

# 城市水資源循環之動態生命週期評估模型

許桓瑜<sup>1</sup>、闕蓓德<sup>2</sup>

## 摘要

水資源是一個城市人口、經濟、社會發展之重要資源，城市供水與需水之平衡為城市水資源安全之重要管理目標，其中，水資源管理策略又與能源及環境影響關係密切，具備低耗能低衝擊之管理策略為各國關注之焦點。生命週期評估(Life cycle assessment, LCA)是良好之環境衝擊量化工具，可透過範疇界定、盤查、衝擊量化及結果闡釋，評價管理策略或處理技術之環境衝擊，然而傳統 LCA 方法多以平均值為系統之代表衝擊，忽略了策略或技術隨時間變動所造成之影響。本研究以系統動力學模型改良生命週期評估架構，建立動態生命週期評估方法(Dynamic life cycle assessment, DLCA)，以島嶼型區域(金門)之水資源系統為研究案例，建立該地區水資源供需模型，以相同功能單位(1 噸飲用水水質標準之產水)討論供水系統與污水處理系統中，淨水處理、海水淡化、境外引水、污水再生與污水處理設施，隨時間變動、管理策略施行對環境衝擊之影響。研究結果顯示，金門地區以境外引水之衝擊最低，其次為淨水處理，而水廠之供水穩定度為衝擊變化最主要之影響因素。DLCA 紀錄處理設施隨時間變化之資源使用及水處理效率，不僅可進一步提供管理策略之環境影響結果，亦避免了傳統 LCA 僅考量平均值之環境衝擊。

關鍵字：水資源管理、系統動力學、環境衝擊、政策分析

---

<sup>1</sup> 國立臺灣大學環境工程學研究所，博士生

<sup>2</sup> 國立臺灣大學環境工程學研究所，教授

## 1. 前言

城市水資源系統應能夠支援城市之社會經濟發展，且不影響當代與未來之供水服務要求(Willuweit and O' sullivan. 2013)，於永續發展之城市水資源管理目標之下，管理者應考慮更多元的供水選擇、廢水處理方案、以及其他可增加水資源之作法(雨水蒐集、污水再生、節水策略等)，許多城市嘗試採取上述措施作為新的供水策略(Mo et al. 2014)，其中，污水再生利用為近年來被特別關注之供水策略，因為污水再生來自於不可避免的污水排出，其水量大、穩定且污染負荷低之特性，使再生水成為不受氣候影響之替代水源，已被世界各國列為因應氣候變遷衝擊的有效調適策略，特別於小島型國如新加坡、日本，或地中海區域國家如義大利、西班牙、希臘等，逐漸將水再生利用規劃供作景觀、沖廁用水、消防用水、工業用水或作為乾旱時期的救急水源(Meneses et al. 2010)。

隨著上述之供水策略發展，儘管有多種解決方案，最重的仍是通盤的對於供給與需求進行分析，整合環境、社會、經濟各面向訊息，建立水資源管理系統，以提出最適當之城市供水策略。城市供水壓力與能源耗用強度之正相關趨勢，且具有溫室氣體排放衝擊風險(Lee et al., 2017)，水資源管理策略與能源及環境影響關係密切，隨著各種供水策略的開發，除了水資源供需問題之外，應同時考量其伴隨之環境問題，不管是供水、送水、污水處理階段，皆應避免環境衝擊轉移，因此，水資源管理策略之環境衝擊量化，為策略實施前之重要評估工作。

生命週期評估方法(Life cycle assessment, LCA)為良好之環境衝擊量化工具，Shiu et al. (2017)曾以此工具量化污水再生利用於城市和農業造成之環境影響，指出儘管水再生處理仍需耗用能源與資源，但是所產生之水再利用之價值，可取代其付出之環境衝擊。亦有相關研究從技術層面、污水處理廠營運層面、或是再生水供水方案之 LCA 討論(Ortiz et al. 2007, Muñoz et al. 2009, Zhang et al. 2010)。於此，傳統 LCA 面臨兩項挑戰，其一，從搖籃到墳墓的系統邊界，是否可以代表再生水循環再生之特性，其二，水處理設施於壽命，隨時間變動之影響、策略施行之影響，無法反應於傳統 LCA 結果中，將高估或低估其環境衝擊。

