

氣候變遷影響下中部地區最適水資源供給組合之研究

黃彥禎¹、李堅明²、張廣智³、阮香蘭⁴、鄭欽韓⁵

壹、摘要

建構具氣候韌性的水資源供給組合，已成為政府因應氣候變遷之水資源安全的最優先調適策略。本研究依據中部門地區（包括苗栗、台中、南投及雲彰等四區）水文條件，考量氣候變遷情境，評估豐、枯水年之最適資源供給組合。研究方法上，本研究以最適控制理論（Optimal Control Theory），考量產水成本、間歇性成本、減碳成本、氣候變遷影響下各種水資源可供給量等因素，建立一個成本有效性（cost effectiveness）理論模型，評估長期（2031 年）最適供水技術組合。本研究主要為最適供給組合方法論之探討，因台中地區具有較多元的水源可呈現出較多不同供給配比，故本研究以台中為案例來探討與分析方法論之研究。結果顯示，台中地區在民國 110 年原水投入成本以增供地下水為最低，碳排放量則以提升農業用水效率為最低，而在民國 115 年及 120 年原水投入成本和碳排放量皆以提升農業用水效率為最低，各目標年結果差異表示不同的水資源供給組合具有各自的優勢（如低產水成本或碳排放量），以長期規劃的角度，本研究可計算各目標年不同水資源供給組合之成本與環境衝擊，故可做為政策評估推動之依據。

關鍵詞：氣候變遷、最適控制、中部地區水資源供給組合

貳、前言

一、研究動機與目的

為因應氣候變遷之水資源安全問題，IPCC（2014）建議全球水資源主管部門應加強調適措施，特別是投入地面水資源供給的科學預測、風險管理及衝擊評估，同時，加強涵養地下水資源，以因應未來地下水資源的抽取需求。鑑此，聯合國於 2015 年提出 2030 年永續水資源發展目標，包括：(1) 提供可負擔及安全水資源；(2) 提升水質及提高廢污水回收；(3) 提升各部門水資源使用效率；(4) 提升水資源整合管理；(5) 保育與維護水資源相關的生態系統（包括河川、湖泊、濕地、森林及地下水等）等。為此，主要推動策略包括：(1) 穩定水資源供給：例如建築水壩、海水淡化及水資源回收；(2) 重

¹象騰顧問有限公司專案經理

²聯繫作者，國立台北大學自然資源與環境管理研究所教授，新北市 23741 三峽區大學路 151 號。電話：(02)26748189-67335；傳真：(02)25039083；E-mail：cmlee@mail.ntpu.edu.tw。

³經濟部水利署綜合企劃組組長

⁴經濟部水利署綜合企劃組簡任正工程司

⁵經濟部水利署綜合企劃組科長

要水資源基礎建設：例如基礎建設投資，包括供水設施及汰舊老舊管線及降低漏水率；(3)需求面管理：例如政策改革(水價)，提高水資源使用效率；及(4)提升水資源生產力：例如提高農業與工業用水效率。可知，提高水資源供給系統韌性，以及投資基礎建設將成為全球水資源主管部門的主要施政挑戰。

Draper et al. (2003) 以最大化 2020 年水資源經濟收益為目標，提出一結合水文與經濟的模式 CALVIN (California value integrated network)，用來評估加州主要 5 個供水區域之最佳水資源配置。其中用水標的包括生活用水以及農業用水兩個部門，其經濟收益分別以缺水損失以及農業產出價值乘以部門水資源分配量，支出部分則為供水系統操作成本。Jenkins et al. (2004) 延續上述研究，將更多變數納入模型以評估加州地區的最適水資源配置，包括：彈性操作的經濟效益、設施擴建的經濟效益、民眾對於水資源的願付價格 (willingness to pay, WTP)、環保基流量的環境機會成本、水資源聯合運用與移轉的效益等。分析結果顯示，最佳化模式提供了可觀且深入的資訊供決策者參考，其中區域性的水資源移轉及交易市場，可增加供水操作彈性和降低缺水所衍生的成本，在枯水期透過聯合運用的方式，可同時獲得經濟及操作上的效益。

在臺灣水資源的衝擊部分，根據鄭兆尊等人 (2017) 之研究推估，21 世紀末影響臺灣的颱風個數，於不同海溫設定下同樣皆有減少的趨勢，颱風所帶來的降雨是非常重要的水源來源，故氣候變遷可能會帶來未來水資源缺乏的衝擊。另根據許晃雄與陳英婷 (2017) 之研究，21 世紀末鋒面頻率變化：冬季，臺灣鋒面有略微減少的趨勢，日本與臺灣東側海面鋒面增加；春季，臺灣與中國華南鋒面減少。鋒面活躍度的降低，亦可能減少臺灣未來水資源來源；鋒面活躍度的增加，則會增加梅雨季的降水，也提高了氣候變遷調適策略的困難度。

