

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

黃彥禎*、李堅明**

水資源安全已成為全球因應氣候變遷的重要調適策略，如何建立一個氣候韌性的水資源供給組合，已成為政府維護水資安全的機會與挑戰。爰此，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 (至 2031 年) 最適水資源供給組合。本研究再以澎湖地區為例，實證分析澎湖地區的最適水資源組合，研究顯示，海淡水將成為澎湖地區最主要的供給水源，至 2031 年最適占比約 71.81%，從而，也提高產水成本及碳足跡。因此，建議透過需求面管理來確保水資源的永續發展。

關鍵詞：氣候變遷、最適控制理論、水資源供給組合、澎湖地區

* 象騰顧問有限公司專案經理。國立臺北大學自然資源與環境管理研究所博士後研究員。

** 聯繫作者：國立臺北大學自然資源與環境管理研究所副教授，新北市三峽區大學路 151 號。電話：(02)8674-1111#67335；傳真：(02)26716313，E-mail：cmlee@mail.ntpu.edu.tw。作者感謝兩位匿名評審提供非常有用的寶貴意見，然而，作者仍負本文錯誤之責。

農業經濟叢刊 (Taiwanese Agricultural Economic Review)，23:2(2017)，41-72。

臺灣農村經濟學會出版

I、前言

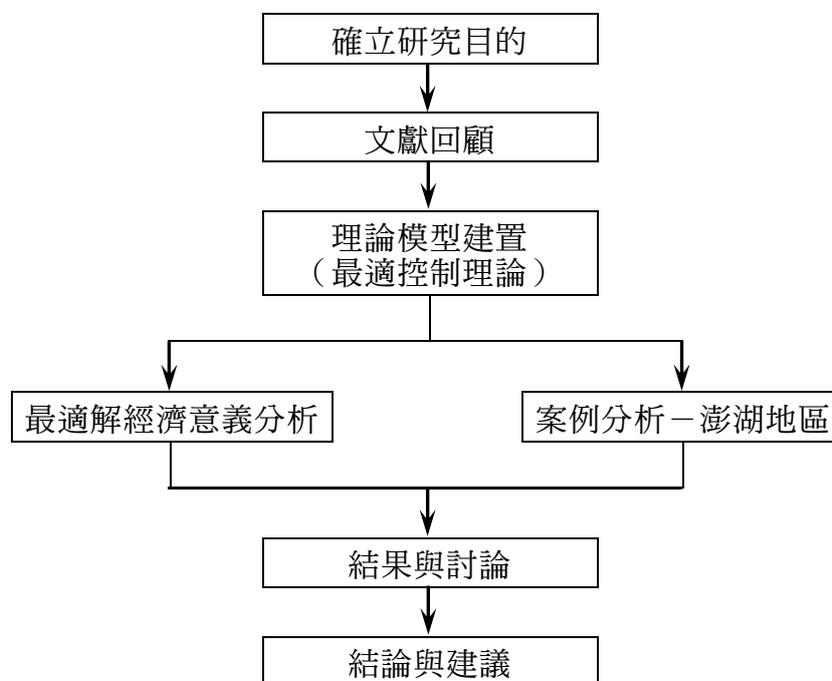
政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 以下簡稱 IPCC) 第一工作組 (Work Group I) 於 2013 年公布第五次評估報告 (the Fifth Assess Report, 以下簡稱 AR5) (註 1), 指出 1880 至 2012 年間, 全球平均溫度上升 0.85°C, 並出現加速增溫的現象, 海平面高度升高, 熱浪、乾旱及豪大雨等極端氣候發生的強度與頻率增加。在全球暖化的衝擊下, 聯合國亦多次呼籲各國政府一方面需持續減少溫室氣體排放以減緩 (mitigation) 全球暖化, 另一方面須積極面對氣候變遷產生的衝擊並採取積極的調適 (adaptation) 作為, 降低氣候風險, 提高恢復力 (resilience)。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 (註 2), 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 (註 3)。

因應氣候變遷之水資源衝擊與管理, 已受到國際文獻廣泛重視。Xu (2000) 針對瑞典中部地區 25 個集水區, 利用模式模擬 15 種氣候變遷情

境，如結合溫升 1、2、4°C 和降雨±10%、±20%的條件下，對於水文環境的影響。結果顯示冬季降雪堆積量在所有情境下都顯著的減少。另冬季逕流 (runoff) 明顯增加，春季與夏季逕流減少。說明未來瑞典中部地區的水資源將面臨與過往不同的挑戰，包括春、夏季可蓄水量減少，冬季河川逕流變化大等問題。Vörösmarty 等人 (2000) 定義了相對用水需求 (relative water demand, 以下簡稱 RWD) 指標，作為評估水資源脆弱度的因子，並設計三種情境計算相對用水需求。經計算，全球已有 17.6 億人位於相對缺水的區域，且全球未來相對用水需求指標將較現況成長 50%，應及早進行相關的研究規劃來因應。Pahl-Wostl (2007) 針對水資源因應氣候變遷影響，提出了一個概念架構 (conceptual framework)，期能使管理策略由傳統單一向的管理思維，轉變成較具有彈性的調適方式。Dessai 與 Hulme (2007) 針對未來氣候變遷預測的不確定性，提出了一個評估架構，並以東英格蘭的 Anglian 地區水資源管理方案 (Water Services' 25 year Water Resource Plan) 為案例，評估水資源管理方案中，對於氣候變遷不確定性較為敏感的因子。Kundzewicz 等人 (2008) 回顧了全球氣候變遷對水資源衝擊的相關文獻，包括冬季降雪可能因溫升而變為降雨，改變了河川洪峰發生的時間。強降雨發生頻率非常有可能因溫升而增加，河川枯早期時間可能拉長而減少可用水資源等。Harou 等人 (2009) 完整的回顧了過去 45 年，23 個地區有關水文—經濟模型的概念、設計與應用，並提出未來可能的研究方向。Mulangu 與 Kraybill (2015) 利用假設市場評價法 (contingent valuation method, 以下簡稱 CVM) 來評估耕作者在減少氣候變遷帶來的風險下，投資在改善灌溉方案的願付價格 (willingness to pay, 以下簡稱 WTP)。Borgomeo 等人 (2016) 的研究中說明，在選擇因應氣候變遷的水資源調適計畫時，無可避免的都需要在風險、成本和其他影響中間做出取捨 (trade-off)，因此該篇論文以多目標最佳化 (multi-objective optimization) 理論，評估在滿足不同的可容忍風險 (tolerable risk) 條件下，最小成本的水資源調適方案組合。

台灣雖然降雨豐富，但仍屬於缺水國家（註 4），面對氣候變遷影響，水資源供給安全更具挑戰，已引起國內學者重視，如鄭兆尊等人（2017）推估，21 世紀末，影響臺灣的颱風個數將減少，從而，減少水資源供給。結果，將衝擊臺灣中南部及離島地區的水資源安全。許晃雄與陳英婷（2017）指出，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，並提高氣候變遷調適策略的困難度。綜上可知，科學研究顯示，氣候變遷影響下，的確會提高臺灣水資源供給風險，因此，考量我國水資源供給來源（包括河川引水、水庫水、地下水、海淡水及再生水等），並依據不同水資源特性（註 5），建立具氣候韌性的水資源供給系統，已成為水資源主管部門刻不容緩課題。

