

ISSN : 2791-3805  
GPN : 2011100010

下水道  
● 水再生期刊

# 下水道水再生 期刊

第四卷第二期 114年7月

下水道系統優化建設與管理：下水道管理議題與解決方案

10

下水道系統優化建設與管理×下水道管理議題與解決方案

內政部國土管理署



本期刊下載



中華民國  
內政部國土管理署 National Land Management Agency,  
Ministry of the Interior

電話總機 (02)8771-2345  
105404 台北市松山區八德路2段342號

中華民國  
內政部國土管理署  
National Land Management Agency,  
Ministry of the Interior

## 主編的話

AI 浪潮席捲，污水下水道建設如何因勢利導趁勢而為？近年來人工智慧 AI 的突破可謂一日千里，而這兩年在生成式 AI 為大眾普遍使用的推波助瀾下，設法利用 AI 來解決各項課題已成為一種顯學，因此 AI 在各領域的廣泛運用已有風起雲湧之勢，儼然漸漸改變了過去產業管理上的思維，同時也形塑出另一種新型態解決方案，然而在 AI 運用興起的同時，更可結合已逐漸在污水下水道建設中發展成熟的數位轉型、智慧化管理、大數據分析、決策輔助、互聯網 IoT、雲端運算及數位孿生等創新科技，開啟新世代污水下水道管理架構及體系的序章，並與國際趨勢接軌，建立更具韌性及永續的水資源環境。

污水下水道的建設從開始擘畫之初，歷經了各個階段，包括：規劃設計、施工興建、營運管理、循環利用、淨零排放、延壽重置及永續發展等，都會面臨到不同的管理議題，早期對於這些議題的處理，因受限於科技的門檻及資訊流通的封閉，往往是透過人力或是個人能力經驗解決，其過程不僅耗時費力而缺乏效率，也容易淪為單打獨鬥無法集思廣益，且在權責人員離開崗位後經驗即無法傳承而造成知識的斷層，然下水道水再生期刊發行迄今已屆三年，因此本期期刊主題選定為「下水道系統管理議題與解決方案」，希冀綜整探討下水道建設發展以來曾遭遇的管理議題，並藉由近年創新的技術引領及參考國際間先進的研究，為議題的因應之道開創前瞻思維的解決方案。

本期期刊共收錄了 8 篇邀稿專文，分別針對了下水道建設資訊的管理、污水處理廠智慧化的操作、污水下水道管線的維護、再生水水源的監控、污水處理廠單元設備效能的提升及驗證等議題，分享運用創新科技或人工智慧賦予新方向的實際案例或解決方案，相信可以啟發在評估下水道建設管理議題時，能激盪出更有效率、更為精準及多元的策略。而這些解決方案在研商、評估及建置的過程中，其核心精神也必須要契合到目前國家積極推動淨零減排政策，因此在本期最後一篇專文將以全生命週期的觀點，提出下水道建設邁向淨零之路的解決方案。

有關污水處理廠智慧化操作的應用本期有 2 篇專文，由臺灣大學環境工程學研究所于昌平教授等 4 人主筆的「污水下水道系統大數據分析應用：從數據品質到智能管理」，闡明智慧化操作雖已成為處理廠營管的核心技術，但數據品質的良窳才是成敗與否的關鍵，于教授團隊以污水處理廠為實證場域，透過降取樣、時間滯後、相關性分析、特徵篩選等前處理技術提高數據品質，並以機器學習模型驗證對數位孿生的優化。

## 主編的話

由基士德環科公司卓伯全總監等 3 人分享的「打造 AI 賦能的污（廢）水處理廠」案例中，以人工智慧 AI 結合互聯網 IoT 的 AIoT 建構處理廠的管理平台，透過「程控智聯」、「設備賦能」、「智能巡檢」、「精確控制」等模組，達成穩定處理成效、設備故障預測、節省能耗及精簡加藥等，提升營運整體績效及落實永續循環。

由臺中市政府水利局方于芸股長等 2 人撰述的「臺中市用戶接管進度空間化管理：提升效率與推動環境永續的創新實踐」，係以數位轉型的模態，導入了 GIS 及 MIS 技術，建立了視覺化的管理平台，將過去極為繁瑣的用戶接管資料，透過多層次圖表分析功能，能即時掌握各階段進展，並結合提醒功能及空間分析，強化整體管理效率。

