



都市水資源消耗 評估指標 — 都市水足跡

莊雯凱／國立臺灣大學環境工程學研究所 碩士生

闕蓓德／國立臺灣大學環境工程學研究所 教授

隨著氣候變遷以及更多地區的都市化與工業化，全球水資源缺乏（Water scarcity）問題日趨嚴重；而位於人口集中的都市地區更是水資源缺乏衝擊的首當其衝區域。因此，都市地區的水資源管理甚為重要，並需要兼顧全面性以及區域特性的水資源評估指標，以分析都市地區的水資源消耗情形，進而研擬應對水資源消耗的減量措施。而水足跡評估方法目前被廣泛地應用於集水區以及農產品等不同尺度之水資源消耗分析，能夠精細提供不同水資源消耗者之水資源消耗量等資訊。也因此，近年來水足跡的評估對象漸漸朝向都市水資源系統進行分析。本文針對水足跡以及都市水足跡，整理其發展、定義以及目前的應用案例，並提出現有的都市水足跡評估在後續應用上所受到的限制以及目前仍待完善的方法學。

水足跡評估指標的發展

水足跡的概念及評估方法係由 Hoekstra^[1] 提出，並將水足跡定義為製造一產品所消耗與污染的淡水資源，為虛擬的水資源概念。近年所訂定的國際標準 ISO14046 中，也將水足跡定義納入生命週期的角度與概念，能夠量化與水資源有關的衝擊指標（ISO^[2]）。而水足跡的估算除了一般系統邊界內消費端的直接用水（如家戶用水、道路清洗用水、工業用水等）外，同時也考量系統邊界外生產端的間接用水（如食物供應鏈中產品製造過程的間接耗水，Virtual water）（Hoekstra *et al.*^[3]）。

從直接用水與間接用水中，Hoekstra *et al.*^[3] 進一步將水資源區分為藍水（表面水與地下水資源）、綠水（降雨於綠地土壤並直接儲存在未飽和土壤中，能夠讓植物直接使用的水資源（不含土壤滲漏作用而構成的地下水補注量），以及灰水（能夠稀釋人類活動產生之污

水之環境水體水資源），因而衍生出此三種水資源的消耗之定義，分別為藍水足跡、綠水足跡以及灰水足跡；其中，藍水足跡定義為表面水或地下水資源的消耗，包括人類的直接消耗、表面水的蒸發、產品製造的消耗以及不會回到原本集水區的回流水資源；綠水足跡意指在降雨之下，被土壤所攔截的水資源，並為植物蒸發散作用所消耗之水量；而灰水足跡則以水質的角度評估人類活動對於環境水體的污染情形，代表能夠把污水中之污染物稀釋到河川特定水質標準以下時所需消耗的水量，也因此依據不同污染物的稀釋性質，會有不同的灰水足跡（Hoekstra *et al.*^[3]）。從上述的定義可知，水足跡的評估概念及原理與生命週期評估（Life cycle assessment, LCA）的概念相似，而其範疇比起生命週期評估來說更加專一且精細，並能夠彌補 LCA 盤查水資源時通常以取水量評估而有高估的現象；此外，根據灰水的定義，其為虛擬不存在的水消耗，也因此 LCA 並無法評估灰

水的衝擊；綜合以上，水足跡的分析應能夠更進一步的完善與彌補 LCA 的評估 (Morera *et al.* [4])，幫助都市地區的水資源管理決策者更加了解水資源的消耗情形與其背後的消耗來源。

由於水足跡評估考量到人為活動所構成的產品或行為時的藍水、綠水與灰水資源消耗，因此其應用範圍相當廣泛，能夠依據不同的分析範疇評估細至產品大至國家之不同尺度下水足跡，同時從水質與水量的角度全面性地分析都市尺度下的水資源消耗；此外，在量化水資源若僅以水資源供給來源（如雨水等）為指標時並不直觀，需要考量各個面向之間的潛在關係；其中，若以水資源循環的權益相關者角度來說，需考量供水安全、長期成本、公共健康衛生、根據競爭需求分配水資源以及環境外部成本（能源使用、溫室氣體排放、水質狀況等）；而若以都市規劃權益相關者的角度來看，則需考量洪水風險管理、都市河流流量以及保護水資源對於文化與生態價值等，而只有全面性的探討都市水資源系統能夠解決上述問題。也因此，水足跡的評估概念更能夠完善幫助地區的水資源管理決策者了解水資源的消耗情形。

