

# 因應氣候變遷水源供應與經濟影響研究(1/2)

## The Adaptation to Climate Change Impact on Water Supply and Economy (1/2)

主管單位：經濟部水利署

游保杉<sup>1</sup>  
Yu, Pao-Shan

林幸君<sup>2</sup>  
Lin, Hsing-Chun

郭彥廉<sup>3</sup>  
Kuo, Yen-Lien

曾宏偉<sup>1</sup>  
Tseng, Hung-Wei

<sup>1</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系

<sup>2</sup> 國立嘉義大學應用經濟學系

<sup>3</sup> 國立成功大學經濟學系

### 摘要

本計畫重點為評估可能水文情境下水源枯旱風險與經濟影響，並依據分析結果(缺水率與經濟影響)進行調適策略評估，以提供水資源政策推動參考。因臺南降雨集中發生於梅雨季與颱風季，故本計畫主要針對兩季研擬偏少、無雨、延遲以及正常之情境，針對水文情境定義簡單說明如下：(1)偏少情境：降雨總量累分布函數之值小於 30%、(2)無雨情境：降雨總量累分布函數之值小於 10%、(3)延遲情境：首月降雨總量累分布函數之值小於 30% 以及(4)正常情境：排除上述 3 種情境之資料。

為評估氣候變遷對水源供需可能帶來之負面影響，本計畫參考「氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估(2/2)」(經濟部水利署，民國 106 年)選擇臺南地區水源供需之最劣情境 A2-CSMK35 進行衝擊分析，藉由比對基期與未來水文情境特徵線之差異，瞭解氣候變遷對臺南地區主要降雨來源之可能影響。基期與未來之情境特徵線比對結果顯示：(1)在水文情境平均值之部分，A2-CSMK35 最劣情境下梅雨偏少、無雨、延遲以及正常情況之降雨總量平均值皆有減少，其又以延遲情況之減少幅度最大；而颱風雨偏少、無雨、延遲以及正常情況之降雨總量平均值則有增有減，偏少與無雨情況呈現略為減少，而延遲與正常情況則有較顯著增加；(2)在水文情境邊際機率之部分，A2-CSMK35 最劣情境下梅雨偏少與無雨之發生機率皆有增加情形，而梅雨延遲與正常之發生機率則皆有減少情形；颱風雨偏少與無雨之發生機率則皆有減少情形，而颱風雨延遲與正常之發生機率則分別為持平與增加情形。

針對水文高度不確定性下之調適策略決策問題，參考決策理論中期望值準則(expected value criterion)，整合機率概念進行水源枯旱風險之計算，提供決策者合理且客觀之量化風險值，以作為後續水資源政策推動參考。本計畫將水源枯旱風險定義為缺水率或經濟影響之期望值：

$$\text{水源枯旱風險} = \sum_{i=1}^N \text{缺水率}_i \times \text{水文情境發生機率}_i$$

其中， $i$  為水文情境之編號，而  $N$  則為水文情境之總數量。

調適策略效益評估結果指出：臺南高雄水源聯合運用(S2)與山上淨水場改善工程(S8)於減緩缺水上有較高之效益，而效益次高之策略則為永康安平再生水(S3)與白河水庫後續更新改善(S4)，以上調適策略若能順利推動，每個策略皆可減緩公共用水缺水率約 2.1% 至 3.0%。

**關鍵詞：**氣候變遷、枯旱風險、經濟分析

### Abstract

This project aims to build up an economic analysis and policy assessment system for water under various hydrological scenarios. The project evaluated the drought risk from the perspective of both water shortage and economic impact. With taking economic analysis into account, a more valuable information for water policy assessment or decision making can be provided.

Since the major rainfall seasons in Tainan are mei-yu (May to June) and typhoon (July to September) seasons, this project designs some hydrological scenarios to study potential drought risk. The designed hydrological scenarios are composed of below normal, few, delay and normal conditions for both mei-yu and typhoon seasons. The definition of proposed hydrological scenarios are given below: (1) the below normal condition: the cumulative probability of total rainfall amount is less than 30%. (2) the few condition: the cumulative probability of total rainfall is less than 10%. (3) the delay condition: the cumulative probability of the first month rainfall is less than 30%. (4) the normal condition: the exclusion of above conditions.