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，再以澎湖地區為案例（註 6），實證澎湖地區 2031 年最適水資源供給組合，提供政府施政參考。本研究內容安排如后：第一節為研究背景分析；第二節為本研究理論模型；第三節為澎湖地區案例分析；第四節為本文結語。整體研究流程如圖 1 所示。



資料來源：本研究。

圖 1 研究架構流程圖

II、最適水資源供給組合模型建構

2.1. 理論模型建構

2.1.1 模型相關情境說明

現階段國內之水資源供給以地面水、地下水、海淡水（離島地區）為主，並積極推動污水處理廠再生水及雨水貯留等多元化水源的開發利用。由於目前我國再生水的使用用途有其限制，且各標的用水之水質尚待中央及目的事業主管機關訂定（註 7），而雨水貯留規模小且設置仍然很少，故在本研究中暫不將此兩種水源納入。另考量未來目標如下：

- (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) 水資源供給組合：多元開發（投資）確保供水穩定，包含地面水、地下水及海淡廠設施之開發與建置；
- (3) 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水文條件及氣候變遷影響，反應供水安全；
- (4) 水資源供給特性：考量水源供給間歇性成本（intermittency costs），反應水源供給穩定性；
- (5) 減碳成本：考量產水之減碳成本，反應降低產水碳足跡（carbon footprint）之成本。

2.1.2 供水量及原水量

本研究考量三種水資源作為系統供水來源，包括地面水（ Q_{1t} ）、地下水（ Q_{2t} ）及海淡水（ Q_{3t} ）。欲產生前述水量，則需由自然環境取得原水，包括地面水（ F_{1t} ）、地下水（ F_{2t} ）及海水（ F_{3t} ）取水量。由前述定義，第 t 期產水量（ Q_{it} ）是原水量（ F_{it} ）的函數，即 $Q_{it}(F_{it})$ ，且產水量為原水量的準凹函數（quasi-concave function），即 $\partial Q_{it} / \partial F_{it} \geq 0$ 及 $\partial^2 Q_{it} / \partial (F_{it})^2 \leq 0$ 。

2.1.3 供水成本函數

本研究考量三種水資源型態，包括地面水、地下水及海淡水，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：

$$TC_{it} = (C_{it} + \phi_{it}) \times Q_{it} + P_{Ai} A_{it} + P_{ei} E_{it} \quad (1)$$

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

其中， C_{it} 為平均單位產水成本，等於水資源設施投資成本（ $P_{Iit}I_{it}$ ）、原水投入成本（ $P_{Fit}F_{it}$ ）及營運成本（ \bar{Q}_i ）（假設固定）之和，再除以產水量（ Q_{it} ）。其中， P_{Iit} 為單位投資成本， I_{it} 為水資源設施投資量。 ϕ_{it} 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。另本研究假設海淡水非常穩定，故不存在間歇性成本，即 $\phi_3 = 0$ 。

二氧化碳減排成本（ $P_{Ait}A_{it}$ ），等於減排價格（ P_{Ait} ）與減排量（ A_{it} ）的乘積；二氧化碳（ CO_2 ）排放成本，等於碳價（ P_{eit} ）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_{eit} ）、原水價格（ P_{Fit} ）與減排價格（ P_{Ait} ）為外生固定。

2.1.4 資本累積方程式

本研究考量三種水資源型態資本存量（ K_{it} ），包括地面水、地下水及海淡水，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：

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

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 種水資源施第 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 $\partial Q_{it} / \partial K_{it} \geq 0$ 與 $\partial^2 Q_{it} / \partial (K_{it})^2 \leq 0$ 。

2.1.5 水資源安全及供水總量限制

假設經濟社會每期計畫用水需求量為 \bar{Q}_t ，則滿足水資源安全方程式如下所示：

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

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。

政府已制定 2031 年總用量目標為 \bar{Q}_T （全台灣 200 億噸），則第 T 年，滿足總供水目標之限制式如下所示：

$$\sum_{i=1}^3 Q_{iT} \leq \bar{Q}_T \quad (5)$$

2.1.6 二氧化碳淨排放量與減碳目標

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：

$$E_{it} = e_{0i}F_{it} - A_t \quad (6)$$

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，以下簡稱 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：

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^3 E_{it} \leq \bar{E}_T \quad (7)$$

2.2 最適水資源供給組合模型與求解

2.2.1 最適控制模型

達到政府在 2031 年水資源供給（式(7)）及減碳目標（式(6)）下，且能

夠確保水資源安全（式(4)），則追求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：

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad Z &= \int_0^T \left(\sum_{i=1}^3 TC_{it} \right) e^{-\rho t} dt \\
 \text{s.t.} \quad & \\
 TC_{it} &= (C_{it} + \phi_{it}) \times Q_{it} + P_{Ai} A_{it} + P_{Ei} E_{it} \quad (\forall i = 1 \sim 3) \\
 C_{it} &= (P_{Ii} I_{it} + P_{Fii} F_{it} + \bar{O}_i) / Q_{it} \quad (\forall i = 1 \sim 3) \\
 \dot{K}_{it} &= I_{it} - \delta_i K_{it} \quad (\forall i = 1 \sim 3) \\
 \sum_{i=1}^3 Q_{it} &\geq \bar{Q}_t \\
 \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^3 E_{it} &\leq \bar{E}_T \\
 \sum_{i=1}^3 Q_{iT} &\leq \bar{Q}_T
 \end{aligned} \tag{8}$$

2.2.2 最適解

前述最適控制問題之當期（current）Hamiltonian 及 Lagrangian 函數，分別如式(9)及式(10)所示：（下標 t 省略）

$$H_c = \sum_{i=1}^3 TC_i - \sum_{i=1}^3 m_i (I_i - \delta_i K_i) \tag{9}$$

$$L_c = H_c - \theta_1 \left(\sum_{i=1}^3 Q_i - \bar{Q} \right) - \theta_2 \left(\bar{E}_T - \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^3 E_{it} \right) - \theta_3 \left(\bar{Q}_T - \sum_{i=1}^3 Q_{iT} \right) \tag{10}$$