水足跡估算方法

根據 Hoekstra *et al.* [3] 對於水足跡的評估步驟如圖 1 所示，主要分為四個步驟：

- (1) 水資源消耗的評估目標以及評估時空間範疇界定。
- (2) 根據水足跡評估的方法進行盤查，分別計算製程、產品或直接用水消耗中系統內部植被的藍水、綠水以及污水產生的灰水消耗量；而在盤查時應需考量時空間範疇，將系統邊界以建構組元 (Building blocks) 區分不同的盤查種類，以利系統性的盤查來增加盤查效率。

- (3) 計算研究範疇內的可用水量，為來自系統外部集水區的表面水資源以及系統內部的降雨，進而分析可用水量與水足跡之間的差異，評估研究地區的水資源缺乏程度（或永續性）；也因此可以看出主要的資源消耗以及資源缺乏熱點，並進一步以環境、社會、經濟的角度評估三者的效益與衝擊，以及找出造成水資源消耗熱點的主因。

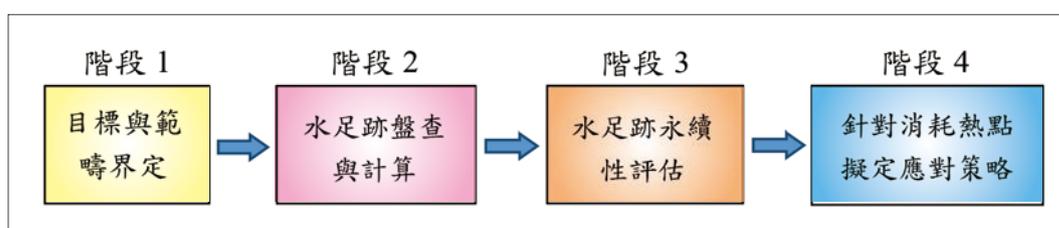
根據上述的熱點與主因擬定應對策略，增加地區對於水資源衝擊的調適能力。

水足跡評估的應用

水足跡概念發展以來已被應用於多種領域，若是以衡量類別區分，水足跡可分為製程水足跡 (Water footprint of a process step)、產品水足跡 (Water footprint of a product)、消費者水足跡 (Water footprint of a consumer)、社區水足跡 (Water footprint of a community)、企業水足跡 (Water footprint of a business)、國家或區域水足跡 (Water footprint of a nation/region) (周嫦娥等人 [5])。

而若是以衝擊導向分類，利用水足跡數據呈現不同面向之衝擊，可分為壓力水足跡 (Stress-weighted water footprint)、生命週期評估水足跡 (Life Cycle Assessment water footprint)、機會成本水足跡 (Opportunity Cost water footprint)、能源水足跡 (Energy water footprint)、遙測水足跡 (Remote sensing water footprint)、預測水足跡 (Forecasting water footprint) 等 (Takawira [6])。

此外，水足跡概念中由於具有完整且精細的水資源的分類系統，也因此被廣泛應用於評估農業、全球或國家水資源的運用，而近年來水足跡則開始應用於都市尺度上的分析。



資料來源：(Hoekstra *et al.* [3])；本文繪製

圖 1 水足跡評估步驟

農業水足跡 (Agricultural water footprint)

農業一直是水資源最大耗用者，約佔全球水足跡的 99% (Mekonnen and Hoekstra^[7])；而隨著人口增加及農業用地的擴大，水資源的消耗量也隨之增加，特別是灌溉地區更為顯著 (Siebert and Döll^[8])；也因此，對於農業用水評估更為重要。當水足跡的概念以及評估方法在 2003 年由 Hoekstra 提出後，Rost *et al.*^[9] 將水足跡概念應用於灌溉農業用水，以模式模擬估算全球 11 種農作物之藍水與綠水消耗，是首次較為明確將藍水與綠水分開計算之文獻。而後 Siebert and Döll^[8] 以 5ft × 5ft 空間解析度之網格，擴大估算全球 26 類別農作物之藍水與綠水足跡。

