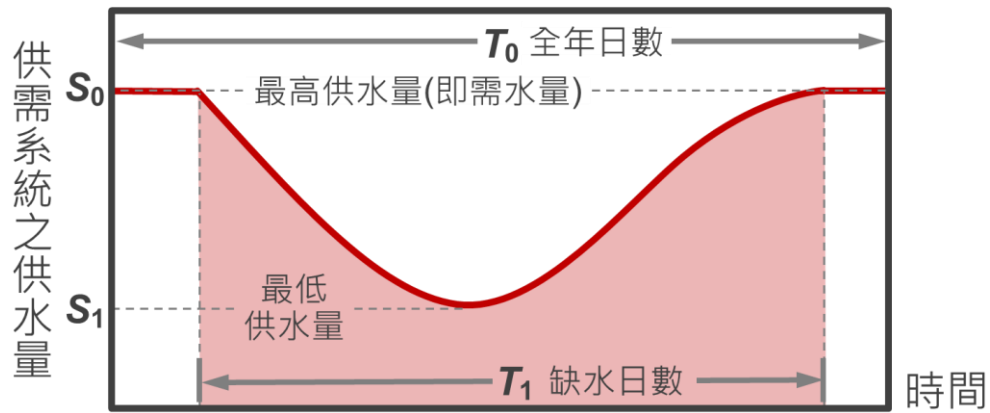


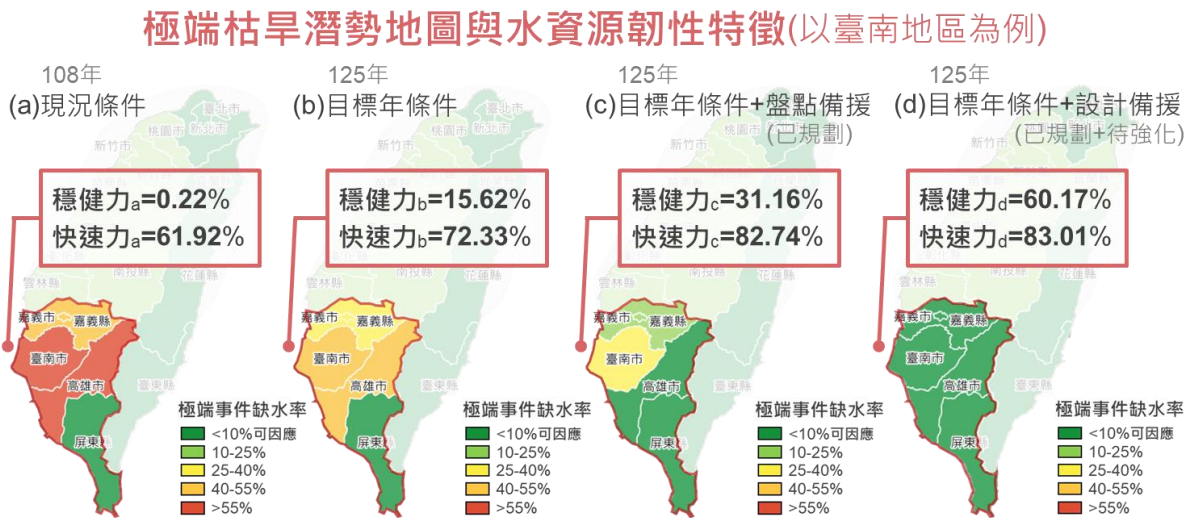
圖 5-13 韌性曲線與無因次韌性參數之因子關係圖

#### 4、韌性提升效益

為瞭解設計備援水量對於韌性提升之效益，針對水資源系統供需模擬之設定分別採用：(1)現況條件、(2)目標年條件、(3)目標年條件與盤點備援(即已規劃備援水量)以及(4)目標年條件與設計備援(即已規劃備援水量與待強化備援水量)，並重新進行水資源供需分析、極端枯旱風險評估以及水資源韌性評估，最後藉由極端枯旱潛勢地圖呈現不同供需條件之風險差異與對應之韌性參數(以臺南地區韌性特徵為例)，以探討設計備援水量之韌性提升效益，可作為後續推動備援方案之說帖。

針對上述四種水資源系統供需設定，水資源韌性評估結果(圖 5-14)指出：(1)於現況條件下，臺南地區之無因次穩健力與無因次快速力分別為 0.22%與 61.92%、(2)於目標年條件下，臺南地區之無因次穩健力與無因次快速力皆有所改善，其分別為 15.62%與 72.33%、(3)於目標年條件搭配盤點備援(即已規劃備援水量)下，臺南地區之無因次穩健力與無因次快速力進一步提升，其分別為 31.16%與 82.74%以及(4)於目標年條件搭配設計備援(即已規劃備援水量與待強化備援水量)下，臺南地區之無因次穩健力與無因次快速力進一步提升，其分別為 60.17%與 83.01%。而南

部區域各個縣市於不同供需設定條件下之水資源韌性評估結果彙整如圖 5-15 與表 5-17 所示，分析結果指出：受益於水資源經理計畫推動，相較於各個縣市現況條件下韌性參數，目標年條件下韌性參數皆有所改善或者持平；若同時考慮目標年條件與不同備援設定(即盤點備援與設計備援)，各個縣市韌性參數則皆能進一步改善。



註：1經理計畫可滿足水資源長期需水情況，惟於極端枯旱條件下(例如：50年大旱)仍需仰賴備援方案之緊急支援，藉以穩定極端枯旱條件下之區域用水；<sup>2</sup>無因次穩健力為極端枯旱期間水資源系統可穩定提供之水量(相較於需水量之百分比)，無因次快速力為從缺水回復至穩定供水之速度(相較於全年日數之百分比)。

圖 5-14 韌性提升效益評估示意圖

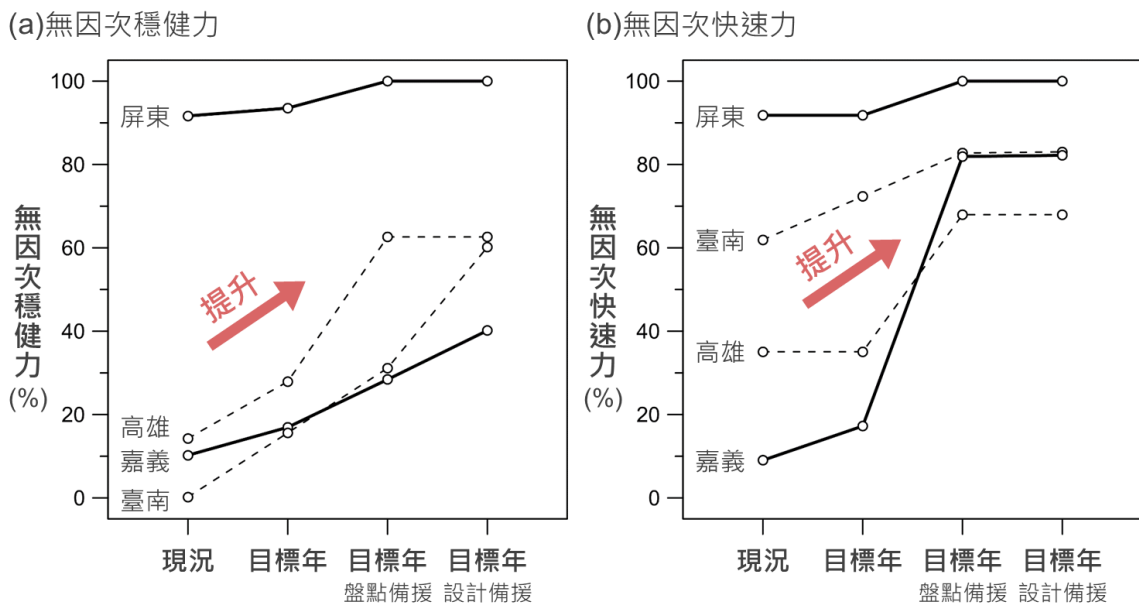


圖 5-15 南部區域各縣市於不同供需條件之水資源韌性參數

表 5-17 南部區域各縣市於不同供需條件之水資源韌性參數

| 縣市 | 現況條件<br>(民國 108 年) |            | 目標年條件<br>(民國 125 年) |            | 目標年條件<br>(民國 125 年) |            |                   |            |
|----|--------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|-------------------|------------|
|    |                    |            |                     |            | 盤點備援 <sup>1</sup>   |            | 設計備援 <sup>2</sup> |            |
|    | 無因次<br>穩健力         | 無因次<br>快速力 | 無因次<br>穩健力          | 無因次<br>快速力 | 無因次<br>穩健力          | 無因次<br>快速力 | 無因次<br>穩健力        | 無因次<br>快速力 |
| 嘉義 | 10.26%             | 9.04%      | 16.96%              | 17.26%     | 28.42%              | 81.92%     | 40.17%            | 82.19%     |
| 臺南 | 0.22%              | 61.92%     | 15.62%              | 72.33%     | 31.16%              | 82.74%     | 60.17%            | 83.01%     |
| 高雄 | 14.30%             | 35.07%     | 27.93%              | 35.07%     | 62.61%              | 67.95%     | 62.61%            | 67.95%     |
| 屏東 | 91.63%             | 91.78%     | 93.53%              | 91.78%     | 100.00%             | 100.00%    | 100.00%           | 100.00%    |

註：<sup>1</sup> 盤點備援係以南部區域各個縣市之已規劃備援水量作為備援設定；<sup>2</sup> 設計備援係以南部區域各個縣市之已規劃備援水量與待強化備援水量作為備援設定。

#### 四、建置極端枯旱風險評估與備援建議之操作準則

為能減緩極端事件對於水資源供需系統之衝擊，研提因應極端事件水資源供需調適架構，以建置一套備援評估規劃之標準操作準則，其主要項目包含：(1)極端枯旱風險評估、(2)備援盤點與建議以及(3)備援效益評估等項目，以提供其他計畫區域在備援能力評估規劃上作為參考。此外，導入「水資源韌性」概念，藉以檢視水資源供需系統之韌性提升效益，可作為推動備援強化方案之說帖，最後嘗試提出韌性提升之策進作為建議，以進一步提升「水資源韌性」。

##### (一)備援評估規劃之操作準則

針對水資源供需系統備援能力評估規劃之程序，建議操作準則主要包含：(1)極端枯旱風險評估、(2)備援盤點與建議以及(3)備援效益評估，針對各項程序說明如下：

##### 1、極端枯旱風險評估

為能突顯出水資源供需系統實際之極端枯旱情況，可應用「極端乾旱」概念進行極端枯旱風險量化(採用乾旱 SDF 曲線)，並搭配枯旱潛勢地圖以呈現極端枯旱風險在空間上之分布情況，有助於辨識枯旱熱點區位。

## 2、備援盤點與建議

為瞭解水資源供需系統之備援水量是否足夠，可應用「極端乾旱」之缺水量推估供需系統之設計備援水量，再依據供需系統實際備援水量之盤點結果，計算待強化備援水量並提出對應之建議強化方案(例如：增加海水淡化與抗旱水井)。

