

建立綜合考量氣候與能源之水資源規劃方法研究

The Study of Water Resource Planning Considering Climate and Energy

主管單位：經濟部水利署水利規劃試驗所

胡明哲¹ 童慶斌¹ 馬鴻文² 劉子明¹ 林嘉佑¹

Hu, Ming-Che¹ Tung, Ching-Pin¹ Ma, Hung-Wen¹ Liu, Tzu-Ming² Lin, Chia-Yu²

¹國立臺灣大學生物環境系統工程學系

²國立臺灣大學環境工程學研究所

摘要

水資源對於氣候變遷極為敏感，稍有缺水或乾旱事件發生，可能會造成水資源之供需失衡。能源與水資源和氣候之間的關係亦錯綜複雜，水資源在過程中會使用到電力、燃料、熱能或藥品，而相關設施及管路製造與建設過程也消耗諸多能資源。另一方面，水資源也間接參與能源的生產過程，如水庫之水力發電。

當水資源供需無法平衡時，便需要水資源調適方案來彌補差異，如何分析加入調適方案前後的能耗差異、評估調適方案的優先次序乃是本研究的主要目標；制定方案的同時，能夠考量更多不同領域的層面，使方案在制訂時不至於顧此失彼，亦為研究重點之一。

關鍵詞：水資源、太陽能值、能值分析、能耗評估

Abstract

Water resources is very sensitive to climate change, drought or lack of precipitation may cause an imbalance between supply and demand of water resources. The relationship among energy, water resources, and climate is quite intricate. It consumes electricity, fuel, heat or medicine to supply and purify water, and hydraulic construction process also consumes energy and resources. On the other hand, water could also be indirectly involved in energy production processes, such as hydroelectric reservoirs.

When it is unable to balance water demand and supply, water adaptive programs are emerged. The main idea of this project is to analyze the energy consumption of adding new adaptive programs to water resources, and to prioritize these programs. It helps the decision maker consider more aspects of different field when developing the programs.

Keywords : water resources, solar energy, energy analysis, energy consumption.

一、文獻回顧

水資源、氣候、能源三者間密不可分，氣候變遷對於流量的衝擊以及造成用水量的改變，需要調適方案來彌補水資源供需間的差異(氣候影響水資源)，當調適方案涉及水資源設施元件的新建、修復、復建時，勢必會投入更多能資源於其中，造成比現有水資源供水系統更多的能耗(水資源影響能耗)，能耗增加代表可能提高溫室氣體排放，進而惡化氣候變遷(能耗影響氣候)，形成回饋效應。如何評估水資源調適措施能耗乃本研究之主要目的。

本研究針對德國、西班牙、土耳其、印度、印尼、墨西哥、香港等地區，因應氣候變遷和社經條件所進行之水資源調適策略進行探討，各國調適策略均考量能源的消耗，其中以德國為首，在水資源調適策略中，制定嚴格的法規，將供配水程序的能源消耗列入考量，以維護整體生態環境之永續性；而與臺灣距離較近的香港近年也開始省思供水過程所耗用的龐大電能，並注意到氣候變遷因素所導致的缺水問題。

美國對於水資源能耗所做的研究最多且最廣，其次是日本，而其他如歐洲地區、挪威、澳洲、紐西蘭等也有許多相關研究，顯示出各國對於水資源供給過程中之能源消耗議題均十分重視。其中，美國能源部統計全美國各地區之發電量，顯示平均約有 4% 是耗用在水資源的供給與處理上；而其電力研究院也推估至 2050 年之全美各地區在水處理上所耗用之能源，預計在 2050 年時，全美公共用水之處理耗能將成長為 460 億 kWh，此類針對國家地區所做之水資源供給處理過程的能源耗用之相關統計估算，均值得台灣相關單位部門做參考。

綜合分析歸納日本、香港、印尼、印度、德國、美國如何將能耗納入決策規劃之目標與準則，日本及美國的主要目標均為確保在達成水資源供需平衡之目標下，達成最小之能源消耗；德國的目標則是為兼顧環境及水資源之永續發展。印尼及印度則是為解決因應人口問題所造成之龐大水源與能源需求；而香港則是將目標放在氣候變遷所造成之可能缺水情況，並且減少其龐大的能源消耗。