本研究以系統動力學模型改良生命週期評估架構，建立動態生命週期評估方法(Dynamic life cycle assessment, DLCA)，以島嶼型區域(金門)之水資源系統為研究案例，建立該地區水資源供需模型，討論供水系統與污水處理系統中，淨水、海水淡化、境外引水、污水再生與污水處理設施，隨時間變動、管理策略施行對環境衝擊之影響，比較 LCDA 與傳統 LCA 之差異，提出永續水資源管理之策略與建議。

## 2. 水資源系統之管理策略

### 2.1 金門區域島嶼特性

本研究以島嶼型區域金門為研究案例，該島嶼面積為 153.1 平方公里，儘管

平均降雨量為 1,047 公厘高於許多缺水國家，由於地形平坦加上島嶼面積小以及降雨不平均之因素，金門仍然是個缺水區域。過去，金門之水源主要來自於地下水(79%)，其次是湖庫水(19%)、和海水淡化(2%)，自 2018 年啟用了來自福建之境外引水，引水成為金門最主要之水源。

2015 年金門人口約 132,800 人，主要耗水為農業用水(43%)，民生用水約 29%(包含 3%之觀光用水)，其餘為工業及軍事用水。近年隨著污水再生技術發展，金門除了引水之外，亦積極規劃污水再生作為農業用水，由於金門主要之工業用水為高粱釀酒，其水質要求較高，故不使用再生水作為工業用水水源。

## 2.2 供水系統與污水處理系統規劃

由於金門缺水以及區域之島嶼型態，使該地區供水方式多元，現有之供水設施包含 3 座淨水廠(太湖淨水場、滎湖淨水場、紅山淨水場)，其中滎湖淨水場與海水淡化廠結合，缺水時協助海水淡化廠之供水；2018 年金門地區啟用來自福建之境外引水，金門地區供水設施與供水量詳述於 3.3 節。

金門地區之污水處理多以氧化深渠為處理方法，3.3 節將列出 5 座污水處理廠及其處理水量(金城污水處理廠、滎湖污水處理廠、太湖污水處理廠、擎天污水處理廠、東林污水處理廠)，其中金城污水處理廠已預計於 2019 年完成擴廠，提高污水處理量同時，也增加三級處理設施，供應再生水。

# 3. 研究方法

## 3.1 系統動力學模型

模型起源於 1961 年美國麻省理工學院，Forrester 教授應用回饋理論分析工業系統，1969 年後最著名之系統動力學應用於都市動態(Urban Dynamics)研究(劉子明，2010)。系統動力學模型與時間變化有連動關係，而水資源系統也是隨時間變化且非靜態系統，因此系統動力學是非常適合應用於水資源系統的研究方法，系統動力學應用於水資源管理已延伸出許多方向，大致上可歸納出區域分析、流域規劃、城市水資源管理、洪水、灌溉和標準純化程序等類別，這些研究逐步了解水資源及其管理之間的相互依存關係，另一方面可量化的社會和經濟因素，包含人口、就業、工業等等(Winz et al. 2008)，

本研究以 Vensim 模擬軟體進行模擬，建立流量變數(flow)、存量變數(stock)、回饋環路(feedback loop)，進行水資源供給與需求模擬。供給包含既有淨水廠、海水淡化廠、境外引水及污水再生，此外亦建立完整水處理系統所需之污水處理設施，需求端以民生用水、農業用水、工業用水建立人口、經濟與社會發展之需水變化，供水與需求之關係將影響水處理成本與環境衝擊結果，而影響水資源供給與需求之政策，系統之因果關係如圖 1 所示。