Besides, the project also took climate change scenarios into consideration. The impact assessment shows that: (1) under the A2-CSMK35 scenario (the worst scenario), all the average values of below normal, few, delay and normal mei-yu conditions decrease, while the delay mei-yu condition decreases most significantly; the average values of below normal and few typhoon conditions slightly decrease, but the average values of delay and normal typhoon conditions increase significantly. (2) under the A2-CSMK35 scenario (the worst scenario), the occurrence probabilities of below normal and few mei-yu conditions increase but the occurrence probabilities of delay and normal mei-yu conditions decrease; the occurrence probabilities of below normal and few typhoon conditions decrease but the occurrence probabilities of delay and normal typhoon conditions plateau and increase, respectively.

The expected value theory was used to quantify the drought risk of a water supply system under both hydrological and climate change scenarios. The drought risk is defined as the expected value of water shortage and economic impact, which is calculated as follows:

$$drought\ risk = \sum_{i=1}^N water\ shortage_i \times occurrence\ probability_i$$

where  $i$  represents  $i$ -th hydrological scenario and  $N$  represents the total number of hydrological scenarios.

In this project, the benefit of a strategy is evaluated by the increase in drought risk (i.e., expected water shortage or expected economic impact) due to a failure in strategy implementation. A larger increase in expected water shortage indicates the benefit of a strategy is higher. Eight different combinations of adaptation strategies were examined and then ranked. The evaluation results show: (1) the benefits of S2 and S8 strategies are relatively higher than others. (2) S3 and S4 strategies are of medium benefits in reduction of water shortage.

**Keywords : climate change, drought risk, economic analysis.**

## 一、前言

本計畫重點為評估可能水文情境下水源枯旱風險與經濟影響，並依據分析結果進行調適策略評估，以提供水資源政策推動參考。為此，本計畫研提水資源經濟與政策評估架構，呈現不同調適策略對應之水源枯旱風險與經濟影響，以瞭解各個調適策略之重要程度，並進一步提供風險資訊(缺水率或經濟影響之期望值)作為政策評估之依據。其中，水資源經濟與政策評估架構主要元件包含：情境設定、調適策略、水文情境、缺水分析、經濟分析以及決策分析。在此政策評估架構下，關鍵項目包含：(1)氣候變遷情境與可能水文情境與(2)水源枯旱風險，針對各項目說明如下：

### 1.1 氣候變遷情境與可能水文情境

本計畫藉由綜合考慮氣候變遷情境與可能水文情境，進行惡劣水文條件研擬，作為後續水源供需分析與經濟分析之依據，以評估惡劣水文條件下臺南地區可能面臨之水源枯旱風險，其定義如下：

$$\text{氣候變遷下可能水文情境} = \text{氣候情境} + \text{水文情境} \quad (1)$$

其中，氣候變遷情境主要係考慮長期水文特性之改變，例如：梅雨降雨總量之平均值減少10%；而可能水文情境主要則係考慮水文變異所導致之豐枯情況，例如：梅雨偏少、無雨(空梅)、延遲以及正常之情況。

### 1.2 水源枯旱風險

針對水文高度不確定性下之調適策略決策問題，參考決策理論中期望值準則 (expected value criterion)，整合機率概念進行水源枯旱風險之計算，提供決策者合理且客觀之量化風險值，以作為後續水資源政策推動參考。本計畫將水源枯旱風險定義為缺水率或經濟影響之期望值<sup>1</sup>：

<sup>1</sup>第一年度計畫於水源枯旱風險定義上係先採用缺水率之期望值，待第二年度計畫完成全部之經濟分析成果，則改採用經濟影響之期望值來量化水源枯旱風險。

$$\text{水源枯旱風險} = \sum_{i=1}^N \text{缺水率}_i \times \text{水文情境發生機率}_i \quad (2)$$

其中， $i$ 為水文情境之編號，而 $N$ 則為水文情境之總數量。

## 二、基本資料蒐集、水文特性分析及現況與未來氣候變遷情勢分析

### 2.1 基本資料蒐集

本計畫蒐集臺南地區之水源基本資料作為後續水源枯旱風險分析之依據，其包含：水資源系統架構、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。針對臺南地區供水系統整理如圖1所示，其主要供水設施包含：曾文水庫、烏山頭水庫、南化水庫、白河水庫、鏡面水庫以及玉峰堰。