二、多元化水資源耗能評估系統

2.1 能值分析法計算方式與應用

本研究提出以太陽能值作為評估能源消耗之單位，並介紹能值分析法，藉由能換率 (Transformity) 將不同能量轉換呈相同基準的太陽能值，單位為太陽能焦耳 (sej)，其計算公式如以下說明：

$$\text{Solar energy(SE)} = \text{Energy} \times \text{Transformity} \quad (1)$$

其中 Solar Energy 為各類能量經由能換率轉換後之太陽能值，單位為 solar emjoules(sej)；Energy 為各類能源，Transformity 為各類能量與太陽能值之間的轉換率關係，位在系統階層越高之組成分或作用，其具備的能換率也越高。進一步將式(1)分成直接能耗(式 2)與間接能耗(式 3)部份，分別計算用電量及其它能資源所代表的太陽能值。

$$\text{SE(direct, d)} = \text{Electricity} \times (3.606 \times 10^6) \times 159,000 \quad (2)$$

$$\text{SE(indirect, ind)} = \text{Other resources} \times \text{Transformity} \quad (3)$$

式(2)中 Electricity 為電力使用量(度)； 3.606×10^6 為度轉換成焦耳之比值；159,000 為電力使用之太陽能轉換率(sej/J)。式(3)中 Other resources 為不包括電力之其它能資源；Transformity 為各類能量與太陽能值之間之轉換率關係。為考量將成本價格換算成太陽能值，本研究參考水利署及國科會相關報告所提出之能源貨幣概念，推估出民國 101 年至民國 120 年單位貨幣的平均太陽能轉換率為 1.45×10^{10} (sej/NTD)。

以上為能值分析法之計算方式，接著將其應用於水資源供配水設施的能值推求，本研究將能源消耗分為直接能耗與間接能耗，直接能耗來自於用電量，間接能耗則是其他能資源之消耗，通常以成本計算。其納入能耗估算之項目如表 1 所示，現有設施與新開發設施之能耗計算項目之差異則列如表 2 所示。

表 1 現有設施與新開發設施之能值計算內容

設施類別		現有設施	新開發設施
能耗項目	工程興建	已為過去式，故不考量此部份能耗	根據該設施之相關規劃報告中之預估資料，以其成本價格推估能耗。
	營運管理維護	可根據該設施過去相關歷史資料推估能耗。	根據該設施之相關規劃報告中之預估資料推估能耗；或參考類似性質設施之過去歷史資料。

(資料來源：本研究自行整理)

表 2 供配水設施能值計算所需之資料項目

設施類別	直接能耗	間接能耗	
		興建工程	操作營運、管理維護、更新改善
水庫、攔河堰、人工湖	1.運水、輸水用電量 例如：閘門操作用電、加壓站運轉用電、抽水機運轉用電等 2.水處理用電量 例如：海水淡化過程、廢污水處理過程、淨水過程	1.直接工程費 例如：各類主體工程、輸水管線工程、雜項工程、施工安全衛生、環保措施等。 2.間接工程費 例如：各項工程監造、環境監測、空氣污染防治、初期運轉等	1.操作營運費 例如：辦公室營運、水文監測系統設、警報系統設、水質檢驗、污泥處理等；海水淡化、廢污水處理及淨水場則包含各種藥品與薄膜之置換。 2.管理維護費 例如：土木機械及電器設備之維護、管線維護 3.更新改善費 例如：各項設施元件之更新汰換、管線更新汰換
地下水、伏流水			
海水淡化			
廢水利用			
雨水貯集			
淨水場			
配水管網	運水、輸水用電量， 例如：抽水機運轉用電、加壓站運轉用電、閘門運作用電等		

(資料來源：本研究自行整理)

2.2 新興水資源設施能耗分析

在計算各種新興水資源設施的能耗部份，本研究採用能值分析法，利用相關研究或歷史報告中之數據資料，計算出配水管網以及各新興水資源設施在供水過程中所消耗之太陽能值，並將其成果整理為表 3，表中針對不同設施提供單位出水能值耗用之建議設定值，以作為多元供配水設施能值計算之參考依據。

2.3 建立多元水資源能耗評估系統

本研究對水資源系統之供配水能耗分析流程建構，採用「水資源設施（點）→輸水路徑（線）→水資源系統（面）」的漸進方式逐步分析。圖 1 為本研究水資源系統能耗分析架構之示意圖。