## 3、備援效益評估

為評估備援效益，可分別採用「目標年條件」與「目標年條件+備援方案」作為設定條件，重新分析水資源供需情況，以瞭解設計備援水量於減緩極端枯旱風險之效益，並可配合水資源韌性概念檢視水資源供需系統之韌性提升效益，以作為推動備援強化方案之說帖。

### (二)韌性提升策進建議

面對極端事件頻率與強度增加之威脅，除所研提之備援評估規劃準則外，亦亟需發展枯旱監測與預警機制，從「未雨綢繆」角度切入，提早導入相關防禦性策略，以避免嚴重供需衝擊發生。其中，水文資料扮演非常關鍵角色，係以歷史與即時水文資料作為基礎，將資料轉化為監測與預警資訊，從上游資料端即開始抗旱，以期紓緩枯旱衝擊並提升整體抗旱韌性。在乾旱發展成為世界大流行之前，「監測與預警」就如同疫苗，能夠以預防方式避免嚴重衝擊(重症)。

於嚴重枯旱期間，仰賴適當之水源調度與備援水量，可確保供水穩定。然而，若能在實際進入枯旱情況以前，藉由枯旱預警機制觸發超前部署，儘早啟用水源調度與備援，可進一步提升整體抗旱韌性與精進枯旱期間風險管理。為此，建議未來可應用枯旱預警指標與機器學習預先研判水情，瞭解未來幾個月可能面臨之缺水風險，並依據水情研判結果適時啟動備援水量或水源調度，藉由此種超前部署方式以降低枯旱風險與強化抗旱韌性。此外，未來亦可進一步配合長期流量預報系統，提前掌握未來水情資訊，在科學流量預報輔助下進行備援水量之超前部署，以強化水資源系統之抗旱韌性。

## 參考文獻

1. Aksoy, H. (2001) Storage Capacity for River Reservoirs by Wavelet-based Generation of Sequent-peak Algorithm. *Water Resources Management*, 15, 423-437.
2. Balaei, B., Wilkinson, S., Potangaroa, R., Hassani, N., Alavi-Shoshtari, M. (2018) Developing a Framework for Measuring Water Supply Resilience. *Natural Hazards Review*, 19(4), 04018013. doi: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000292.
3. Bonstrom, H., Corotis, R.B. (2016) First-Order Reliability Approach to Quantify and Improve Building Portfolio Resilience. *Journal of Structural Engineering*, 142(8), C4014001, 1-12. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001213.
4. Boulware, E.W.B. (2013) *Alternative Water Sources and Wastewater Management*. McGraw Hill
5. Fredrich, A.J. (1968) Pilot Study for Storage Requirement for Low Flow Augmentation. Technical Paper No. 7, The Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.
6. Ganguli, P., Ganguly, A.R. (2016) Space-time Trends in U.S. Meteorological Droughts. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 8, 235-259.
7. Grafton, R.Q., Doyen, L., Béné, C., Borgomeo, E., Brooks, K., et al. (2019) Realizing Resilience for Decision-Making. *Nature Sustainability*, 2, 907-913. doi: 10.1038/s41893-019-0376-1.
8. Guzmán, D.A., Mohor, G.S., Taffarello, D., Mendiondo, E.M. (2017) Economic Impacts of Drought Risk for Water Utilities through Severity-Duration-Frequency Framework under Climate Change Scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, <https://doi.org/10.5194/hess-2017-615>.
9. Halwatura, D., Lechner, A.M., Arnold, S. (2015) Design Droughts: A New Planning Tool for Ecosystem Rehabilitation. *International Journal of GEOMATE*, 8(1), 1138-1142.
10. Haque, M.E., Srivastava, P.L., Afshar, N.R. (1992) Criteria for Storage Capacity Fixation for Irrigation Reservoir Project. *Irrigation and Power Journal*, 49(1), 139-152.
11. International Water Association (2015) *Alternative Water Resources: A Review of Concepts, Solutions and Experiences*.
12. IPCC (2012) *Changes in Climate Extremes and Their Impacts on the Natural Physical Environment*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230.
13. Juliani, B.H.T., Okawa, C.M.P. (2017) Application of a Standardized Precipitation Index for Meteorological Drought Analysis of the Semi-Arid Climate Influence in Minas Gerais, Brazil. *Hydrology*, 4(2), 26.

doi:10.3390/hydrology4020026.

14. Kang, S., Lee, S., Kang, T. (2017) Development and Application of Storage-zone Decision Method for Long-term Reservoir Operation Using the Dynamically Dimensioned Search Algorithm. *Water Resources Management*, 31, 219-232.
15. Kazuto, N., (1991) *Water Resource Science*, The Asakura Publishing Co. Ltd, Tokyo, Japan.
16. Kwak, J., Kim, S., Kim, D., Kim, H. (2016) Hydrological Drought Analysis Based on Copula Theory. *River Basin Management*, Chapter 4, Published by INTECH.
17. Liu, N., Li, Z. (2017) The Feasibility on the Case that the Air Conditioning Condensate Water is Used as the Make-up Water of Cooling Tower. *Procedia Engineering*, 205, 3557-3562.
18. McMahon, T.A., Pegram, G.G.S., Vogel, R.M., Peel, M.C. (2007) Revisiting Reservoir Storage-yield Relationships Using a Global Streamflow Database. *Advances in Water Resources*, 30, 1858-1872.
19. McPhillips, L.E., Chang, H., Chester, M.V., Depietri, Y., Friedman, E., et al. (2018). Defining Extreme Events: A Cross-Disciplinary Review. *Earth's Future*, 6, 441-455. doi: 10.1002/2017EF000686
20. National Academies (1985) *Drought Management and Its Impact on Public Water Systems*. Report on a Colloquium Sponsored by the Water Science and Technology Board, National Research Council, National Academies, 127pp.
21. Noutcha, M.A.E., Damiete, O., Johnny Jr., M. et al. (2016) Quantity and Quality of Water Condensate from Air Conditioners and Its Potential Uses at the University of Port Harcourt, Nigeria. *Advances in Applied Science Research*, 7(6), 45-48.
22. Pinson, A.O., White, K.D., Moore, S.A., Samuelson, S.D., Thames, B.A., O'Brien, P.S., Hiemstra, C.A., Loechl, P.M., Ritchie, E.E., 2020. *Army Climate Resilience Handbook*. Washington, DC: US Army Corps of Engineers
23. Rajsekhar, D., Singh, V.P., Mishra, A., (2013) *Hydrological Drought Atlas for the State of Texas*. Texas Water Resources Institute, technical Report Number 474.
24. Reddy, M. J., Ganguli, P. (2012) Application of Copulas for Derivation of Drought Severity-Duration-Frequency Curves. *Hydrological Processes*, 26, 1672-1685.
25. Rippl, W. (1883) Capacity of storage reservoirs for water supply. In *Minutes of Proceedings, Institution of Civil Engineers*, 71, 270-278.
26. Sabnis, A., Kale, M., Dhanorkar, M. and Kale, S.P. (2020) Quality Testing of Air Conditioner Condensate and Its Potential in Water Conservation. *Journal of Water Resource and Protection*, 12, 93-101.
27. Sheffield, J., Wood, E.F. (2011) *Drought: past problems and future scenarios*. Earthscan. London, UK.

28. Simonovic, S.P. (2020) System Approach to Management of Water Resources – Toward Performance Based Water Resources Engineering. *Water*, 12(4), 1208. doi: 10.3390/w12041208.
29. Singleton, A. (2012) Forecasting Drought in Europe with the Standardized Precipitation Index: An assessment of the Performance of the European Centre for Medium Range Weather Forecasts Variable Resolution Ensemble Prediction System. JRC Scientific and Technical Reports. EUR 25254 EN-2012.
30. Sung, J.H., Chung, E.S. (2014) Development of Streamflow Drought Severity-Duration-Frequency Curves Using the Threshold Level Method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3341-3351.
31. The Water Research Foundation (2018) Comprehensive Analysis of Alternative Water Supply Projects Compared to Direct Potable Reuse.
32. Thomas, H.A., Burden, R.P. (1963) Operations Research in Water Quality Management. Cambridge, MA: Harvard Water Resources Group.
33. UN-Water (2020) UN-Water Analytical Brief on Unconventional Water Resources. Geneva, Switzerland.
34. USACE (1994) Managing Water for Drought. National Study of Water Management during Drought, Institute for Water Resources, IWR Report 94-NDS-8.
35. USACE (2018) Hydrologic Engineering Requirements for Reservoirs: Engineer Manual.
36. Van Loon (2015) Hydrological Drought Explained. *WIREs Water*, 2(4), 359-392. doi: 10.1002/wat2.1085.
37. Vasiliades, L., Sarailidis, G., Loukas, A. (2017) Hydrological Modelling of Low Flows for Operational Water Resources Management. *European Water*, 57, 223-229.
38. Vogel, R.M., Bolognese, R.A. (1995) Storage-reliability-resilience-yield relations for over year water supply systems. *Water Resources Research*, 31(3), 645-654.
39. Wilhite, D.A., Glantz, M.H. (1985) Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International* 10(3):111-120.
40. WMO (2012) Standardized Precipitation Index User Guide. WMO-No. 1090.
41. WMO (2015) Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events, draft version (first review by TT-DEWCE).
42. 王宗南，民國 95 年，水庫容量風險性設計準則之比較探討，國立成功大學水利及海洋工程研究所，碩士論文。
43. 王鈺閔，民國 98 年，缺水指標與缺水風險之相關性，國立中央大學土木工程學系，碩士論文。
44. 李惠玲，民國 107 年，正視臺灣的氣候變遷，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台電子報，第 18 期。
45. 李棕蒼，民國 99 年，臺灣南部地區供水潛能分析及工程決策檢討之研