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。 $\theta_1 \sim \theta_3$ 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 ($\forall i = 1 \sim 3$)：

$$\frac{\partial L_c}{\partial I_i} = 0 \Rightarrow P_{I_i} = m_i \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_c}{\partial F_i} = 0 &\Rightarrow P_{F_i} + \phi_i \frac{\partial Q_i}{\partial F_i} + P_{e_i} e_{0i} - \theta_1 \frac{\partial Q_i}{\partial F_i} + \theta_2 \sum_{t=0}^T e_{0i} = 0 \\ \Rightarrow \frac{\partial Q_i}{\partial F_i} &= \frac{P_{F_i} + P_{e_i} e_{0i} - \theta_2 \sum_{t=0}^T e_{0i}}{\theta_1 - \phi_i} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{\partial L_c}{\partial A_i} = 0 \Rightarrow P_{A_i} - P_{e_i} + \theta_2 \sum_{t=0}^T (-1) = 0 \Rightarrow P_{A_i} = P_{e_i} + \theta_2 T \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_i &= -\frac{\partial L_c}{\partial K_i} + \rho m_i = -(\phi_i) \frac{\partial Q_i}{\partial K_i} - \delta_i m_i + \theta_i \frac{\partial Q_i}{\partial K_i} + \rho m_i \\ &= (\theta_i - \phi_i) \frac{\partial Q_i}{\partial K_i} - (\delta_i - \rho) m_i \end{aligned} \quad (14)$$

$$\theta_1 \frac{\partial L_c}{\partial \theta_1} = 0 \Rightarrow \theta_1 \left(\sum_{i=1}^3 Q_i - \bar{Q} \right) = 0 \quad (15)$$

$$\theta_2 \frac{\partial L_c}{\partial \theta_2} = 0 \Rightarrow \theta_2 \left(\bar{E}_T - \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^3 E_{it} \right) = 0 \quad (16)$$

$$\theta_3 \frac{\partial L_c}{\partial \theta_3} = 0 \Rightarrow \theta_3 \left(\bar{Q}_T - \sum_{i=1}^3 Q_{iT} \right) = 0 \quad (17)$$

式(11)、式(12)及式(13)分別為最適水資源投資、原水投入及減排方程式；式(15)~式(17)分別代表水資源安全、減碳目標、及產水量終期目標限制。

2.2.3 最適解之經濟意義

假設經濟體系達到定態 (steady state) 下，則 $\dot{m}_i = 0$ ，式(14)可以調整為：

$$\frac{\partial Q_i}{\partial K_i} = \frac{(\delta_i - \rho)m_i}{\theta_1 - \phi_i} \quad (18)$$

將式(11)代入式(18)，可以得到：

$$\frac{\partial Q_i}{\partial K_i} = \frac{P_{li}(\delta_i - \rho)}{\theta_1 - \phi_i} \quad (19)$$

上式經濟意義說明如下：最適水資源投資水準，決定於邊際產量 ($\partial Q_i / \partial K_i$) 等於邊際實質投資成本之處，其中 $P_{li}(\delta_i - \rho)$ 為水資源設施投資的淨折舊成本，等於折舊成本 ($P_{li}\delta_i$) 扣除利息成本 ($P_{li}\rho$)； $(\theta_1 - \phi_i)$ 則是一個平減因子，將名目成本轉化實質成本。

觀察式(13)可知，最適減排水準決定於邊際減排成本 (P_{Ai}) 等於邊際減排效益 ($P_{ei} + \theta_2 T$) 之處。其中，邊際減排效益包括節省的排放成本 (P_{ei}) 及減排目標達成價值 ($\theta_2 T$)。因本研究假設 e_{oi} 固定，故 $\theta_2 \sum_{t=0}^T e_{oi} = T\theta_2 e_{oi}$ 。由式(14)可知， $\theta_2 = (P_{Ai} - P_{ei})/T$ ，代入式(13)，可以獲得最適燃料水準方程式：

$$\frac{\partial Q_i}{\partial F_i} = \frac{P_{Fi} + P_{Ai}e_{oi}}{\theta_1 - \phi_i} \quad (20)$$

式(20)之經濟意涵說明如下：符合永續水資源之產水技術最適原水投入水準決定於邊際產量 ($\partial Q_i / \partial F_i$) 等於實質原水投入成本 ($(P_{Fi} + P_{Ai}e_{oi})/(\theta_1 - \phi_i)$) 之處。其中，實質原水投入成本包括原水投入成本 (P_{Fi}) 與二氧化碳排放成本 ($P_{Ai}e_{oi}$)； $(\theta_1 - \phi_i)$ 則是一個平減因子，將名目成本轉化實質成本。由式(20)來看，減排活動會考量碳價，另最適原水投入量將受到碳排放係數影響，進而受到碳價 (P_{ei}) 影響。

2.3 最適水資源供給組合影響因子分析

為進一步探討水資源供給配比，本文假設供水量 (Q_{it}) 為 C-D 型函數 (Cobb-Douglas function)，且為固定規模報酬 (constant return to scale，以下簡稱 CRS)，亦即 $Q_{it} = \varpi_{it} K_{it}^\gamma F_{it}^{1-\gamma}$ ，其中， γ 為固定參數，且 $0 \leq \gamma \leq 1$ ， ϖ_{it} 為產水容量因子 (註 8)。地面水的產水容量因子 (ϖ_{1t})，本研究以降雨無法轉換為可用水存量比例 (α_{1t})，如蒸發散及入滲等；氣候變遷影響 (降雨量減少或時間集中) 導致地面水可收集量減少的比例 (β_1) 及環保基流量比例 (μ) 等因子來呈現，反應產水量受不同水文條件與氣候變遷的影響。地下水的產水容量因子 (ϖ_{2t})，本研究以總入滲量無法轉換為可用地下水存量之比例 (α_{2t})，如邊界流出；氣候變遷影響 (降雨量減少或時間集中) 導致地下水可收集量減少的比例 (β_2) 及地下水涵養比例 (η) 等因子來呈現，反應產水量受不同水文條件與氣候變遷的影響。另因海淡水設備產水能力幾乎不受水文條件變化的影響，在本研究中假設其產水容量因子與降雨的變化、氣候變遷等因素無關，即 $\varpi_{3t} = 1$ 。

本研究以式(19)除以式(20)，可得最適水資源資本與原水量決策方程式 (省略下標 t)：

$$\frac{\partial Q_i / \partial K_i}{\partial Q_i / \partial F_i} = \frac{\gamma}{1-\gamma} \frac{F_i}{K_i} = MRTS_i = MC_i = \frac{P_{li}(\delta_i - \rho)}{P_{Fi} + P_{Ai}e_{0i}} \quad (21)$$

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(4-18)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，可得各水資源單位設施容量供水函數如下：

$$\frac{Q_i}{K_i} = \varpi_i k_i^{1-\gamma} = [(1-\alpha_i)(1-\beta_i)(1-\mu)] \left(\frac{1-\gamma}{\gamma} \right)^{1-\gamma} \left\{ \frac{P_{li}(\delta_i - \rho)}{P_{Fi} + P_{Ai}e_{0i}} \right\}^{1-\gamma} \quad (22)$$

$$\frac{Q_2}{K_2} = \varpi_2 k_2^{1-\gamma} = [(1-\alpha_2)(1-\beta_2)(1-\eta)] \left(\frac{1-\gamma}{\gamma} \right)^{1-\gamma} \left\{ \frac{P_{I2}(\delta_2 - \rho)}{P_{F2} + P_{A2}e_{02}} \right\}^{1-\gamma} \quad (23)$$

$$\frac{Q_3}{K_3} = \varpi_3 k_3^{1-\gamma} = \left(\frac{1-\gamma}{\gamma} \right)^{1-\gamma} \left[\frac{P_{I3}(\delta_3 - \rho)}{P_{F3} + P_{A3}e_{03}} \right]^{1-\gamma} \quad (24)$$