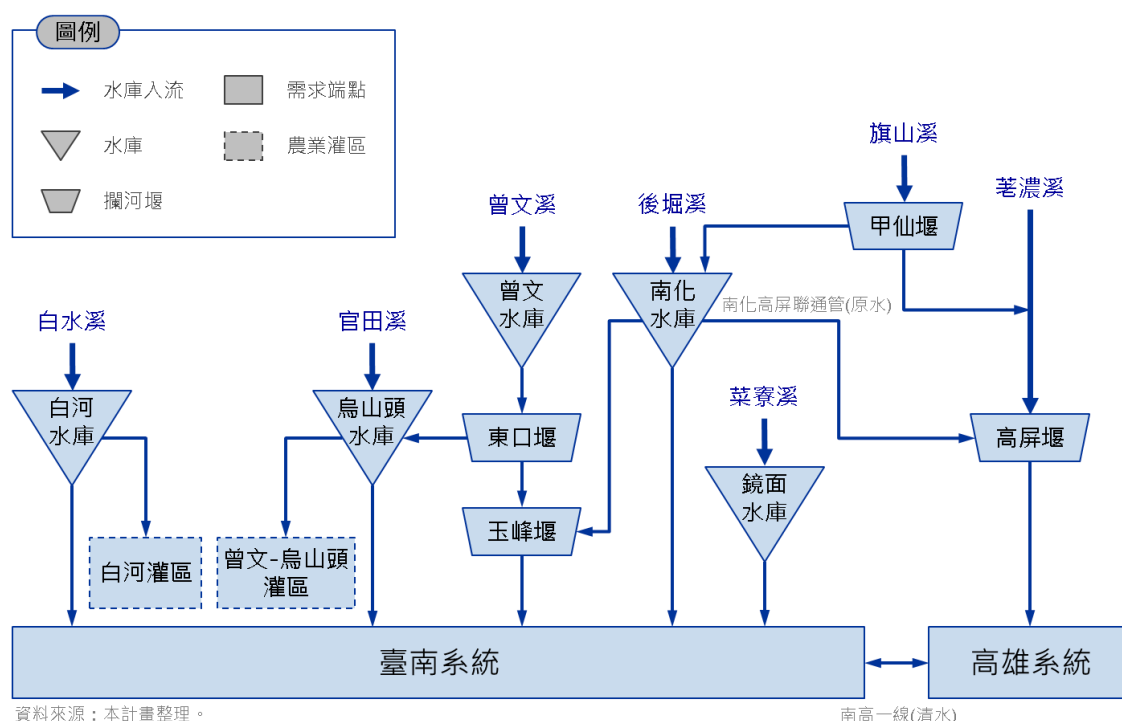
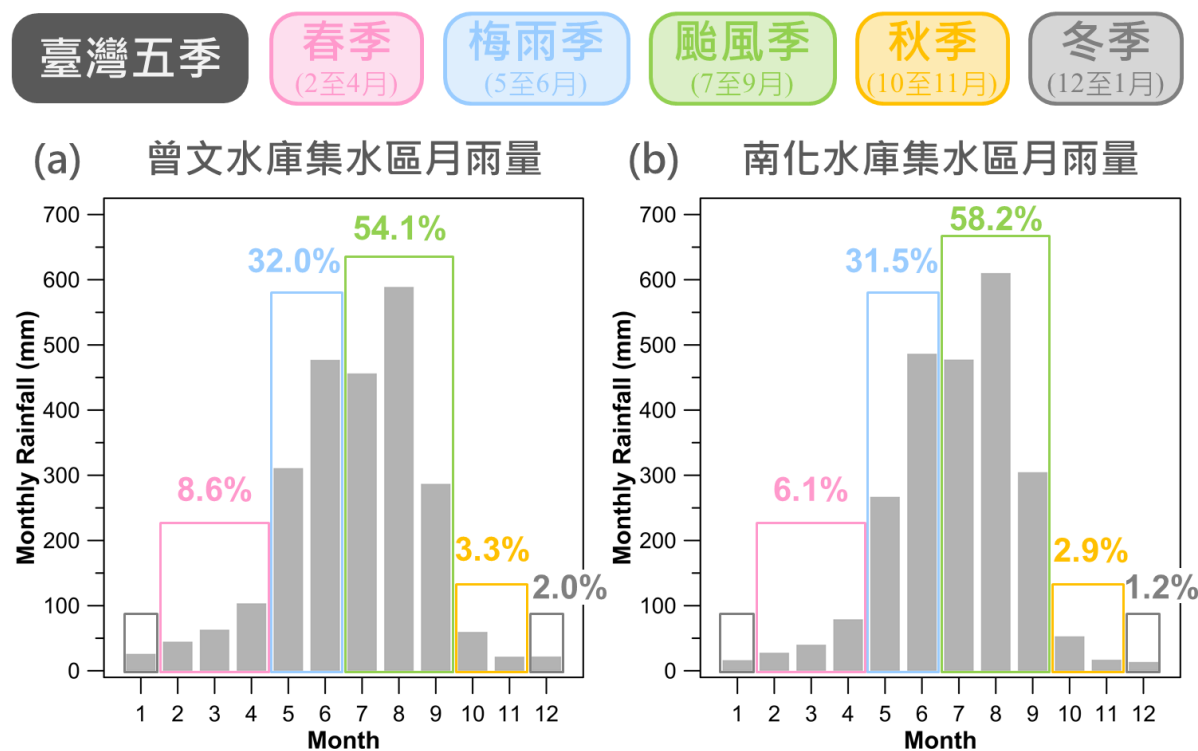