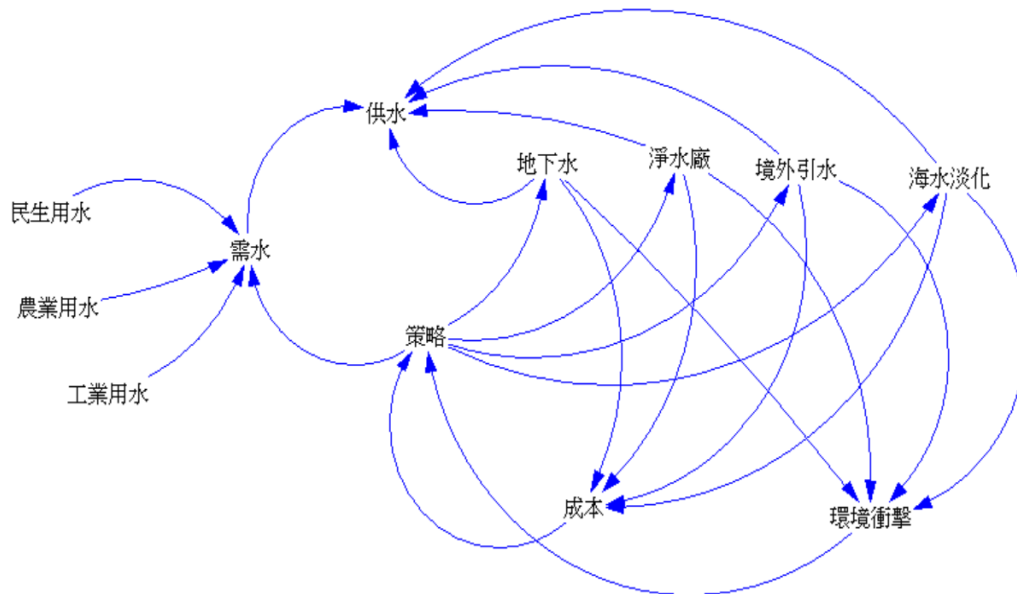


圖 1 供水策略對供水設備的影響因果關係圖

### 3.2 生命週期評估

生命週期評估方法為國際標準組織 (International Organization for Standardization, ISO) ISO14040 規範之分析方法，包含四步驟：目標及範疇界定 (Goal and Scope Definition)、盤查分析 (Life Cycle Inventory, LCI)、衝擊評估 (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)、結果闡釋 (Life Cycle Interpretation) (ISO, 2006)。本研究以 1 噸水作為功能單位，計算各個水處理設施所處理之水量所需之能源與資源，對環境造成之影響，使用 CML 2000 為衝擊評估方法，量化水處理設施之酸化、暖化、優養化等十種類別之環境衝擊。

本研究以傳統 LCA 方法以及本研究建立之動態 LCA 方法，初步以新建海水淡化廠為例，計算水處理設施之環境衝擊並分析衝擊結果之差異。於傳統 LCA 計算中，使用 2013 年之盤查數據為計算基準，DLCA 之盤查數據則建立於系統動力學模型中，詳述於 3.3 節。

### 3.3 供給與需求模型建構

金門地區供水系統可分為民生(居民、觀光、軍事)、農業、畜牧業、工商業等主要用水類別，資料蒐集之時間範疇為 1991 至 2012 年，共 22 年，並考量境外引水簽約之 20 年期限，往後推算至 2034 年。以下針對上述需水類別之用水量進行數據蒐集與分析：

#### 1. 供水與污水處理系統

##### (1) 地下水

金門部分地區地下水使用成本低且水質與水量穩定，金城淨水場之供水主要抽地下水，經鐵錳去除後使用，供水量約每日 9,700 公噸，金門酒廠也依賴地下水為主要水源，此外，民眾開鑿地下水井抽水，以彌補日益增加之農業、工業及民生用水標的用水不足。金門縣政府於 2012 年「金門地區地下