透過式(22)~式(24)，可以推估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（ γ ）、水資源設施投資淨折舊成本（ $P_{Ii}(\delta_i - \rho)$ ）、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（ α_i ）、氣候變遷影響導致可收集量減少的比例（ β_i ）、環保基流量比例（ μ ）、地下水安全出水量比例（ η ）等因素影響。

III、最適水資源供給組合案例分析—澎湖地區

3.1 模型相關資料彙整與參數設定

為推估澎湖地區之最適水資源供給組合，本研究蒐集彙整模型所需的現地資料並設定部分參數的可能情境，其中水資源技術參數（ γ ）設定為 0.5，其他參數如以下說明：

3.1.1 研究年期

本研究以 2031 年為最終期，為了解水資源配置隨時間的可能變化，另以 2021、2023、2026 年為研究年期。

3.1.2 原水成本（ P_{Fi} ）

根據台灣自來水公司（2006；2011；2015）、陳俊仲（2010）及宮天民

(2015；2016)，本研究整理澎湖地區湖庫水、地下水及海淡水 3 種水源的原水成本如下：

湖庫水：11.91 元/立方公尺

地下水：14.33 元/立方公尺

海淡水：41.47 元/立方公尺

其中地下水因來自深水井，故較湖庫水多出額外的動力費用，海淡水需透過 RO 逆滲透淡化海水，所需成本較高。綜合而言，澎湖地區各種水源的單位原水投入成本，均較自來水價來的高，故台灣自來水公司於澎湖地區長年處於虧損的狀態。

3.1.3 碳排放係數 (e_{oi})

過去經濟部水利署曾針對水庫的水資源工程溫室氣體排放量進行評估(黃琬淇, 2013)，在該報告中針對翡翠水庫、鯉魚潭水庫、曾文水庫及南化水庫等 4 座案例水庫，進行兩年度碳排放活動量調查與碳排放量及碳足跡評估，供水碳足跡介於為 2.0~24.4 kgCO_{2e}/m³ 之間，顯示在不同區域的水資源工程，碳排放量差異可達 10 倍。另范景雯(2012)以投入產出生命週期評估探討自來水供水系統之碳足跡，在該研究中金門海淡廠的評估結果顯示，產品生命週期之溫室氣體排放量約 9.6 kgCO_{2e}/m³，另豐原給水廠產品生命週期之溫室氣體排放量約 0.19 kgCO_{2e}/m³。就相關文獻的評估成果來看，台灣水資源設施的碳足跡計算尚未完整，缺乏以地下水為原水來源的評估，且碳足跡受到水資源設施規模、區域位置及採用技術不同等因子影響，僅能呈現個案調查的結果，無法透過特定公用係數，推估其他類似水資源設施的碳足跡。

目前台灣自來水公司公告的產品碳足跡，以單位供水 CO₂ 排放量的方式來呈現，其公式為：(總用電產生的 CO₂ 量+總用油產生的 CO₂ 量)/總供水量。雖其未能完整呈現產品生命週期的碳足跡，但在不同水資源設施的碳足跡計算上，此公式所需資料較容易取得，亦可作為比較分析的基礎。故本研

究根據此公式，彙整台灣自來水公司「澎湖營運所盈虧分析」（台灣自來水公司，2011）中的動力費用與各水源供水量資料，換算澎湖地區 3 種水源的碳排放係數如下：

湖庫水：0.610 kgCO_{2e}/m³

地下水：1.012 kgCO_{2e}/m³

海淡水：2.286 kgCO_{2e}/m³

3.1.4 淨折舊費用

彙整台灣自來水公司「澎湖營運所盈虧分析」（台灣自來水公司，2006；2011）的資料，各產水技術淨折舊費用計算結果如下：

湖庫水：47,278 元

地下水：56,923 元

海淡水：191,604 元

3.1.5 水文條件參數設定

根據宮天民（2015），澎湖地區水資源利用架構如圖 2 所示。澎湖地區水資源主要包括地表水及地下水資源，地表水及地下水資源均來自降雨，故透過雨量資料及土地利用型態即可推估年總降雨量及年總逕流量，再依據水利署水利規劃試驗所「澎湖地區地下水整體保育策略規劃」（黃彥禎，2012）所建立的地下水水平衡模式，可推估年總入滲量及補注量。

經計算，年降雨量約 12,017 萬立方公尺，其中有 45% 蒸發、46% 逕流和 9% 入滲。由於湖庫為靜止水體且無遮蔽物，因日照產生的蒸發量更大，約達 60% 左右，故降雨無法轉換為湖庫水之比例設定為 60%。在地下水部分，根據上述研究報告之分析，年總入滲量中，約有 43% 的水由邊界流出，即雖其進入地下含水層，但無法被加以利用，故以此數值代表降雨無法轉化為地下水的比例。

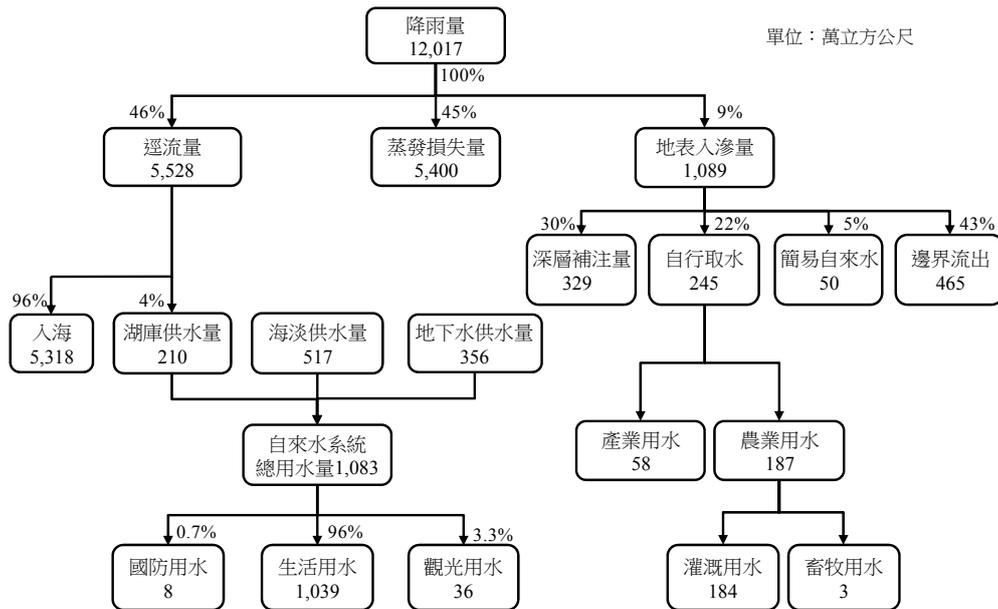
故式(22)~式(24)中，各水源產水容量因子 ω_{it} 之水文條件參數假設如下：