- 究，國立中興大學水土保持學系，碩士論文。
46. 林李耀等人，民國 105 年，臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置，科技部補助專題研究計畫成果報告。
  47. 徐享崑，民國 77 年，高屏河流域水資源規劃缺水指標之研究，經濟部水資源統一規劃委員會。
  48. 徐享崑、蘇瑞榮，民國 88 年，二十一世紀議程之水資源管理。
  49. 財團法人維謙基金會，民國 105 年，石門水庫供水調配及水資源風險管理之探討。
  50. 連婉余、吳瑞賢，民國 100 年，應用風險分析指標評估區域性水資源供水系統，2011 區域與環境資源永續發展研討會，臺北。
  51. 陳憲宗、曾宏偉、林錦源、楊道昌、游保杉，民國 100 年，氣候變遷情境下曾文水庫集水區水文乾旱特性推估，農業工程學報，第 57 卷，第 3 期，第 44 至 60 頁。
  52. 黃金山，民國 75 年，臺灣水庫規劃缺水忍耐標準之探討，第三屆水利工程研討會，第 51 至 64 頁。
  53. 溫漢章，民國 90 年，利用合成流量進行水資源系統分析-以濁水溪流域為例，國立臺灣大學土木工程學系，碩士論文。
  54. 經濟部，民國 109 年，旱災災害防救業務計畫。
  55. 經濟部，民國 110 年，臺灣各區水資源經理基本計畫-核定本。
  56. 經濟部水利署，民國 105 年，104 年度水利防災年報彙編。
  57. 經濟部水利署，民國 106 年，臺灣南部區域水資源經理基本計畫(第 1 次檢討)-核定本。
  58. 經濟部水利署，民國 108 年，107 年臺灣水文環境情勢專刊。
  59. 經濟部水利署，民國 91 年，供水可度標準建立之研究。
  60. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 100 年，強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究。
  61. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 108 年，108 年南部區域水資源經理計畫滾動檢討。
  62. 經濟部水利署南區水資源局，民國 89 年，曾文-烏山頭水庫串聯運用引水量蒸發、滲漏及輸水損失問題探討改善研究。
  63. 經濟部水資源局，民國 90 年，水文設計應用手冊。
  64. 廖培明，民國 91 年，水庫規劃供水之可靠度評估，逢甲大學土木及水利工程研究所，碩士論文。
  65. 蔡昫直，民國 101 年，供水系統綜合可靠度分析-以石門水庫為例，國立交通大學土木工程學系，碩士論文。
  66. 蘇文瑞，民國 89 年，水資源供需指標建立之研究，國立中央大學土木工程研究所，博士論文。



## 附錄一 備援能力評估規劃手冊

## 附錄一 備援能力評估規劃手冊

面對極端事件之威脅，如何提升水資源供需系統之抗旱韌性，以減緩極端事件衝擊，為臺灣當前水資源經營與管理之重要努力目標。為此，本手冊提出備援能力評估規劃流程，聚焦評估水資源系統因應極端乾旱事件所需要之合適備援水量，可於枯旱條件下啟用備援，以延長水庫供水時間或穩定供水作為主要目的。其中，備援能力評估規劃包含主要步驟分別為：(1)乾旱 SDF 曲線產製、(2)極端乾旱參數探討、(3)極端枯旱潛勢地圖繪製、(4)備援水量評估規劃以及(5)效益評估。針對各步驟說明如下：

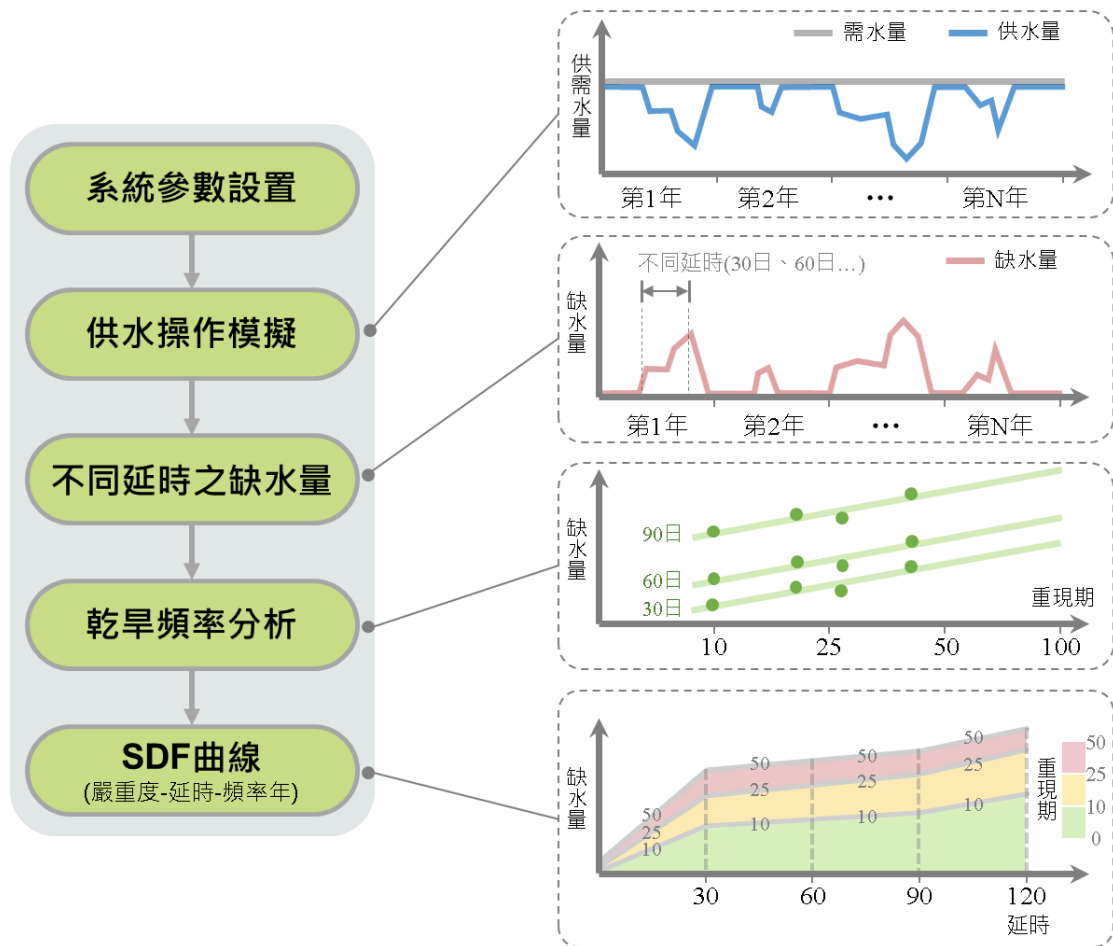
### 一、乾旱 SDF 曲線產製

乾旱 SDF 曲線產製流程如附圖 1-1，其產製主要係基於長期水資源供需模擬結果，分析缺水(供需不平衡)事件之嚴重度、延時以及頻率年間之關係，再將分析結果繪製成乾旱 SDF 曲線作為後續應用依據。

- (一)設置水資源系統參數與資料，包含：流量資料、需水量、水庫有效庫容、正常滿水位、水庫操作規線、輸水損失以及引水限制等相關資料。
- (二)採用供水操作模式進行水資源系統之長期供水操作分析，並產出歷年供水量與需水量之時間序列資料。其中，長期供水操作分析採用至少 30 年以上資料，以確保後續乾旱頻率分析結果之合理性。
- (三)計算水資源系統之缺水量，而缺水(乾旱事件)之定義係指供水量無法滿足需水量之情況，其量為需水量與供水量兩者之差異。再以缺水量作為乾旱事件之嚴重度，依水文豐枯特性重新整理資料，進一步探討不同延時下乾旱事件之特性，並針對不同延時(例如：30、60、90…180 日)進行年最大缺水量(嚴重度)挑選，提供後續分析使用。
- (四)針對不同延時之年最大缺水量資料進行頻率分析，以計算不同延時下各頻率年乾旱事件所對應之缺水量。其中，頻率分析採用之統計分布係以臺灣常用之水文統計分布為主(經濟部水資源局，民國 90 年)，例如：一般極端值分布(GEV)、極端值一型分布(EV1)、皮爾遜第三型分布(PT3)、對數皮爾遜第三型分布(LPT3)、三參數對數常態

分布(LN3)以及常態分布(N)，再配合適合度檢定以決定最佳統計分布。

(五)基於不同延時下乾旱事件各個頻率年缺水量，繪製可代表水資源系統乾旱嚴重度、延時以及頻率年之關係圖(乾旱 SDF 曲線)。



附圖 1-1 乾旱 SDF 曲線產製流程圖

## 二、極端乾旱參數探討

藉由導入極端乾旱之概念，可量化極端枯旱(嚴重乾旱)發生時水資源系統可能面臨之缺水情況，並據以決定水資源系統需提升之額外備援容量或抗旱因應作為，以強化抗旱韌性與減緩乾旱可能造成之衝擊。極端乾旱概念在實務應用上，需先選擇合適之極端乾旱參數(即延時與頻率年)，再透過乾旱 SDF 曲線查詢極端乾旱參數所對應之缺水量(即嚴重度)，並以此缺水量作為水資源系統之設計備援水量。針對極端乾旱之參數設定方法說明如下：

### (一)頻率年參數設定

針對頻率年參數設定，建議可從近年嚴重乾旱事件中挑選衝擊較大者，作為極端乾旱在頻率年設定上參考。以南部區域為例，其民國 103 至 104 年乾旱事件與民國 109 至 110 年乾旱事件在各個縣市造成缺水事件之頻率年如附圖 1-2 所示，則各個縣市在頻率年參數設定上建議：嘉義地區採用 25 年之缺水頻率年、臺南與高雄地區採用 50 年之缺水頻率年、屏東地區採用 2 年之缺水頻率年。

|    | 103-104<br>乾旱事件 | 109-110<br>乾旱事件 | 頻率年<br>採用參數<br>(兩者取大) |
|----|-----------------|-----------------|-----------------------|
| 嘉義 | 10 年            | 25 年            | 25 年                  |
| 臺南 | 10 年            | 50 年            | 50 年                  |
| 高雄 | 10 年            | 50 年            | 50 年                  |
| 屏東 | 2 年             | -               | 2 年                   |

註：<sup>1</sup>本計畫係將歷史嚴重乾旱事件於不同延時之最大缺水量點繪至乾旱 SDF 曲線上，以決定南部區域各縣市之乾旱頻率年參數；<sup>2</sup>「-」代表乾旱事件期間該縣市無缺水情況發生。

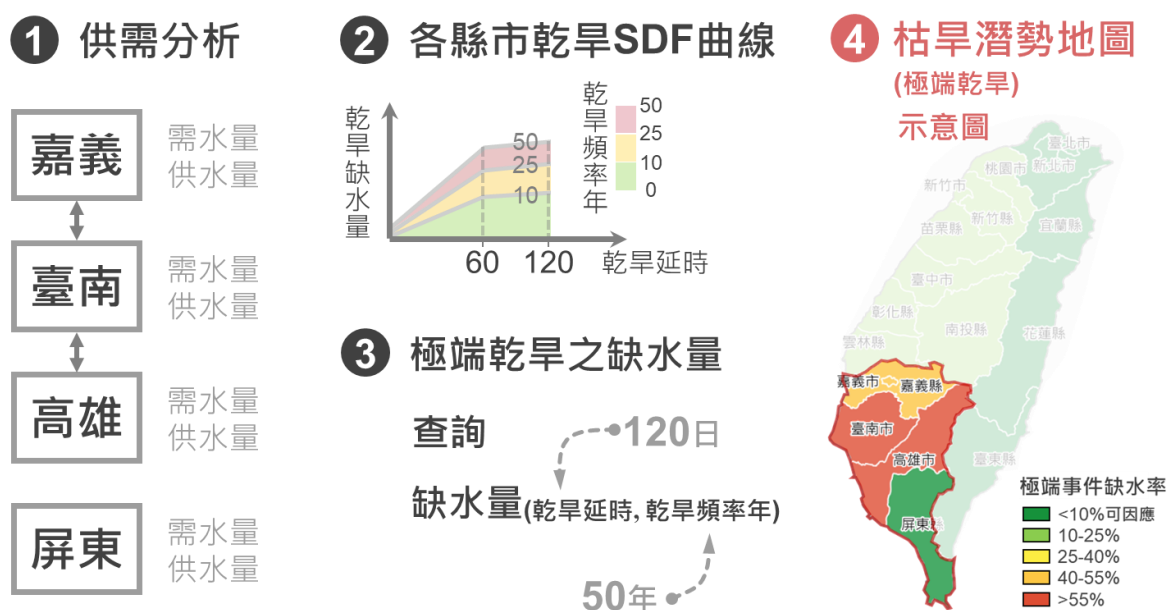
附圖 1-2 南部區域各縣市近年嚴重乾旱事件之缺水特性

### (二)延時參數設定

針對極端乾旱之延時參數設定，亦建議可參考近年嚴重乾旱事件之缺水延時(以實施減量供水時間研判)進行設定，民國 103 至 104 年與民國 109 至 110 年乾旱事件於南部區域分別造成之缺水延時為 90 日與 120 日，挑選兩者中較大者作為延時參數之建議值，即南部區域極端乾旱之延時參數建議以 120 日作為設定值。