台灣雖有豐沛降雨，惟蓄存能力不足，加上氣候變遷影響，極端旱澇發生頻率增加，使得水資源之供給面臨嚴峻的挑戰。惟以往研究多著重於工程技術，甚少甚少將水資源價值、環境成本、社會偏好等一併納入分析，更無法估算水資源真實價值 (或缺水所帶來的損失)。中部地區目前面臨用水環境需強化、用水效率待提升等，如雲彰地區各標的用水過度依賴地下水，使地層下陷嚴重。因此，除既有主要水源設施外，尚有多項施工中與規劃中之水源設施，如大安大甲聯合運用計畫、鳥嘴潭人工湖及再生水等。惟若要確保各項水源設施可妥適推動，除目前的供給/需求等技術面考量外，亦應將水資源價值、環境影響及社會認同等因子整合納入評估，規劃中部地區中長期具氣候韌性 (climate resilience) 水資源最適供給組合 (Portfolio)，以提升政策的社會接受度與可行性。

因應氣候變遷，政府已制定 2031 年 (民國 120 年) 水資源供給 200 億噸上限的政策目標，易言之，已確立「以供定需」的水資源規劃與管理政策方向。據此，本研究將依據聯合國永續水資源供給原則，包括：(1)可靠性 (reliability)：水資源供給系統穩定性；(2)經濟可行性 (economic feasibility)：商業化供水技術，供水成本穩定；(3)可負擔性 (affordability)：民眾可支配所得的負擔；(4)環境友善性 (environmental friendly)：低污水與低碳排放；(5)社會可接受 (social acceptable)：生態多樣性保育 (提供環保基流量) 等五項水資源供給原則，應用動態最適控制理論 (optimal control theory)，評估最適水資源供給型態組合 (portfolio) 的影響因子，再以台中地區為案例，規劃台中地區個目標年最適水資源供給組合，提供政府施政參考。

參、最適水資源供給組合模型

一、最適控制理論簡介

最適控制模型最早是用於自然科學領域，由俄國數學家 Pontryagin 在 1960 年提出的最適控制理論，主要是用來探討經濟個體如何將資源分配在一段時間內的各個時間點，以達成資源效率配置。

最適控制通常是以數學最佳化步驟達成，首先，控制程序需具有精確的數學模式，而且必須定義特定的價值函數，再對此價值函數要求最小或最大而達系統之最佳化。一個典型最適控制問題如下：

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & V = \int_0^T F(t, y, u) dt \\ \text{s.t.} \quad & \dot{y} = f(t, y, u) \\ & y(0) = A, \quad y(T) \text{ free} \end{aligned}$$

其中， V 為目標（或價值）函數； u 為控制變數（Control variable）； y 為狀態變數（State variable）。求解方式是透過最大化原理（The maximum principle），先求解控制變數的最適路徑，進而可以獲得狀態變數的最適路徑。

二、模型建置基本原則

因應氣候變遷，政府已制定 2031 年（民國 120 年）水資源供給上限的政策目標，易言之，已確立「以供定需」的水資源規劃與管理政策方向，故本研究參考黃彥禎與李堅明（2017）之研究，以下列五項原則建置最適控制模型：

1. 可靠性（reliability）：水資源供給系統穩定性。
2. 經濟可行性（economic feasibility）：商業化供水技術，供水成本穩定。
3. 可負擔性（affordability）：民眾可支配所得的負擔。
4. 環境友善性（environmental friendly）：對於環境的衝擊（資源折耗與環境質損）低。
5. 社會可接受（social acceptable）：確保生態基流量（生態多樣性保育）及地下水涵養（減緩地層下陷）。

首先在模型設定上，定義所需之基本條件、影響因子、參數與變數等，再配合中部地區特性（如水源特性、用水特性、水資源價值、社會偏好、環境影響等），蒐集、彙整相關資料，應用動態最適控制理論（optimal control theory），建立中部地區之最適水資源供給型態組合（portfolio）模型。

三、模型基本條件設定

現階段中部地區之水資源供給以地面水（湖庫、攔河堰）及地下水為主，未來的水資源供給尚包括再生水，故本研究模型將主要水源類型分為 3 種。整理模型之基本條件如下：

1. 水資源供給目標：目標年設定為 2031 年（民國 120 年）為模型終期年。
2. 水資源供給對象：配合農業用水特性，先在天然水資源供給潛能中將其扣除，故本研究以公共用水（生活與工業）為對象，評估水資源剩餘供給潛能之最適組合。
3. 水資源供給情境：由於中部地區地面水豐、枯水年差異大，故在供給組合探討時將分為豐、枯兩種情境，以評估實際供給可能遭遇的問題。
4. 水資源供給類型：多元開發（投資）確保供水穩定，包含地面水（湖庫、攔河堰及人工湖）、地下水設施、再生水等。
5. 水資源供給安全：確保年供水量不小於年計畫需水量，且地面水、地下水之可取水量受到氣候變遷影響，反應供水安全。
6. 水資源供給類型：依目前規劃包含地面水、地下水及再生水三種類型，若受豐、枯水年或氣候變遷影響，使得天然水資源供給潛能未能滿足需求時，則透過水源開發（地下水、海淡水）或移撥農業用水等方式來因應。
7. 水資源供特性：考量水源供給間歇性成本（Intermittency costs），反應水源供給穩定性。
8. 氣候變遷影響：中部地區受氣候變遷影響較大者為地面水，故本研究以最劣情境的方式，模擬地面水受到氣候變遷導致逕流量減少的情形。另地下水的部分，因其補注較不受強降雨的影響，根據過去之研究，在多數 GCM 的情境下，供水潛能甚至較無氣候變遷情境更高，故在本研究中設定其不受氣候變遷影響。
9. 供水環境成本：考量產水之環境成本（資源折耗與環境質損），由於現階段相關數據中，以碳排放較為完整，故本研究以單位產水碳排放來代表對環境的影響，主要反應在降低碳足跡（carbon footprint）的成本上。換言之，單位產水之碳排放量越大，其環境成本越高。

