



生態水利於數位轉型下之 應用與展望

黃國文* / 國立臺灣大學水工試驗所 技正暨特約研究員

黃耀陞 / 國立臺灣大學土木工程學系 碩士

楊欣樺 / 國立臺灣大學水工試驗所 計畫專員

生態水利學強調水文環境與生態系功能之整合，近年在政府推動自然工法、生態工法與工程生態檢核政策下，其應用重要性更為提升。然而，棲地品質評估需同時整合生物與環境因子，現地資料取得不易，致多以文獻推估替代，難以反映即時生態狀態。隨著人工智慧（AI）影像辨識與物聯網（IoT）水文水質感測技術成熟，棲地品質監測逐漸由人工定量轉向即時且連續之數位監測模式。以 AI 影像辨識魚類行為與族群組成，結合水位、水質、氣象等感測資料，可建構多類型棲地因子之資料，並透過統計分析方法推估棲地品質指標。此外，數位孿生（Digital Twin）技術可進一步將棲地環境於虛擬域中模擬、預測與情境分析，做為復育設計、調度操作及風險預警之決策支援。本文提出之棲地品質數位整合架構，將有助於實現水利工程與生態永續兼顧之智慧化治理。

關鍵詞：人工智慧、物種辨識、棲地品質、數位監測、數位孿生

前言

生態水利學（Ecohydraulics）是一門高度跨學科的學術領域^[1]，生態水利學是透過量化生態學和水利學的關係，來發展有效的措施，以減輕或彌補水利工程對生態造成的負面影響，或以水利工程方法增加生態系統效益^[2-4]。它整合了多個學科的知識，包括生物學（Biology）、生態學（Ecology）、河相學（Fluvial geomorphology）、水文學（Hydrology）及水利工程學（Hydraulic engineering）等。而生態水利學將生物與環境量化整合之量化棲地品質，為目前常用之關鍵指標^[5]，特別於近年政府大力推動自然工法、生態工法/工程、工程生態檢核^[6]、自然解方等作為下，更需要具

持續性、即時性、自動化判釋之棲地品質量化指標。惟棲地品質量化常需整合生物與環境因子，兩類因子現地調查資料取得不易，因此目前大部分常以文獻引用方式進行評估。

隨著全球數位化浪潮，「數位轉型」成為全球公共建設與環境治理的核心議題，近年人工智慧（AI）與物聯網（IoT）技術的成熟，使得以往依賴人工調查與定期採樣的生物及環境監測，部分得以轉變為即時、連續與高解析度的數位監測系統。例如環境部自 2020 年起推動的「智慧水聯網」^[7]，以水質感測器與 AI 分析進行每分鐘級監測（pH、導電度、溫度、溶氧等），連結網路作為異常警示與執法佐證的底層資料，現已於多縣市擴大建置。Shah *et al.*^[8] 開發基於深度學習的增強型 YOLOv5 模型，應對水下環境複雜和資料集類

* 通訊作者，gwhwang@ntu.edu.tw

別高度不平衡的挑戰，顯著提高水下魚種識別的準確性。Yang *et al.*^[9] 指出流域數位孿生應結合資料流、資料治理與可互操作之物理—資料驅動混合模型，以支援水質預測、環境流量管理與災害減緩等決策；相關研究亦提出了數位孿生架構藍圖與關鍵能力清單，凸顯資料、模型與跨域協作的挑戰與路徑。

在環境與生物因子之 AI 自動化判釋及監測持續發展下，本文將以 AI 影像辨識、水文水質感測與雲端資料整合為核心，探討棲地品質量化之數位整合系統，未來可運用「數位孿生」結合自動化辨識水域物種、監測水位變化、評估水質指標，並結合空間分析推估棲地適生性與長期變遷趨勢，提供水利設施與生態工程整合設計的重要依據。

AI 物種辨識技術的發展與應用

現況文獻案例

在淡水河與蘭陽河流域已有相關透過設置水下攝影機與 AI 影像辨識模型之案例，系統能自動辨識如吳郭魚、溪哥、香魚等主要魚種，準確率達 92% 以上。未來可依影像時間序列統計出棲息密度與行為活動週期，建立長期棲地監測資料庫。Boom *et al.*^[10] 介紹一個創新的跨學科研究工具，透過自動分析水下攝影機所記錄的長期且連續的影片內容，以支持海洋生態學家對珊瑚礁魚群組合進行研究。這個系統的獨特性在於其能夠處理極為龐大的監測數據量，例如目前已處理了約一年份的影片，其中包含超過 400 萬次魚類觀察記錄，這使得人工檢視變得不可行。為應對巨量數據的挑戰，該系統利用高效能計算設施進行處理（使用多達 1,000 個 CPU）和儲存（200 TB），並整合了多種自動化影像處理技術，包括使用如 ViBe 等演算法進行魚類偵測，採用 covariance-based 模型進行追蹤，以及利用平衡保證優化樹（BGOT）等方法來識別魚種，以實現魚群豐度與物種組成的分析。