### 三、極端枯旱潛勢地圖繪製

應用乾旱 SDF 曲線可量化水資源供需系統面臨之極端枯旱風險，若再進一步彙整各縣市於「極端乾旱」條件下之可能缺水情況，則可呈現南部區域極端枯旱風險之空間分布，有助於辨識面臨極端乾旱事件時之高風險區域，並提出對應之備援措施以降低高風險區域之極端枯旱風險。極端枯旱潛勢地圖繪製流程如附圖 1-3 所示，其步驟說明如下：



附圖 1-3 區域極端枯旱潛勢地圖繪製(縣市尺度)之繪製流程

#### (一) 供需分析

針對南部各個縣市(嘉義、臺南、高雄以及屏東)進行水資源供需分析，以瞭解各個縣市之水資源供需情況(包含水資源聯合運用)，再藉由需水量與供水量進行缺水量之計算。

#### (二) 乾旱 SDF 曲線

依據各個縣市之缺水量資料推估乾旱 SDF 曲線，瞭解不同延時與頻率年之缺水情況，以量化極端枯旱風險。

#### (三) 極端乾旱

基於南部區域各縣市「極端乾旱」之參數條件(例如：臺南地區參數為延時 120 日與頻率年 50 年)，查詢乾旱 SDF 曲線上所對應之缺水量，瞭解各個縣市在「極端乾旱」條件下所面臨之極端枯

旱風險。

#### (四)極端枯旱潛勢地圖

依據各個縣市在「極端乾旱」條件下所面臨之極端枯旱風險值，進行極端枯旱潛勢地圖之繪製，呈現極端枯旱風險在空間上之分布，以辨識面臨極端枯旱事件時之高風險區域，有助於提出對應之備援措施以降低高風險區域之極端枯旱風險。

### 四、備援水量評估規劃

為因應上述「極端乾旱」條件下極端枯旱風險，可藉由適合之備援水量評估規劃以提升水資源系統面臨極端枯旱事件之抗旱韌性，紓緩極端事件之可能衝擊。其中，備援水量評估規劃可分為「設計備援水量」之評估規劃與「待強化備援水量」之建議，分別說明如下：

#### (一)設計備援水量之評估規劃

為避免類似「極端乾旱」之嚴重缺水情況發生，建議可藉由設計備援水量探討水資源系統應具有之合理備援水量，其計算公式如下：

$$\text{設計備援水量} = \text{極端乾旱缺水量} - \text{可因應缺水量} \quad (\text{附 1-1})$$

其中，極端乾旱缺水量係乾旱 SDF 曲線中特定延時與頻率年參數所對應之缺水量；而可因應缺水量則係參考「早災災害防救業務計畫」(經濟部，民國 109 年)之早災災害等級區分表，當一供水區水情燈號轉為紅燈(即分區供水)，代表其對應之缺水率高於 10%，假設當缺水率小於等於 10%可透過管理方式加以因應，故取缺水率 10%作為可因應缺水量之上限值。

#### (二)待強化備援水量之評估規劃

上述評估規劃流程重點在於評估水資源系統之「設計備援水量」，然而「設計備援水量」係包涵已規劃備援水量與待強化備援水量，其關係如下：

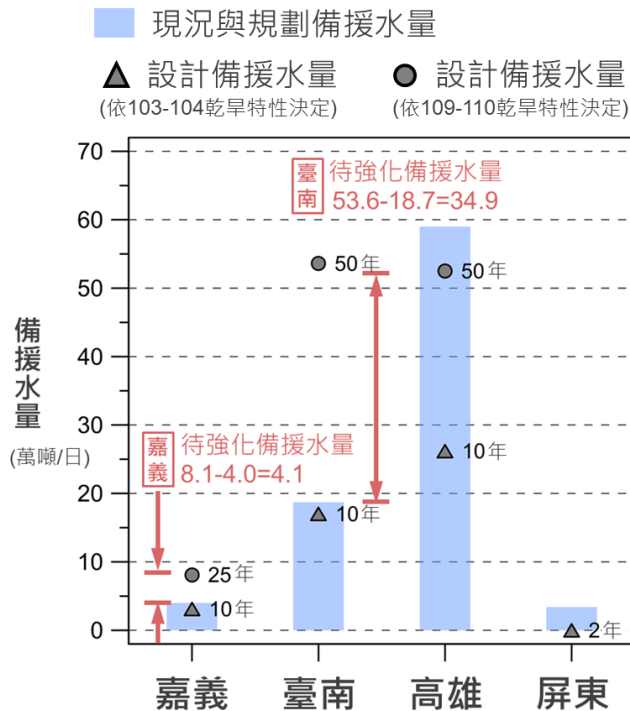
$$\text{待強化備援水量} = \text{設計備援水量} - \text{已規劃備援水量} \quad (\text{附 1-2})$$

其中，若「已規劃備援水量」大於等於「設計備援水量」，則「待

強化備援水量」為零。已規劃備援水量為系統現況與未來規劃上場之總備援水量，可藉由蒐集盤點相關備援策略以釐清其總量；而待強化備援水量則為系統需要再增加之備援水量，其水量係採用上述公式加以計算。

### (三)南部區域待強化備援水量評估規劃結果

南部區域各個縣市於目標年條件下因應「極端乾旱」之待強化備援水量之評估規劃如附圖 1-4 所示，評估結果指出：在延時固定為 120 日前提下，若參考 103-104 乾旱特性決定極端乾旱之頻率年參數(因應各縣市供需特性不同，採用適合該縣市之頻率年參數，例如：嘉義、臺南以及高雄皆採用頻率年 10 年，而屏東則採用頻率年 2 年)，嘉義、臺南、高雄以及屏東之設計備援水量皆低於已規劃備援水量，故無需另外增加待強化備援水量；若針對更加嚴峻之乾旱條件，參考 109-110 乾旱特性決定極端乾旱之頻率年參數(因應各縣市供需特性不同，採用適合該縣市之頻率年參數，例如：嘉義採用頻率年 25 年，而臺南與高雄皆採用頻率年 50 年，屏東則因無發生缺水情況不參與分析)，僅嘉義與臺南需增加待強化備援水量，其水量分別為 4.1 與 34.9 萬噸/日。綜合以上，建議未來可針對嘉義與臺南地區導入更多備援設施，以確保其於更加嚴峻乾旱期間仍可穩定供水。於增加備援水量之前，因應極端枯旱措施建議如下：嘉義地區可藉由加強引水方式盡可能增加仁義潭與蘭潭水庫之蓄水量，以因應 25 年一遇之乾旱事件；而臺南地區則需藉由大面積停灌措施，以因應 50 年一遇之乾旱事件。其中，嘉義地區與臺南地區因應 109-110 乾旱重現之建議作為供需水量分析結果如附圖 1-5 所示。



目標年(125年)系統備援水量盤點結果顯示：

1. 南部可因應103-104乾旱
2. 部分可因應109-110乾旱 (高雄與屏東)

- 因應作為
- 嘉義建議加強引水因應
  - 臺南建議停灌加以因應

註：2/10/25/50年為因應2/10/25/50年大旱所需之設計備援水量

附圖 1-4 南部區域各個縣市目標年條件下待強化備援水量之評估規劃

目標年(125年)條件下嘉義地區與臺南地區因應109-110乾旱重現之建議作為：

**嘉義** 待強化備援水量  
 $8.1 - 4.0 = 4.1$  (萬噸/日)

建議 (1) 加強引水轉備援水量  
 2.4 (萬噸/日)

竹山堰下游保留水量為5cms，若於加強引水期間改為保留3cms，換算備援水量約為 2.4 萬噸/日。

(2) 仍需增加備援水量  
 $4.1 - 2.4 = 1.7$  (萬噸/日)

**臺南** 待強化備援水量  
 $53.6 - 18.7 = 34.9$  (萬噸/日)

建議 (1) 停灌轉備援水量  
 30.7 (萬噸/日)

供需模式分析結果指出：109年1至5月農業用水可供水量約共4,600萬噸，若平均分配至150日，約為30.7 萬噸/日。

(2) 仍需增加備援水量  
 $34.9 - 30.7 = 4.2$  (萬噸/日)

附圖 1-5 因應 109-110 乾旱重現之建議作為供需水量分析

## 五、效益評估

為評估設計備援水量之效益，針對水資源系統供需模擬之設定分別採用：(1)現況條件、(2)目標年條件、(3)目標年條件與盤點備援(即已規劃備援水量)以及(4)目標年條件與設計備援(即已規劃備援水量與待強



化備援水量)，並重新進行水資源供需分析與極端枯旱風險評估，最後藉由極端枯旱潛勢地圖(附圖 1-6)與水資源韌性參數(附圖 1-7)，探討設計備援水量之效益，以作為後續推動備援方案之說帖。針對紓緩極端枯旱風險效益與韌性提升效益分別說明如下：