四、行為方程式說明

(一) 供水量及原水量

本研究擬將中部地區不同水源納入供水量（ Q_{it} ）中，包括地面水（湖庫、攔河堰、人工湖）、地下水及新興水源（再生水、海淡水）等 3 種類型。欲產生前述供水量，則需由自然環境取得原水，固定義取水量為（ F_{it} ）。由前述定義，第 t 期產水量（ Q_{it} ）是原水量（ F_{it} ）的函數，即 $Q_{it}(F_{it})$ ，且供水量為原水量的準凹函數（quasi-concave function），即 $Q_{it}/F_{it} > 0$ 及 $^2Q_{it}/(F_{it})^2 < 0$ 。

(二) 供水成本函數

第 i 種水資源型態之第 t 期總產水成本（ TC_{it} ）及單位產水成本（ C_{it} ）如式(1)與式(2)所示：

$$TC_{it} = (C_{it} + \alpha_i) \cdot Q_{it} + P_{Ai} A_{it} + P_{ei} E_{it} \dots\dots\dots (1)$$

$$C_{it} = (P_{lit} I_{it} + P_{Fit} F_{it} + \bar{O}_i) / Q_{it} \dots\dots\dots (2)$$

其中， C_{it} 為平均單位產水成本，等於水資源設施投資成本（ $P_{lit} I_{it}$ ）、原水投入成本（ $P_{Fit} F_{it}$ ）及營運成本（ \bar{O}_i ）（假設固定）之和，再除以產水量（ Q_{it} ）。其中， P_{lit} 為單位投資成本， I_{it} 為水資源設施投資量。

α_i 為供水水源之單位間歇性成本，用以反應供水水源的不穩定性，如受氣候變遷影響降雨量過少使得地面/地下水可用水量不足，需透過其他水源（如區域運水調度，或短期內緊急增加海淡廠供水量）滿足需求時，所額外衍生的成本。另本研究假設新興水源非常穩定，故不存在間歇性成本，即 $\alpha_3 = 0$ 。

另由前述基本條件，產水之環境成本以二氧化碳減排成本（ $P_{Ai} A_{it}$ ）來代表，其等於減排價格（ P_{Ai} ）與減排量（ A_{it} ）的乘積；二氧化碳（ CO_2 ）排放成本，等於碳價（ P_{ei} ）與 CO_2 淨排放量（ E_{it} ）的乘積，用以反應環境成本。在本研究中，假設碳價（ P_{ei} ）、原水價格（ P_{Fi} ）與減排價格（ P_{Ai} ）為外生固定。

(三) 資本累積方程式

水資源型態資本存量（ K_{it} ），用以代表設施供水能力，則第*i*種水資源型態之第*t*期資本累積方程式，如式(3)所示：

$$\dot{K}_{it} = I_{it} - \delta_i K_{it} \quad (i=1\sim 3) \dots\dots\dots (3)$$

其中， \dot{K}_{it} 為第*t*期第*i*種水資源資本存量累積； I_{it} 為第*i*種水資源第*t*期投資量； δ_i 為第*i*種水資源資本折舊率（假設固定）。另假設前述產水量（ Q_{it} ）除了為原水投入（ F_{it} ）的函數外，亦為水資源資本存量（ K_{it} ）的函數，即 $Q_{it}(F_{it}, K_{it})$ ，且為資本存量的準凹函數，即 $Q_{it} / K_{it} > 0$ 與 $^2Q_{it} / (K_{it})^2 < 0$ 。

(四) 水資源安全

假設中部地區經濟社會每期計畫用水需求為 \bar{Q}_t ，則滿足水資源安全方程式如下所示：

$$\sum_{i=1}^3 Q_{it} \geq \bar{Q}_t \dots\dots\dots (4)$$

式(4)之經濟意義指出，第 t 期三種水資源產水總量應不小於第 t 期的需水量，滿足當期用水需求，用以反應供水系統的可靠性。

(五) 二氧化碳淨排放量

假設第 i 種產水技術的二氧化碳淨排放 (E_{it}) 等於原水碳排放量 ($e_{0i}F_{it}$)，扣除減排量 (A_t)，如下所示：

$$E_{it} = e_{0i}F_{it} - A_t \dots\dots\dots(5)$$

其中， e_{0i} 為第 i 種產水技術之單位二氧化碳排放係數 (假設固定)，如果 e_{0i} 愈低，表示該產水技術為低碳技術，反應產水技術的環境友善性。如果 A_t 愈高，表示採取較積極之減碳技術，如碳封存與捕獲技術 (carbon capture and storage, CCS)，則其淨排放量 (E_{it}) 愈低。

另假設水資源部門至目標年 2031 年的二氧化碳排放量上限為 \bar{E}_T ，則減碳目標之限制式如下所示：

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^3 E_{it} \leq \bar{E}_T \dots\dots\dots(6)$$

五、模型求解

根據前述說明，追求中部地區供水成本最小之最適水資源供給組合的最適控制問題如下所示：

$$\text{Min } Z = \int_0^T \sum_{i=1}^3 TC_{it} e^{-\rho t} dt \dots\dots\dots(7)$$

s.t.