完成水資源系統之各設施分類，並且計算單位水資源經過各設施所消耗太陽能值後，可藉由水資源系統動力模擬之結果確認水資源在系統中的流動方向與其經過的設施，依序計算水資源經過設施時所消耗的總太陽能值，並依照水流動路徑往下累加；遇到水流分向時，則依據各水流的水量照比例將總太陽能值分開計算；而當遇到水流匯合時，則加總各水流至此所消耗之個別總太陽能值，並繼續往下計算累加，直到累加至最終的水資源設施時，便可得知該路徑在提供水資源時所耗用之總太陽能值，完成整體水資源系統之能耗評估。

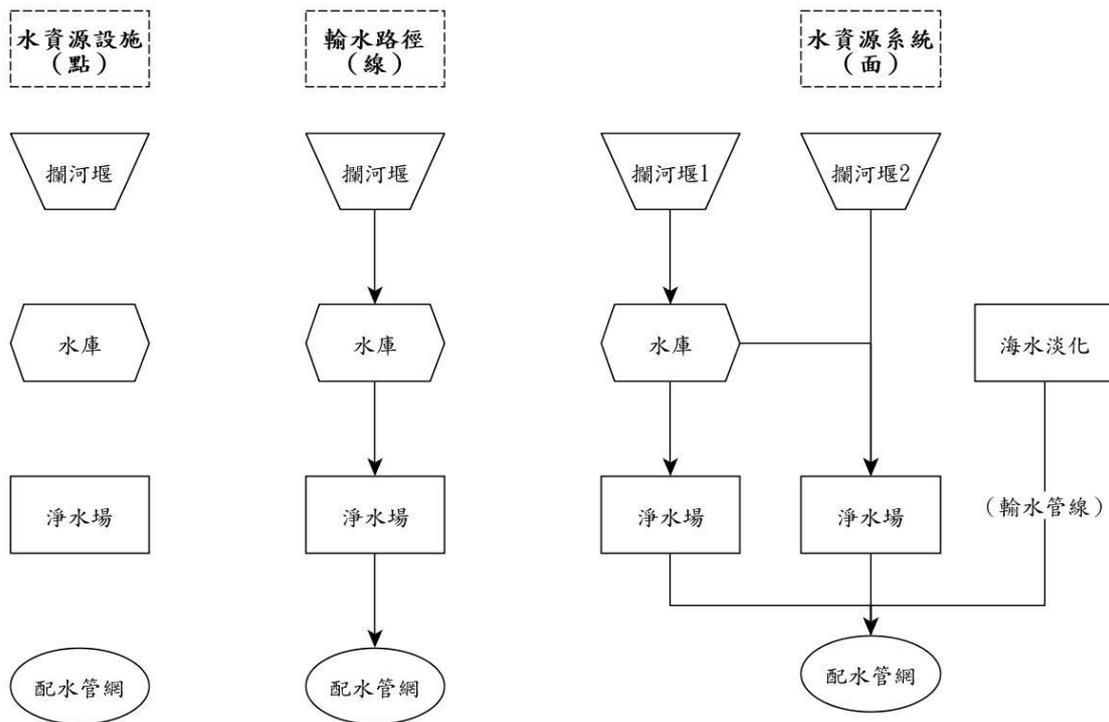


圖 1 水資源系統能耗分析架構之示意圖

2.4 水資源調適之能源、氣候與水資源回饋關係

為了增加供水量的水資源調適方案，同時亦可能間接降低系統供水能力，為了降低水資源調適之能耗↔氣候↔能源之負回饋，則必須於此回饋關係中，增加正向回饋因子，如水力發電以及能耗管理等，如此方能使水資源調適方案於氣候變遷考量下更趨完整。如圖 2 所示。