圖 1 臺南地區供水系統圖

### 2.2 水文特性分析

本計畫參考陳昭銘(民國97年)季節劃分方式，將臺灣季節分為五季，分別為：春季(2至4月)、梅雨季(5至6月)、颱風季(7至9月)、秋季(10至11月)以及冬季(12月至隔年1月)，並針對計畫區域內兩大重要集水區：曾文水庫集水區與南化水庫集水區進行水文量統計分析，以瞭解各季節水文特性，並作為後續可能水文情境研擬之依據。水文特性分析主要係基於「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」產製之歷史觀測網格雨量月資料，挑選計畫區域集水區對應網格並統計其長期(民國49至104年)平均月雨量，分析結果(圖2)顯示：曾文水庫集水區春季雨量佔全年雨量8.6%，而梅雨季、颱風季、秋季以及冬季佔比則分別為32.0%、54.1%、3.3%以及2.0%；南化水庫集水區春季雨量佔全年雨量6.1%，而梅雨季、颱風季、秋季以及冬季佔比則分別為31.5%、58.2%、2.9%以及1.2%。

整體而言，曾文水庫集水區與南化水庫集水區雨量主要集中於梅雨季與颱風季，其佔全年雨量分別為86.1%與89.7%。



註：集水區雨量分析成果係基於「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」產製之歷史觀測網格雨量月資料