昕傳科技公司吳文峰副總經理等 3 人介紹的「污水下水道系統智慧管理應用與發展」，則以國內首度上線執行的高雄鳳山水資中心遠端監視系統為例，針對其集污區收集系統，結合 GIS、現場感測及影像辨識，透過互聯網技術建構水質、水量、水位及異常入侵等監測系統平台，並導入 AI 深度學習模型演算長期數據以提早預警，維持再生水水源的安全及穩定。

成功大學水工所陳緻紘研究員等 6 人所研提的「污水處理廠薄膜式散氣設備曝氣效能與混合情形探討」及國土署下水道永續組邱明祺科長等 6 人合著的「公共污水處理廠渦流沉砂池效能評估與建議」，均對過去處理廠單元設備常遭遇的效能問題發表因應解決之道，其中散氣設備攸關處理廠核心處理單元的生物效能，國土署擬建立本土化的驗證機制及場域，該研究參考國際間的效能測試規範建置測試模廠，據以探討相關操作參數，並進一步以軟體模擬分析溶氧對於硝化性能的影響；而沉砂池為重要前處理單元，但常見運轉功能不如預期，國土署邱科長等彙整了過去全國污水處理廠評鑑時有關沉砂池效能不彰的樣態，除分析發生的可能原因，也提供具體的改善對策與措施。

本期的跨域整合係以中興工程顧問公司周武雄技師等 3 人所撰文的「生命週期碳管理邁向下水道系統淨零排放」，闡述在國家 2050 年淨零排放路徑上，污水下水道建設要以更宏觀思維出發，並揭櫫減碳作為的關鍵戰略，進而建立起包括提高污水處理率、降低營運碳排放及建設低碳工程等三面向，以全生命週期為概念的碳排放管理。

由中興大學環境工程系陳浸煇教授等 2 人所共著的「科技解決方案應用於下水道系統管理因應策略之研析」，蒐集了國外以先進科技應用於下水道管線維護的研究，其中

## 主編的話

國際水協會(IWA)收錄的紐西蘭團隊研究，以超高射頻識別(UHF-RFID)的偵測方式，模擬下水道管線中水位及流速，據以預測管線阻塞的位置、程度及水流的影響；另在日本 B-DASH 計畫研發成果中，利用 AI 的影像辨識技術來強化下水道管渠破損的偵測能力，下水道管線以 TV 進行檢視雖已行之有年，惟其影像的辨識工作量龐大需耗力費時，因此透過 AI 影像辨識模組進行管損程度辨別，且自動訓練學習提高辨識精準度，將可有效提升工作效率。

污水下水道是重要的民生基礎建設，所涉議題層面及領域廣泛且經緯萬端，然而解決問題的思維、方法及工具，應隨著經驗的累積及科技的發展與時俱進，本期 8 篇專文中各方先進分享在面臨各項議題時，藉由務實優化的策略結合新創高效的科技，提出了新世代解決方案的應用參考可供借鏡外，亦冀望能啟發更多元的因應策略，以強化我國污水下水道永續發展的建設目標。