3.1.6 湖庫水

- (1) 無法轉換為湖庫水比例 (α_1) : 60% (蒸發與入滲)
- (2) 環保基流量比例 (μ) : 0 (澎湖無河川)

3.1.7 地下水

- (1) 無法轉換為地下水比例 (α_2) : 43% (邊界流出)
- (2) 地下水涵養比例 (η)



資料來源：宮天民，2015。

圖 2 2013 澎湖地區天然水資源利用架構

根據宮天民 (2015)，澎湖地區在豐、平及枯水年之地下水供水能力如表 1 所示。另依照黃彥禎 (2016) 之分析，由於澎湖地區地下水鹽化問題嚴

重，在滿足民眾用水需求的前提下，應盡可能降低對於地下水的依賴，達到保育地下水的目標，並將其定位為緊急情況時之備援水源。配合澎湖地區的地下水保育目標，本研究假設自 2021 年起至 2031 年，逐步減少地下水使用量，並以枯水年地下水安全出水量 117 萬立方公尺，作為目標年 2031 年時的地下水抽水量上限，對照近三年地下水供水能力，地下水涵養比例（ η ）約為 64%，故於 2021、2023、2026、2031 年等 4 個研究年期，假設 η 分別為：16%、32%、48%及 64%。

表 1 澎湖地區豐、平、枯水年地下水安全出水量

單位：萬立方公尺

區域	豐水年	平水年	枯水年
馬公白沙	432	222	62
西嶼	149	89	43
望安	13	9	6
七美	7	5	3
吉貝	8	5	3
合計	609	329	117

資料來源：宮天民，2015。

3.2 氣候變遷參數情境設定

IPCC 公布的第四版科學報告（IPCC，2013），揭示過去 100 年的氣候變遷現況，與未來 100 年在暖化效應持續的情況下可能的衝擊影響後，科技部（前國家科學委員會）即積極推動本土化的氣候變遷推估與衝擊研究，包括統計與動力降尺度的模擬與應用、水文與農業所需之日資料和時資料的繁衍與工具模組化等。根據林李耀（2016）的研究成果，配合 IPCC 科學報告，氣候變遷對於台灣水資源的影響與衝擊，在近未來時期（2016-2035），月降

雨改變率約介於-20~-30%之間。在不同的代表濃度途徑(Representative Concentration Pathways, 以下簡稱 RCPs)中各月差異不大。然而在世紀末時期(2081-2100), RCP8.5 的改變率約-50%, 而 RCP4.5 則是介於-30%之間。另由單情境(RCP8.5)的時序變化模擬來看, 2021-2041 的年平均雨量最大改變率為 75.74%, 最小為-38.78%。

本研究目的在找出最適水資源供給組合, 故在氣候變遷情境設定上, 以 RCP8.5 的條件, 模擬雨量受氣候變遷影響而減少, 作為氣候變遷情境。在 2021、2023、2026、2031 年等 4 個研究年期, 本研究假設氣候變遷影響, 導致可收集量減少的比例(β_i)逐步增加, 分別為: 20%、22%、25%及 30%。彙整「水文條件參數」以及「氣候變遷情境參數」之設定, 如表 2 所示, 後續將據以計算各水源之最適配置比例。

表 2 水文條件與氣候變遷情境設定

參數項目	參數係數	2021 年	2023 年	2026 年	2031 年
水文條件	α_1	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%
	α_2	43.0%	43.0%	43.0%	43.0%
	μ	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	η	16.0%	32.0%	48.0%	64.0%
氣候變遷	β_1	20.0%	22.0%	25.0%	30.0%
	β_2	20.0%	22.0%	25.0%	30.0%

資料來源: 本研究。

3.3 供水量及碳排放目標設定

3.3.1 供水量目標設定

根據宮天民(2015)之水資源供需情勢分析, 澎湖地區於研究年期 2021、2023、2026、2031 之用水需求, 分別為 1,107、1,106、1,104、1,100

萬立方公尺/年。雖然人口與觀光人數持續上升，但預期自來水系統之抄見率將有所提升（即漏水率下降），故總供水量呈現略微下降的趨勢。

3.3.2 碳排放目標設定

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。另經濟部能源局提出之「建置澎湖低碳島專案計畫」（經濟部能源局，2011），規劃五大推動面向，包括再生能源、節約能源、綠色運輸、綠建築及資源循環等，打造澎湖成為低碳觀光示範島。其中資源循環之目標包括水資源充分利用、垃圾減廢及有機再生運用等，亦無針對水資源減排提出具體目標。由於水資源部門非主要碳排放部門，本研究參考澎湖低碳島計畫的規劃精神，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。彙整黃彥禎（2016）資料，配合前述原水碳排放係數推估結果，本研究計算澎湖地區 2015 年自來水系統產水量及碳排放量如表 3 所示。其中年總供水量約 1,078 萬立方公尺，碳排放量約 1,785 萬 kgCO_{2e}，平均單位供水排碳量約為 1.66 kgCO_{2e}/m³。

表 3 2015 年澎湖地區供水量及碳排放量彙整表

水源別	湖庫水	地下水	海淡水	合計
供水量 (m ³)	1,725,355	3,056,145	5,996,585	10,778,085
供水比例	16.0%	28.4%	55.6%	100.0%
排放係數 (kgCO _{2e} /m ³)	0.610	1.012	2.286	-
碳排放量 (kgCO _{2e})	1,053,274	3,092,049	13,709,632	17,854,956
平均單位供水排碳量 (kgCO _{2e} /m ³)	1.66			

資料來源：黃彥禎（2016），本研究彙整計算。

若假設於研究年期中，各水源供水之比例均與 2015 年相同，則依平均單位供水排碳量，可分別計算各研究年期的碳排放總量，作為一切如常 (business-as-usual, 以下簡稱 BAU) 情境，如表 4 所示。由於供水量逐年下降，碳排放總量亦逐年減少，符合本研究設定。若未來因不同水資源配比而導致碳排放量增加時，則需透過額外的減排活動 ($A_i > 0$) 來達成，此將改變各水源的最適配比。

表 4 各研究年期澎湖地區供水量及碳排放量彙整表

研究年期	供水量	BAU (kgCO _{2e})
2021 年	11,074,830	18,346,543
2023 年	11,059,353	18,320,904
2026 年	11,037,235	18,284,263
2031 年	11,000,005	18,222,588

資料來源：本研究。

3.4 澎湖地區最適水資源供給組合規劃

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(22)~式(24)計算各水源最適配比，如表 5 及圖 3 所示。無論由現況或未來情勢來看，海淡水已成為澎湖地區最主要的供給水源，其最適占比自 2021 年的 60.55%，逐步上升至 2031 年的 71.81%。在供水量部分，海淡廠 2031 年時應有 789.8 萬立方公尺/年 (21,638CMD) 的供水能力。且隨著海淡水占比增加，提升產水及減碳成本，導致供水成本逐年增加，至 2031 年，單位供水成本增加為 33.40 元/立方公尺。