水資源之管理與運用策略」中分析地下水觀測井資料，指出合理抽水量約每日2.38萬噸，目前地下水的使用量約每日3.54萬噸，每年超抽1萬噸地下水。

#### (2) 淨水廠

金門地區共有太湖淨水場、榮湖淨水場、紅山淨水場等3座淨水場，太湖淨水場水源抽取太湖、陽明湖、田埔水庫等湖庫之水源處理及成功、瓊林共3口深井，設計每日出水量可達12,000公噸，目前每日出水量約為6,500公噸。榮湖淨水場水源抽取榮湖、金沙水庫、擎天水庫及山西蓄水塘等湖庫之水源，設計每日出水量為10,500公噸，目前每日出水量約為3,500公噸。紅山淨水場水源抽取蓮湖、菱湖、西湖等湖庫之水源處理供應。設計每日出水量為3,000公噸，目前每日出水量約為1,500公噸。

#### (3) 境外引水

金門2018年自福建引水，於金沙水庫西南側興建洋山淨水場，第一期淨水場設計每日出水量為25,000公噸，並且預留空間，未來可擴充至每日50,000公噸。目前引水方案簽約20年。

#### (4) 新建海水淡化廠

儘管自福建引水可提供穩定且足夠之水源，然而金門仍搭配新建海水淡化廠作為備援之配套方案，設計容量為每日20,000公噸。

#### (5) 再生水

以金城污水廠增加三級處理程序，將污水再生利用，目前再生水用於鄰近公園綠地澆灌，未來進一步提供於農業用水。行政院2013年核定「金門地區整體供水改善綱要計畫」之目標，期望可供水量約每日4,535公噸。

#### (6) 污水處理廠

金門地區共有金城污水處理廠(處理能量為3,000公噸)、太湖污水處理廠(3,000公噸)、榮湖污水處理廠(3,000公噸)、擎天污水處理廠(750公噸)、東林污水處理廠(435公噸)，共5座，其中金城污水處理廠實際處理量為4,500公噸，目前實施二期擴建工程，預定2019年完成達到每日5,000公噸之處理量。

## 2. 需水系統

### (1) 民生用水

本研究以金門縣政府統計資料庫，蒐集人口資料，包含出生、死亡、遷入、遷出人數以及上述項目之變動率以及觀光人口，軍事用水資料來自金門縣政府自來水統計年報，根據二期離島綜合建設實施方案之報告書中估算，金門地區之生活用水量為每人每日 0.2028 m<sup>3</sup>(每年 74 m<sup>3</sup>)，值得注意的是，據 2010 年行政院主計處之人口及住宅普查統計結果提要分析，金門縣戶籍人口 97,387、常住人口僅有 57,214 (58.75%)、幽靈人口有 40,173 (41.25%)。此報告亦估算觀光人次與觀光用水量，以平均每年 1,091,247 人、每人每年 0.48 m<sup>3</sup> 計算，旅客之計算不包含小三通之中轉台商。軍事用水則以平均值每年 1,514,896 噸水計算。

### (2) 農業用水

本研究以金門縣政府自來水統計年報，蒐集農業之種植面積及產量，包

含主要之雜糧作物(甘藷、花生、大麥、小麥、高粱、玉米)以及蔬菜，其中蔬菜之平均種植面積為 5%，平均之產量為 25%。本研究以水利署各項用水統計資料庫所提供之雜作單位面積用水量的歷年平均值，雜作每公頃平均用水  $9,723.8 \text{ m}^3$ ，作為水量估算。本研究以水利署資料庫推估之農業單位面積用水量，每年每公頃 2,195 噸。

### (3) 畜牧用水

本研究以金門縣政府自來水統計年報，蒐集家畜家禽數量，本研究僅考慮主要隻畜牧隻家畜與家禽，以豬(70.5%)、牛(12.9%)、雞(98.8%)、鴨(0.7%)作為代表。本研究以水利署各項用水統計資料庫所提供之畜牧頭數用水量的歷年平均值，豬、牛平均用水  $0.007 \text{ m}^3$ ，雞平均用水  $0.118 \text{ m}^3$ ，鴨平均用水  $0.294 \text{ m}^3$ ，作為水量估算。本研究以水利署資料庫推估之單位畜牧用水量，每頭豬每年 17.5 公噸，每頭牛每年 27.74 公噸，每隻雞、鴨每年 2.92 公噸。