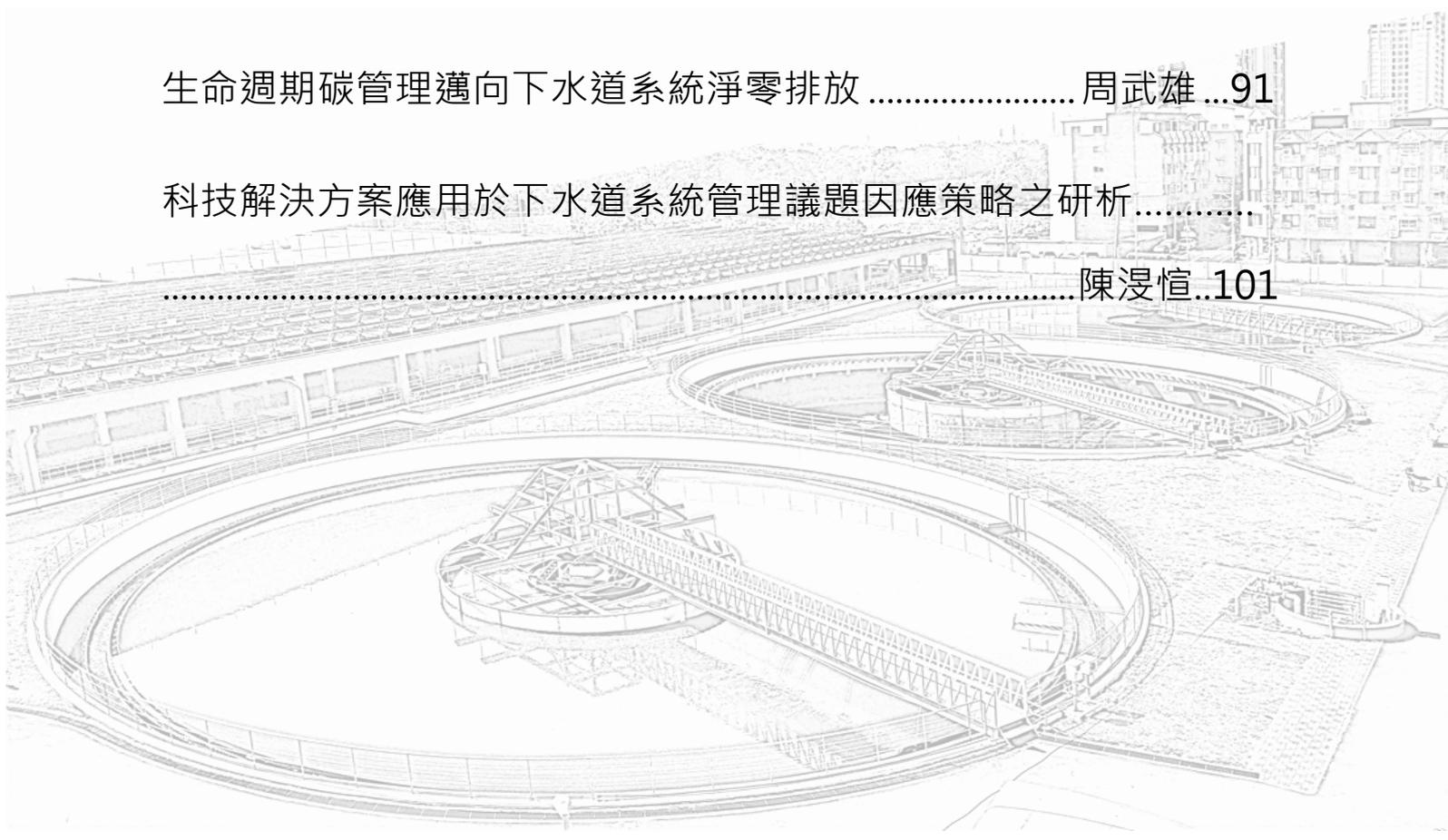
財團法人中興工程顧問社 環境工程研究中心阮春騰主任

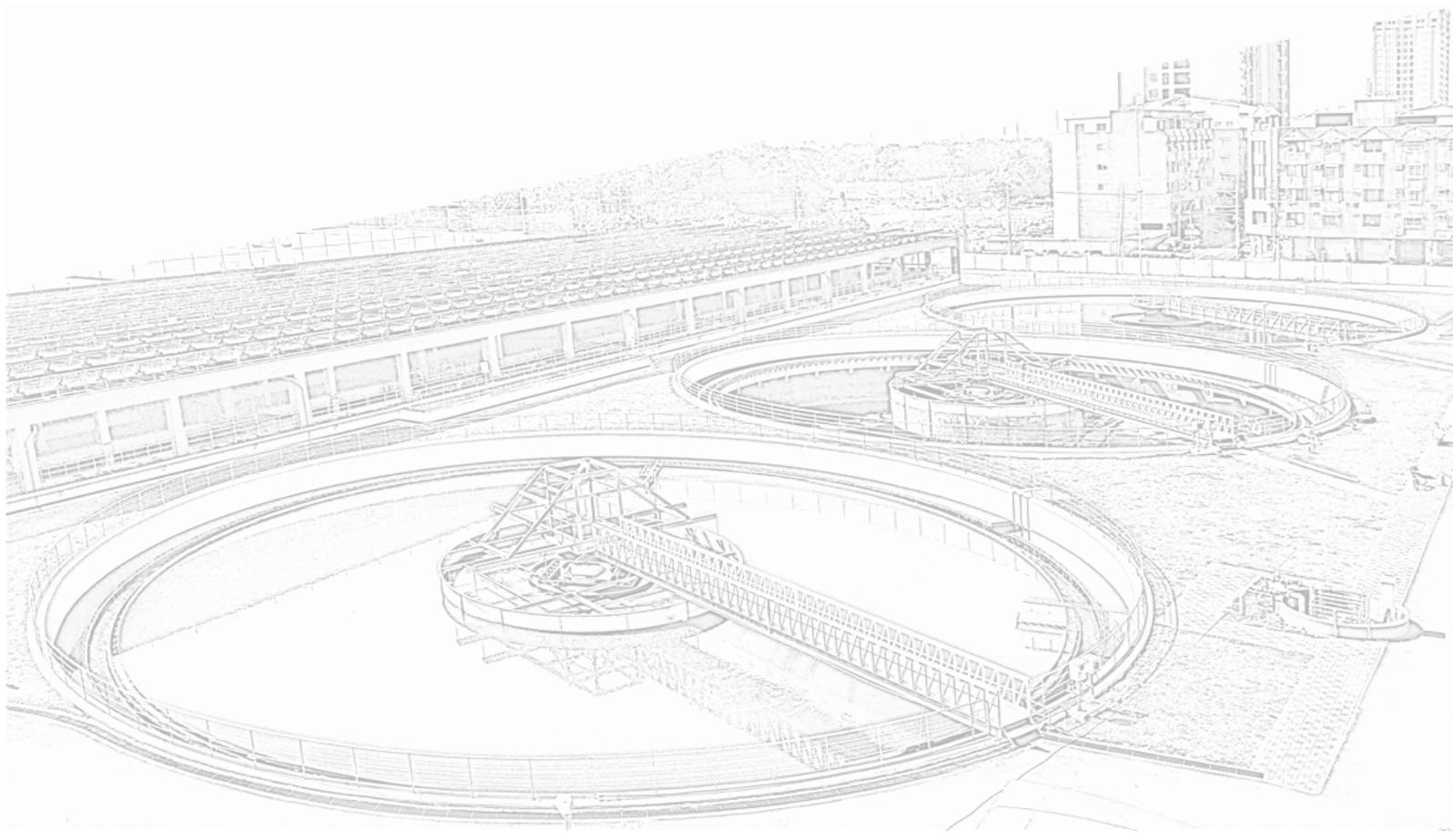


## 主編的話

# 目錄

污水下水道系統大數據分析應用：從數據品質到智能管理.....	
.....	于昌平 ...1
打造 AI 賦能的污（廢）水處理廠 .....	卓伯全 ...21
臺中市用戶接管進度空間化管理：提升效率與推動環境永續的創 新實踐 .....	方于芸 ...37
污水下水道系統智慧管理應用與發展 .....	吳文峰 .. 49
污水處理廠薄膜式散氣設備曝氣效能與混合情形探討..	陳緻紘 ...63
公共污水處理廠渦流沉砂池效能改善評估與建議 .....	邱明祺 ...79
生命週期碳管理邁向下水道系統淨零排放 .....	周武雄 ...91
科技解決方案應用於下水道系統管理議題因應策略之研析.....	
.....	陳漫愷..101







## 摘要

面對氣候變遷與水資源短缺的加劇，智慧化污水處理已成為永續水資源管理的關鍵策略。本研究以 A 污水處理廠為實證場域，運用高頻連續監測數據，結合線性迴歸、隨機森林、梯度提升等多種機器學習與集成模型技術，系統性驗證數據品質、降取樣與時間滯後處理對預測效能之影響。結果顯示，異常值剔除與感測器校正能使  $R^2$  提升至 0.977；60 分鐘降取樣下之 Voting 模型將 MAPE 降至 5.4%，在 11 小時滯後預測條件下進一步優化至 4.7%。國際間 AIoT 與數位孿生應用趨勢亦顯示，數據品質標準化、模型可解釋性及跨場域資料共享為主流方向，呼應本研究提出的智慧營運決策架構與強化學習應用策略。整體而言，本研究驗證高品質數據與多模型融合在智慧化污水處理中之關鍵價值，並提供結合數位孿生與強化學習之優化方案，作為我國永續污水管理之實證依據與國際參照。