Fish4Knowledge^[11] 計畫以臺灣珊瑚礁海域為場域，蒐集超過 8.7 ~ 9 萬小時的水下影像並自動偵測 14 億次魚類目標，是全球最具代表性的長期水下視覺生態大數據專案，對於長期族群趨勢與模型訓練資料公開具有開創性。另一方面，iNaturalist 的群眾科學影像與電腦視覺模型，持續滾動更新（例如 2024 年

v2.11），已被廣泛用於物種分布、行為、分類改良與生物多樣性變化等學術研究，顯示社群影像補強野外資料方面的價值。

影像辨識技術在生態調查之突破

傳統的生態調查多仰賴人工辨識與目視紀錄，不僅耗時費力，也受限於人員經驗。AI 深度學習（Deep Learning）在影像分類上的突破，使得自動化物種辨識成為可能。以卷積神經網路（CNN）為基礎的模型（如 ResNet、EfficientNet 等）可透過數千張標註影像進行訓練，達到對魚類、鳥類、兩棲爬蟲等高精度辨識。以深度學習為核心的水下影像辨識，在魚類偵測、行為辨識與族群趨勢上已具可用性。NOAA 團隊提出的強化版 YOLOv5 架構（引入 transformer 模組與類別不平衡損失）在魚類辨識上顯著提升精度與速度，展示了在受限算力環境中的落地潛力^[10]。

運用 AI 物種辨識技術的突破性發展，未來可應用於生態調查，突破目前受限於人力、交通、時間及經費等限制，無法完整蒐集調查生態資料之困境。未來將可建構具空間及時間完整性之生態資料庫，以利相關生態水利學及工程施做之參考使用。

棲地品質數位監測系統架構

棲地品質指標量化

在行政院公共工程委員會^[6] 規定下，各單位於工程規劃設計執行階段部分需辦理的工程生態檢核，例如水利署提供生態評估分析表與快速棲地生態評估表等工具，將水文水理—棲地—友善措施連動於工程規劃期，利於與 AI 監測輸出銜接。而水利署河川環境資訊平台彙整指標魚類生活史與棲地適合度曲線等資訊，作為生態工法與復育設計參考。

依據美國 EPA 與我國生態工法指標體系，棲地品質指標可分為三類：

1. 物理棲地結構：水深、流速、底質組成；
2. 水質環境：DO、pH、溫度、濁度；
3. 生物指標：生物密度、優勢種比例、群聚多樣性（Shannon Index）。AI 系統可將多類型資料整合後，以包絡線、模糊邏輯或主成分分析（PCA）等統計方法計算棲地品質分級，提供動態生態健康評估。

複合模式感測資料整合

國內縣市環保單位已在重點水域（如日月潭、工業區排水等）部署微型水質感測器，透過物聯網與太陽能供電實施即時異常通報與稽查；中央平台並提供河川監測資料與污染指數查詢，支援研判與教學示範。除了國際常用的生物多樣性與物理／化學指標外，國內工程實務亦發展了快速棲地生態評估表與水利署規劃設計階段生態評估分析表等工具，提供水域型態多樣性、過渡帶／底質、生物指標的原則檢核與友善措施建議，便於在規劃階段納入生態考量。

未來可整合影像感測（AI 影像辨識）、水位感測（超音波或壓力式水位計）、水質感測（pH、溶氧、濁度、電導度）及氣象資料（溫濕度、雨量），透過 LoRa 或 NB-IoT 模組回傳至雲端資料庫。資料以時序格式儲存，支援即時視覺化與異常警示。這部分棲地環境因子之數位化、長期且即時監測，即可建構棲地品質數位監測系統之資料，如圖 1，為棲地品質量化之重要基礎。