表 5 澎湖地區最適水資源供給組合及碳排放量彙整表

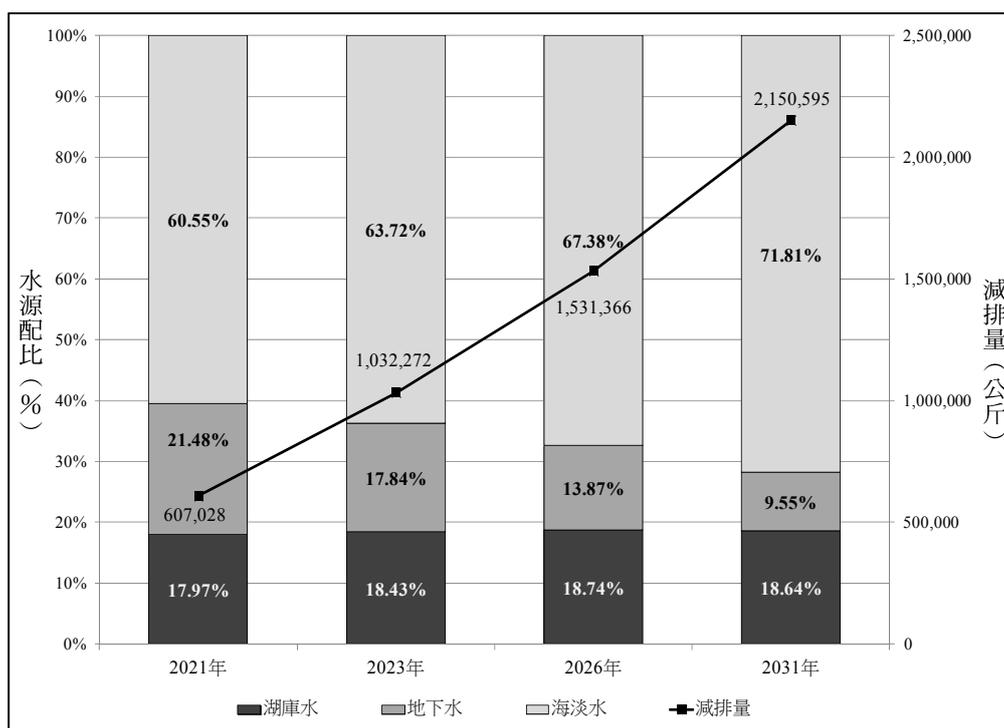
項目	水源別	2021 年	2023 年	2026 年	2031 年
供水量 (m ³)	湖庫水	1,989,814	2,038,788	2,068,820	2,050,664
	地下水	2,378,732	1,973,035	1,531,017	1,050,633
	海淡水	6,706,284	7,047,531	7,437,398	7,898,708
	小計	11,074,830	11,059,353	11,037,235	11,000,005
供水比例 (%)	湖庫水	17.97%	18.43%	18.74%	18.64%
	地下水	21.48%	17.84%	13.87%	9.55%
	海淡水	60.55%	63.72%	67.38%	71.81%
	小計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
排碳量 (kgCO _{2e})		18,346,543	18,320,904	18,284,263	18,222,588
減排量 (kgCO _{2e})		607,028	1,032,272	1,531,366	2,150,595
單位產水成本 (元/m ³)		30.33	31.18	32.16	33.37
單位減排成本 (元/m ³)		0.009	0.016	0.024	0.087
單位成本 (元/m³)		30.34	31.19	32.19	33.40

資料來源：本研究。

本研究政策意含指出，目前澎湖地區海淡廠之設計供水能力約 17,350 CMD，預計 2018 年 5 月底在馬公第二海水淡化廠完工後，總供水能力將增加為 21,350CMD，已相當接近本研究推估的最適海淡水供水規模，但為確保長期供水穩定，仍建議投資興建（或更新）海水淡化廠。另，地下水之最適占比受氣候變遷及地下水保育目標的影響逐年降低，自 2021 年的 21.48% 降至 2031 年的 9.55%，供水量減少至 105 萬立方公尺，約為枯水年安全出水量的 90%，符合地下水保育目標。湖庫水亦受到氣候變遷影響，但在地下水佔比逐年降低而海淡水成本偏高的情況下，其學理上的最適佔比約維持在 18% 左右，供水量約 200 萬立方公尺（5,479CMD），根據宮天民（2015）的計算，此供水量約為澎湖地區湖庫水供水能力的 94% 左右。

在排碳量部分，因海淡廠供水碳排放係數最高，因此 2021-2031 年在海淡水佔比增加的情況下，總排碳量均大於 BAU 情境，無法由其他水源占比

的改變來達成，需透過額外的減碳措施來達成，如購買碳權來抵換 (offset)。根據計算結果，若要滿足 BAU 排放情境的限制，2021、2023、2026 及 2031 年分別要減少 60.7 萬、103.2 萬、153.1 萬及 215.1 萬 kgCO₂ 排放。本研究假設以購買碳權的方式，每噸 CO₂ 價格參考歐盟碳交易價格，設定為 5 歐元，則由式(22)~式(24)，因 $P_{Ai} > 0$ ，各水源配比因而改變，且單位成本需將購買碳權的費用加入。經計算，2021、2023、2026 及 2031 年單位成本分別為 30.34、31.19、32.19 及 33.40 元/m³，有逐年上升的趨勢。另，本研究將單位成本分解為產水及減碳兩部分來看，以單位產水成本為主要成本來源，減碳成本在碳權價格偏低的情況下，所占比例較低，隨著未來各研究年期海淡水所佔比例增加，單位減排成本亦逐年上升。



資料來源：本研究。

圖 3 2021~2031 年澎湖地區最適水資源配比趨勢圖

3.5 水文及氣候變遷參數敏感性分析

本研究模型中，水文參數包括無法轉換為湖庫水比例（ α_1 ）、環保基流量比例（ μ ）、無法轉換為地下水比例（ α_2 ）及地下水需保留水量比例（ η ）等，其中澎湖地區無河川，環保基流量為 0；地下水需保留水量比例係根據其地下水保育目標設定，亦不會變動。因此，在水文條件參數中可能有變化者，僅有無法轉換為湖庫水及無法轉換為地下水之比例。此外，就物理特性來看，地下水系統難以透過工程的手段改變其入滲與出流行為，故無探討其參數敏感性之意義。反之，湖庫可能因淤積或污染等問題減少可利用的比例，但亦可能透過人工方式減少蒸發量，提升可利用比例，故本研究 3.4 節以 $\alpha_1=0.6$ 探討最適水資源供給組合，此處則分別以 $\alpha_1=0.5$ 及 $\alpha_1=0.7$ 來計算湖庫水文條件參數變化下之最適水資源供給組合。