$$TC_{it} = (C_{it} + P_{Ai}) \cdot Q_{it} + P_{Ai}A_i + P_{ei}E_i \quad (i=1\sim3)$$

$$C_{it} = (P_{Ii}I_{it} + P_{Fii}F_{it} + \bar{O}_i) / Q_{it} \quad (i=1\sim3)$$

$$\dot{K}_{it} = I_{it} - \delta_i K_{it} \quad (i=1\sim3)$$

$$\sum_{i=1}^3 Q_{it} \leq \bar{Q}_t$$

前述最適控制問題之當期 (current) Hamiltonian 及 Lagrangian 函數，分別如式(8)及式(9)所示：(下標 t 省略)

$$H_c = \sum_{i=1}^3 TC_i + \sum_{i=1}^3 m_i(I_i - K_i) \dots\dots\dots(8)$$

$$L_c = H_c + \lambda_1 \sum_{i=1}^3 Q_i - \bar{Q} + \lambda_2 \bar{E}_T - \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^3 E_{it} \dots\dots\dots(9)$$

其中， m_i 為水資源資本的伴隨變數 (co-state variable)，或影子價格 (shadow price)， n 為減碳資本的伴隨變數。 λ_1 、 λ_2 分別為水資源安全、二氧化碳排放目標及供水總量限制之 Lagrangian 乘數因子。假設 $I_i > 0$ 的情況下，上述問題之最大化原理條件如下 ($i=1\sim 3$)：

$$\frac{L_c}{I_i} = 0 \quad P_{Ii} = m_i \dots\dots\dots(10)$$

$$\frac{L_c}{F_i} = 0 \quad P_{Fi} + \lambda_1 \frac{Q_i}{F_i} + P_{ei} e_{0i} - \lambda_1 \frac{Q_i}{F_i} + \sum_{t=0}^T e_{0i} = 0$$

$$\frac{Q_i}{F_i} = \frac{P_{Fi} + P_{ei} e_{0i} - \sum_{t=0}^T e_{0i}}{\lambda_1} \dots\dots\dots(11)$$

$$\frac{L_c}{A_i} = 0 \quad P_{Ai} - P_{ei} + \sum_{t=0}^T (1) = 0$$

$$P_{Ai} = P_{ei} + \sum_{t=0}^T 1 \dots\dots\dots(12)$$

$$\dot{m}_i = \frac{L_c}{K_i} + \dot{m}_i$$

$$= \left(\lambda_1 \frac{Q_i}{K_i} - \lambda_1 m_i + \lambda_1 \frac{Q_i}{K_i} + \dot{m}_i \right)$$

$$= \left(\lambda_1 \frac{Q_i}{K_i} - \lambda_1 m_i \right) \dots\dots\dots(13)$$

$${}_1 \frac{L_c}{1} = 0 \quad {}_1 \sum_{i=1}^3 Q_i \bar{Q} = 0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

$${}_2 \frac{L_c}{2} = 0 \quad {}_2 \bar{E}_T \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^3 E_{it} = 0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

式(10)~式(12)分別為最適水資源投資、原水投入及減排方程式；式(14)、式(15)分別代表水資源安全及減碳目標限制。

六、最適解函數之經濟意涵分析及影響因子探討

本研究最適水資源資本與原水量決策方程式（省略下標 t ）：

$$\frac{Q_i / K_i}{Q_i / F_i} = \frac{F_i}{K_i} = MRTS_i = MC_i = \frac{P_{Fi} (i)}{P_{Fi} + P_{Ai} e_{0i}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

其中， $MRTS_i$ 為第 i 種水資源供水技術之邊際技術替代率(marginal rate of technology substitution)； MC_i 為第 i 種水資源技術之原水成本與實質資本相對價格。式(19)是典型個體經濟學最適生產要素決策方程式，令 $k_i = F_i / K_i$ ，則依據 C-D 生產函數，可得 3 種類型之水資源設施容量供水函數如下：

$$\frac{Q_1}{K_1} = {}_1 k_1^1 = (1 - {}_1)(1 - {}_2) \frac{1}{P_{F1} + P_{A1} e_{01}} \frac{P_{I1} (1)}{P_{F1} + P_{A1} e_{01}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\frac{Q_2}{K_2} = {}_2 k_2^1 = (1 - {}_2)(1 - {}_3) \frac{1}{P_{F2} + P_{A2} e_{02}} \frac{P_{I2} (2)}{P_{F2} + P_{A2} e_{02}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