### (4) 工商業用水

本研究以金門縣政府統計資料庫，蒐集金門地區製造業之產業面積，產業用水量，包含金屬製品製造業( $0.034 \text{ m}^3$ )、電子零組件製造業( $0.0625 \text{ m}^3$ )、食品製造業( $0.171 \text{ m}^3$ )、飲料製造業( $0.0855 \text{ m}^3$ )、印刷及其輔助業( $0.028 \text{ m}^3$ )、非金屬礦物製品製造業( $0.031 \text{ m}^3$ )，此六項類別為水利署工業用水統計中，金門地區主要之工業用水。2009 年至 2015 年資料來自於水利署工業用水統計之工業用水量與面積，其餘年份以金門統計年報中，金門地區製造業登記家數之成長率進行推估。

## 4. 結果與討論

金門地區為島嶼型城市，降雨稀少，加上地形限制使蓄水條件差，是一個水資源匱乏的地區。金門地區的供水來源主要為地下水，其次為集水區的湖庫水以及海水淡化。除了自然條件限制下的水資源匱乏，在金門地區觀光政策與人口成長所增加的水資源需求，使水資源供應壓力更大，水資源不夠時區域的地下水超抽，使地下水資源超出安全出水量，面臨地下水位漸降的問題，除了政府積極辦理湖庫水質改善及清淤工程，於 2015 年與福建供水公司簽訂境外引水契約，且已於 2018 年開始正式引水，此外，在供水規劃上，也新建海水淡化廠提供足夠的供水水量。

### 4.1 金門供水與需水之分析結果

本研究彙整金門地區供需水狀況，繪製供需平衡圖如圖 2 所示。金門地區最主要的用水量來自於農業，也因為農業需求，抽用地下水使金門地區的地下水水量漸減，進一步由供需平衡圖可觀察，於 2018 年以前，水資源不足時皆使用地下水補足，2018 年境外引水方案開始實行後，就是足夠的水量，使地下水的供應可以維持安全出水量。

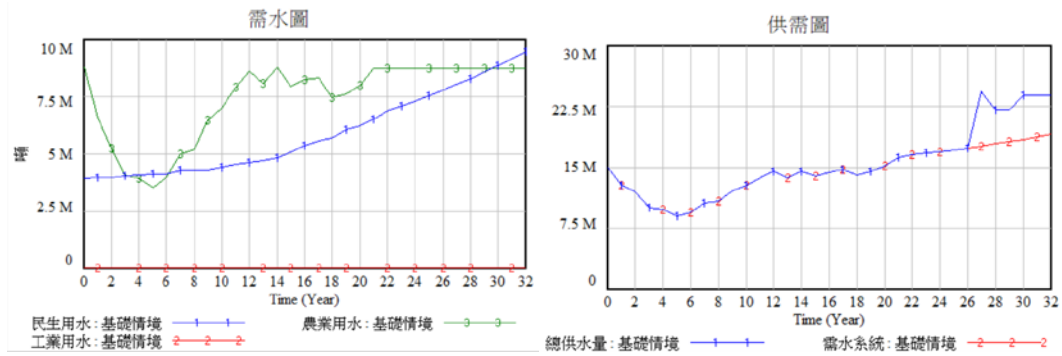


圖 2 民生、農業、工業之需水量及供水需水平衡圖

#### 4.2 金門供水系統之環境衝擊分析結果(以新建海水淡化廠為例)

本研究分別以傳統 LCA 方法及 DLCA 方法，對新建海水淡化廠之方案進行環境衝擊量化，如表 1、表 2 所示。當海水淡化廠順利達到建設規劃之供水目標時，其標準化之衝擊值為  $6.83E-12$ ，衝擊熱點為基礎建設之混凝土以及藥品使用。