### (一)紓緩極端枯旱風險之效益

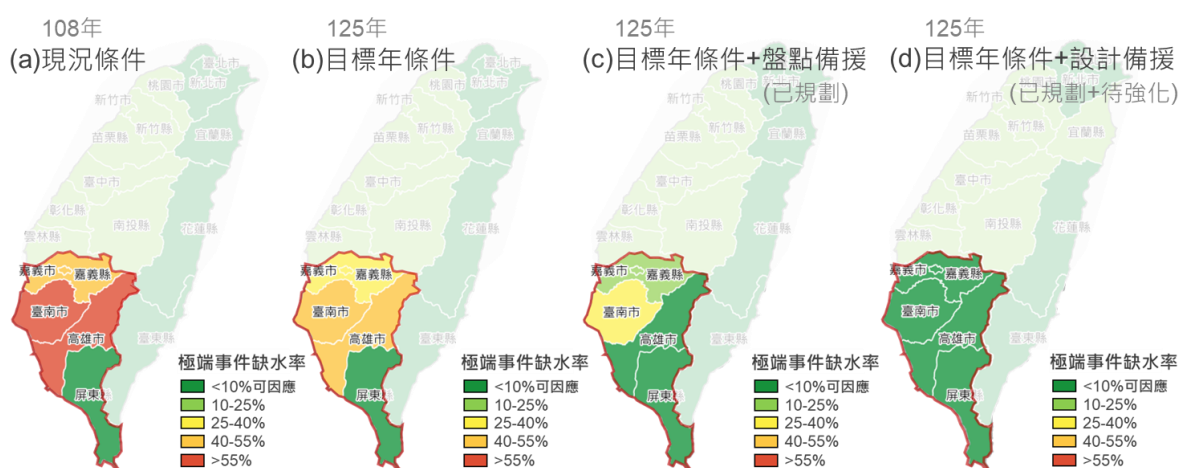
南部區域於不同供需條件之極端枯旱潛勢地圖如附圖 1-6 所示，若以現況條件下水資源供需情況作為比較基準，目標年條件下極端枯旱風險已有所改善，而目標年條件下再配合不同備援設定(即盤點備援與設計備援)則極端枯旱風險有更加顯著減少，突顯備援方案對於紓緩極端枯旱衝擊之重要性。

### (二)韌性提升效益

南部區域各個縣市於不同供需設定條件下之水資源韌性評估結果彙整如附圖 1-7 所示，分析結果指出：受益於水資源經理計畫推動，相較於各個縣市現況條件下韌性參數，目標年條件下韌性參數皆有所改善或者持平；若同時考慮目標年條件與不同備援設定(即盤點備援與設計備援)，各個縣市韌性參數則皆能進一步改善。

## 極端枯旱潛勢地圖

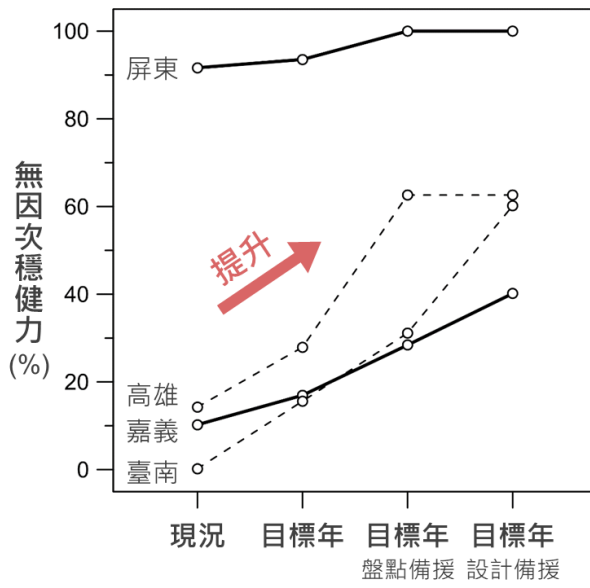
(基於極端乾旱之缺水率進行繪製)



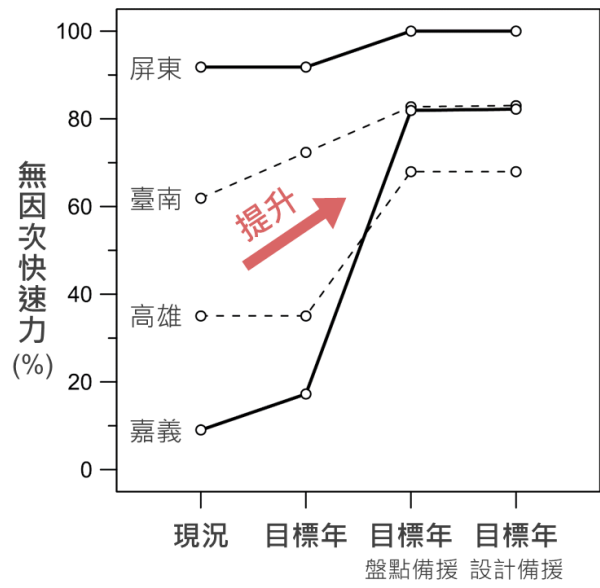
\*經理計畫可滿足水資源長期需水情況，惟於極端枯旱條件下(例如: 50年大旱)仍需仰賴備援方案之緊急支援，藉以穩定極端枯旱條件下之區域用水。

附圖 1-6 南部區域於不同供需條件下之極端枯旱潛勢地圖

(a)無因次穩健力



(b)無因次快速力



附圖 1-7 南部區域各縣市於不同供需條件之水資源韌性參數

## **附錄二 水利新知**

- 一、從空氣中取水(無能源使用)
- 二、空氣製水機(能源使用)
- 三、2021 年乾旱特別報告重點摘錄
- 四、空調冷凝水

## 附錄二 水利新知

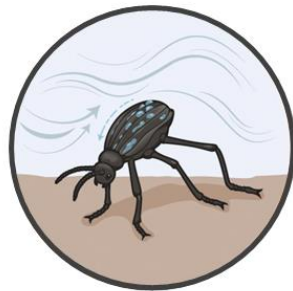
### 一、從空氣中取水(無能源使用)

在氣候變遷影響下，地球上原本就乾燥少雨之區域可能變得更加乾燥。由於缺乏乾淨且可靠的用水，這些區域將來可能不再適合居住。為解決用水問題，工程師決定學習納米比沙漠甲蟲(又稱沐霧甲蟲)百萬年以來「從空氣中取水」的喝水方法(附圖 2-1(a))。

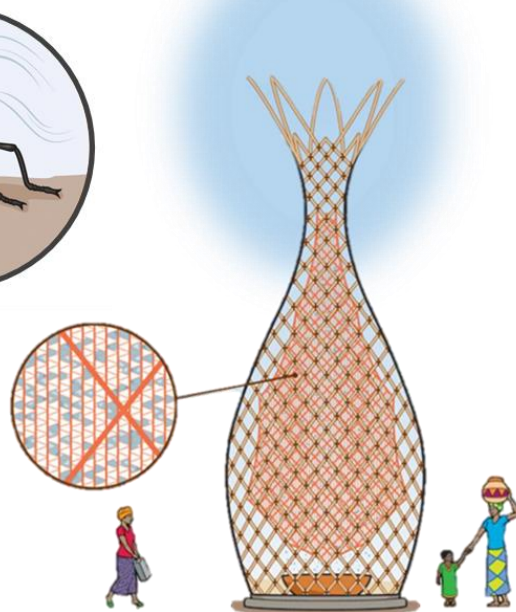
位於非洲南部的納米比沙漠每年雨量僅有 12.7 毫米，但沙漠甲蟲卻能找到非常充足的飲用水。當霧汽從大西洋飄至沙漠時，沙漠甲蟲便會抬起後側身體等待水汽聚集於具有親水性的甲殼端點上，而小水滴則再順著甲殼上的蠟質溝流至嘴裡，以取得充足的飲用水。工程師學習此種甲蟲於乾燥地區喝水之方式，設計仿生系統以從空氣中取水。

在非洲許多鄉村社區都以瓦爾卡樹作為集會地點，而一種空氣中取水裝置-瓦爾卡水塔(Warka Water Tower)便以此種樹名作為命名依據。一座瓦爾卡水塔每日可製造約 95 公升的乾淨飲用水，且大部分建材皆為就地取材，其無活動元件(更為耐用)，運作上亦無需電力。

(a) 納米比沙漠甲蟲  
從空氣中取水示意圖



(b) 瓦爾卡水塔示意圖  
(Warka Water Tower)

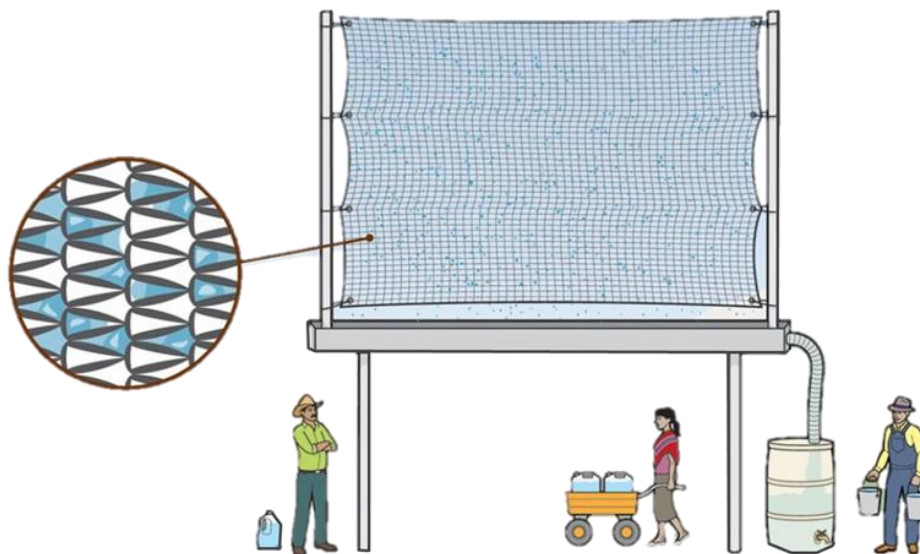


圖片來源：<https://www.sierraclub.org/sierra/2014-6-november-december/innovate/harvesting-water-thin-air>

附圖 2-1 納米比沙漠甲蟲空氣取水與瓦爾卡水塔示意圖

水塔設計師為義大利工程師阿圖羅·維托里(Arturo Vittori)，曾經協助歐洲太空總署發展載人太空飛行器，進行太空居住環境設計規劃。他意識到地球上一些極端環境與太空環境都面臨相似挑戰，而這些挑戰的關鍵核心就是必須提高資源的利用效率。最後，他設計出瓦爾卡水塔(附圖 2-1(b))，此種結構無需高科技且可手工打造，可協助乾燥地區民眾從空氣中取水，以獲得更多水資源。此種水塔取水原理係基於自然溫差變化，讓水汽於物體表面凝結，以達成空氣取水目的，且水塔材料以就地取材為原則，先採用竹子或木材打造框架，再應用聚酯纖維作為主要集水介面。

此外，麻省理工學院的工程師團隊應用不鏽鋼鍍膜網，開發出一種簡單的空氣取水裝置-採霧器(附圖 2-2)，並導入極度乾燥的智利阿他加馬沙漠，以補捉霧汽中的小水滴。此種取水裝置未來可以參考風力發電風場之形式進行配置，增加規模以提供農業灌溉用水。



圖片來源：<https://www.sierraclub.org/sierra/2014-6-november-december/innovate/harvesting-water-thin-air>

附圖 2-2 採霧器(fog catcher)示意圖

## 二、空氣製水機(能源使用)

空氣製水機<sup>2</sup>係一種能夠從周遭空氣取水的裝置，其一般藉由冷凝法(condensation)或乾燥劑法(desiccants)從空氣取水。其中，冷凝法係將空氣溫度降低至露點以下，讓空氣中水汽凝結為水；而乾燥劑法則係將乾燥劑暴露於空氣中，以利於吸附水汽。以下分別針對冷凝法、乾燥劑法以及精進方法進行說明：