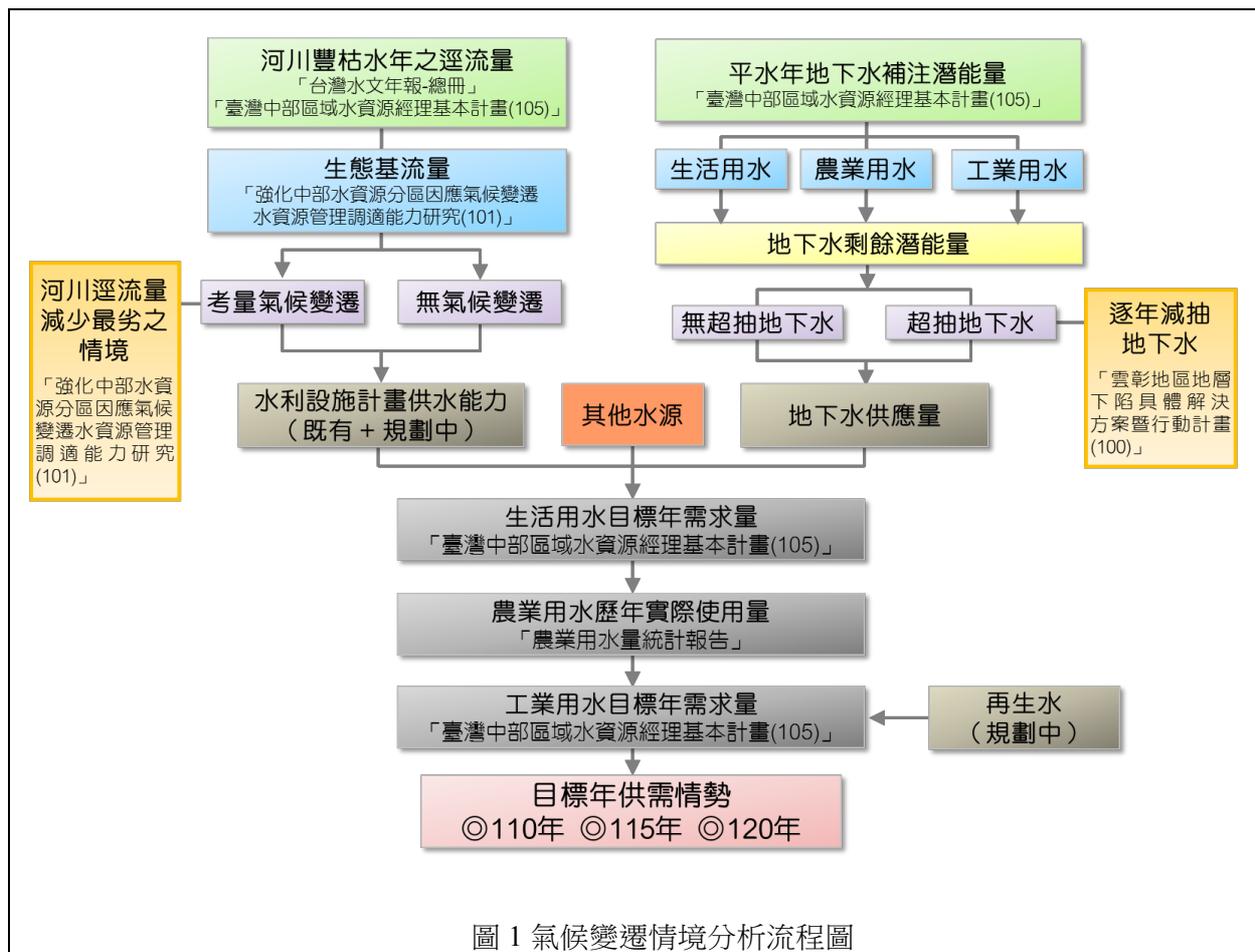
$$\frac{Q_3}{K_3} = {}_3 k_3^1 = \frac{1}{P_{F3} + P_{A3} e_{03}} \frac{P_{I3} (3)}{P_{F3} + P_{A3} e_{03}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

透過式(17)~式(19)，可以推估目標年各水資源最適產水量及配比。觀察前述公式，可知各水資源單位設施容量產水量函數，受到水資源技術參數（ ${}_i$ ）、氣候變遷影響導致可收集量減少之比例（ ${}_i$ ）、生態基流量比例（ ${}_i$ ）、地下水涵養比例（ ${}_i$ ）、原水投入成本（ P_{Fi} ）、水資源設施投資淨折舊成本（ $P_{Fi} (i)$ ）、減排成本（ P_{Ai} ）、原水碳排放係數（ e_{0i} ）等因素影響。

肆、氣候變遷情境與模型參數設定

一、氣候變遷情境分析流程

本研究氣候變遷情境綜合水利署「臺灣中部區域水資源經理基本計畫(2016)」、「強化中部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究(2012)」研究資料，以及其他相關用水資料，將河川逕流量分為豐枯水年，並以先滿足生活用水再滿足農業需求之順序，最後將河川逕流量供給扣除生活用水後的水利設施供水能力，評估目標年工業用水之供需情勢，其氣候變遷情境分析流程如圖 1 所示。



二、台中地區相關資料彙整與參數設定

(一) 研究年期：

本研究以民國 120 年(2031 年)為最終期，為了解水資源配置隨時間的可能變化，另以民國 110、115 年為研究年期。

(二) 供需情勢設定：

本研究目標年供水量之設定，台中地區各目標年公共用水需求分別為：150.10、155.20、157.20 萬噸/日。

(三) 河川逕流量：

台中地區主要河川為大安溪與大甲溪，其豐水年河川逕流量分別為 618.34 萬噸/日及 1,048.28 萬噸/日，枯水年則分別為 250.85 萬噸/日及 425.27 萬噸/日。

(四) 生態基流量及地下水涵養比例設定：

台中地區主要河川為大安溪與大甲溪，其生態基流量設定比例為 7.33%與 12.39%，而地下水涵養比例因地下水設施取水量小於地下水潛能量（5.40 億噸/年），且無地下水超收與地層下陷等問題，故設定為 0。

