



建構水-糧食-能源智慧調控模式 之永續發展城市

張斐章／國立臺灣大學生物環境系統工程學系 教授

李孟信、黃安祺、邱普運／國立臺灣大學生物環境系統工程學系 博士班研究生

本研究係國際貝蒙論壇與科技部重點支持項目，跨界探究氣候環境和社會變化如何影響水-糧食-能源鏈結系統，以創新科學技術結合大數據分析，開發新穎人工智慧預測與優化模式、系統動態模式等管理工具，考量資源分配權衡及效益，提出新利基以達到消耗最少的水、提升能源和糧食生產的合宜解決方案，促進水-糧食-能源鏈結協同效益和提高全流域資源整體效益，協助政策制定符合社會和環境期望的永續經營管理策略，分享研究成果提升台灣學術國際影響力。

前言

水、糧食及能源（Water-food-energy, WFE）是維持生命與都市穩定發展最重要的自然資源。聯合國於「世界人口展望」中推估全球人口在 2050 年將升高至 98 億，而人口成長使水、能源、農業與運輸等部門間的資源競爭更加激烈，對人類生存與環境將帶來不可預測的影響^[1]。面臨需求不斷增加但資源供應有限，如何妥善管理水-糧食-能源鏈結（WFE Nexus），避免資源不當應用造成生態環境的衝擊，維持永續發展目標，是很重要的工作^[2,3]。此外，聯合國推測全球都市將會是資源的最大需求中心，面對都市化與氣候變遷的乾旱及水患風險，如何維繫都市的穩定成長，確保國家的經濟發展，提供都市糧食生產所需的水資源和能源的環境承載力與供應能力，係巨大的挑戰^[4-6]。由於自然資源相互依存鏈結之緊密關聯，創建智慧供應鏈之合宜管理工具，改善傳統供應與消費鏈結，提升資源整體效益，有其迫切性與重要性^[7-9]。聯合國相關

研究機構透過 WFE Nexus 的研究，希望能找出維持資源穩定並兼顧生態永續利用的都市發展解決方案；貝蒙論壇（Belmont Forum）致力推動跨學科的發展，通過國際跨學科研究，提供可普及且適應全球環境變化的知識（<http://www.belmontforum-most.url.tw/>），倡議國際合作計畫（Sustainable Urbanisation Global Initiative Food-Water-Energy Nexus (SUGI-FWE Nexus)），科技部重點支持該研究並為捐助國之一；吾等籌組研究團隊，成員囊括水資源經營管理（張斐章）、農糧政策技術（盧虎生）、能源環境管理（胡明哲、范致豪）、都市化發展（黃泰霖）等學者，於 2016 年起共同執行科技部水-糧食-能源鏈結跨領域整合型研究計畫，並攜手合作，由台灣主導（計畫總主持人，PI）與美、日、巴西等國學者共組國際研究團隊，以「智慧城市代謝系統面向未來綠色城市－Intelligent Urban Metabolic Systems for Green Cities of Tomorrow: an FWE Nexus-based Approach」為題，獲得該國際合作研究計畫，提昇台灣學術研究於國際的能見度與影響力。

為達成跨領域全方位解決都市化複雜且具高度不確定性的 WFE 鏈結問題，本研究整合國內及國際團隊資源，以都市代謝系統為基礎，進行廣泛且深入的交叉-互動-連結-整合研究，分析彼此相依程度建立鏈結關係，闡述各資源如何進入及排出城市，考量資源分配之權衡性及安全性，將資源做最佳分配與運用，確認都市代謝 (Urban Metabolism) 的關鍵因子，建立系統動態模型，進行衝擊性、脆弱度及風險評估，尋求資源間最佳分配及協同效益，提出整體資源競合的解決方案。本研究蒐集淡水河流域不同尺度之異質資料，依據各資源使用情況及供給需求，以跨領域系統動力模型為基礎，各資源為整體系統驅動核心，利用人工智慧、大數據、系統動力、生命週期評估等先進技術，建立各資源鏈結關係並解析供需的連動模式，深入探討都市化資源鏈結之動態關係，結合智慧多目標資源永續管理，針對有限自然資源進行有效的運用，提升 WFE 協同效益，模擬不同情境的資源供需情況，評估整體系統之承载力與回復力，進而提出整體解決方案，打造智慧綠色城市邁向永續綠色經濟與和諧安康社會，整體研究架構如圖 1。