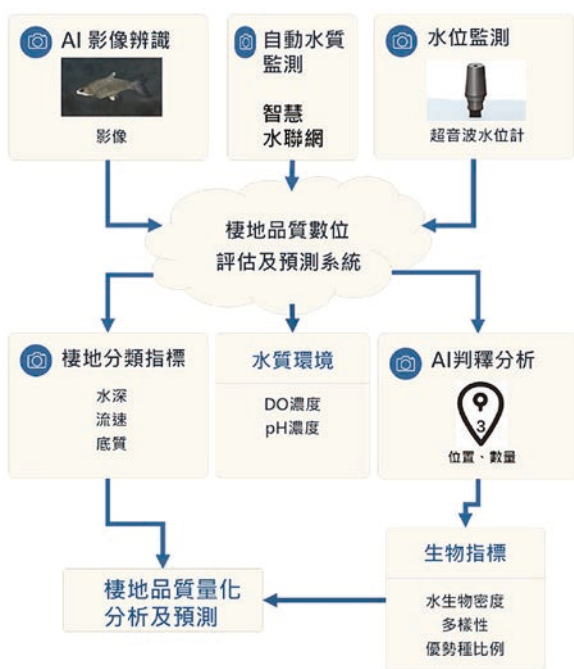


圖 1 AI 物種辨識技術及棲地品質量化之發展與應用示意圖

數位孿生之棲地評估與決策支援

數位孿生（Digital Twin）應用

數位孿生（Digital Twin, DT）是一種高度創新的虛擬技術，旨在將現實世界的物理實體或系統，在虛擬空間中創建一個整體且生動的虛擬複製品^[12]。數位孿生技術應用於自然環境，結合了基於物理的知識與數

據驅動的洞察，在解決重大環境挑戰（如水質惡化、極端水文事件、地貌改變和生物多樣性喪失）方面具有巨大的潛力^[13]。

Yang *et al.*^[9] 探討數位孿生流域（Digital-twin river basins）的框架、核心能力，以及在全球範圍內實現全面、永續和公平的水資源管理及災害緩解所面臨的重大挑戰。數位孿生流域被視為應對日益加劇的水災（如 2021 年德國 / 比利時洪水和中國鄭州洪水）以及實現聯合國永續發展目標（SDGs）的根本性轉變和關鍵解決方案。一個功能完善的數位孿生流域系統不僅是一個水文或城市水模型彙編，它必須足夠全面，能夠涵蓋所有與水相關的物理過程（包括水文、水力學、生態影響、人類活動及主要工程設施的運作）。此系統應具備預報、早期預警、演練和情境規劃這四項基石能力，以支持近乎即時的綜合智慧風險評估和決策制定。儘管數位孿生技術正在加速改變水資源管理方式，但其全球應用仍面臨三大挑戰。

1. 數據能力不足：數位孿生所需的數據（包括水質、水需求、污染物、流域形態和設施運營等）標準遠高於傳統用途。現有數據基礎設施需要重大升級，以支援更全面、更標準化的數據採集、治理與提供服務
2. 模型整合困難：現有的水模型往往未有效整合，且缺乏多物理過程的耦合，難以反映流域尺度的所有基本相關物理過程。例如，傳統方法常忽略洪水期間水體與地貌之間近乎即時且非線性的雙向交互作用。解決方案可能在於發展緊密耦合的模型框架，並利用物理資訊深度學習（PIDL）等先進的數據驅動方法。

因此研究人員、從業者和決策者必須採取果斷行動，優先研究並分配資源，促進跨界合作，以建立整合且廣泛的數位孿生流域系統，促進全球水資源的可持續性與韌性。

Pal *et al.*^[12] 提出流域數位孿生（Digital Twin, DT）概念性的藍圖與結構化框架，旨在將這一前瞻性的願景轉化為現實。流域數位孿生被定義為一個整體且生動的虛擬複製品，透過即時監測、歷史觀察、數據分析、預測建模和高效能計算的無縫整合，成為流域管理中創新的虛擬範例。該系統透過持續的雙向回饋迴路，超越了現有的決策支持系統（DSS），目標是優化運營效率、彌合關鍵知識差距，並持續推進流域決策過程。該藍圖提出了一個六維結構框架，包含實體流

域、後端基礎設施、數據、建模、服務和連通性。其中，數據是數位孿生的燃料，強調多域（氣候、水、土地、社會、經濟）數據的連續採集、標準化和融合；建模是驅動因素，需要結合結構、物理基礎和數據驅動的方法，並將混合建模視為增強預測能力和可解釋性的未來趨勢。設計實施遵循單元（Unit）、系統（System）和系統之系統（SoS）典範轉變工具。