**關鍵字：** 智慧污水處理、數據品質、降取樣、機器學習、數位孿生

1. 國立臺灣大學環境工程學研究所 / 教授
2. 國立臺灣大學環境工程學研究所 / 教授
3. 國立中山大學環境工程研究所 / 講座教授
4. 信諾科技股份有限公司 / 總經理
5. 國立臺灣大學環境工程學研究所 / 碩士

于昌平<sup>1</sup>、林逸彬<sup>2</sup>、高志明<sup>3</sup>、陳冠榮<sup>4</sup>、張育綺<sup>5</sup>

# 污水下水道系統大數據分析應用 | 從數據品質到智能管理

## Abstract

In response to escalating climate change and water scarcity, smart wastewater treatment is a key strategy for sustainable water management. This study examined the A Wastewater Treatment Plant, using high-frequency continuous monitoring data and a range of machine learning models-including linear regression, random forest, and gradient boosting-to evaluate the impact of data quality, downsampling, and time-lag treatment on predictive performance. Results show that outlier removal and sensor calibration increased  $R^2$  to 0.977, and a voting ensemble model with 60-minute downsampling reduced MAPE to 5.4%, further optimized to 4.7% under an 11-hour lag. Trends in AIoT and digital twin applications underscore the importance of data quality assurance, model interpretability, and cross-site data sharing. This study demonstrates the critical value of high-quality data and multi-model integration in smart wastewater management and proposes a digital twin – reinforcement learning optimization framework as a practical and globally relevant reference.

**Keywords** : smart wastewater treatment, data quality, downsampling, machine learning, digital twin

## 壹、前言

隨著全球氣候變遷與水資源短缺問題日益嚴峻，污水處理廠的角色已不再只是單純的污染削減設施，而是水資源回收與循環利用的重要環節。為了確保污水處理後的水質達標，並實現高效能的水資源管理，智慧化污水處理技術的發展成為產業發展的關鍵趨勢。其中，人工智慧物聯網(AIoT)技術結合物聯網(IoT)與人工智能機器學習(Machine learning)技術，可即時監測污水處理廠的水質變化，並透過數據分析進行精準預測，提升處理效能，降低運營成本，進一步推動污水處理系統的智慧轉型。

本研究團隊以 A 污水處理廠為實證場域，從「資料品質最佳化」出發，結合機器學習與數位孿生模型，系統性檢驗資料清洗、降取樣與時間滯後修正對預測效能的影響，並進一步採用包含集成模型等交叉驗證最適化程序，導入時間滯後效應敏感度分析，突顯特徵工程與多模型融合之優勢。

除場域驗證外，本文亦對近年國際間 AIoT 與數位孿生應用進行回顧，歸納感測資料品質標準化、模型可解釋性提升與跨廠資料共享等趨勢，以期掌握國際前瞻趨勢逐步實現污水處理智慧化與永續經營的目標。

## 貳、水質水量監測資料品質對智能分析的影響

在智慧化污水處理系統的發展過程中，數據的品質決定了智能分析的準確性與可靠性，其不僅影響模型的準確度，更關係到智能決策是否能夠實際應用於處理流程的最佳化。

在污水處理場域，如 A 污水處理廠各處理單元佈建感測器持續收集水質與運行數據。過去的研究顯示，數據品質的變動會顯著影響模型學習能力，例如在污水處理廠的活性污泥槽（好氧槽）中，若數據品質較高，機器學習模型的準確度可顯著提升。

本章將探討數據品質如何影響智能分析的準確性，並分析數據前處理技術如何提高機器學習模型的效能。透過具體案例與數據驗證，闡述數據異常值處理、數據滯後效應的影響，以及感測器校正的重要性，以確保智慧水管理系統的可靠性與準確性。