圖 2 計畫區域各季節雨量佔全年雨量百分比

## 2.3 現況與未來氣候變遷情境分析

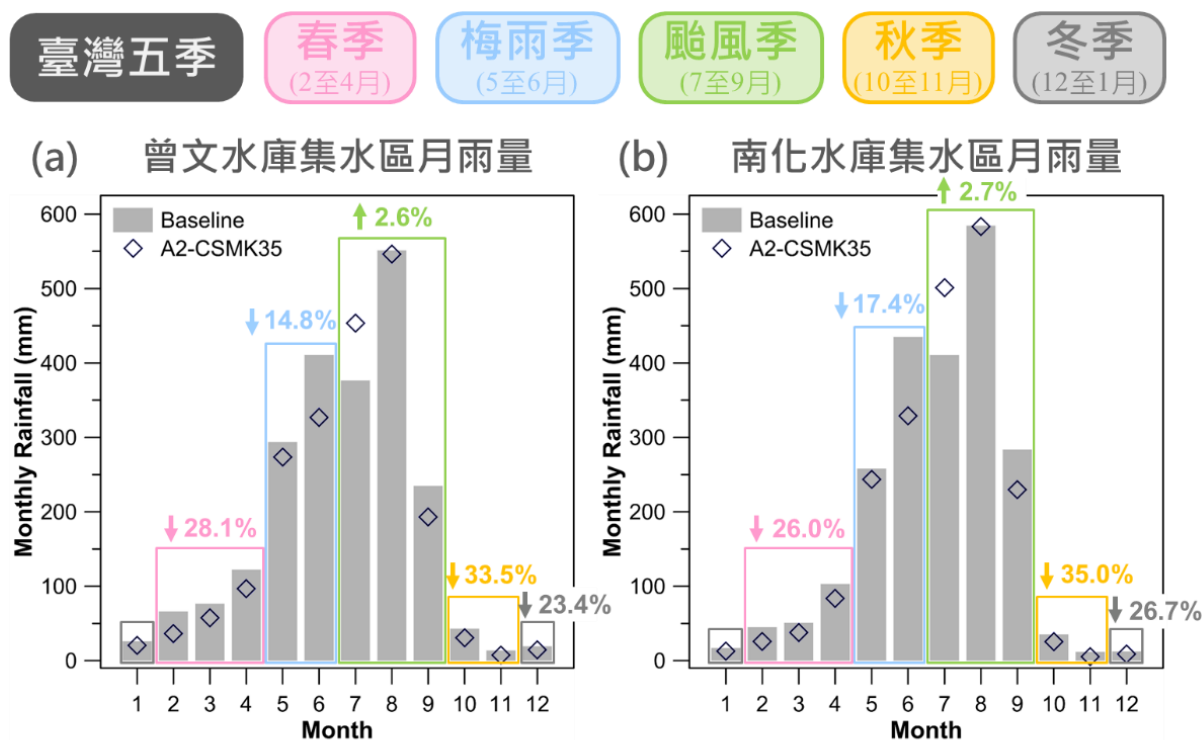
### 2.3.1 現況氣候情勢

為瞭解曾文水庫季節雨量資料是否具有趨勢及變異點，針對其水文資料挑選各季節總雨量，進行核平滑分析、趨勢檢定以及變異點檢定。核平滑分析可快速檢視資料長期變動情況，其分析結果指出：曾文水庫集水區於颱風季與冬季之雨量有增加趨勢，而其餘季節則無明顯增減趨勢，其資料趨勢大致維持水平。然而，因冬季雨量佔全年雨量比例較低，其增加趨勢對於全年雨量之貢獻有限。在趨勢檢定結果之部分，各季節總雨量為增加情況且颱風季增加最多，僅冬季總雨量在統計上呈現顯著趨勢，其趨勢為6.51 mm/10年，而其餘季節之總雨量趨勢在統計上不顯著；而在變異點檢定結果之部分，颱風季總雨量存在顯著變異點於民國92年，冬季總雨量存在顯著變異點於民國58年，其餘季節之總雨量則無顯著變異點存在。

針對南化水庫各季節總雨量核平滑分析結果指出：颱風季與冬季之雨量有增加趨勢，而其餘季節則無明顯增減趨勢，其資料趨勢大致維持水平。然而，因冬季雨量佔全年雨量比例較低，其增加趨勢對於全年雨量之貢獻有限。在趨勢檢定結果之部分，各季節總雨量為增加情況且颱風季增加最多，僅冬季總雨量在統計上呈現顯著趨勢，其趨勢為4.58 mm/10年，而其餘季節之總雨量趨勢在統計上不顯著；而在變異點檢定結果之部分，僅冬季總雨量存在顯著變異點於民國58年，其餘季節之總雨量則無顯著變異點存在。

### 2.3.2 未來氣候情勢

為瞭解氣候變遷對於計畫區域內主要集水區雨量之衝擊，本計畫針對曾文水庫與南化水庫集水區之基期與未來情境下各季節總雨量進行比較分析(圖3)。雨量衝擊分析結果顯示：在氣候變遷影響下曾文水庫集水區梅雨季與颱風季總雨量將分別減少14.8%與增加2.6%；而南化水庫集水區梅雨季與颱風季總雨量將分別減少17.4%與增加2.7%。整體而言，臺南地區主要集水區未來於春季、梅雨季、秋季以及冬季之總雨量皆有減少情況，僅颱風季之總雨量有略微增加情況，未來颱風季曾文水庫與南化水庫之情境雨量分別增加2.6%與2.7%。在氣候變遷影響下，臺南地區豐枯水期雨量將會更加懸殊。



註：集水區雨量分析成果係基於「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」產製之歷史觀測網格雨量月資料