國家水足跡 (National water footprint)

水足跡的概念亦延伸應用於國家尺度，並定義為提供該國居民的商品及服務所需要的水量總和 (Hoekstra and Chapagain^[10])。隨著經濟蓬勃發展，國際間貿易愈趨頻繁，產品進出口使得水足跡計算須更全面考量；國家水足跡則可分為內部水足跡與外部水足跡；其中，內部水足跡為國家內居民生產消費的產品與服務所使用的水量，而外部水足跡為國民使用外國生產的產品和服務所需要的水量 (周嫦娥等人^[5])。Hoekstra and Chapagain^[10] 研究中統計各國農業用水、民生用水與工業用水，且考量進出口貿易虛擬水資源，計算世界各國水足跡之總和，全球水足跡共為 7,450 Gm³/yr，平均為 1,240 m³/cap/yr。單純以用水量看，印度為全球水足跡最大的國家 (987 Gm³/yr)，若將各國之總水足跡除以其人口數進行標準化，美國擁有最大的人均水足跡 (2,480 m³/cap/yr)，緊接著為希臘、義大利等南歐國家，而人口基數多的中國則是呈現較低的人均水足跡 (700 m³/cap/yr)。可歸納造成各國水足跡差異的四項主要因子為：消費水平 (國民收入)、飲食習慣 (食肉多寡)、氣候 (作物灌溉需求)，以及農耕技術 (用水效率)。

都市水足跡 (Urban water footprint)

近年來全球人口越趨集中於都市，都市地區成為經濟與交通樞紐，使得都市的土地利用模式與空間發

展型態發生改變，同時都市大量人口過度消耗資源與能源，因此都市系統愈受重視，將水足跡聚焦於都市水資源之管理。都市水循環系統包含從集水區收集水、原水儲存、清潔和淨水、透過供水管網分配、污水進入下水道、污水處理廠處理，最後如考量再生水則是將處理後的水返回到集水區 (URBAN_WFTP^[11])。

Vanham and Bidoglio^[12] 統計米蘭都市範圍內農產品及相關產業的藍水、綠水及灰水足跡，顯示居民對都市外來水資源的依賴之外，透過數據也可了解到居民的日常飲食攝取比例，幫助未來在有限的土地與水資源條件下規劃適合的政策。Renouf and Kenway^[13] 在宏觀層面上推動都市水管理目標，針對可持續性的水資源之發展，考量都市整合水系統及都市代謝流等，嘗試建立適合的都市水資源評估框架。Chini *et al.*^[14] 考量足以供都市運轉之能源與水資源，估算美國各個城市區域內的直接與間接水足跡，綜合分析多個城市系統，同時將水足跡應用於食物 — 能源 — 水資源網絡 (Food-Energy-Water Nexus) 之量化，了解都市水循環的脈絡，為今後的研究奠定基礎，以便未來可使用單獨統一的方法評估多個城市水足跡，並解決永續都市水資源之問題。

都市水足跡評估的挑戰

除了資料可獲性的限制之外，則需思考都市水足跡評估後續的應用價值；其中，水足跡的探討目的在於估算都市水資源系統的消耗總量，藉以提供都市水資源管理者水資源消耗主要來源的決策支持資訊，得以更有效率的擬定水資源消耗的減量對策。然而，若僅估算都市各類建築物型態的水足跡總量時，都市的水資源管理者並無法真正有效的擬定應對的水資源消耗減量決策；而需要更進一步透過地理資訊系統，以空間分析的方式顯現出都市藍水、綠水以及灰水足跡的分布趨勢，則能夠有效地讓水資源決策者了解都市內部的耗水主因以及優先需要減量的地區。也因此，若能夠破除估算都市水足跡所需的資料可獲性限制，並進一步更仔細的細分出都市內部的土地利用型態，除了能夠增加都市水足跡估算的真實性之外，透過空

間分析方法，以比都市尺度還要細的空間統計單元來分析都市水足跡，則能夠作為更有效的水資源決策支持系統；而若能夠將都市水足跡評估在後續與社會經濟因子或水資源減量策略等整合分析，則更能夠突顯出都市水足跡評估的應用價值，以期增加都市水資源管理的完整性與效率。