在 DLCA 結果中，由於新建海水淡化廠之供水為最後順位，在境外引水的狀況下，海水淡化之供水量比預期低，造成水廠使用效率降低而衝擊上升之結果。

表 1 傳統 LCA 量化新建海水淡化廠方案之環境衝擊結果

總衝擊	濃水排放	鋼筋	混凝土	電力	混凝劑	液鹼	次氯酸鈉
$6.83E-12$	$5.29E-16$	$1.81E-15$	$4.49E-12$	$4.01E-15$	$1.38E-16$	$3.71E-16$	$2.33E-12$
100%	0.01%	0.03%	65.75%	0.06%	< 0.01%	0.01%	34.14%

表 2 DLCA 量化新建海水淡化廠方案之環境衝擊結果

總衝擊	濃水排放	鋼筋	混凝土	電力	混凝劑	液鹼	次氯酸鈉
$2.07E-11$	$5.29E-16$	$7.41E-15$	$1.84E-11$	$3.90E-15$	$1.38E-16$	$3.72E-16$	$2.33E-12$
100%	< 0.01%	0.04%	88.68%	0.02%	< 0.01%	< 0.01%	11.26%

## 5. 結論與建議

金門地區水廠之供水穩定度為衝擊變化最主要之影響因素，DLCA 紀錄處理設施隨時間變化之資源使用及水處理效率，不僅可進一步提供管理策略之環境影響結果，亦避免了傳統 LCA 高估或低估之環境衝擊。本研究初步以新建海水淡化廠之環境衝擊研究結果作為討論，未來可囊括所有供水與污水處理設施，系統性分析環境衝擊變化，提出相對應之供水、污水處理策略。

### 參考文獻

1. ISO (2006) ISO 14040:2006 Environmental management-Life cycle assessment Principles and Framework. Standardization.
2. Lee, M., Keller, A. A., Chiang, P. C., Den, W., Wang, H., Hou, C. H., Wang, X. Yan, J. (2017). Water-energy nexus for urban water systems: A comparative review on energy intensity and environmental impacts in relation to global water risks. *Appl. Energ.* 205, 589-601.
3. Meneses, M., Pasqualino, J.C. and Castells, F. (2010) Environmental assessment of urban wastewater reuse: Treatment alternatives and applications. *Chemosphere* 81(2), 266-272.
4. Mo, W., Wang, R. and Zimmerman, J.B. (2014) Energy–Water nexus analysis of enhanced water supply scenarios: A regional comparison of Tampa Bay, Florida, and San Diego, California. *Environ. Sci. Technol.* 48(10), 5883-5891.
5. Muñoz, I., Rodríguez, A., Rosal, R. and Fernández-Alba, A.R. (2009) Life Cycle Assessment of urban wastewater reuse with ozonation as tertiary treatment: A focus on toxicity-related impacts. *Sci. Total Environ.* 407(4), 1245-1256.
6. Ortiz, M., Raluy, R.G. and Serra, L. (2007) Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town. *Desalination* 204(1–3), 121-131.
7. Shiu, H.Y., Lee, M., Chiueh, P. T. (2017). Water reclamation and sludge recycling scenarios for sustainable resource management in a wastewater treatment plant in Kinmen islands, Taiwan. *J. Clean. Production*, 152(20), 369-378.
8. Winz, I., Brierley, G. and Trowsdale, S. (2008) The use of system dynamics simulation in water resources management. *Water Resources Manag.* 23(7), 1301-1323.
9. Willuweit, L., O’sullivan, J.J. (2013) A decision support tool for sustainable planning of urban water systems: presenting the dynamic urban water simulation model. *Water Res.* 47(15), 7206-7220.
10. Zhang, Q.H., Wang, X.C., Xiong, J.Q., Chen, R. and Cao, B. (2010) Application of life cycle assessment for an evaluation of wastewater treatment and reuse project – Case study of Xi’an, China. *Bioresource Technol.* 101(5), 1421-1425.
11. 劉子明 (2010) 氣候變遷對區域水資源衝擊評估整合系統之研究，國立台灣大學，博士論文
12. 金門縣政府(1999-2012)，自來水統計年報
13. 金門縣政府(2015)，二期離島綜合建設實施方案
14. 水利署，各項用水統計資料庫，<http://wuss.wra.gov.tw/annuals.aspx>