主要研究成果

本研究透過整體策略思考及規劃，建立資料庫進行大數據分析，開發智慧優化模型，深入探討在確保滿足各個部門的用水需情況，尋求增加糧食產量與增加能源產量的最佳可行方案，透過情境分析掌握各資源於供應鏈中生產、分配、利用之動態變化及相互影響，研擬解

決策略，創建整合性 WFE nexus 之整體解決方案 [10,11]。因應全球對綠色能源的需求不斷增長以降低碳排放，立法院通過再生能源修正草案，確立 2025 年我國再生能源發電佔比達 20%，因此各種形式的綠電發展，皆有助於此一政策的發展。為有效管理資源以因應都市化趨勢，我們提出的整體解決方案，能促進綠色能源發展並結合到現有的供水系統中增加糧食產量，對城市化發展有深遠的影響，開發的工具與成果可分享推廣應用於全球關注之永續發展議題，有助於提升人類福祉及永續綠色經濟。針對水-糧食-能源鏈結於綠能發展的主要研究成果簡要說明如下：

聯合石門水庫和灌溉池塘的短期 / 長期聯合運行操作

台灣因山高水急，降雨集中颱風季節，水資源儲存不易且調配困難。石門水庫為一多功能水庫，依據水庫防洪操作數據，排出的棄水量相當大，往往導致水電資源的浪費 [6,12]；颱風帶來豐沛的雨量，對於水庫操作相當重要，最近研究顯示類神經網路可依颱風路徑提早兩天準確預測颱風之降雨雨量及全洪程，對水庫操作有極大助益 [13]。本研究以石門水庫和下游的 745 口灌溉池塘為研究案例，藉由水庫與灌溉池塘的短期 / 長期聯合運行結合以應對城市化，優化 WFE 的協同效益。分步實施：(1) 優化短期 (日規模) 水庫運行，實現颱風季節節水力發電和水庫最終蓄水量最大化；(2) 考慮非颱風季節農業灌溉池塘的多用性，模擬長期 (旬尺度) 缺水率；(3) 整合短期優化和長期模擬作業，從全年角度促