### (一) 冷凝法

冷凝法取水主要係藉由壓縮機驅動冷媒先流經冷凝器再至蒸發器，而蒸發器則可以將周遭空氣溫度降低至露點以下，讓空氣中水汽凝結為水，再配合上抽風扇與空氣濾網，以持續補充乾淨空氣。在取得凝結水之後，通常會再導入淨水過濾與殺菌程序，以確保其能夠符合飲用標準。

冷凝法之產水效率主要取決於相對溼度、氣溫以及壓縮機尺寸，若氣溫與相對溼度較高時，其產水效率亦會較高；若氣溫與相對溼度較低，其產水效率亦會較低。從過去經驗來看，若氣溫低於 18.3 度或相對溼度低於 30%時，冷凝法已無法有效的運作。

國內外已有許多冷凝法之應用(附表 2-1)，例如：以色列 Watergen 公司製水程序為：(1)空氣過濾、(2)冷凝、(3)淨水過濾、(4)殺菌、(5)低溫儲水以及(6)內循環殺菌。其中，Watergen 藉由研發專利塑料熱交換製程，以提升空氣製水效率，每 1 度電約可產製最多 2.9 公升的水，換算 1 度水成本高達 1,734 元(以非夏月 1 度電 5.03 元估算)。

### (二) 乾燥劑法


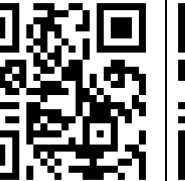
由鹽組成的溼式乾燥劑為常見的乾燥劑，其主要係利用濃鹽水吸附周遭空氣水汽，然後再將濃鹽水內的水分萃取出來並加以淨化。乾燥劑法可設置於大型貨櫃車並搭配發電機進行製水，每日可產水 4,500 公升，每 1 公升的燃油約可產製 5 公升的水，其水油比約為

---

<sup>2</sup>Wikipedia: atmospheric water generator  
([https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric\\_water\\_generator#Modern\\_technologies](https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_water_generator#Modern_technologies))

5 倍。

附表 2-1 國內外冷凝製水應用案例

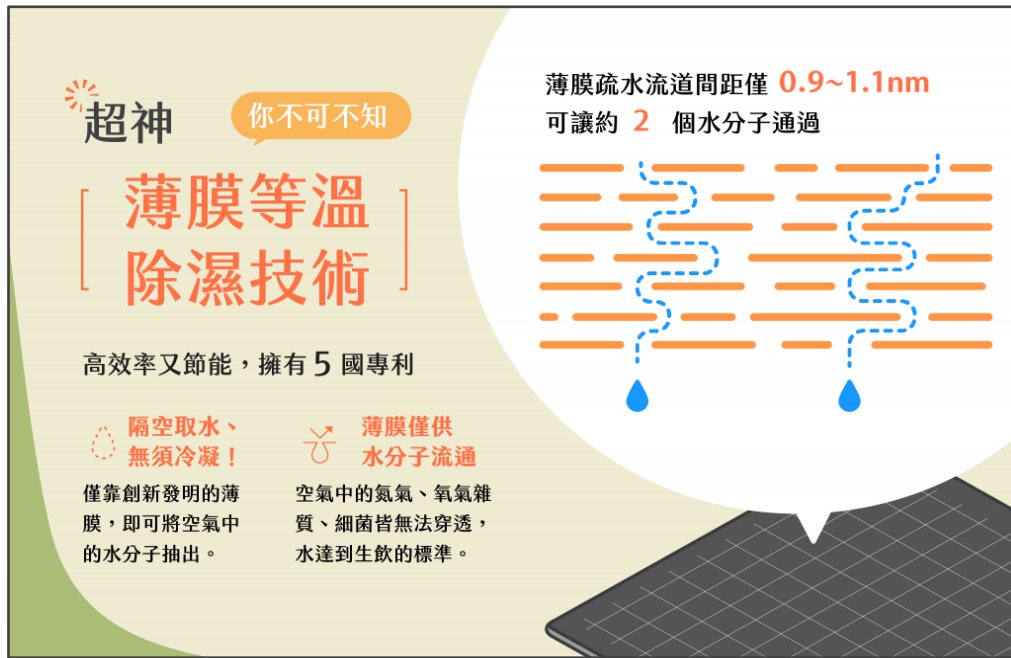
| 國家         | 臺灣  | 美國  | 以色列   | 孟買   | 印度  | 南非  |
|------------|---|---|---|--|---|---|
| 公司<br>(產品) | ARKVO <sup>[1]</sup><br>(ARK-001)   | Aquaboy <sup>[2]</sup><br>(Aquaboy Pro II)  | Watergen <sup>[3]</sup><br>(GENNY)  | Air-O-Water <sup>[4]</sup><br>(Dewpoint)   | AKVO <sup>[5]</sup><br>(akvoPOD)  | Water from Air <sup>[6]</sup><br>(AW3)  |
| 製水<br>程序   | 1.空氣過濾<br>2.冷凝<br>3.儲水與殺菌<br>4.淨水過濾<br>5.煮沸<br>6.出水與殺菌                              | 1.空氣過濾<br>2.冷凝<br>3.儲水與殺菌<br>4.淨水過濾<br>5.儲水與殺菌<br>6.冷水與熱水桶                          | 1.空氣過濾<br>2.冷凝<br>3.淨水過濾<br>4.殺菌<br>5.低溫儲水<br>6.內循環殺菌                               | 1.空氣過濾<br>2.冷凝<br>3.儲水<br>4.加壓<br>5.淨水過濾<br>6.臭氧殺菌                                   | 1.空氣過濾<br>2.冷凝<br>3.儲水<br>4.淨水過濾<br>5.殺菌  | 1.冷凝<br>2.殺菌<br>3.活性碳過濾<br>4.逆滲透膜<br>5.添加礦物質<br>6.儲水與殺菌<br>7.出水與殺菌                    |
| 製水<br>能力   | 16 公升/日<br>(RH60% ; 27°)  | 7.6~18.9 公升/日<br>(RH28~90% ; 13~32°)  | 19.2 公升/日<br>(RH60% ; 27°)  | 19 公升/日<br>(RH60% ; 22°)   | 50 公升/日<br>(RH80% ; 30°)  | 32 公升/日<br>(RH35~90%)   |
| 特色         | 專利冷凝塗層<br>智慧家電  | 七道簡易過濾程序  | 專利塑料<br>熱交換製程   | Air2Water<br>專利製水程序<br>(含臭氧殺菌)   | 適用離線<br>(off-grid)電力  | 整合逆滲透   |
| 用電         | 最大 750WH<br>待機 35WH   | 970WH   | 350WH/L   | 500WH  | 650WH   | 450WH   |
| 介紹         |  |  |  |  |  |  |

註：由於冷凝製水在用電需求上係隨著規模與功能而有所不同，為能客觀比較不同產品差異，主要係針對「家用冷凝製水規模」進行相關資料整理，而相關冷凝製水產品之參考資料條列如下：<sup>[1]</sup>臺灣 ARKVO (<https://arkvo.com.tw/>)、<sup>[2]</sup>美國 Aquaboy (<https://www.atmosphericwatersolutions.com/>)、<sup>[3]</sup>以色列 Watergen (<https://www.watergen.com/>)、<sup>[4]</sup>孟買 Air-O-Water (<https://www.airowater.com/>)、<sup>[5]</sup>印度 AKVO (<https://akvosphere.com/>)、<sup>[6]</sup>南非 Water from Air (<https://www.waterfromair.co.za/>)。

### (三)空氣製水精進方法

在經濟部技術處科技專案支持下，工研院研發出「薄膜等溫除濕技術」(附圖 2-3)，其主要為表面具有親水基但內含疏水微流道(僅供約 2 個水分子通過)的薄膜材料，可有效地分離出空氣中的水氣，在全球都在發展綠能節能之趨勢下，臺灣成功領先全球首創出此技術，並已擁有 5 國專利，其在空氣製水應用上潛力十足。

應用薄膜等溫除濕技術，其分離出的水汽濃度瞬間會提高 10 萬倍以上，僅需略微壓縮這些水汽，即可自然凝結成水，而且薄膜上的疏水流道間距僅 0.9 至 1.1 奈米，空氣中的氮氣、氧氣雜質以及細菌病毒等皆無法穿透，故薄膜濾出的水具有完全無菌的特性。



圖片來源：經濟部技術處([https://www.moeda.gov.tw/MNS/doiit/content/Content.aspx?menu\\_id=34648](https://www.moeda.gov.tw/MNS/doiit/content/Content.aspx?menu_id=34648))

附圖 2-3 工研院薄膜等溫除濕技術介紹

### 三、2021 年乾旱特別報告重點摘錄

#### (一)前言

在全球暖化影響下，氣溫上升導致降雨型態擾亂，進而造成許多地區乾旱頻率、嚴重程度以及持續時間之增加。全球升溫目前已趨於 2°C，需要採取緊急行動與更深入的瞭解且更有效的管理乾旱風險，以減少對人類生命與財產造成破壞性損失。

乾旱對社會、生態系統以及經濟造成廣泛且深遠之影響，但其影響往往被低估且不成比例的由最脆弱群體承擔。近年不斷發生的乾旱對於永續發展與減災目標構成重大威脅，惟有採用前瞻性、主動性以及創新性之乾旱風險管理方法以大幅減緩乾旱影響。

在乾旱風險管理上，應從被動的抗旱因應作為轉變成聚焦於乾旱的預防措施，因其成本遠低於乾旱發生後之相關抗旱因應作為。而乾旱預防措施可從辨識乾旱因子與系統脆弱因子著手，以盡量避免或減緩乾旱風險作為努力目標。



## (二)乾旱事件帶來的挑戰

### 1、乾旱事件的經濟影響

乾旱對社會、經濟以及生態系統的直接和間接影響非常巨大，難以從經濟角度進行量化，故其影響經常被低估。若從乾旱可量化的影響來看，其造成的經濟損失已非常驚人，例如：(1) 1998 至 2017 年乾旱至少影響全球約 15 億人口，並且導致至少 1240 億美元的經濟損失。其中，乾旱分別造成美國與歐盟每年約 64 億美元與 90 億歐元的直接損失；(2)嚴重乾旱對印度造成的經濟損失估計可占其 2 至 5% 的 GDP；(3)澳洲受到千年大旱的影響，其農業生產力於 2002 至 2010 期間減少 18%。

隨著乾旱持續時間拉長與其影響程度增加，其可量化損失將大幅度提升，且乾旱實際造成的損失通常為可量化損失的好幾倍。

### 2、氣候變遷加劇乾旱影響

氣候變遷為導致乾旱加劇的驅動因子之一，氣候變遷將造成許多地區乾旱發生頻率、嚴重程度以及持續時間有增加的情況，即使在較為樂觀的氣候變遷情境下乾旱仍有加劇的情形。而乾旱為沙漠化與土地退化的驅動因子，進而增加生態系統的脆弱性與社會的不穩定性(尤其是農業區域)。此外，乾旱與人類活動(例如：土地與水資源管理)有密切關係，人類活動(需水量增加)可能進一步使得乾旱加劇，造成更加嚴重的經濟與生態衝擊。