(五) 碳排放目標、單位產水碳排放係數(e_{0i})及單位減排成本設定：

在我國「國家自定預期貢獻」(行政院環境保護署，2015)的部門減緩措施中，包含能源、工業、住宅、服務業、運輸、農業及廢棄物等 7 大部門，並未將水資源部門納入，也缺乏具體的減排目標。本研究以未來碳排放量不增加為原則，作為水資源碳排放目標設定的依據。

本研究蒐集歷年相關報告，彙整台中地區水資源設施之單位原水投入成本及單位產水碳排放係數⁶，說明如下：

1. 鯉魚潭水庫：單位原水投入成本 4.64 噸/元、單位淨折舊成本 0.0212 噸/元
2. 石岡壩(豐原淨水廠)：單位原水投入成本 3.33 噸/元、單位淨折舊成本 0.0093 噸/元
3. 大安大甲聯合運用：單位原水投入成本 7.58 噸/元、單位淨折舊成本 0.0835 噸/元
4. 地下水井：單位原水投入成本 7.95 噸/元、單位淨折舊成本 0.1578 噸/元
5. 福田水資源回收中心：單位原水投入成本 11.40 噸/元、單位淨折舊成本 0.3078 噸/元

另在減排部分，本研究假設以購買碳權的方式來進行，每噸 CO₂ 成本則參考歐盟碳交易價格，設定為 150 元，再代入最適供給組合模型中進行計算。由表中可以看出，地面水設施的單位產水碳排放係數較低，其次為地下水和再生水，海淡水最高。

(六) 氣候變遷影響情境設定：

台中地區主要河川為大安溪與大甲溪，其氣候變遷影響情境減少逕流量比例說明如下：

⁶相關資料來源包括：內政部營建署（2016）；台灣自來水公司（2017）；黃彥禎與李堅明（2017）；經濟部水利署（2010、2011、2016）；經濟部水利署水利規劃試驗所（2012、2013、2015）等

1. 大安溪：110 年減少 1.33%，115 年減少 2.65%，120 年減少 3.98%
2. 大甲溪：110 年減少 2.41%，115 年減少 4.82%，120 年減少 7.24%

(七) 工業用水供需情勢

綜合前述氣候變遷情境與各項基本資料分析，台中地區工業用水供需情勢如表 1~表 4 所示，可以發現各情境下民國 110 年因水利設施供給能力不足導致需提升農業用水效率每日 21.10 萬噸；而在民國 115 年因大安大甲聯合運用計畫完工而無須提升農業用水效率；最後民國 120 年枯水年因氣候變遷影響下，河川逕流量減少而需提升農業用水效率每日 2.75 萬噸。

表 1 無氣候變遷（豐水年）

工業用水情勢			
目標年	110 年	115 年	120 年
工業用水量	51.37	56.77	58.91
福田水資源回收中心	0.00	9.65	10.00
公共用水供給量(註)	30.27	55.57	65.71
提升農業用水效率	21.10	0.00	0.00

表 2 無氣候變遷(枯水年)

工業用水情勢			
目標年	110 年	115 年	120 年
工業用水量	51.37	56.77	58.91
福田水資源回收中心	0.00	9.65	10.00
公共用水供給量(註)	30.27	55.57	65.71
提升農業用水效率	21.10	0.00	0.00

表 3 考量氣候變遷(豐水年)

工業用水情勢			
目標年	110 年	115 年	120 年
工業用水量	51.37	56.77	58.91
福田水資源回收中心	0.00	9.65	10.00
公共用水供給量(註)	30.27	55.57	65.71
提升農業用水效率	21.10	0.00	0.00

表 4 考量氣候變遷(枯水年)

工業用水情勢			
目標年	110 年	115 年	120 年
工業用水量	51.37	56.77	58.91
福田水資源回收中心	0.00	9.65	10.00
公共用水供給量(註)	30.27	55.57	46.16
提升農業用水效率	21.10	0.00	2.75

因本研究為分析氣候變遷情境下之供需情勢，希望探討、因應及調適氣候變遷對於水資源系統所帶來的負面影響，故後續最適供給組合章節將以氣候變遷下枯水年之影響最劇烈的情境來規劃。

伍、最適供給組合規劃-以台中地區為例

本研究為顯示供水成本中產水成本及環境成本所占比例，將產水成本及減碳成本兩項（至於二氧化碳排放成本，受到國內尚未開徵碳稅，不易進行實證分析，因此，本研究予以省略不計）。本研究依據單位產水之碳排放量為基礎，推估未來各研究年期的總碳排放量，並計算相較於 BAU 情境之各期的減排量及減排成本。根據前述各參數的設定，本研究以式(2)~式(4)計算各水源最適配比。

台中地區在枯水年氣候變遷影響的條件下，分別在民國 110 年及 120 年需調配農業用水每日 21.1 萬噸及每日 2.75 萬噸，本研究除提升農業用水效率因應工業用水需求外，另評估以增供地下水及新增海淡水因應，比較分析各目標年原水投入成本與碳排放量之差異，不同因應方式之最適組合規劃如圖 2~圖 4 所示，其原水投入成本與碳排放量對照表如表 5 所示。