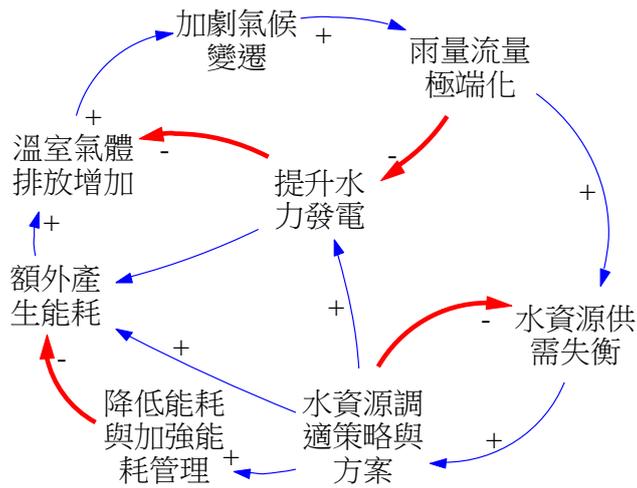


圖 2 水資源、氣候及能耗回饋關係圖

三、強化水資源調適方案之評估工具

3.1 發展能源考量納入水資源調適方案之評估方法

為將能耗分析結果結合其他準則，評估方案之優劣特性，以進行方案之排序，本研究擬採用多準則排序評估法進行評估。

將多元化供水之各擬定方案，透過氣候變遷水資源模擬與能耗分析，探討各方案於氣候變遷影響下之效用以及能耗。以效用、能耗、無悔性、急迫性及可行性總共五項準則透過「多準則排序評估法」進行水資源調適方案之評估與方案優選，以決定方案之優先順序。

3.2 強化發展能源考量納入水資源調適方案之評估工具

本研究發展出結合能耗分析與供配水系統之整合性水資源規劃模擬模式，對既有之整合性水資源規劃模擬模式進行強化。包含以系統動力模式發展軟體 Vensim 建構供水系統動力模式，以此為基礎將能耗分析模組納入，並將原有的水資源系統動力模式設定三個模組，分別為：供配水系統動力模組、供配水規則模組以及能源分析模組，以 TaiWAP 為原型發展考量氣候與能源之區域水資源評估模式「EnWater」，並增加多準則排序評估工具於「EnWater」之中。

四、多元供水系統案例分析

4.1 挑選現有方案進行多元供水系統之能耗評估

以台南地區做分析案例，模擬三個調適方案，方案一為加入台南海水淡化廠，方案二為加入台南安平污水再生利用廠、方案三為加入台南社區雨水貯集設施，並針對台南地區現況、民國 120 年氣候變遷影響前後、加入調適方案後之水資源系統進行供需水評估。接著分析加入各水資源調適方案後，整體水資源系統能耗的改變，以及各調適方案對於民國 120 年供需缺口之填補效用，結果如圖 3、圖 4 所示，結果顯示三個調適方案之供水能力恰好能夠補足民國 120 年之供需缺口。此外，本研究也另行分析曾文水庫之發電所產生之能值，並對照整個台南供水系統的總能耗，其結果如圖 5。