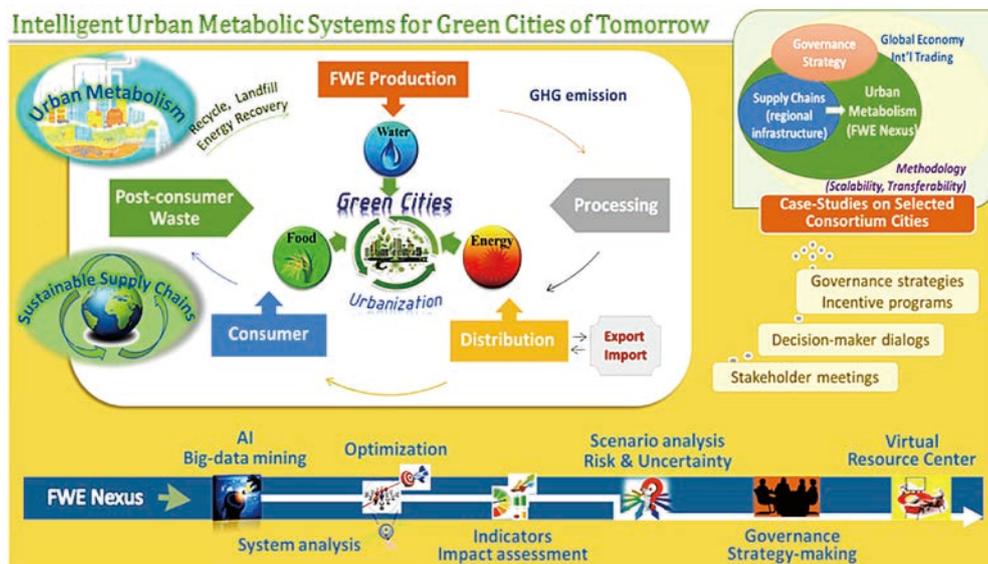


圖 1 貝蒙論壇之都市化水糧食能源跨領域研究架構

進 WFE Nexus 的協同效益。結果顯示，非支配排序遺傳算法 II (NSGA-II) 得到的最優短期水庫運行可以大幅提高水力電量，且供水僅有些微影響。水庫與灌溉池塘的聯合操作和不包括灌溉池塘的操作結果相比，聯合操作可以顯著降低農業和公共缺水率，平均分別為 22.2% 和 23.7%。而常年短長期聯合運行結果表明，缺水率最多可降低 10%，糧食生產率最高可提高 47%，水電效益最多可提高 933 萬美元 / 年（潮濕年份）。因此，本研究提議的水庫與灌溉池塘短期 / 長期聯合運行係促進 WFE Nexus 協同效益的有效可行方法，分析結果提供了科學根據，有助於利益相關者和政策制定者推動相關法案與執行策略，以尋求可持續的城市發展計劃^[6]。

小水電系統提供綠能絕佳機會

小型水力發電廠屬於低成本的可再生能源，對於環境的衝擊影響小，應對蓬勃的城市化發展，加入小型水力發電方案，能使系統運行產生深遠影響。本研究將 AI 技術應用於優化集水區現有供水系統和未來小（微）水電系統，模擬優化加入小水電安裝於石門水庫集水區，深入探討北部地區 WFE Nexus 的協同效益。研究結果指出，推導出的最優水資源配置不但可以大幅緩解缺水狀況，改善水庫蓄水；而且小水電安裝方案可以在不減少對需求部門供水的情況下增加水水力發電量。以 M-5 操作規律模擬為基準，對比結果顯示，配合小水電安裝協同下的多年聯合優化可為 WFE Nexus 帶來互惠互利的結果，大幅減輕每年水資源短缺指數高達 40.0%（水務部門），年均糧食產量提升高達 10.6%（糧食部門），水電年均產量提升 7.5%（1,700 萬美元 / 年；能源部門）。這項研究開闢了再生能源的新視角，為小水電實踐提出可行的戰略建議，並讓實踐安裝小水電方案有科學根據，有助於實現未來綠能源需要^[14]。

本研究計畫所提之小水力系統解決方案不僅提高綠色能源產量與穩定性，而且透過水庫操作提高供水效率和糧食生產產量，研擬的方法與成果方案提供有關小水力建置的政策建議，維持永續發展。台灣有高山及豐沛的雨量，從水庫、河川、渠道各階段，都有豐富水力發電可以利用，可惜長久以來小水力發電未受重視，如何善用豐富的水力資源，有很大努力的空間，台灣正處於能源轉型的過程，太陽光電及風力發電存在間歇性問題，無法全日全時發電，我們的研究成果說明加入小水力發電是有效可行解決方案，讓綠電（水風光電）互補，值得大力推廣。

魚塘上部署浮動光伏的潛力很大

不斷增長的能源需求和減少溫室氣體排放的壓力，導致全球太陽能顯著增加。浮動光伏（FPV）系統的發展為土地稀缺地區提供新的契機。本研究提出一個數學動態模型，模擬受 FPV 覆蓋的虱目魚（MILKFISH）池塘中的主要生化過程。根據在兩個生產季節（冬季和夏季）從有和沒有覆蓋 FPV 的池塘收集的實驗數據，以驗證該模型的真確性與合宜性，並用該動態模型對不同覆蓋程度的生態影響進行了蒙特卡羅模擬分析。結果顯示，在魚塘上安裝 FPV，對池塘的水質影響微小，僅造成溶解氧水平降低，對魚類產生些微的負面影響，惟能源方面的大幅收益（容量約為 1.13 兆瓦 / 公頃）彌補了魚類產量的損失。台灣約有 40,000 公頃的水產養殖池塘，若能於台灣魚塘部署 FPV，估計可容納的裝機容量是政府到 2025 年達到 20GW 太陽能發電目標的兩倍。這項研究開闢了再生能源的新視角，為魚塘上部署浮動光伏提出可行的戰略建議，並讓實踐 FPV 有科學根據，有助於相關部門更新有關 FPV 在魚塘中整合的法規，以充分發揮這種新綠色技術的潛力。