圖 2 為本研究團隊估算之臺北市藍水及綠水足跡總量，以及四個因子中不同土地利用型態對於該項水足跡的貢獻程度。透過內政部國土利用分類系統歸類出臺北市內部不同的土地利用型態，並根據每種土地利用型態的平均逕流係數，得以估算都市內部不同土地利用型態所負責構成的雨水資源消耗；同時，水表用水的統計資料也能夠反映出建築物內部所構成的藍水足跡。

透過地理資訊系統與水足跡評估指標的整合，可以讓都市地區的水資源決策者更加了解內部的水資源消耗情形，並針對水資源消耗的熱點優先進行減量策略的推行；如圖 3 所示為臺北市地區各類一級經濟發

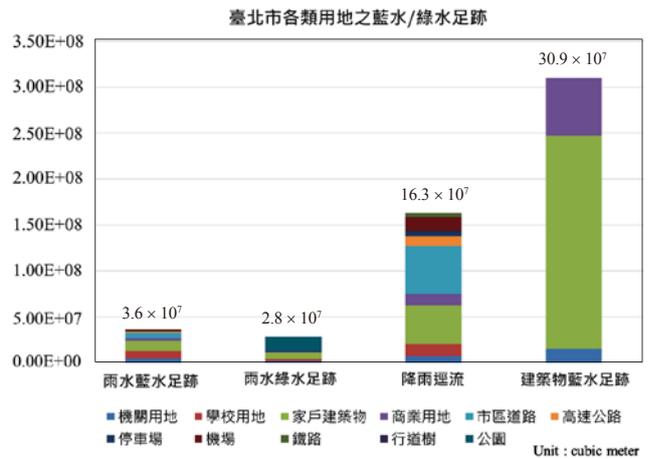


圖 2 2016 年臺北市地區各類用地之藍水、綠水足跡估算結果與貢獻來源

布統計區之藍水足跡與綠水足跡的加總量，以此較高空間解析尺度的方式統計都市水足跡，得應用於後續減量策略之效益評估，作為良好的決策支持工具，讓都市地區在推行永續政策時，能夠先行了解資源消耗的現況，並同時透過詳細的空間決策資訊研擬應對策略。