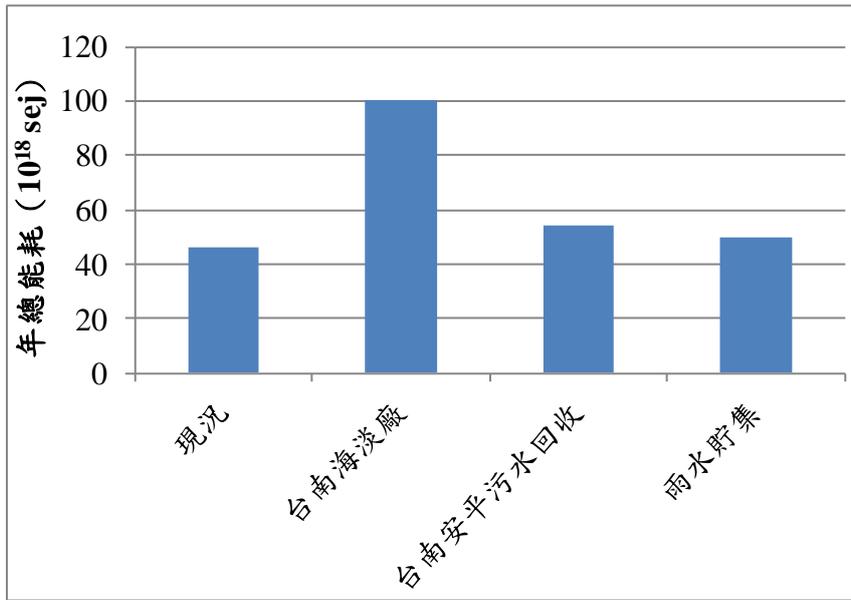


圖 3 加入各調適方案後之年供水總能值

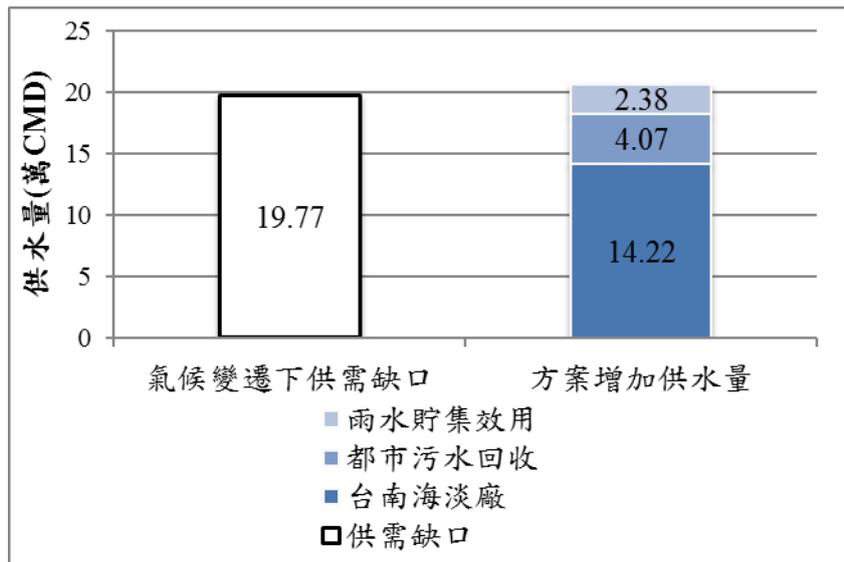


圖 4 各調適方案所帶來之供水效益

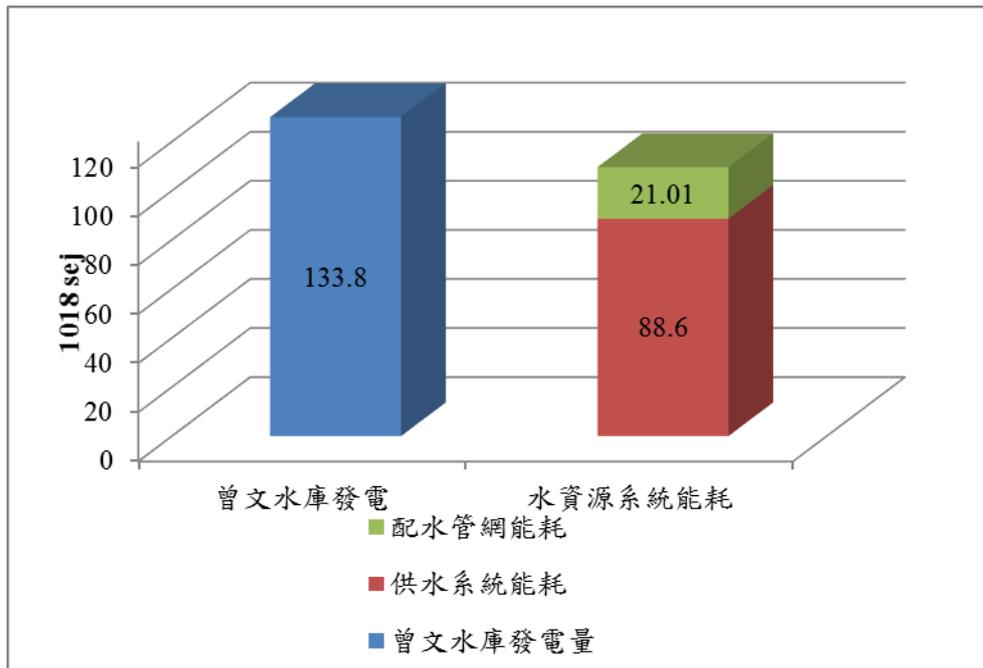


圖 5 水力發電產生能值與供水系統能耗

4.2 利用分析結果，提出改進方向

利用多準則排序評估法，以效用、無悔性、急迫性、能耗以及可行性多準則進行分析與評估，所得到結果如表 3 所示，以本研究之評估方法而言，方案優先順序為台南安平污水回收>雨水貯集>台南海淡廠，與單以效用考量之排序有所差異。然而，使用多準則排序評估法為多方面且較客觀之評估結果，除了增加能耗為考量準則之一，同時可依區域之規劃特性與需求，多方考量其他準則，以提高方案優選之客觀性。