應用浮動光伏與水力發電互補方案促進水糧食能源協同效益

混合水力發電和浮動光伏發電對水、糧食、能源鏈結關係有深遠影響，但在水文氣象條件高度不確定的情況下，WFE 互補運行具有極大挑戰。本研究以石門水庫流域系統為案例，提出人工智慧的 WFE nexus 總體解決方案，由混合水力和浮動光伏發電驅動，促進 WFE nexus 協同效益；開發 Grasshopper 演算的多目標優化模型，以同時最大化水力和浮動光伏發電輸出、蓄水與水庫容量的比率，及供水與需水的比率。結果顯示 AI-based 優化模型可以顯著提高 WFE 協同效益，在蓄水、糧食生產和發電輸出方面分別達到 13%、13.3% 和 15.1%。這項研究擴大大綠色能源生產開闢了新的視角，同時促進 WFE 協同效益，減輕有關水文氣象不確定性對 WFE 關係管理的影響，讓決策者制定可行的浮動光伏部署計劃，以實現社會可持續性。

結論與未來展望

面對都市化、人口成長及有限的資源，本研究透過不同面向探討都市化下水、糧食、能源鏈結之議題，透過永續評估指標、系統動態模型、水資源優化、埤塘與

小水力等運用，有效分析整體水-糧食-能源鏈結之議題，整合水庫、圳路與埤塘系統，使水資源調配具有更多彈性並滿足需水標的，同時發揮綠能的潛力，研擬於埤塘系統建置太陽能板，開拓綠色能源，以提升整體環境之協同效益。此外，將資源以生命週期的概念拆解，以物質流分析結合大數據與資料探勘等技術，結合智慧水資源/綠色能源供需預測系統與調配系統模型，開發有效率及合宜應用各項資源的方案，作為資源管理決策的參考，協助政府推 WFE 資源管理政策，促進綠色經濟之永續發展；研究成果陸續發表於國際 SCI 頂尖期刊，提升台灣學術國際影響力。

未來我們將延續先前之研究成果，整合已開發機器學習技術及資通科技，深入且完整地探討都市化下水、糧食、能源鏈結之議題，主要努力方向將包括 (1) 資訊平台建置以提供研究使用、藉由資料分享機制能吸引不同領域的研究者進行跨領域合作研究，獲致更有效率的資源調配管理政策；(2) 開發「智慧農業資源管理系統」，整合農業技術、機器學習及資通技術至資源管理資訊平台，將水、能源、土地利用作更有效率的應用，降低生態衝擊；(3) 整合綠能系統，發展多目標生態養殖系統，妥善研擬輔導計畫，以促進台灣西部海岸養殖業產業昇級，增加水、糧食及能源的供應，並可為漁村再造，永續發展目標貢獻心力。

誌謝

感謝科技部補助本跨領域研究計畫 (MOST-107-2627-M-002-012, MOST 107-2621-M-002-004-MY3)；特別感謝台灣大學盧虎生院長、胡明哲教授、范致豪教授、周研來博士、蔡文炳博士、林恒玥、溫庭玄、成功大學黃泰霖助理教授及農業試驗所姚銘輝博士等於本計畫研究中的貢獻與協助。

參考文獻

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2014). The Water Energy Food Nexus: a New Approach in Support of Food Security and Sustainable Agriculture.
2. Chang, N.B., Hossain, U., Valencia, A., Qiu, J., and Kapucu, N. (2020). The role of food-energy-water nexus analyses in urban growth models for urban sustainability: A review of synergistic framework. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102486.
3. Helmstedt, K.J., Stokes-Draut, J.R., Larsen, A.E., and Potts, M.D. (2018). Innovating at the food, water, and energy interface. *Journal of Environmental Management*, 209, 17-22.
4. Broto, V. C., Allen, A., and Rapoport, E. (2012). Interdisciplinary perspectives on urban metabolism. *Journal of Industrial Ecology*,