圖3 氣候變遷情境下曾文水庫與南化水庫集水區之各季節總雨量

### 三、盤點現況與未來各標的用水供需情勢與抗旱措施

臺南地區現況(民國108年)需水量約93.0萬噸/日，而公共水源供給能力僅82.8萬噸/日，供需缺口約10.2萬噸/日，目前缺口主要係透過農業用水移用加以因應。然而，需水量於未來將持續成長，臺南地區民國120年趨勢中成長用水需求預計為112.3萬噸/日，增加水資源在調度管理上之困難與壓力，故水利署提出四大穩定供水策略與抗旱措施，以確保民國120年用水無虞，臺南地區水源供需盤點與四大定供水策略彙整如圖4所示。



圖 4 臺南地區水源供需盤點與四大穩定供水策略

#### 四、水源供需模式建置與驗證

本計畫為探討建置水源供需模式之合理性，針對臺南地區主要供水系統彙整前期計畫之供水潛能分析結果，並採用相同分析條件與規則進行水源供需模擬，以作為供水潛能分析結果驗證之依據。針對曾文-烏山頭水庫系統，前期計畫推估供水潛能約9.04億噸/年，而本計畫推估結果約為8.91億噸/年，兩者差異約1.4%；而針對南化水庫-甲仙堰、白河水庫以及玉峰堰，前期計畫與本計畫推估供水潛能之差異分別為3.8%、1.1%以及3.7%。整體而言，本計畫可合理推估臺南地區主要水源供需系統之供水潛能，與前期計畫推估供水潛能之差異約介於1.1%至3.8%之間，其差異主要係採用不同水源供需模式所造成。

#### 五、可能水文情境下水源枯旱風險評估

##### 5.1 水文情境研擬

因臺南降雨集中發生於梅雨季與颱風季，故本計畫主要針對兩季研擬偏少、無雨、延遲以及正常之情境，針對水文情境研擬流程與水文情境之定義介紹如下：

##### 5.1.1 水文情境研擬流程

本計畫提出可能水文情境研擬流程(圖5)，其主要包含四大步驟，分別為：(1)雨量時間序列資料整理、(2)推求累積分布函數、(3)定義水文情境以及(4)決定情境特徵線。

##### 5.1.2 水文情境之定義

本計畫基於「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」產製之歷史觀測網格雨量月

資料，針對臺南主要集水區挑選對應之網格資料，推求梅雨與颱風雨之累積分布函數，再基於累積分布函數定義出梅雨與颱風雨之偏少、無雨、延遲以及正常等情境，以決定梅雨與颱風雨情境特徵線。其中，水文情境定義簡單說明如下：(1)偏少情境：降雨總量累分布函數之值小於30%、(2)無雨情境：降雨總量累分布函數之值小於10%、(3)延遲情境：首月降雨總量累分布函數之值小於30%以及(4)正常情境：排除上述3種情境之資料。