### 一、污水處理數據品質的影響因素

污水處理廠的監測數據涵蓋進流水、生物處理槽與出水水質等多個環節，其中影響數據品質的主要因素包括：

#### 1. 數據漂移與校正問題

長期運行的感測設備會出現數據漂移

現象，使得數據的準確性降低，在未經過感測器校正的污水處理廠中，數據的偏差可能導致模型預測結果的誤差顯著增加。

## 2. 異常數據與缺失值

由於設備故障、環境變化或數據傳輸問題，監測數據可能出現異常值或缺失數據，影響機器學習模型的準確性。

## 3. 處理程序造成數據滯後效應

進流水的水質變化會影響生物處理槽的運行效果，然而，這種影響並非即時發生，而是具有一定的時間滯後效應。

## 二、數據品質優化與前處理技術

為了提升污水處理廠的智能管理效能，數據品質的優化與前處理技術至關重要。以下方法可有效提升數據的品質，進而提高機器學習模型的預測準確度：

### 1. 異常數據檢測與處理

透過統計方法（如  $3\sigma$  原則）與機器學習方法（如馬哈拉諾比斯距離）識別異常數據，並根據前後數據以線性內插或趨勢迴歸模型估算插補修正。

### 2. 數據降取樣技術

由於水質感測數據往往是高頻率採樣，直接使用高頻數據可能會增加機器學習模型的運算負擔，因此應使用降取樣技術，以保留關鍵趨勢資訊的同時減少冗餘

數據與雜訊。

## 3. 時間滯後數據處理

考慮槽體各水質變數間的交互影響不完全為即時反應，進流水亦非即時影響出水數據，因此，應透過時間滯後處理方法，經過數據時間序的重新對齊來優化模型輸入，提高模型輸入變數對輸出目標值的關聯性與預測準確度。

## 三、研究案例與實證結果

本研究團隊以 A 污水處理廠實廠監測的數據為分析樣本，探討數據品質對機器學習模型的影響，並驗證數據前處理技術的有效性。

首先將連續 30 天的數據分為 30 日組（完整數據）與 10 日組（數據品質較高），以探討數據品質對機器學習模型預測效能的影響。研究流程包括數據清理、統計分析、相關性篩選、滯後效應評估與模型訓練。透過五種機器學習模型比較不同數據組的預測準確性，並透過 SHAP (Shapley Additive Explanations) 分析特徵影響力（研究流程如圖 1）。

SHAP 是一種機器學習模型解釋方法，它是基於博弈論中的 Shapley 值理論。Shapley 值最初用於衡量合作博弈中各個玩家對整體收益的貢獻，這一概念被引入機器學習領域，用於評估每個特徵對模型預測結果的貢獻。SHAP 透過計算特