表 3 各調適方案之多準則綜合評估表

調適方案	效用	無悔性	急迫性	能耗	可行性	總分
台南海淡廠	2	0	0	0	2	4
台南安平污水回收	1	2	1	1	1	6
雨水貯集	0	1	2	2	0	5

四、水資源調適策略與其他議題間相互影響

5.1 蒐集相關議題，如生態環境、糧食安全、公共衛生以及環境災害等

為使制定方案的同時，能夠同時考量與其他影響領域之交互關係，以供後續規劃方向參考，本研究分別針對「水資源與糧食安全」、「環境災害與水資源」、「水資源與公共衛生」、「水資源與生態環境」蒐集整理關鍵議題。

5.1.1 水資源與糧食安全

- 氣候變遷下水資源對於農業用水調配之困難，加上我國糧食自給率不足之影

響，將提高糧食短缺之風險。

- 水資源減少對內陸漁業與水產養殖造成的缺水現象（例如湖泊的消失、降雨量減少、水氣蒸發量大等問題），這些現象對糧食安全造成之衝擊
- 山坡地農作物，在水土保持不良的條件下，可能導致坡地災害之水土流失，造成水庫庫容減少，影響水資源系統。

5.1.2 環境災害與水資源

- 颱風、暴雨等極端氣候造成土石沖刷、河川污染，會造成水利設施受到損耗（如：如泥沙淤積、污染物、縮短水庫壽命等）
- 極端降雨造成原水濁度過高而無法取水，造成供水困難與缺水。
- 水庫興建將減少河川排砂量，使得河口海岸線倒退，容易引起洪災並使國土流失
- 超抽地下水導致海水倒灌地層下陷

5.1.3 水資源與公共衛生

- 淨水設施老舊導致水質變差，影響民眾用水安全
- 缺水時期，供水管線因為減壓措施，使得汙染物因為負壓關係由管線漏水處進入自來水，進而影響用水衛生。
- 旱季缺水使用替代性水源影響健康

5.1.4 水資源與生態環境

- 各項水利設施之開發工程對於淡水生態系、河口生態系、海洋生態系等造成之影響，包括：棲地多樣性減少、生物種類減少、許多水中生物滅絕等問題
- 缺水時期實施農業休耕之調配管理措施，可以降低公共需水之龐大需水壓力，惟原本水田與圳路生態系統將因為缺水而面臨浩劫

5.2 探討水資源調適策略與其他議題間之相互影響

實際採取水資源調適方案、策略與決策時，無法避免面臨到與其他領域及議題間的權衡問題，因此，在制定決策時，政府部門需要整合式之脆弱度評估工具，國科會推動之「氣候變遷調適科技整合研究計畫」，以各子系統內之相同元素為連結點，連結到其他領域之子系統，最後形成「跨領域回饋分析系統動力模式」。其評估工具之建構流程、各構成單元以及計畫推動流程說明如下：

5.2.1 利用 DSR 架構建立各領域子系統之心智圖

DSR 架構綜合驅動力、狀態、回應的交互關係，有助於釐清子系統內各因子之因果關係，可使子系統不至於遺漏某重要因子，確保子系統的完整性與可解釋性，然後以心智圖繪圖軟體根據 DSR 架構繪製各領域的心智圖，如圖 6。

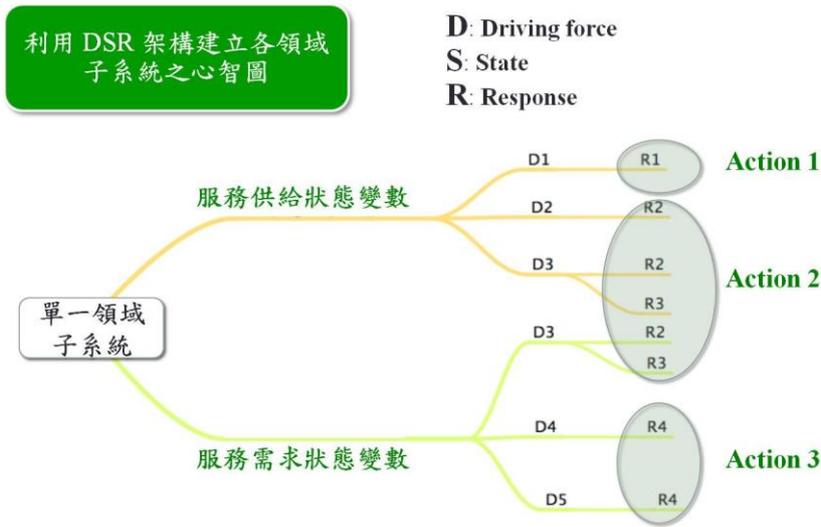


圖 6 各領域子系統心智圖建構原理
(資料來源：童慶斌等人，民國 101 年)