- 16(6), 851-861.
5. Huang, L.C., Chen, Y.H., Chen, Y.H., Wang, C.F., and Hu, M.C. (2018). Food-Energy Interactive Tradeoff Analysis of Sustainable Urban Plant Factory Production Systems. *Sustainability*, 10(2), 446.
6. Uen, T.S., Chang, F.J., Zhou, Y.L., and Tsai, W.P. (2018). Exploring synergistic benefits of Water-Food-Energy Nexus through multi-objective reservoir optimization schemes. *Science of the Total Environment*, 633, 341-351.
7. Auerswald, P., Branscomb, L.M., La Porte, T.M., Michel-Kerjan, E., and MICHEL-KERJAN, E. R. M. A. N. N. (2005). The challenge of protecting critical infrastructure. *Issues in Science and Technology*, 22(1), 77-83.
8. Smajgl, A., Ward, J., and Pluschke, L. (2016). The water-food-energy Nexus-Realising a new paradigm. *Journal of Hydrology*, 533, 533-540.
9. Zhang, C., Chen, X., Li, Y., Ding, W., and Fu, G. (2018). Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies. *Journal of Cleaner Production*, 195, 625-639.
10. Chang, F.J., Wang, Y.C., and Tsai, W.P. (2016). Modelling intelligent water resources allocation for multi-users. *Water resources management*, 30(4), 1395-1413.
11. Chang, F. J. (2018). Optimizing Water Resource Allocation for Food and Energy Linkages under Urbanization. *Impact*, 2018(6), 20-22.
12. Tsai, W.P., Cheng, C.L., Uen, T.S., Zhou, Y. and Chang, F.J. (2019). Drought mitigation under urbanization through an intelligent water allocation system. *Agricultural water management*, 213, 87-96.
13. Chang, L.C., Chang, F.J., Yang, S.N., Tsai, F.E., Chang, T.H., and Herricks, E. E. (2020). Self-organizing maps of typhoon tracks allow for flood forecasts up to two days in advance. *Nature Communications*, 11, 1983.
14. Zhou, Y., Chang, L.C., Uen, T.S., Guo, S., Xu, C.Y. and Chang, F.J. (2019). Prospect for small-hydropower installation settled upon optimal water allocation: An action to stimulate synergies of water-food-energy nexus. *Applied Energy*, 238, 668-682.
15. Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., ... and Yumkella, K. K. (2011). Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, 39(12), 7896-7906.
16. Château, P.A., Wunderlich, R.F., Wang, T.W., Lai, H.T., Chen, C.C., and Chang, F.J. (2019). Mathematical modeling suggests high potential for the deployment of floating photovoltaic on fish ponds. *Science of the total environment*, 687, 654-666.
17. Cristiano, E., Deidda, R., and Viola, F. (2021). The role of green roofs in urban Water-Energy-Food-Ecosystem nexus: A review. *Science of the Total Environment*, 756, 143876.
18. Kao, I.F., Zhou, Y.L., Chang, L.C., and Chang, F.J. (2020). Exploring a Long Short-Term Memory based Encoder-Decoder framework for multi-step-ahead flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 583, 124631.
19. Kow, P.Y., Wang, Y.S., Zhou, Y.L., Kao, I.F., Issermann, M., Chang, L.C., and Chang, F. J. (2020). Seamless integration of convolutional and back-propagation neural networks for regional multi-step-ahead PM2.5 forecasting. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121285.
20. Yuan, M.H., Chiueh P.T., and Lo, S.L. (2021). Measuring urban food-energy-water nexus sustainability: Finding solutions for cities. *Science of the Total Environment*, 752, 141954.
21. Zhou, Y.L., Chang, F.J., Chang, L.C., Lee, W.D., Huang, A., Xu, C.Y., and Guo, S.L. (2020). An advanced complementary scheme of floating photovoltaic and hydropower generation flourishing water-food-energy nexus synergies. *Applied Energy*, 275, 115389.