### 3、乾旱風險具有複雜特性

由於乾旱為一種複雜的系統性風險，故在治理與管理上十分困難。例如：在乾旱影響下，多目標水庫系統(農業與公共用水)可能會增加水庫蓄水的需求或依賴，進而增加系統的脆弱性。隨著乾旱持續時間的增長，造成乾旱損失急速上升，其影響在部門與區域間逐漸加劇。由於乾旱的複雜特性，讓許多國家在乾旱造成的環境與社會經濟影響方面缺乏系統性的量化知識。

### (三)乾旱風險管理與挑戰

#### 1、乾旱風險管理

乾早考驗水資源的分配與管理，同時也會刺激相關政策的推動。此外，多數乾旱研究案例皆指出：減緩乾旱風險需要國家層級的抗旱政策，並且需要避免被動的乾旱因應策略。

除較為被動的抗旱因應作為外，可採用下列三種方法來評估與因應乾旱風險，包含：(1)監測、預警以及預警；(2)脆弱度、回復度以及影響程度評估；(3)減緩與因應規劃。目前已有國家整合氣象服務、預警系統、季長期預報以及監測報告，以瞭解乾旱可能造成的影響層面，並據以滾動調整政策與因應策略。

#### 2、乾旱風險管理之挑戰

乾旱風險管理主要可從風險的三項因素著手：危害度、脆弱度以及暴露度。然而，管理這種高度複雜的風險，需要跨領域與更加全面的方法，通常會涉及不同政府部門、產業、研究單位以及民眾之間的交流與合作夥伴關係，有必要建立跨部門的傘狀結構，在氣象、水資源、能源、農業、環境以及基礎設施部門之間進行更好的協調。亦會需要整合氣候變化情況，考慮增加脆弱度與暴露度的根本原因，並瞭解乾旱的空間結構與動態特徵。

許多地區在乾旱風險管理上尚處於被動反應階段，主要管理重點在於危機因應，例如：財政支付、緊急供水、建造水井以及允許使用土地與基礎設施。這種被動反應方法缺乏風險預防觀念，無法獲得有關當前與未來可能發生的狀況資訊。

此外，相關案例研究指出：大量投資水壩、相關水利基礎設施以及灌溉計畫，其目的為確保平常與乾旱事件期間之供水穩定，但並沒有提高乾旱回復度。一些基礎設施甚至可能產生不利影響(例如過度開發地下水)。在嚴重乾旱期間，應急資金都是短期的，而且相關因應作為成本皆十分高昂，故有必要轉向乾旱回復力建設。

#### (四)乾旱預防措施與調適策略

##### 1、乾旱預防措施

面對乾旱威脅，一般可採用抗旱因應作為與乾旱預防措施，以避免乾旱影響層面進一步擴大。相較於較為被動的抗旱因應作為，乾旱預防措施在人力與經濟成本上皆較為低廉，並可預防社區因乾旱影響的廣度、深度以及長期持續而變得不堪負荷。發展乾旱預防措施，需預先辨識乾旱的驅動因子與特性，例如：瞭解與評估乾旱成因、空間結構、動態變化以及社會生態的脆弱度，以從根本上減緩乾旱可能造成的影響。整體而言，乾旱預防措施的關鍵在於掌握乾旱特性、乾旱預測以及評估系統脆弱度與恢復度。

##### 2、乾旱調適策略

以農業而言，乾旱的調適策略可以包含：調整作物品種、種植日期、種植密度、灌溉策略、牲畜種類以及貿易交付機制等。而調適策略能否成功則往往取決於政府政策(例如：抗旱基金、補貼、退稅以及各種稅收措施)之支持，有些國家則會藉由農業補貼來減緩農業承受的乾旱風險。

#### (五)結論與建議

- 1、沒有兩場乾旱事件會相同，因此也沒有一個簡單的方法足以管理乾旱風險，重點在於對各種乾旱事件與其驅動因子、乾旱預防措施以及抗旱因應作為保持持續的學習與調適。
- 2、在乾旱風險管理上，應從被動的抗旱因應作為轉變成聚焦於乾旱的預防措施，因為乾旱預防措施的人力、經濟以及環境成本遠低於乾旱發生後之相關抗旱因應作為。
- 3、除政府乾旱補貼之外，亦應與金融體系合作，促進更完整的社會保障與應急融資機制，以轉移部分乾旱風險，提供更為多元的乾旱風險管理手段。
- 4、應重新檢視與調整目前的乾旱風險管理架構，例如：進一步擴大乾旱預警系統，或者考慮新的乾旱指標，以決定執行乾旱調適管

理的最佳時機。

#### 四、空調冷凝水

一般空調冷凝水係直接進入排水系統，但隨著水資源與永續重要性逐漸提升，針對此種空調系統所產生之副產品「冷凝水」，在國內外已有許多研究與案例探討其水量水質或回收應用之可行性，以下分別針對國際上相關研究案例與臺灣回收應用案例進行說明：

##### (一)國際上相關研究案例

位於奈及利亞之哈科特港大學(Noutcha et al., 2016)針對 120 台冷氣進行冷凝水蒐集實驗，每週執行五天，為期兩個月。其實驗結果指出：就水量而言，兩個月期間共計蒐集 1,5595 公升冷凝水；就水質而言，冷凝水在物理化學性質上普遍都符合世界衛生組織用水標準，但生菌數量則未達世界衛生組織建議標準。整體而言，冷凝水不建議作為飲用水，但仍可用於環境清潔、植物澆灌、實驗用水以及馬桶用水等。

印度共生國際大學(Sabnis et al., 2020)指出針對許多熱帶或亞熱帶地區之國家而言，因相對溼度經常高於 50%，其空調製冷過程具有較高之冷凝效率。故針對冷凝水進行分析研究，檢視其水質與水量之穩定性。分析結果指出：冷凝水具有高度純淨、產水量大以及幾乎全年可用等特性，其於工業、實驗室、民生以及農業上皆可使用，使得冷凝回收系統具有發展商機。

Liu and Li (2017)指出就產業用水而言，冷卻水占整體用水比例高，應避免浪費並盡量降低用水損失，建議可配合回收水加以補充。故其以北京一處商辦大樓為例，探討以中央空調冷凝水補充冷卻水之效益。分析結果指出：冷凝水回收在技術上可行，且其益本比在經濟層面上亦具有可行性。

## (二)臺灣冷凝水回收應用案例

臺灣因豐枯交替頻繁且趨於懸殊，多元與穩定水資源開發為未來重要方向，針對冷凝水回收應用案例(附表 2-2)介紹如下：(1)經濟部水利署南區水資源局增設空調冷凝水回收設備，A 棟與 B 棟辦公區每日各可回收 150 公升冷凝水，無雨時冷凝水可用於澆花，下雨時則用於拖地與擦玻璃；(2)台灣電力公司設計「智慧化水資源再利用系統」將台電大樓頂樓雨水引流至地下室筏式基礎集水坑，用以澆灌花圃與沖廁所，可大幅減少自來水用量；此外，近年更回收空調運轉產生之冷凝水，讓大樓每天都有水源進帳；(3)中華電信為強化水資源回收再利用成效，導入地下筏基雨水回收系統，收集下雨時機房屋頂與地面乾淨雨水，亦針對辦公大樓空調系統增設冷凝水回收工程，將冷凝水回收充分利用。藉由推動雨水、沐浴水以及空調冷凝水等回收再利用方案，將回收水再利用於樹木澆灌、園區與人行道清洗上；(4)傑能系統工程與康普艾節能科技針對南部某辦公大樓設計冷凝水回收系統，主要係將空調箱與送風機之冷凝水皆回收至冷凝水回收桶後，經冷凝水回收泵傳送至冷卻水塔，進而減少冷卻水塔補水量。此案例之冷凝水回收系統每月可產生約 50,000 公升之冷凝水，可減少冷卻水塔自來水補水量約 50 度，每月可減少 CO<sub>2</sub> 排放約 7.5 公斤(= 0.15\*50)。

附表 2-2 臺灣冷凝水回收應用案例

| 單位   | 案例說明   | 連結  |
|--|--|---|
| <p>經濟部水利署<br/>南區水資源局<br/>燕巢辦公區<sup>[1]</sup></p> | <p>增設空調冷凝水回收設備，A 棟與 B 棟辦公區每日各可回收 150 公升冷凝水，無雨時冷凝水可用於澆花，下雨時則用於拖地與擦玻璃。</p>   |    |
| <p>台灣電力公司<br/>台電大樓<sup>[2]</sup></p>             | <p>台電設計「智慧化水資源再利用系統」將大樓頂樓雨水引流至地下室筏式基礎集水坑，用以澆灌花園與沖廁所，可大幅減少自來水用量；此外，近年更回收空調運轉產生之冷凝水，讓大樓每天都有水源進帳。</p>   |    |
| <p>中華電信<sup>[3]</sup></p>                        | <p>為強化水資源回收再利用成效，中華電信導入地下筏基雨水回收系統，收集下雨時機房屋頂與地面乾淨雨水，亦針對辦公大樓空調系統增設冷凝水回收工程，將冷凝水回收充分利用。藉由推動雨水、沐浴水以及空調冷凝水等回收再利用方案，將回收水再利用於樹木澆灌、園區與人行道清洗上。</p>   |    |
| <p>傑能系統工程與<br/>康普艾節能科技<sup>[4]</sup></p>         | <p>冷凝水回收節能案例分享：針對南部某辦公大樓設計冷凝水回收系統，主要係將空調箱與送風機之冷凝水皆回收至冷凝水回收桶後，經冷凝水回收泵傳送至冷卻水塔，進而減少冷卻水塔補水量。此案例之冷凝水回收系統每月可產生約 50,000 公升之冷凝水，可減少冷卻水塔自來水補水量約 50 度，每月可減少 CO2 排放約 7.5 公斤(= 0.15*50)。</p> |  |

資料來源：

[1] <https://www.facebook.com/tw.wrasb/posts/1968745690099651>

[2] <https://www.cna.com.tw/news/afe/202102060075.aspx>

[3] [https://www.cht.com.tw/home/cht/-/media/Web/PDF/Sustainability/CSR-Report-Download/CSR/2016/2016\\_CSR\\_10\\_Green\\_Enterprise.pdf](https://www.cht.com.tw/home/cht/-/media/Web/PDF/Sustainability/CSR-Report-Download/CSR/2016/2016_CSR_10_Green_Enterprise.pdf)

