



漫談 生態水利 自然解方

施上粟 / 國立臺灣大學土木工程學系 副教授

近代水利工程面對許多不同型式的挑戰，包括氣候變遷、人居環境改變、永續發展需求等，因此有需要思考如何由過去的單解方（single solution）轉換至全解方（total solutions）的思維。本文以生態水利學、生態系統服務、生態系統防減災等相關知識帶來的跨領域課題，漫談近年熱門的自然解方的概念相關案例，希望能起著拋磚引玉之功，引發思考下一階段的典範轉移發生的可能性。

前言

聯合國在 2015 發表了未來 15 年永續發展的議程，同時提出 17 項發展目標，其中與水科學領域直接相關的目標至少有三項，揭示永續發展以水科學為核心的概念為強調人與自然的和諧共處。近年來，學術社群及聯合國相關組織強調如何保護和改善生態系統以降低災害風險的重要性，為降低氣候變遷對人類社會帶來的威脅，2015 年第三屆聯合國防災大會宣布推動「生態系統防減災」（ecosystem-based disaster risk reduction），建議積極維護生態系的健全以提升生態系統對人類社會的服務品質（ecosystem services toward human welfare），並利用生態系統服務中災害調節及支持的功能，達到防減災及永續發展的目標。此亦呼應 1987 年提出「Our Common Future」的 Brundtland Report 中「Towards Sustainable Development」篇章的建議「Merging Environment and Economics in Decision Making」。

臺灣的水文時空間變化大加上坡陡流急的水域特性，使得台灣水利防災及水資源規劃面臨艱鉅的挑戰，面對氣候變遷可能加深危害度、擴大暴露度而增加風險程度，如何強化人居水環境的災變容受力及災復韌性變的刻不容緩。傳統土木水利知識在處理日益複雜的課題上似已逐漸顯露捉襟見肘之感，對於更多的挑戰，水利相關領域需要導入更多的先驅及跨域知識加以因應，並經由跨域合作的過程產出本土知識以

深化知識程度。土木及水利工程天職是服務大眾、建構人類社會安全、健康、宜居的環境，雖常自詡大地雕刻師，卻也常被詬病是自然環境破壞者，其正反面角色極端差異的關鍵為工程師在規劃設計時，是否將永續概念融入於降低生態環境衝擊，並將衍生的外部成本納入考量，以符合永續發展的精神。臺灣具備國際間難得的極端環境條件，因此研究成果具備獨特性，如：面積小卻具高度生物多樣性、人口集中且土地高度開發、降雨量多但可用水資源匱乏等，故國外經驗很難適用臺灣，亟需進行本土數據的累積及理論知識、工程技術、調查方法的研發工作。

生態水利

水域生態系統如溪流、河口、湖泊、濕地、沿岸、海洋等，是由多重空間和時間尺度上的物理、生物和化學過程相互作用而構成^[1]。因此牽涉到生態系統需要跨領域研究團隊來解決這些跨越傳統學科界限的問題，生態水利學（ecohydraulics）是這些新興研究領域之一，吸引了生物學家、生態學家、河流地貌學家、沉積學家、水文學家、水利工程師的投入及合作，除了推進科學和關鍵管理問題以維持自然生態系統的基礎科學問題，也回應現代社會對健康永續環境的要求^[2]。因此，生態水利學扮演水力學 / 流體力學和生物學 / 生態學之間的中間領域角色，用以銜接或解決兩個領域難以處理而關鍵的科學或工程問題，

例如特定物種群聚、物種競爭與棲息地環境特性的關係 (species-habitat relationship) 等接近棲地保育、復育課題 [2,3]，或高灘地植生對自然洪氾系統的影響 (floodplain vegetation-ecohydraulics) 等較類近生態系防減災權衡概念的課題 [5,6]。換言之，生態水利學的核心研究重點之一是提供生態系服務 (ecosystem services) 進行科學量化時的估算基礎 (包括貨幣化評估工程成本及預期效益)。

生態系服務是生態系結構與功能，以直接及間接的方式提供人類社會的福祉，成為決定自然資本的基礎 [7]。生態系統的服務和產生它們的自然資本存量對於地球生命支持系統的運作至關重要，同時也直接或間接為人類福利做出貢獻，雖然這些屬於地球總經濟價值的一部分但常被低估其價值 [8]。實務上，生態系統功能對人類所提供的服務常有相左情形，因此有時必須以權衡 (tradeoff) 的觀念進行積極有效的管理，以使服務功能達到最佳化。