結果顯示，台中地區在民國 110 年原水投入成本以增供地下水為最低，碳排放量則以提升農業用水效率為最低，而在民國 115 年及 120 年原水投入成本和碳排放量皆以提升農業用水效率為最低，不同的水資源供給組合具有各自的優勢（如低產水成本或碳排放量），因此在各目標年之結果呈現不同差異。

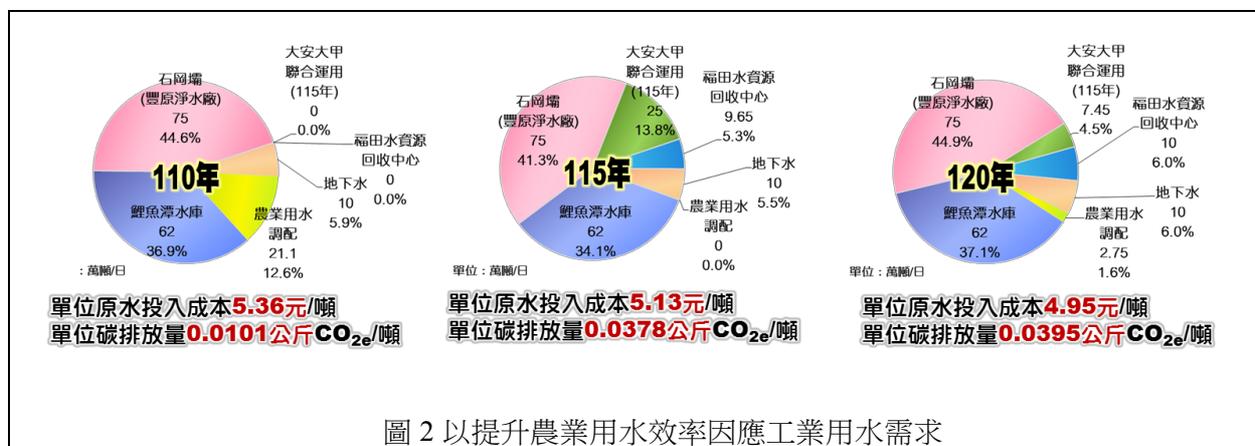


圖 2 以提升農業用水效率因應工業用水需求

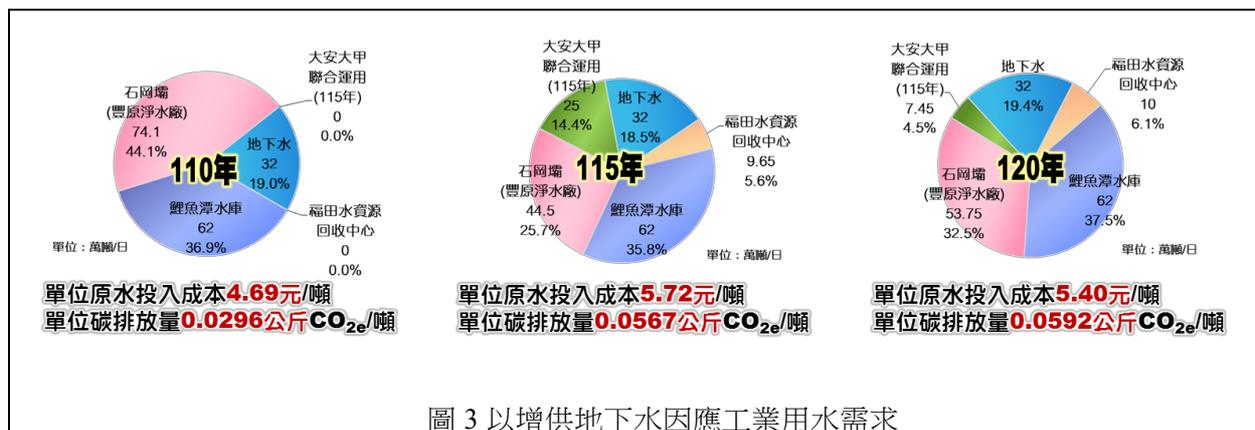


圖 3 以增供地下水因應工業用水需求

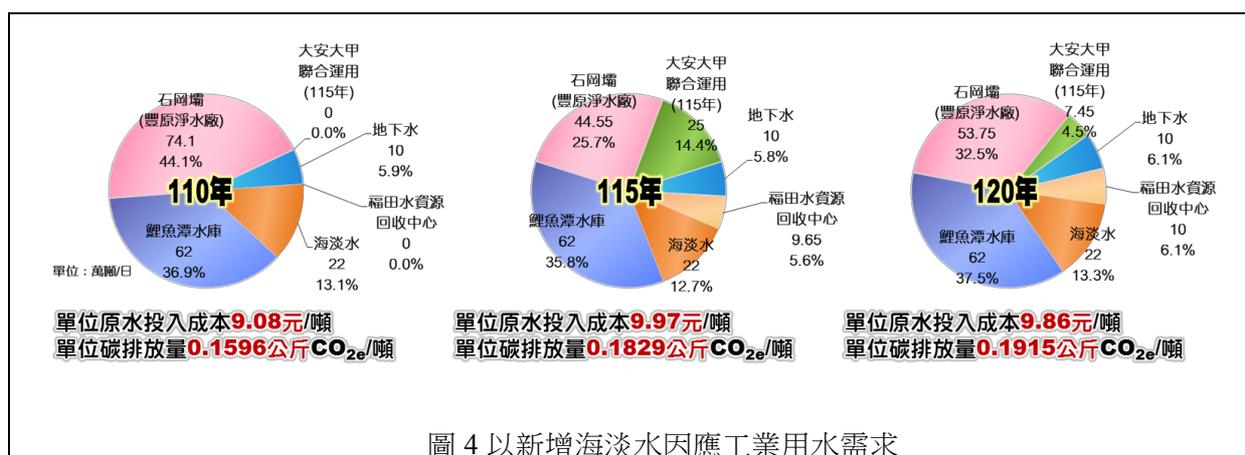


圖 4 以新增海淡水因應工業用水需求

表 5 不同因應工業用水需求方式比較表

因應工業用水需求方式	110 年		115 年		120 年	
	原水投入成本 (元/噸)	碳排放量 (公斤 CO _{2e} /噸)	原水投入成本 (元/噸)	碳排放量 (公斤 CO _{2e} /噸)	原水投入成本 (元/噸)	碳排放量 (公斤 CO _{2e} /噸)
農業用水調配	5.36	0.0101	5.13	0.0378	4.95	0.0395
增供地下水	4.69	0.0296	5.72	0.0567	5.40	0.0592
新增海淡水	9.08	0.1596	9.97	0.01829	9.86	0.1915

陸、結論與建議

本研究以最適控制理論，將產水成本、間歇性成本、碳排放成本、氣候變遷影響下各種水資源可供給量等因子納入，建置一最小經濟成本之理論模型，評估未來不同時期之最適組合。考量同時滿足水資源供給、減碳目標及水資源安全，包括水文條件與氣候變遷影響等，進行長期的供水組合規劃，研究成果具有高度政策意含。

透過最適控制理論，在追求供水成本最小的目標下建構一水資源供給組合模型。推導成果顯示，各水資源最適佔比受到水資源技術參數（ α_i ）、水資源設施投資淨折舊成本（ $P_{li}(\alpha_i)$ ）、原水投入成本（ P_{Fi} ）、減排成本（ P_{Ai} ）、原水碳排放係數（ e_{0i} ）、無法轉換為可用水量比例（ β_i ）、氣候變遷影響導致可收集量減少之比例（ γ_i ）、環保基流量比例（ δ_i ）、地下水安全出水量比例（ ϵ_i ）等因素影響。案例分析結果顯示，台中地區因河川逕流扣除生活及農業用水後尚有多餘逕流量可供給工業用水，且地下水有豐富的潛能量無超抽之疑慮，故在台中地區具有多元的水源可做供給調配，建議未來可同步納入需求面管理策略，降低用水需求，並透過技術的研發，使得水資源來源可以多元化利用，如回收水再利用或美國環保署（USEPA）推動之綠色基礎設施（Green Infrastructure）規劃等方式，方能真正達成水資源的永續經營，並能提出更具體可行之調適策略。

建議未來可進一步擴大本研究的理論模型，將需求面管理納入，如節約用水之影響、不同標的用水需求之變化、水價變化等，可更全面的評估水資源調適策略，並提出完整之政策建議。

參考文獻