[4] <http://edm.jp-system.com.tw/index.php?page=38&tab=3>

### 附錄三 頻率分析方法

## 附錄三 頻率分析方法

### 一、一般極端值分布

一般極端值分布(簡稱 GEV)主要係依據形狀參數  $k$  之特性來予以區分為三種型態：(1)當  $k$  為 0 時(即偏態係數等於 1.139)，則為極端值一型分布(簡稱 EV1)；(2)當  $k$  為負值時(即偏態係數大於 1.139)，則為極端值第二型分布(簡稱 EV2)；(3)當  $k$  為正值時(即偏態係數小於 1.139)，則為極端值第三型分布(簡稱 EV3)。其中，因樣本偏態係數為形狀參數  $k$  值之函數，求得樣本偏態係數後即可藉由反推  $k$  值，進而決定樣本係屬於第幾類型之極端值分布，樣本偏態係數與形狀參數  $k$  值之關係如下：

$$C_s = \frac{\Gamma(1+3k) - 3\Gamma(1+2k)\Gamma(1+k) + 2\Gamma^3(1+k)}{[\Gamma(1+2k) - \Gamma^2(1+k)]^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

其中， $C_s$  為偏態係數； $\Gamma()$  為 gamma 函數。

極端值第二型分布之  $k$  值為負，而極端值第三型分布之  $k$  值為正，極端值第二型分與極端值第三型分布具備相同之函數型態，其累積分布函數  $F(x)$  與機率密度函數  $f(x)$  如下所示：

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 - \frac{k(x-\mu)}{\alpha}\right]^{\frac{1}{k}}\right\} \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{k(x-\mu)}{\alpha}\right]^{\frac{1}{k}-1} \exp\left\{-\left[1 - \frac{k(x-\mu)}{\alpha}\right]^{\frac{1}{k}}\right\} \quad (3)$$

若將上式變量  $x$  予以標準化，則可得變量  $y$  為：

$$y = 1 - \left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)k \quad (4)$$

而累積分布函數  $F(x)$  與機率密度函數  $f(x)$  則可進一步簡化如下：

$$F(y) = \exp\left(-y^{\frac{1}{k}}\right) \quad (5)$$

$$f(y) = -\frac{1}{\alpha} y^{\frac{1}{k}-1} \exp\left(-y^{\frac{1}{k}}\right) \quad (6)$$



於應用一般極端值分布時，為能表示其與頻率年  $T$  之關係，亦可採用下列二式：

$$x_T = \mu + \frac{\alpha(1-y)}{k} \quad (7)$$

$$y = \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right]^k \quad (8)$$

其中， $T$  為頻率年； $\mu$  為位置參數； $\alpha$  為尺度參數； $k$  為形狀參數。而位置參數與尺度參數可利用下式計算：

$$\mu = \bar{x} - \alpha\gamma, \quad \gamma = 0.5772157 \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s \quad (10)$$

在水文分析應用上，推求水文量與頻率因子  $K_T$  之關係可表示如下：

$$x_T = \bar{x} + K_T s \quad (11)$$

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left( \gamma - \frac{1-y}{k} \right) \quad (12)$$

## 二、極端值一型分布

極端值一型分布(簡稱 EV1)亦稱為 Gumbel 分布，為三參數極端值分布之退化型式，亦即  $k$  為 0。因此，此分布僅有兩個統計參數，分別為  $\mu$  與  $\alpha$ 。其累積分布函數與其機率密度函數，分別定義如下：

$$F(x) = \exp \left[ -\exp \left( -\frac{x-\mu}{\alpha} \right) \right] \quad (13)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[ -\frac{x-\mu}{\alpha} - \exp \left( -\frac{x-\mu}{\alpha} \right) \right] \quad (14)$$

其中， $\mu$  為位置參數； $\alpha$  為尺度參數。將上式變量  $x$  予以標準化，可得變量  $y$  為：

$$y = \frac{x-\mu}{\alpha} \quad (15)$$

而累積分布函數  $F(x)$  與機率密度函數  $f(x)$  則可進一步簡化如下：

$$F(y) = \exp \left[ -\exp(-y) \right] \quad (16)$$

$$f(y) = \exp \left[ -y - \exp(-y) \right] \quad (17)$$

上式亦可稱為雙指數分布，於應用極端值一型分布時，為能表示其與頻率年  $T$  之關係，可採用下列二式：

$$x = \mu + \alpha y \quad (18)$$

$$y = -\ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (19)$$

其中， $T$  為頻率年。而在水文分析應用上，推求水文量與頻率因子  $K_T$  之關係可表示如下：

$$x_T = \bar{x} + K_T s \quad (20)$$

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ \gamma + \ln \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right] \right\} \quad (21)$$

### 三、皮爾遜第三型分布

皮爾遜第三型分布(簡稱 PT3)之累積分布函數  $F(x)$  與機率密度函數  $f(x)$  分別定義如下：

$$F(x) = \frac{1}{\theta \Gamma(\beta)} \int_0^{x_0} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\theta}\right)} \left(\frac{x-\gamma}{\theta}\right)^{\beta-1} dx \quad (22)$$

$$f(x) = \frac{1}{\theta \Gamma(\beta)} \left(\frac{x-\gamma}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\theta}\right)} \quad (23)$$

其中， $\mu$  為位置參數； $\alpha$  為尺度參數； $\Gamma()$  為 gamma 函數。將上式變量  $x$  予以標準化，可得變量  $y$  為：

$$y = \frac{x-\gamma}{\theta} \quad (24)$$

而累積分布函數  $F(x)$  與機率密度函數  $f(x)$  則可進一步簡化如下：

$$F(y) = \frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_0^{y_0} y^{\beta-1} e^{-y} dy \quad (25)$$

$$f(y) = \frac{y^{\beta-1} e^{-y}}{\Gamma(\beta)} \quad (26)$$

在水文分析應用上，推求水文量與頻率因子  $K_T$  之關係可表示如下：

$$x_T = \bar{x} + K_T s \quad (27)$$

$$K_T = t + (t^2 - 1) \frac{C'_s}{6} + \frac{1}{3} (t^3 - 6t) \left( \frac{C'_s}{6} \right)^2 - (t^2 - 1) \left( \frac{C'_s}{6} \right)^3 + t \left( \frac{C'_s}{6} \right)^4 + \frac{1}{3} \left( \frac{C'_s}{6} \right)^5 \quad (28)$$

$$t \approx W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_0 W + d_1 W^2 + d_2 W^3} \quad (29)$$

$$t \approx - \left( W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_0 W + d_1 W^2 + d_2 W^3} \right) \quad (30)$$

$$W = \sqrt{\ln \left( \frac{1}{P^2} \right)} \quad , 0 < P \leq 0.5 \quad (31)$$

$$W = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(1-P)^2} \right]} \quad , P > 0.5 \quad (32)$$

其中， $P$  為超越機率； $C'_s$  為修正偏態係數； $C_0 = 2.515517$ ； $C_1 = 0.802853$ ； $C_2 = 0.010328$ ； $d_0 = 1.432788$ ； $d_1 = 0.189269$ ； $d_2 = 0.001308$ 。

#### 四、對數皮爾遜第三型分布

對數皮爾遜第三型分布(簡稱 LPT3)之機率密度函數  $f(x)$  定義如下：

$$f(x) = \frac{1}{\alpha_y x \Gamma(k_y)} \left( \frac{\ln x - \mu_y}{\alpha_y} \right)^{k_y - 1} e^{-\left( \frac{\ln x - \mu_y}{\alpha_y} \right)} \quad (33)$$

其中， $y = \ln(x)$ ； $\mu_y$  為位置參數； $\alpha_y$  為尺度參數； $k_y$  為形狀參數； $\Gamma()$  為 gamma 函數。在水文分析應用上，推求水文量與頻率因子  $K_T$  之關係可表示如下：

$$y_T = \bar{y} + K_T s_y \quad (34)$$

$$K_T = t + (t^2 - 1) \frac{C'_s}{6} + \frac{1}{3} (t^3 - 6t) \left( \frac{C'_s}{6} \right)^2 - (t^2 - 1) \left( \frac{C'_s}{6} \right)^3 + t \left( \frac{C'_s}{6} \right)^4 + \frac{1}{3} \left( \frac{C'_s}{6} \right)^5 \quad (35)$$

其中， $t$  為標準常態值； $C'_s$  為樣本取對數後之修正偏態係數； $\bar{y}$  為樣本取對數後之平均值； $s_y$  為樣本取對數後之標準偏差。

## 五、三參數對數常態分布

三參數對數常態分布(簡稱 LN3)之機率密度函數 $f(x)$ 定義如下：

$$f(x) = \frac{1}{(x-\alpha)\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\ln(x-\alpha)-\mu_y]^2}{2\sigma_y^2}} \quad (36)$$

其中， $\alpha$  為位置參數； $\mu_y$  為  $\ln(x-\alpha)$  之平均值； $\sigma_y$  為  $\ln(x-\alpha)$  之標準偏差。在水文分析應用上，推求水文量與頻率因子  $K_T$  之關係可表示如下：

$$x_T = \bar{x} + K_T s \quad (37)$$

$$K_T = \frac{e\left[\ln(1+Z_2^2)\right]^{1/2} t - \left[\ln(1+Z_2^2)\right]/2 - 1}{Z_2} \quad (38)$$

$$Z_2 = \frac{1-w^{2/3}}{w^{1/3}} \quad (39)$$

$$w = \frac{\left[-r_1 + (r_1^2 + 4)^{1/2}\right]}{2} \quad (40)$$

$$r_1 = \frac{e^{3s_y^2} - 3e^{s_y^2} + 2}{\left(e^{s_y^2} - 1\right)^{3/2}} \quad (41)$$

其中， $Z_2$  為  $(x-\alpha)$  分布之變異系數； $s_y$  為樣本取對數後之標準偏差； $t$  為標準常態值。

## 六、常態分布

常態分布(簡稱 N)之機率密度函數 $f(x)$ 定義如下：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (42)$$

其中， $\mu$  為  $x$  之平均值； $\sigma$  為  $x$  之標準偏差。在水文分析應用上，推求水文量與頻率因子  $K_T$  之關係可表示如下：

$$x_T = \bar{x} + K_T s \quad (43)$$

$$K_T = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (44)$$

其中， $\mu$  為  $x$  之平均值； $\sigma$  為  $x$  之標準偏差。

經濟部水利署水利規劃試驗所出版品版權頁資料

因應極端氣候水資源系統備援能力評估規劃

---

出版機關：經濟部水利署水利規劃試驗所

地址：臺中市霧峰區吉峰里中正路 1340 號

電話：(04)23304788

傳真：(04)23300282

網址：<http://www.wrap.gov.tw>

編著者：財團法人成大研究發展基金會/曾宏偉

出版年月：110 年 12 月

版次：初版

定價：新臺幣 700 元

EBN：10110F0033

著作權利管理資訊：經濟部水利署水利規劃試驗所保有所有權利。欲利用本書全部或部分內容者，需徵求經濟部水利署水利規劃試驗所同意或書面授權。

電子出版：本書製有光碟片

聯絡資訊：經濟部水利署水利規劃試驗所

電話(04)23304788



廉潔、效能、便民



經濟部水利署水利規劃試驗所

地址：臺中市霧峰區吉峰里中正路 1340 號

網址：<http://www.wrap.gov.tw/>

總機：(04)23304788

傳真：(04)23300282

EBN：10110F0033

定價：新臺幣 700 元