自然解方

自然解方 (Nature-based Solution, NbS) 最早在 2008 年由世界銀行公開此概念，強調保護生物多樣性對氣候變化減緩與適應的重要性 [9]；緊接著，國際自然保護聯盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 2009 年時向聯合國氣候變化框架公約第 15 屆締約國大會提交的工作報告中，強調 NbS 在應對氣候變化中可發揮的作用，並將其定義為「Nature-based Solutions are actions to protect, sustainably manage, and restore natural and modified ecosystems that address societal challenges effectively and adaptively, simultaneously providing human well-being and biodiversity benefits.」 (<https://www.iucn.org/theme/nature-based-solutions>)。自然解方作為生態系統相關方法的總括概念，其總體目標是為了解決日益嚴峻的社會挑戰，像是糧食安全、氣候變化、水安全、人類健康、災害風險及社會和經濟發展等 (圖 1)。一般可分為五個類別，包括：生態系統復育方法、生態議題相關方法、基礎設施相關方法、生態系統管理方法、生態系統保護方法 [10]。

實際上，過去已有許多與 NbS 概念相近的理論或想法被提出，如：生態系統功能與服務 (ecosystem functions and services)、生態防減災 (Ecosystem-based Disaster Risk Reduction, Eco-DRR)、綠色基礎



圖 1 自然解方主要關注重點及總體目標 [10]

設施 (Green Infrastructure, GI)、低衝擊開發 (Low Impact Developments, LIDs)、最佳管理措施 (Best Management Practices, BMPs) 等，這些名詞在不同國家採用的名稱也不盡相同，現今歐洲地區普遍使用 NbS 統稱這些理論與想法，與其他名詞不同的是，NbS 為一個整合許多想法與理論的方案，考慮的面向除了水資源永續管理，同時也對氣候變遷、生物多樣性、人民健康及生活品質的議題納入考量 [11]。

其中，綠色基礎設施 GI 的概念約於 2010 年前後由低衝擊開發 LID 演變而來，是一種聚焦於利用自然過程調適水患，並能帶來環境、社會、經濟利益的方法。傳統上的洪災管理方式包含堤防、水庫、下水道系統、抽水站等，全世界每年耗費大量經費在強化諸如此類的灰色基礎設施 (grey infrastructures) 以防護水患；然而這些作為也有可能增加淹水風險，比如同一條河川兩側保護標準不一時，低保護地區的受災頻率就會上升 [12]；且政府需要花費額外支出，以彌補地景價值損失 (如綠美化堤岸)、水質淨化等生態系統服務功能喪失 (如興建污水處理廠)，顯示不同考量及需求間存在競爭及權衡的問題需要克服。綠色設施在許多情況下都能作為洪災管理架構下的一個關鍵因子，形式上包含濕地、緩衝帶、綠屋頂、樹穴、透水鋪面等，這些措施可與現有都市的灰色設施進行整合規劃，幫助減少洪水衝擊以強化城市韌性能力，並提高整體人居的環境品質。綠色基盤可用於控制地表逕流以降低都市淹水潛勢，同時也扮演調節蒸發散、補充地下水、改善都市微氣候條件的角色；相較於傳統措施，綠色基盤的開發與運維成本皆較低廉，其建造成本至多可節省 30%，而全生命週期成本則便宜 25% [13]。

事實上，近代水利工程計畫的規劃及設計不再是水利工程師的專屬領域，有更多不同領域的研究人員或環境關懷團體提出創意思維，因此如何與生態學、經濟學、社會科學和行政科學等其他學科的合作對於找到可接受的解決方案至關重要。參與或主導此類水利工程計畫的專家會發現，僅僅根據正確的物理定律、嚴格的防洪標準及水資源調度計畫並不能保證在此類過程中被利益相關者所重視，因此水利工程師必須學會如何在比以前更複雜的決策過程中有效貢獻水利方面的專業知識。亦即，工程計畫中應該從一開始就將利益相關者關注的內容納入其中，如何從原本「最大限度地減少和減輕一組設計的影響」的相對被動或單一的思維，跳脫至相對積極的思考「如何優化所有功能和生態系統服務」，是未來水利工程師必須積極面對的挑戰。