1. Draper, A.J., Jenkins, M.W., Kirby, K.W., Lund, J.R., Howitt, R.E.(2003), “Economic-Engineering Optimization for California Water Management,” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(3), pp. 155-164.
2. Jenkins, M.W., Lund, J.R., Howitt, R.E., Draper, A.J., Msangi, S.M., Tanaka, S.K., Ritzema, R.S., Marques, G.F.(2004), “Optimization of California's Water Supply System: Results and Insights,” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(4), pp. 271-280.
3. 內政部營建署 (2016), 臺中市福田水資源回收中心放流水回收再利用可行性評估及後續作業委託技術服務案-第三階段成果報告統包效益評估 (定稿版)。
4. 行政院環境保護署 (2015), 中華民國 (台灣) 國家自定預期貢獻 (Intended Nationally Determined Contribution, INDC)。
5. 台灣自來水公司 (2017), 台灣自來水事業統計年報。
6. 黃彥禎, 李堅明 (2017), 因應氣候變遷之最適水資源供給組合研究 - 以澎湖地區為例, 農業經濟叢刊 (*Taiwanese Agricultural Economic Review*), 23(2), 41-72。
7. 經濟部水利署 (2010), 自來水事業碳足跡評估與減碳策略之先期研究。
8. 經濟部水利署 (2011), 大安大甲溪水源聯合運用輸水工程計畫 (行政院核定本)。
9. 經濟部水利署 (2016), 臺灣中部區域水資源經理基本計畫。
10. 經濟部水利署 (2017), 水資源規劃經濟效益分析與評估。
11. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2012), 強化中部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究。
12. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2013), 水資源規劃經濟效益分析與評估。
13. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2015), 水資源工程計畫碳管理制度研究-總報告書。
14. 經濟部水利署, 「台灣水文年報-總冊」, <http://gweb.wra.gov.tw/wrhygis/>。
15. 經濟部水利署, 「農業用水量統計報告」, <http://wuss.wra.gov.tw/annuals.aspx>。
16. 鄭兆尊、林宜穎、陳淡容、許晃雄、陳正達 (2017), TCCIP-II 動力降尺度進展: 從單一到多組區域氣候推估, 臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置第二期計畫成果發表會論文集, 台北市, 頁 43-52。