目前數位孿生發展仍受限於部分數據能力不足及模型整合困難，故需進一步投入資源研發，惟其發展目標與生態水利之棲地品質量化一致，可作為決策支援系統架構。

AI 輔助決策

透過結合 AI 辨識與即時感測資料，可建立「生態棲地數位孿生模型」，如圖 2，模擬不同水文條件（枯水期、豐水期）下棲地變化。此模型可用於：

1. 生態工法設計前之敏感度分析；
2. 河川復育方案的成效追蹤；
3. 水利設施運轉（如堰、閘門開度）對棲地影響之動態模擬。

利用 AI 進行時間序列分析與預測，可提前偵測生態風險，如突發性濁度升高、溶氧下降或物種異常遷移，作為生態警示與水利操作調度之依據。未來更可與自動控制系統及自動判釋結合，達成智慧河川管理，更進一步發展數位孿生之棲地評估決策系統。

未來展望與挑戰

儘管 AI 與數位監測技術展現出強大潛力，但仍面臨若干挑戰：

1. 影像資料判釋成本高：物種辨識需仰賴大量人工標註，資料共享平台尚待建立。
2. 感測設備耐候性：水下環境易造成鏡頭污損與資料遺失。
3. 跨領域整合需求：水利工程師、生態學家與資訊科學家需建立共同語言。
4. 倫理與資料治理：AI 應用於生態監測須兼顧隱私、保育倫理與開放資料政策。

目前需持續發展推動之方向：

1. 資料治理與共享：建立在地資料庫（含水下影像與群眾影像）與模型紀錄適用範圍，串接水利署評估表與河川環境資訊平台，使 AI 指標 → 工程檢核 → 規劃設計調整，形成完整 SOP。
2. 感測器耐候與維護策略：在感測端導入自動鏡頭清潔、遮陽罩、電蝕防污與遠端自檢；在資料端布建品質控制（QC）規則與異常回補方法。
3. 跨域培力：以共同詞彙與可互操作 API，讓水工、生態與資料團隊協作；並建立實驗場域（living lab）加速政策落地。

未來可朝「開放式生態資料平台」與「跨域 AI 模型共享」發展，透過政府與學術研究機構協作，建立具在地化特徵的水生生物 AI 模型，結合無人機、衛星

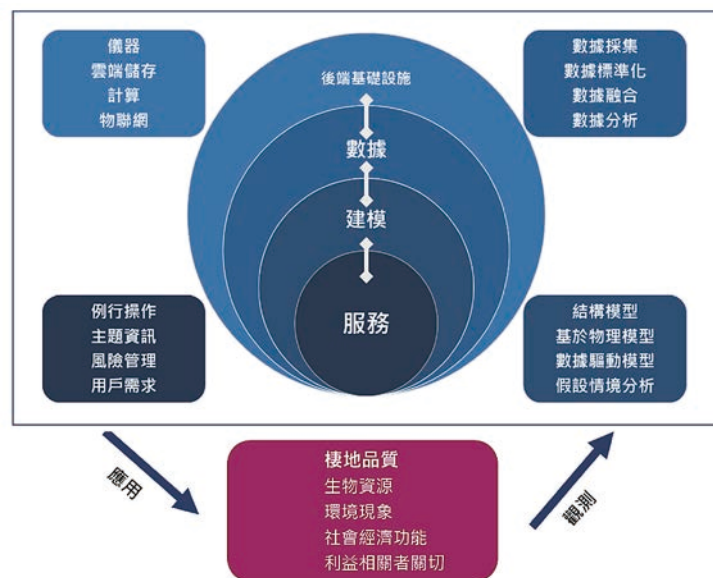


圖 2 數位孿生之棲地評估與決策支援示意圖

註：修改自 Pal et al. [12]

遙測與數位孿生河川模型，達成水利工程與生態永續共榮的目標。

結語

本文回顧生態水利學在數位轉型下之新興工具與發展方向，並提出棲地品質數位監測與數位孿生之整合架構，其主要結論如下：

1. AI 有效補強傳統生態調查限制：AI 影像辨識可突破人力、時間與區域可及性限制，建構具時間連續性與空間覆蓋度之生態資料庫，提升生物因子量測之精度與完整性。
2. 多類型感測資料是棲地品質量化的核心：水深、流速、底質、水質及生物指標需以感測系統長期與即時量測，方能建立棲地品質指標之穩定估算基礎。
3. 棲地品質量化指標必須與工程規劃流程連結：透過結合生態評估分析表、棲地適合度資訊與感測監測，可以形成監測－評估－設計－調整之工程生態檢核流程。
4. 數位孿生為智慧河川管理的重要方向：數位孿生可用於情境推算、生態風險預測、水利設施操作模擬，進而支援治理決策與生態影響降低。
5. 跨域協作與資料治理為推動之關鍵前提：生態學、水利工程與資料科學需建立共同資料格式、共享平台與判釋機制，才能擴大 AI 模型可用性與推廣性。