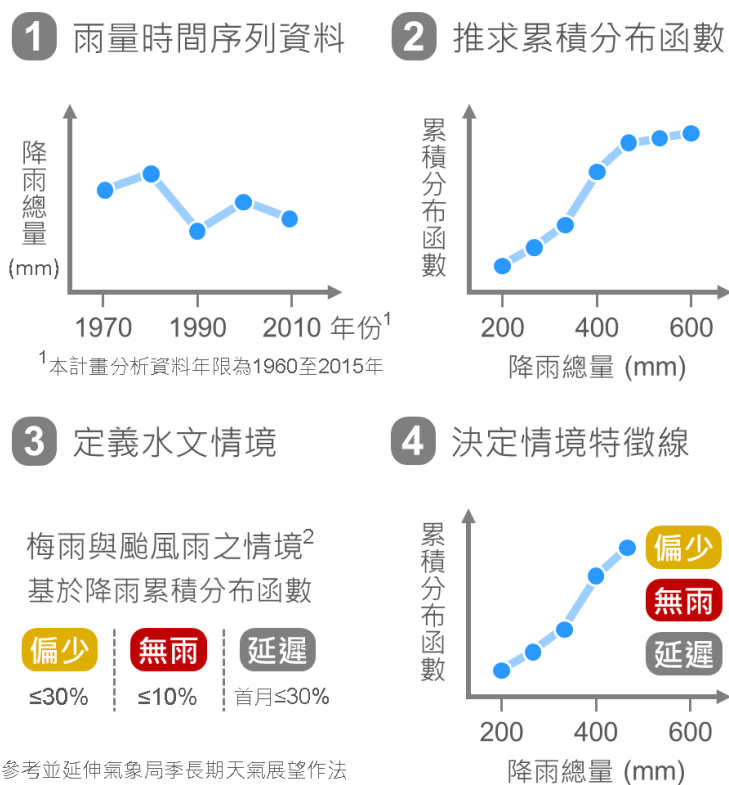


圖 5 可能水文情境研擬流程

### 5.1.3 氣候變遷對情境特徵線之影響

為評估氣候變遷對水源供需可能帶來之負面影響，本計畫參考「氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估(2/2)」(經濟部水利署，民國106年)選擇臺南地區水源供需之最劣情境A2-CSMK35進行衝擊分析，藉由比對基期與未來水文情境特徵線之差異，瞭解氣候變遷對臺南地區主要降雨來源之可能影響。基期與未來之情境特徵線比對結果顯示：在A2-CSMK35最劣情境下，梅雨偏少、無雨、延遲以及正常情況之降雨總量平均值皆有減少，其又以延遲情況之減少幅度最大；而颱風雨偏少、無雨、延遲以及正常情況之降雨總量平均值則有增有減，偏少與無雨情況呈現略為減少，而延遲與正常情況則有較顯著增加。整體而言，在氣候變遷影響下臺南地區主要集水區之梅雨有減少情形，而颱風雨降雨總量之變異則有擴大情形(低愈低、高愈高)，導致其豐水期雨量可能更加集中發生。

### 5.1.4 氣候變遷對情境發生機率之影響

為瞭解氣候變遷對於梅雨與颱風雨偏少、無雨、延遲以及正常情況發生機率之影響，本計畫以A2-CSMK35情境為例，進行氣候變遷情境下情境發生機率分析並與基期



情況進行比較。基期與未來水文情境之發生機率比對結果顯示：在水文情境邊際機率之部分，梅雨偏少與無雨之發生機率皆有增加情形，而梅雨延遲與正常之發生機率則皆有減少情形；颱風雨偏少與無雨之發生機率則皆有減少情形，而颱風雨延遲與正常之發生機率則分別為持平與增加情形。在水文情境聯合機率之部分，梅雨偏少或無雨水文情境組合之聯合機率有增加情形，而梅雨延遲或正常水文情境組合之聯合機率有減少情形，造成臺南主要集水區未來降雨量可能將更常集中發生。

## 5.2 水源枯旱風險分析

本計畫基於上述可能水文情境(梅雨與颱風雨之偏少、無雨、延遲以及正常)進行民國120年之水源供需模擬，並探討四大穩定供水策略無法順利推動或無法上場時對應之公共用水缺水情況，以作為調適策略效益評估之依據。效益評估主要精神係藉由分析不同調適策略無法順利推動或無法上場之缺水率增加情況，以瞭解其效益高低，即調適策略之效益愈高，若其無法上場對應之缺水率增加情況亦愈高。本計畫依據四大穩定供水策略盤點結果，設定8種不同調適策略組合(表1)進行對應之水源供需分析，再藉由比較不同調適策略組合之期望缺水率，探討調適策略之效益高低，高效益調適策略若無法上場，其對應之缺水率增加情況亦愈高。以調適策略全部上場之組合(S1)而言，因其水源相對充沛，對應之期望缺水率僅約為7.9%。本計畫以S1組合為基準，比較其餘調適策略組合之期望缺水率增加情況，分析結果指出：期望缺水率增加最多之組合為S2與S8，其次為S3與S4，而增加最少之組合則為S5、S6以及S7。整體而言，調適策略效益評估結果指出：臺南高雄水源聯合運用(S2)與山上淨水場改善工程(S8)於減緩缺水上有較高之效益，而效益次高之策略則為永康安平再生水(S3)與白河水庫後續更新改善(S4)，以上調適策略若能順利推動，每個策略皆可減緩公共用水缺水率約2.1%至3.0%。

表 1 臺南地區之水資源調適策略組合

調適策略	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
臺南高雄水源聯合運用		X						
永康安平再生水			X					
白河水庫後續更新改善				X				
降低漏水率計畫					X			
加強農業用水效率						X		
曾文淨水場二期工程							X	
山上淨水場改善工程								X