表 6 各研究年期不同湖庫水文參數下之最適水資源供給組合及單位成本

$\alpha_1=0.5$				
水源別	2021 年	2023 年	2026 年	2031 年
湖庫水	21.49%	22.03%	22.38%	22.27%
地下水	20.56%	17.05%	13.25%	9.13%
海淡水	57.95%	60.92%	64.37%	68.61%
小計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
單位成本（元/m³）	29.54	30.34	31.27	32.44
$\alpha_1=0.7$				
水源別	2021 年	2023 年	2026 年	2031 年
湖庫水	14.11%	14.49%	14.75%	14.67%
地下水	22.49%	18.70%	14.55%	10.02%
海淡水	63.40%	66.80%	70.70%	75.32%
小計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
單位成本（元/m³）	31.21	32.13	33.19	34.46

資料來源：本研究。

由計算結果可知，當無法轉換湖庫水比例下降時 ($\alpha_1=0.5$)，各研究年期湖庫水使用比例即隨之增加，而地下水及海淡水所佔比例同時下降。此結果亦符合本研究模型之設定，由於湖庫水產水成本較低，在可利用比例增加的情況下，最適供給比例亦同時上升。另海淡水成本較地下水來的高，在此情境下海淡水的最適供給比例下降幅度，亦較地下水來的多，整體而言單位成本下降。反之，若無法轉換湖庫水比例增加時 ($\alpha_1=0.7$)，地下水及海淡水供給量均增加，其中又以海淡水增加量較多，且單位成本上升。

為進一步評估不同氣候變遷情境下，對水資源最適佔比的影響，本研究設定不同的氣候變遷參數 β_i ，並代入式(22)~式(24)中，計算在目標年 2031 年時，3 種水資源各自之最適佔比，在本研究中假設，2031 年之氣候變遷影響參數由 0% 到 50%，其計算結果如表 6 所示。由不同情境下的海淡水供水比例以及平均供水成本來看，湖庫水及地下水因氣候變遷影響，最適佔比下降。海淡水部分則是逐步上升。比較供水比例差異，在氣候變遷影響由 0% 增加至 10% 時，海淡水供水比例需增加 3.73%，若氣候變遷影響增加至 50% 時，海淡水供水量比例需增加 21.90%。在減排量部分，對比 BAU 情境，在 0% 氣候變遷影響下，需減排約 84 萬公斤 CO_{2e}，但在 50% 影響比例下，需減排約 322 萬公斤 CO_{2e}，約增加 3.8 倍。

由永續水資源經營的角度，若僅由水資源供給面來評估，為滿足水資源安全，在氣候變遷影響下，澎湖地區僅能透過投資興建海淡廠來達成，然而所需付出的代價是增加民眾（或國家補貼）用水負擔，且對環境造成更多衝擊（排碳），故未來應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（Environmental Protection Agency，以下簡稱 EPA）推動之綠色基礎建設（Green Infrastructure）工法等，方能真正達成水資源的永續經營。

表 7 2031 年不同氣候變遷參數之最適水資源供給組合

2031 年	氣候變遷 參數	0%	10%	20%	30% ¹	40%	50%
供水量	湖庫水	2,613,707	2,440,017	2,252,878	2,050,664	1,831,478	1,593,088
	地下水	1,339,101	1,250,113	1,154,234	1,050,633	938,335	816,199
	海淡水	7,047,198	7,309,875	7,592,893	7,898,708	8,230,192	8,590,717
供水比例	湖庫水	23.76%	22.18%	20.48%	18.64%	16.65%	14.48%
	地下水	12.17%	11.36%	10.49%	9.55%	8.53%	7.42%
	海淡水	64.07%	66.45%	69.03%	71.81%	74.82%	78.10%
差異比例	湖庫水	0.00%	-6.65%	-13.81%	-21.54%	-29.93%	-39.05%
	地下水	0.00%	-6.65%	-13.81%	-21.54%	-29.93%	-39.05%
	海淡水	0.00%	3.73%	7.74%	12.08%	16.79%	21.90%
減排量 (kgCO_{2e})		839,414	1,243,893	1,679,691	2,150,595	2,661,024	3,216,171
單位供水成本 (元/m³)		31.16	31.85	32.59	33.40	34.27	35.22

資料來源：本研究。

註 1：此情境為表 5 中 2031 年之氣候變遷參數設定。

3.6 碳排放量目標之敏感性分析

為了解碳排放量目標變動時，對於單位減排成本的影響，本研究設定四個排碳目標情境，分別為 BAU 減少 5%、10%、15%及 20%等，計算其對於成本之影響，如表 8 所示。在碳排放量 BAU 之設定中，以 2031 年為例，若要再額外減少 5% 碳排放，則單位減排成本將增加 42.5%，若要額外減少 20%，則單位減排成本將增加 170.1%。可知，隨著排碳目標趨嚴，單位減排成本遞增。

表 8 各研究年期不同碳排放目標下之單位減排成本

碳排放目標	單位：元/m ³			
	2021年	2023年	2026年	2031年
BAU	0.009	0.016	0.024	0.087
BAU 減少 5%	0.023	0.030	0.038	0.124
BAU 減少 10%	0.037	0.044	0.052	0.161
BAU 減少 15%	0.052	0.058	0.066	0.198
BAU 減少 20%	0.066	0.072	0.080	0.235

資料來源：本研究。

IV、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（ γ ）、水資源設施投資淨折舊成本（ $P_u(\delta_i - \rho)$ ）、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（ α_i ）、氣候變遷影響導致可收集量減少的比例（ β_i ）、環保基流量比例（ μ ）、地下水安全出水量比例（ η ）等因素影響。案例分析結果顯示，海淡水將成為澎湖地區最主要的供給水源，最適佔比逐年上升，也增加了單位成本及碳排放量，2031年最適佔比約 71.81%。地下水受氣候變遷及地下水保育目標的影響，最適佔比逐年降低。湖庫水雖受到氣候變遷影響，但在地下水佔比降低，海淡水成本偏高的情況下，最適佔比約維持在 18% 左右。

澎湖地區在高氣候變遷影響的情境下，受到水文條件與地下水保育的限制，僅能透過增建海淡廠來因應，將造成供水成本及碳排放量將隨之上升，除增加民眾（或國家補貼）用水負擔外，亦對環境造成更多衝擊（排碳），建議未來應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 EPA 推動之綠色基礎設施規劃等方式，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。

投稿日期：2017 年 9 月 12 日

接受日期：2017 年 12 月 26 日

附註

1. IPCC 於 1988 年由聯合國環境規劃署及世界氣象組織共同設立，隨後於 1989 年發佈第一版科學評估報告 (AR 1)，往後平均每 6 年發佈新版本的科學評估報告，至 2014 年發佈第 5 版科學評估報告。
2. 聯合國於 2015 年提出 17 項永續發展目標，其中，第六項為水資源永續發展目標。
3. 為達到上述目標，預估全球開發中國家的水資源投資總額需達到 1,140 億美元 (Oliver、Mazza & Wang, 2016)。
4. 台灣年平均降雨量約 2,467mm，為世界平均值 973mm 的 2.6 倍，但因地狹人稠，每人每年可分配雨量僅約 4,074 立方公尺，不及世界平均值 21,796 立方公尺的五分之一 (楊偉甫, 2010)。
5. 例如地面水 (包括河川水及水庫水) 最易受到氣候變遷影響；海淡水地下水最具氣候韌性，然而，成本及碳足跡較高；地下水應成為備用水，作為缺水時期的主要取水來源。
6. 澎湖地區，在水資源供給面上受水文、地形等限制，水庫可收集水量非常有限，加上蒸發量大，需配合地下水或海水淡化廠方可滿足用水需求，但地下水因長期抽用，導致水位下降及水質鹽化，海水淡化廠則非常耗能且成本高，故各水源在使用上均有其限制。
7. 依照我國「再生水資源發展條例」第七條規定：再生水不得供作直接食用及食品業、藥品業之用水。再生水水質標準、使用限制及應遵行事項，由中央主管機關定之；各標的用水之目的事業主管機關定有水質標準者，其供作該標的使用之再生水，應符合該標準。
8. 本研究產水容量因子之定義為設施實際產水量/設計產水量 (%)。