生態水利在數位轉型下的核心不僅是工具技術，而在於建立長期持續、資料完整、自動化的知識累積與決策系統，以達成水利工程與生態保育之智慧共榮目標。

誌謝

感謝國家科學及技術委員會、內政部國家公園署、農業部林業及自然保育署、宜蘭縣政府及國立臺灣大學水工試驗所提供相關經費協助。

參考文獻

1. Ian Maddock, Atle Harby, Paul Kemp, Paul Wood (2013). Ecohydraulics: an integrated approach. John Wiley & Sons.
2. 李鴻源、胡通哲、施上粟 (2012)，水域生態工程，中國水力水電出版社。
3. 吳富春 (1999)，生態水利工程，土木水利，第 26 卷第 2 期，第 11-15 頁。
4. 施上粟 (2022)，漫談生態水利自然解方，土木水利，第 49 卷第 2 期，第 6-10 頁。
5. 郭品含、黃耀陞、黃守忠、黃國文 (2022)，生態水利的起點—知己知彼從環境調查開始，土木水利，第 49 卷第 2 期，第 11-16 頁。
6. 行政院公共工程委員會 (2023)，公共工程生態檢核注意事項。
7. 環境部 (2020)，中央地方攜手合作全面啟動臺灣智慧水聯網，<https://enews.moenv.gov.tw/Page/3B3C62C78849F32F/2042f3c7-e254-47af-aeca-3a6999f0178c>
8. Shah, C., Alaba, S.Y., Nabi, M. M., Prior, J., Campbell, M.D., Wallace, F., Ball, J.E., and Moorhead, R. (2023). An enhanced YOLOv5 model for fish species recognition from underwater environments. In Ocean Sensing and Monitoring XV (Article 1254300). SPIE.
9. Yang, Y., Xie, C., Fan, Z. et al. (2024). Digital twinning of river basins towards full-scale, sustainable and equitable water management and disaster mitigation. npj Nat. Hazards 1, 43. <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00047-2>.
10. Boom, B.J., He, J., Palazzo, S., Huang, P.X., Beyan, C., Chou, H.-M., Lin, F.-P., Spampinato, C., and Fisher, R.B. (2014). A research tool for long-term and continuous analysis of fish assemblage in coral-reefs using underwater camera footage. Ecological Informatics, 23, 83-97.
11. Fish4Knowledge. (2016). Collecting and Analyzing Massive Coral Reef Fish Video Data. March
12. Pal, D., Marttila, H., Ala-Ahoa, P., Lotsari, E., Ronkanen, A.-K., Gonzales-Incad, C., Croghan, D., Korppoo, M., Kämäri, M., van Rooijen, E., Bläfield, L., Silander, J., Baubekova, A., Bhattacharjee, J., Haghighi, A.T., Uvo, C.B., Kaartinen, H., Rasti, M., Klöve, B., and Alho, P. (2025). Blueprint conceptualization for a river basin's digital twin. Hydrology Research, 56(3), 197-212. doi: 10.2166/nh.2025.111.
13. Blair, G.S. (2021). Digital twins of the natural environment, Patterns, 2 (10), 100359. 



交廣工程顧問有限公司

誠信 | 創新 | 品質 | 服務 | 永續發展



案例實績

- 桃園捷運綠線GC03現況鑑定
- 高雄捷運黃線YC03、YC02建物調查
- 中壢污水下水道系統興建工程現況鑑定
- 臺大醫學院附設醫院西址院舍等12棟既有建築物耐震能力詳評
- 衛福部桃園醫院本院宿舍大樓結構補強工程委託設計
- 國防部空軍司令部馬公機場停機坪整建工程設計、監造
- 台灣自來水公司苗栗三義潛盾工程現況鑑定

服務項目

01. 公共工程規劃設計
02. 私有建物耐震弱層補強
03. 房屋安檢鑑定
04. 自來水及下水道工程

台北總公司

- ☎ 02-2709-0716
- 🌐 www.jgce.com.tw
- 📍 台北市大安區忠孝東路三段52號2樓

桃園分公司

- ☎ 03-357-2323
- 🌐 www.jgce.com.tw
- 📍 桃園市桃園區莊二街24號7樓