案例介紹

美國基西米河重塑蜿蜒河道及濕地復育

美國基西米河（Kissimmee River）在佛羅里達州曾經有著蜿蜒 103 英里的河道（直線僅 50 餘英里），當雨季來臨時，上昇的河水位會緩緩漫過廣大的沼澤地，其河道周圍 3 英里都會是魚類和涉禽的天堂，其流域包括了 24 個以上的湖泊、相關支流與氾濫平原，請詳圖 2a。在 1947 年的一次長時間淹水事件後，民眾要求聯邦政府治水，於是 1948 年美國國會授權美國陸軍工兵團著手佛羅里達州中南部治水計畫，目標是把基西米河截彎取直、拓寬再挖深（圖 2b），計畫提出後，生物學家即提出警告，認為此工法會對當地生態系統帶

來毀滅性的後果。1962 至 1971 年間，基西米河已渠道化並命名為 C-38 運河，水深 30 英尺總長 56 英里，這條以防洪為考量建造的運河，使當地氾濫平原的排水速度加快，因此顯著降低了洪水衝擊，更提供了大量畜牧、農業、居住用新生地，但也大幅傷害了原有氾濫區的生態系統。許多依賴該系統的瀕危物種、特有種、魚類及濕地動物也顯著受到衝擊甚至滅絕，如：超過 90% 的濕地水禽（waterfowl）消失，位於食物鏈頂端的禿鷹（bald eagle）群落數量也減少了 70%。

美國國會在 1992 年啟動跨聯邦復育計畫，希望讓基西米河回到它過去生態盎然的樣貌，此結果展示了相關團體對美國政府的遊說力量，同時也可視為美國政府對錯誤環境決策懸崖勒馬的魄力，這中間當然有評估環境破壞後再復原的代價做為決策的基礎之一。此斥資 9.8 億美金的復育計畫於 1999 年正式執行，工程內容包括購買土地（3 億美金）還地於河、拆除舊有河堤、重新挖出舊河道並拆除洩洪道、總長 56 英里的運河有 22 英里將回填。並重塑出 24 英里的蜿蜒河道，舊有氾濫平原再次氾濫；在 2007 年的大旱災中，復育完成的河段比起人工運河，展現了對大自然極端氣候更快速的反應與承受力。在一連串以環境為優先的操作中，周圍人民財產的防洪標準並沒有下降，因為原本的氾濫區已歸還於基西米河。復育後的土地經濟活動收入，則可由觀光和急速復甦的休閒垂釣與打獵活動所取代補足。受惠於天然濕地的含水功能，當地供水在旱季也不會受影響，航運在極端乾季也能維持 90% 以上正常運作，下游歐基求碧湖的營養鹽輸入量，也可望因為上游基西米河草澤恢復後過濾吸收而降低。截至 2008 年該計畫已回填 8 英里的運河，並重



圖 2 (a) 截彎取直工程施工前的基西米河；(b) 截彎取直工程施工後的基西米河

塑出 24 英里的蜿蜒河道，舊有洪氾平原再次氾濫。墨西哥河上游流域長期監測計畫由 2010 年開始，2015 年的監測結果指出，比起復育計畫啟動前，有害的浮水植物與墊狀植生被原生挺水植物取代；水底有機物質累積量降低了 71%，幫助重建了沙洲，與鳥類、無脊椎動物的棲地；水體溶氧則上升了 6 倍之譜，進而讓魚類整體數量顯著上昇，且休閒魚種比例由魚類組成的 38% 上升至 68%，長期衰退的休閒垂釣價值也再次繁榮起來；長腿涉禽數量回復比預期高了 2 倍、短腿鴨也回到河中、另有 8 種水鳥重新回到復育流域。

日本荒川彩湖生態滯洪池營造計畫

流經日本東京都的荒川發源於本州埼玉縣，流經東京都後注入東京灣中，河川全長 173 公里，流域面積達 2,940 平方公里。荒川自古有「狂暴之河」之譽，因此水性湍急時常氾濫成災，如 1947 年的凱薩琳颱風就造成了嚴重的大淹水，自此後日本當局就開始建設各種防洪設施。荒川彩湖滯洪池初始設計是以防洪與儲水資源為主要目的，於 1997 年完成荒川儲水池，之後再於 2004 年完成荒川彩湖滯洪池，總面積 5.8 平方公里，儲水量 3,900 立方公尺。