5.2.2 根據心智圖建立各領域子系統之系統動力模式

使用系統動力模式可解決複雜系統 (Complex System) 產生之問題。經由各領域專家研判或學術研究文獻支持，子系統所含因子間之正向或負向因果關係在此一併標示，有助於瞭解其間之定性關係。可藉以瞭解水資源供水系統「因子間因果關係」之「回饋分析」。

5.2.3 以相同因子連結各領域子系統

連結各領域子系統之最簡單方式為連接其相同因子。後續並透過分析改善與強化連結關係。

5.2.4 利用關係矩陣確認不同子系統因子間之因果關係

各領域子系統所含之不同因子雖不能直接當作連接點，其間仍有可能存在因果關係可使子系統產生連結，例如：透過各領域專家填寫關係矩陣判定各領域子系統不同因子之因果關係。

5.2.5 利用樹狀圖做分析

利用 Vensim 軟體本身提供因果關係分析工具 (Uses Tree and Causes Tree) 來分析跨領域之關係。此外，藉由「使用樹狀圖 (Uses Tree)」與「因子樹狀圖 (Causes Tree)」之綜合分析可進一步鑑別該回饋影響路徑。

六、結論與建議

本研究以「能值分析法」做為從水資源單一設施、輸水管線到水資源系統能源消耗之推估方法，其優勢在於可將能源消耗分成直接能耗與間接能耗兩部份，以將水資源系統之電力消耗以及其他能資源耗用整合為一體，並可作為評估水資源調適方案的準則依據之一。蒐集各類設施之相關可行性規劃報告以及實際歷史營運資料，整理出能值耗用總表，可作為未來相關人員在規劃方案時之考量依據。

水資源調適方案之評估，以多準則排序評估法為基礎，並結合水資源供水系統動力

模式以及單位供水能耗分析，發展出整合性的水資源規劃模擬模式工具—「考量氣候與能源之區域水資源評估模式 (EnWater)」，為功能性健全之水資源調適方案評估工具。

以台南水資源系統為例，分析加入台南海水淡化廠、台南安平污水再生利用、台南社區雨水貯集設施等三個調適方案後，對整體水資源系統能耗的影響，結果顯示各方案在 SI=1 時，海水淡化廠由於之供水量最大且穩定，並且單位供水所耗能值也較高，因此，對於整個系統所增的年總能耗最高，約增加了 35%，而台南安污水處理廠與社區雨水貯集設施則分別對台南水資源系統之年總能耗增加約 5% 與 2%。

配水設施之加壓設備的直接能耗目前僅能從國際相關研究來推估，若需推求精準的配水設施的直接能耗，應有更進一步的研究，建議相關單位可將取水、送水到水處理過程中之能耗列為監測記錄項目，以作為相關單位評估設施耗及水利規劃之參考。

本研究使用多準則排序評估法對水資源調適方案所做出來的排序結果，與僅以「效用」準則所做出來的結果不同，為使一般民眾能夠認同多準則排序評估法，本計畫有下列建議：1. 政府相關單位可依據政策目標與社會環境狀況，訂定所需要的評估準則；2. 提昇民眾對於多準則的認知，建議可進行教育宣導；3. 建立多準則的權重決定方式，以使多準則排序評估法所做出來排序成果更具有參考價值。

七、參考文獻

1. 童慶斌、林幸助、詹士樑、余化龍，民國 101 年，「氣候變遷調適科技整合研究計畫-跨領域脆弱度評估與回復能力建構計畫」，行政院國家科學委員會專題研究計畫，計畫編號：NSC 100-2621-M-002-036。
2. 童慶斌，劉子明，李明旭，洪念民，宋睿唐，林嘉佑，曹榮軒，民國 102 年，「氣候變遷下區域水資源供水承载力整合評估之研究」。台灣水利，61(3),1-13。水利署：MOEAWRA0990327。
3. 黃書禮，民國 80 年，「整合生態與經濟-應用能值分析於公共政策評估」，中興大學都市計畫研究所。