註：X 表示該項調適策略無法順利推動或無法順利上場。

## 六、可能水文情境下水源枯旱風險經濟分析

本計畫分析可能水文情境下水源枯旱對各部門造成之經濟影響，並計算其對於臺灣總產出損失與GDP影響效果。其中，針對總產出效果與總GDP<sup>2</sup>效果占全國比率，係分別以民國106年國民所得統計之全國生產總額37兆5,218.25億元與生產毛額17兆5,488.14億元計算。經濟分析結果顯示：在可能水文情境下，水源枯旱對於臺灣總產出減少約18.51

<sup>2</sup>GDP 效果採廣義定義，包括：勞動報酬、經營盈餘、資本消耗、間接稅淨額。

至90.08百億元，GDP減少5.19至25.58百億元。在臺南缺水情況下，農業損失為1.40至11.03百億元，工業部門損失為6.94至32.00百億元，而服務業部門損失5.61至25.87百億元。以對於其他地區影響來看，受到臺南缺水影響北部農業產值約減少0.55至2.58百億元，而中部農業產值約減少0.93至4.36百億元；以工業部門損失來看，臺南缺水將誘發北部工業損失0.49至2.26百億元與中部地區工業產值減少0.58至2.69百億元。

## 七、結論與建議

### 7.1 結論

- (1) 本計畫主要目的為評估可能水文情境下水源枯旱風險與經濟影響，並藉由綜合考慮公共用水缺水率與可能水文情境之發生機率推估期望缺水率，提供決策者不同調適策略下合理且客觀之量化風險值，以作為後續水資源政策推動參考。
- (2) 以可能水文情境之降雨總量而言，在A2-CSMK35最劣情境下，梅雨偏少、無雨、延遲以及正常情況之平均值皆有減少，其又以延遲情況之減少幅度最大；而颱風雨偏少與無雨情況呈現略為減少，延遲與正常情況則有較顯著增加。
- (3) 以可能水文情境之發生機率而言，在A2-CSMK35最劣情境下，梅雨偏少與無雨之發生機率有增加情形，而梅雨延遲與正常之發生機率則有減少情形；颱風雨偏少與無雨之發生機率有減少情形，而颱風雨延遲與正常之發生機率則分別為持平與增加情形。
- (4) 本計畫藉由分析不同調適策略無法順利推動或無法上場之期望缺水率增加情況，以進行調適策略之效益評估，評估結果指出：臺南高雄水源聯合運用(S2)與山上淨水場改善工程(S8)於減緩缺水上有較高之效益，而效益次高之策略則為永康安平再生水(S3)與白河水庫後續更新改善(S4)，以上調適策略若能順利推動，每個策略皆可減緩公共用水缺水率約2.1%至3.0%。
- (5) 在可能水文情境下，水源枯旱對於臺灣總產出減少約18.51至90.08百億元，GDP減少5.19至25.58百億元。在臺南缺水情況下，農業損失為1.40至11.03百億元，工業部門損失為6.94至32.00百億元，而服務業部門損失5.61至25.87百億元。

### 7.2 建議

- (1) 基於可能水文情境資料，本計畫得以探討梅雨與颱風雨之偏少、無雨以及延遲等惡劣水文條件下水資源系統供水情況，建議未來於水資源規劃管理或檢討時，亦可以將惡劣水文條件納入考慮，以評估嚴重枯旱對於水資源系統之影響。
- (2) 因氣候變遷情境資料具有高度不確定性，建議未來於決策分析時應納入不同氣候變遷情境資料，以探討情境不確定性對於決策結果之影響。
- (3) 本計畫研提16種可能之水文情境組合，並針對各種組合進行對應之水源枯旱風險分析，再藉由綜合考慮水文情境組合之發生機率與水源枯旱風險計算缺水率或經濟影響之期望值。惟16種可能之水文情境組合內，部分組合屬於極端惡劣之水文情境，其將導致非常嚴重之缺水情況(但發生機率微小)，建議未來於水文情境組合上可以排除過於極端惡劣之水文情境，例如：梅雨無雨且颱風無雨之水文情境。

## 參考文獻

1. 陳昭銘，民國97年，臺灣之自然季節，水利土木科技資訊季刊，42期。
2. 經濟部，民國102年，降低漏水率計畫。
3. 經濟部，民國107年，產業穩定供水策略行動方案。
4. 經濟部，民國107年，臺南山上淨水場供水系統改善工程計畫。
5. 經濟部水利署，民國106年，氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估(2/2)。
6. 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)。