意識到環境議題的重要性，彩湖滯洪池 1993 年由荒川周遭各縣市首長所組成的「荒川滯洪池周邊檢討維護委員會」，為保護荒川滯洪池周邊自然生態，而訂

立具有遠景的 3 個目標，並依目標劃分不同的保護區域及保護強度，以做進一步的維護與管理，包括：(1) 與自然共生：除了保護現有荒川的自然生態的同時，也將再活化與創造出人與動、植物間共生的自然空間；(2) 善用空間：離市中心 20 公里的範圍內的精華地區，提供人們舒壓與戶外活動的空間；(3) 回歸自然：人與自然間接觸的空間增加後，培育新的文化與自然知識。

因此荒川彩湖滯洪池設計時考慮到閘門及堤防的聯合操作策略，在平時下游的水門通常呈現開啟狀態，讓河水能夠自由流動，以維持營養鹽及生物間的自然交換機制，達到櫻草保育及水鳥等水生物利用的目的外，也提供市民假日很好的戶外活動場域，汛期時則可依漲水、洪峰到退水等不同時期，而有不同的閘門操作步驟。荒川滯洪池調節量為 850 m³/s，滯洪池內的儲水池（彩湖）設有淨化設施，每日最大可處理 302,400 m³ 的日常用水。復育後的彩湖滯洪池，其平時的水門開啟，如此能讓水流在滯洪池內部流動，型塑濕地功能，如維持營養鹽及生物間的自然交換機制，保育櫻草及提供水鳥棲息利用，同時也是市民假日很好的戶外活動場域，提供優質的休憩場所；而在發生颱風或豪雨事件時，又能發揮遲滯荒川及鴨川洪峰的功能，有效保障民眾的生命財產安全。其閘門及堤防之操作策略簡述如圖 3 和圖 4：