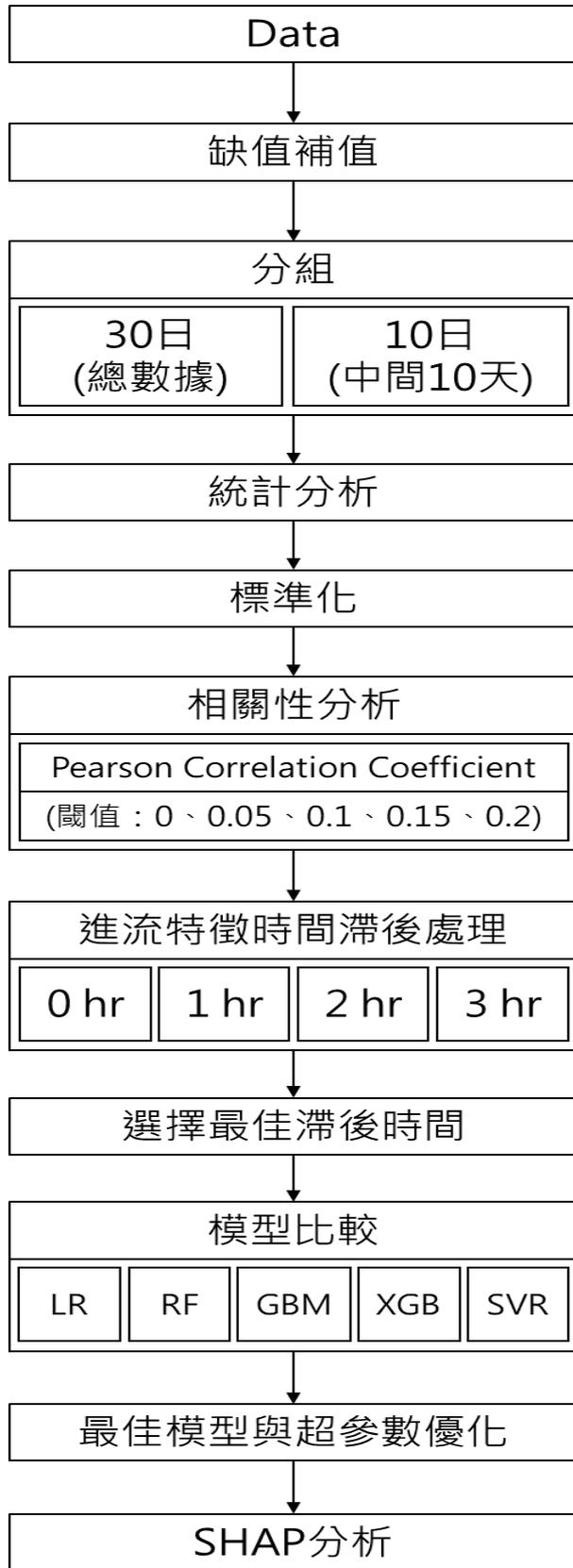


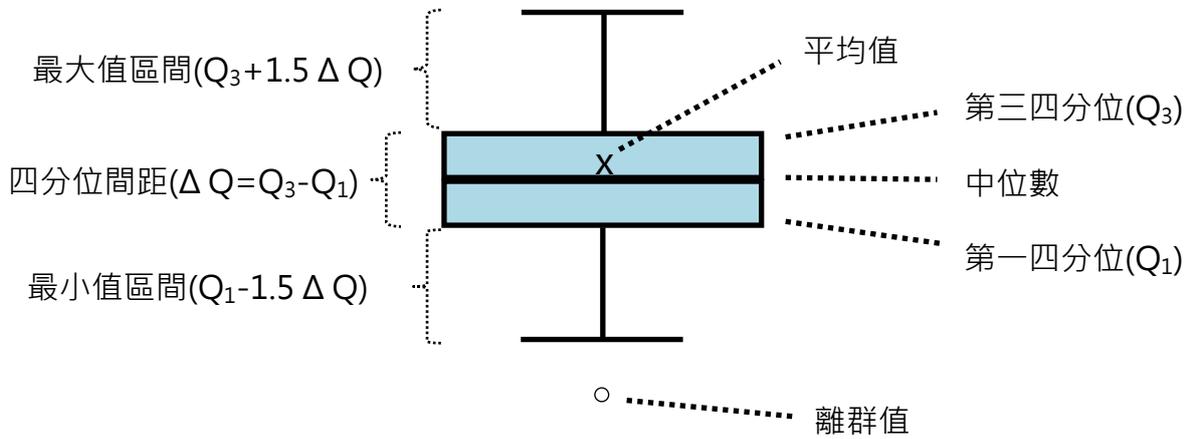
圖 1 研究流程圖

徵在不同特徵組合中的邊際貢獻，公平量化每個特徵的重要性，此外，SHAP 還能捕捉多個特徵之間的交互作用，提供對模型行為更全面的解釋。SHAP 在金融、醫療等需要高透明度與高解釋性的領域應用廣泛，因為它既適用於簡單模型，也能解釋複雜模型，並提供包括總結圖、依賴圖等直觀的可視化工具，使其成為機器學習解釋性分析中的重要工具。

研究結果顯示：

1. 經由持續地進行感測器校正及數據品質保障後，獲得了 10 日組較高品質數據。以進流  $\text{NH}_3\text{-N}$  為例，其數據變動較小，標準差亦較小（參見圖 2）。
2. 考量水質感測器存在漂移特性，故採用降取樣技術進行特徵去噪與優化，針對 10 日組數據集進行資料清洗與線性內插補值，採用均值分箱法 (Mean Binning) 進行降取樣計算。觀察本例 Kullback-Leibler(KL) 散度評估結果（如圖 3，橫軸 Time gap 每 1 刻度代表 5 分鐘），於 20 分鐘 (Time gap=4) 時平均 KL 數趨近最低點，為最佳數據採樣頻率，另經專家訪談建議生物處理區的操作反應可採小時為單位進行統計觀察，因此保留 60 分鐘 (Time gap=12) 的平均數為備選方案。兩組資料 KL 散度皆小於 0.1，顯示降採樣後的數據集仍能

(a)



(b)