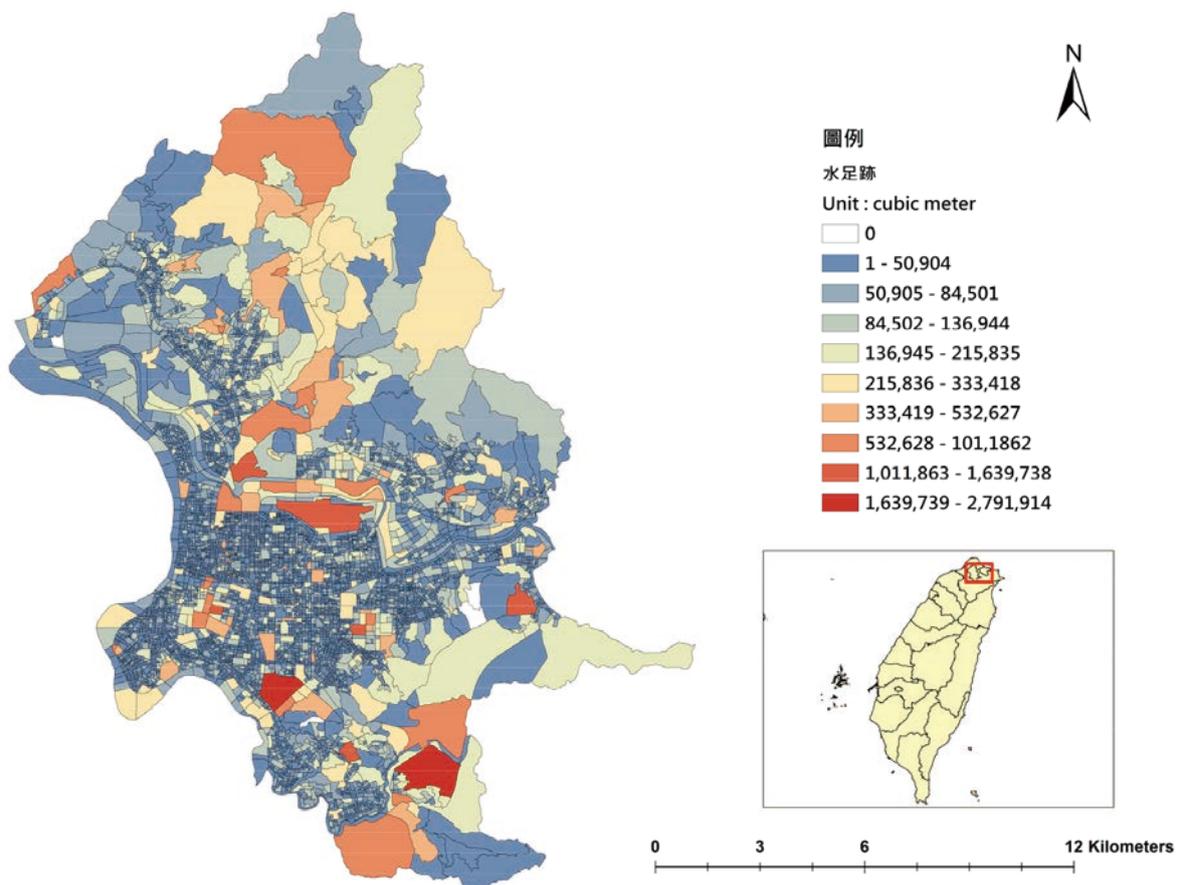


圖 3 2016 年臺北市地區藍水、綠水足跡加總分析結果

參考文獻

1. Hoekstra, A. (2003), "Virtual water: An introduction", *Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series*, 11, 13-23.
2. ISO, I. (2014), *14046: Environmental Management - Water Footprint - Principles, Requirements and Guidelines*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
3. Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M. (2011), *The Water Footprint Assessment Manual, Setting the Global Standard*, Earthscan, London.
4. Morera, S., Corominas, L., Poch, M., Aldaya, M. and Comas, J. (2016), "Water footprint assessment in wastewater treatment plants*", *Journal of Cleaner Production*, 112, 4741-4748.
5. 周嫦娥、李繼宇、林惠芬、阮香蘭 (2011), 「企業水資源管理新指標 — 水足跡」, 工業污染防治。
6. Takawira, G. (2017), "Review of Methodologies of Water Footprint", *International Journal of Advanced Research*, 5(5), 1-5.
7. Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2014), "Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment". *Ecological Indicators*, 46, 214-223.
8. Siebert, S. and Döll, P. (2010), "Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation", *Journal of Hydrology*, 384(3), 198-217.
9. Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohwer, J. and Schaphoff, S. (2008), "Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system", *Water Resources Research*, 44(9).
10. Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. (2006), "Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern", *Integrated Assessment of Water Resources and Global Change*, Springer, 35-48.
11. URBAN_WFTP. (2014), *Introduction of Water Footprint (WFTP) Approach in Urban Area to Monitor, Evaluate and Improve the Water Use*, Eds., W.U.o.E.A.L.S. Institute of Environmental Engineering, U.o.P. Department of Industrial Engineering, U.o.I. Unit for Environmental Engineering, Central Europe.
12. Vanham, D. and Bidoglio, G. (2014), "The water footprint of Milan", *Water Science and Technology*, 69(4), 789-795.
13. Renouf, M.A. and Kenway, S.J. (2017), "Evaluation approaches for advancing urban water goals", *Journal of Industrial Ecology*, 21(4), 995-1009.
14. Chini, C.M., Konar, M. and Stillwell, A.S. (2017), "Direct and indirect urban water footprints of the United States", *Water Resources Research*, 53(1), 316-327. 

工程參訪 — 新店溪活水綠電溯源之旅 @ 桂山電廠、翡翠水庫 107.7.27



由中工會，本學會與日月光基金會合辦「新店溪活水綠電溯源之旅」。感謝桂山電廠歐平廠長、翡翠水庫管理局謝政道局長親自接待與簡報。會中特別播放新店溪水力發電廠微電影。



電影中的黃美玉女士親連現場現身說法



贈送微電影紀念版給歐平廠長



年逾 90 台電老員工伉儷情深