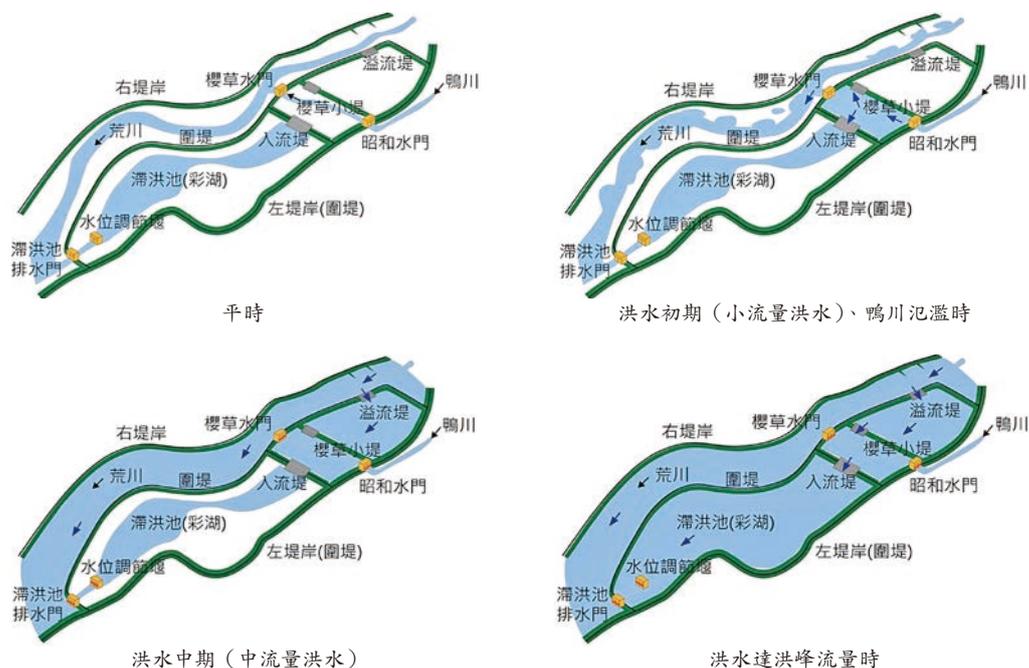


圖 3 荒川彩湖滯洪池調蓄洪水過程示意圖



圖 4 荒川彩湖滯洪池 (a) 平時及 (b) 洪氾時期空照圖

1. 平時：

下游的水門通常呈現開啟狀態，讓河水能夠自由流動，以維持營養鹽及生物間的自然交換機制，並靠水位調節堰調節彩湖的水位。

2. 洪水初期（小流量洪水）、鴨川氾濫時：

首先需立即關閉滯洪池水門，以確保滯洪池內的蓄洪空間，為確保櫻草棲息地水量不變，在洪水初期時會打開昭和木門與櫻草水門。

3. 洪水中期（中流量洪水）：

滯洪池水門、昭和木門與櫻草水門都需關閉，鴨川的排水由排水水磊排出。而荒川水位上升後，則經由溢流堰直接進入滯洪池調節水位。

4. 洪水達洪峰流量時：

上游區塊蓄水池滿後，升高的水經過下個區塊的入流堤，進入下游蓄水池中進行洪水調節。此後隨著荒川的流量降低，再開啟滯洪池排水門進行排水作業。

參考文獻

1. Dauwalter, D.C., Splinter, D.K., Fisher, W.L., and Marston, R.A. (2007). Geomorphology and stream habitat relationships with smallmouth bass (*Micropterus dolomieu*) abundance at multiple spatial scales in eastern Oklahoma. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 64, 1116-1129.
2. Maddock, I., Harby, A., Kemp, P., and Wood, P. (2013). *Ecocydraulics: An Integrated Approach*. JohnWiley & Sons, Ltd., UK.
3. Shih, S.S. (2020). Spatial habitat suitability models of mangroves with *Kandelia obovata*. *Forests*, 11(4), 477.
4. Kuo, P.H., Shih, S.S., and Otte, M.L. (2021). Restoration recommendations for mitigating habitat fragmentation of a river corridor. *Journal of Environmental Management*, 296, 113197: 1-12.
5. Shih, S.S. and Chen, P.C. (2021). Identifying tree characteristics to

determine the blocking effects of water conveyance for natural flood management in urban rivers. *Journal of Flood Risk Management*, e12742: 1-15.

6. Shih, S.S., Hsieh, H.L., Chen, P.H., Chen, C.P., and Lin, H.J. (2015). Tradeoffs between reducing flood risks and storing carbon stocks in riverine mangroves. *Ocean & Coastal Management*, 105, 116-126.
7. Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington DC: Island Press.
8. Costanza, R. et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260.
9. MacKinnon, K., Sobrevila, C., and Hickey, V. (2008). *Biodiversity, climate change, and adaptation: Nature-based solutions from the World Bank portfolio*. The World Bank, Washington, D.C.
10. Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., and Maginnis, S. (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN Commission on Ecosystem Management (CEM) and IUCN World Commission on Protected Areas (WCPA), Switzerland.
11. Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Di Sabatino, S., Leo, L.S., Capobianco, V., Oen, A.M.P., McClain, M.E., and Lopez-Gunn, E. (2020). Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: A state-of-the-art review of the research area. *Nature Hazards Earth System Science*, 20(1), 243-270.
12. Nature Conservancy (2014). *A flood of benefits—using green infrastructure to reduce flood risk*. Nature Conservancy, Arlington, VA.
13. Garrison, N. and Hobbs, K. (2011). *Rooftops to rivers II: Green strategies for controlling stormwater and combined sewer overflows*. Natural Resources Defense Council.
14. de Vriend, H.J., van Koningsveld, M., Aarninkhof, S.G.J., de Vries, M.B., and Baptist, M.J. (2015). Sustainable hydraulic engineering through building with nature. *Journal of Hydro-environment Research*, 9(2), 159-171.
15. Müller, F. and Burkhard, B. (2012). The indicator side of ecosystem services. *Ecosystem Services*, 1, 26-30.
16. 荒川（関東）[http://ja.wikipedia.org/wiki/荒川_\(関東\)](http://ja.wikipedia.org/wiki/荒川_(関東))。
17. 荒川第一調節池 <http://ja.wikipedia.org/wiki/荒川第一調節池>。
18. 彩湖自然学習センター トッ荒川第一調節池 プ <http://www.city.toda.saitama.jp/433/432448.html>。