參考文獻

- 台灣自來水公司，2006。『澎湖營運所盈虧分析』。台中：台灣自來水公司。
- 台灣自來水公司，2011。『澎湖營運所盈虧分析』。台中：台灣自來水公司。
- 台灣自來水公司，2015。『台灣自來水事業統計年報』，38期。台中：台灣自來水公司。
- 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）』。台北：行政院環境保護署。
- 林李耀，2016。「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置第二期(3/3)」。科技部。MOST104-2621-M-865-001，國家災害防救科技中心。
- 范景雯，2012。「以投入產出生命週期評估探討台灣自來水供水系統之碳足跡」。碩士論文，國立臺北科技大學環境工程與管理研究所。
- 宮天民，2015。「離島區域家戶二元供水系統推動計畫規劃—澎湖地區」。經濟部水利署水利規劃試驗所。MOEAWRA1040159。象騰顧問有限公司。
- 宮天民，2016。「離島家戶二元供水系統推動計畫—澎湖地區二元供水示範及海水沖廁試辦規劃」。經濟部水利署水利規劃試驗所。MOEAWRA1050365。象騰顧問有限公司。
- 許晃雄、陳英婷，2017。「東亞鋒面活躍度的變遷」，發表於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。台北：台灣大學。1月18日。
- 陳俊仲，2010。「離島地區中長程供水檢討規劃」。經濟部水利署水利規劃試驗所。MOEAWRA0990193。能邦科技顧問股份有限公司。
- 黃彥禎，2012。「澎湖地區地下水整體保育策略規劃」。經濟部水利署水利規劃試驗所。MOEAWRA1010349。能邦科技顧問股份有限公司。
- 黃彥禎，2016。「澎湖地區水資源整體規劃檢討—地下水經理規劃(1)」。經濟部水利署水利規劃試驗所。MOEAWRA1050340。象騰顧問有限公司。
- 黃琬淇，2013。「水庫系統碳足跡與水資源工程溫室氣體排放量評估總報告書」。經濟部水利署水利規劃試驗所。MOEAWRA1020129。中興工程顧問股份有限公司。
- 經濟部能源局，2011。『建置澎湖低碳島專案計畫』。台北：經濟部能源局。

- 楊偉甫, 2010。「台灣地區水資源利用現況與未來發展問題」, 發表於用水合理化及新生水水源開發論壇。台北市: 台北福華國際文教會館貴賓廳。10月15日。
- 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」, 發表於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。台北: 台灣大學。1月18日。
- Borgomeo, E., M. Mortazavi-Naeini, J. W. Hall, M. J. O'Sullivan, and T. Watson, 2016. "Trading-Off Tolerable Risk with Climate Change Adaptation Costs in Water Supply Systems," *Water Resources Research*. 52(2): 622-643.
- Dessai, S. and M. Hulme, 2007. "Assessing the Robustness of Adaptation Decisions to Climate Change Uncertainties: A Case Study on Water Resources Management in the East of England," *Global Environmental Change*. 17(1): 59-72.
- Harou, J. J., M. Pulido-Velazquez, D. E. Rosenberg, J. Medellín-Azuara, J. R. Lund, and R. E. Howitt, 2009. "Hydro-Economic Models: Concepts, Design, Applications, and Future Prospects," *Journal of Hydrology*. 375(3-4): 627-643.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Switzerland: IPCC.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Switzerland: IPCC.
- Kundzewicz, Z. W., L. J. Mata, N. W. Arnell, P. Döll, B. Jimenez, K. Miller, T. Oki, Z. Şen, and I. Shiklomanov, 2008. "The Implications of Projected Climate Change for Freshwater Resources and Their Management," *Hydrological Science Journal*. 53(1): 3-10.
- Mulangu, F. and D. Kraybill, 2015. "A Cost-Benefit Analysis of Improved Irrigation when Faced with the Risks of Climate Change on Mount Kilimanjaro," *Water Resources and Economic*. 10: 31-44.
- Oliver, Pdraig, Federico Mazza, and David Wang, 2016. *Water Financing Facility: Lab Instrument Analysis*. The Lab: The Global Innovation Lab for Climate Finance. 取自 <http://climatefinancelab.org/wp-content/uploads/2016/01/160623-Lab-WFF-Report.pdf>.
- Pahl-Wostl, C., 2007. "Transitions Towards Adaptive Management of Water Facing Climate and Global Change," *Water Resources Management*. 21(1): 49-62.
- Vörösmarty, C. J., P. Green, J. Salisbury, and R. B. Lammers, 2000. "Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth," *Science*.

289(5477): 284-288.

Xu, C., 2000. "Modelling the Effects of Climate Change on Water Resources in Central Sweden," *Water Resources Management*. 14(3): 177-189.

The Study of Optimal Water Supply Portfolio for Climate Change Impact in Taiwan – The Case Study of Penghu Area

Yen-Chen Huang^{*}, Chien-Ming Lee^{**}

Water Security has become a priority adaptive policy and is used to measure the response of climate change around the world. This is an opportunity and a challenge to establish a climate resilience water supply portfolio for water security by Taiwan government. This study incorporated water production cost, intermittency cost, decarbonized cost, and available water from different sources under climate change, and applied optimal control theory to establish a cost effectiveness model to plan a long-term (2031) climate resilience water supply portfolio in Taiwan. Furthermore, this research uses Penghu area as an empirical case study of water supply portfolio in 2031. The results showed that the desalination water will become the major source of water supply which accounts for 71.81% water supply share in 2031. However, high share of desalination water will result in significant increase on unit water production cost and carbon footprint. Therefore, water demand management is also needed and recommended to sustain water resources in Penghu area.

Keywords: *Climate Change, Optimal Control, Water Supply Portfolio, Penghu Area*

* Yen-Chen Huang, Project manager of LotSoar Consultants Inc.

** Correspondence: Chien-Ming Lee, associate professor of Natural Resource Management Institute, National Taipei University, 151, University Rd., San Shia, Taipei 23741, Taiwan. Tel: (02)26748189#67335; Fax: (02)2503-9083; E-mail: cmlee@mail.nptu.edu.tw. The authors would like to acknowledge useful comments from two anonymous reviewers. All errors are solely the responsibility of the authors.