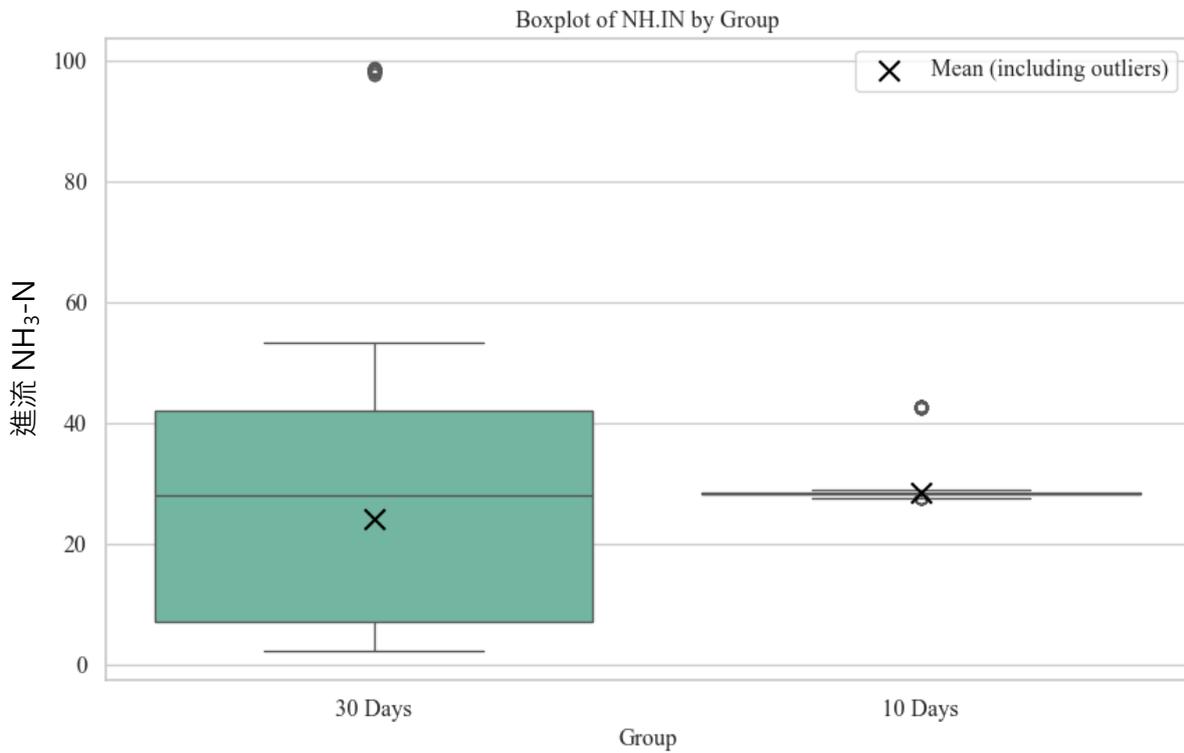


圖2 (a)箱型圖說明及(b)進流  $NH_3-N$  統計箱型圖

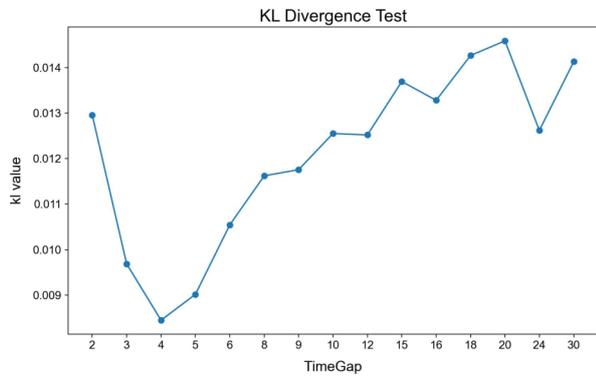


圖 3 KL 離散圖

保留原始數據的有效特徵資訊。

3. 採用 **Pearson** 相關係數進行相關性分析並繪製為熱圖 (如圖 4)，各方格顏色代表水質測項間的相關性差異。本例以好氧槽溶氧濃度為預測目標，設定閾值篩選不同的水質測項作為模型的特徵輸入變數。觀察 30 日組和 10 日組數據中不同閾值組別的模型預測準確度，對比其結果可發現

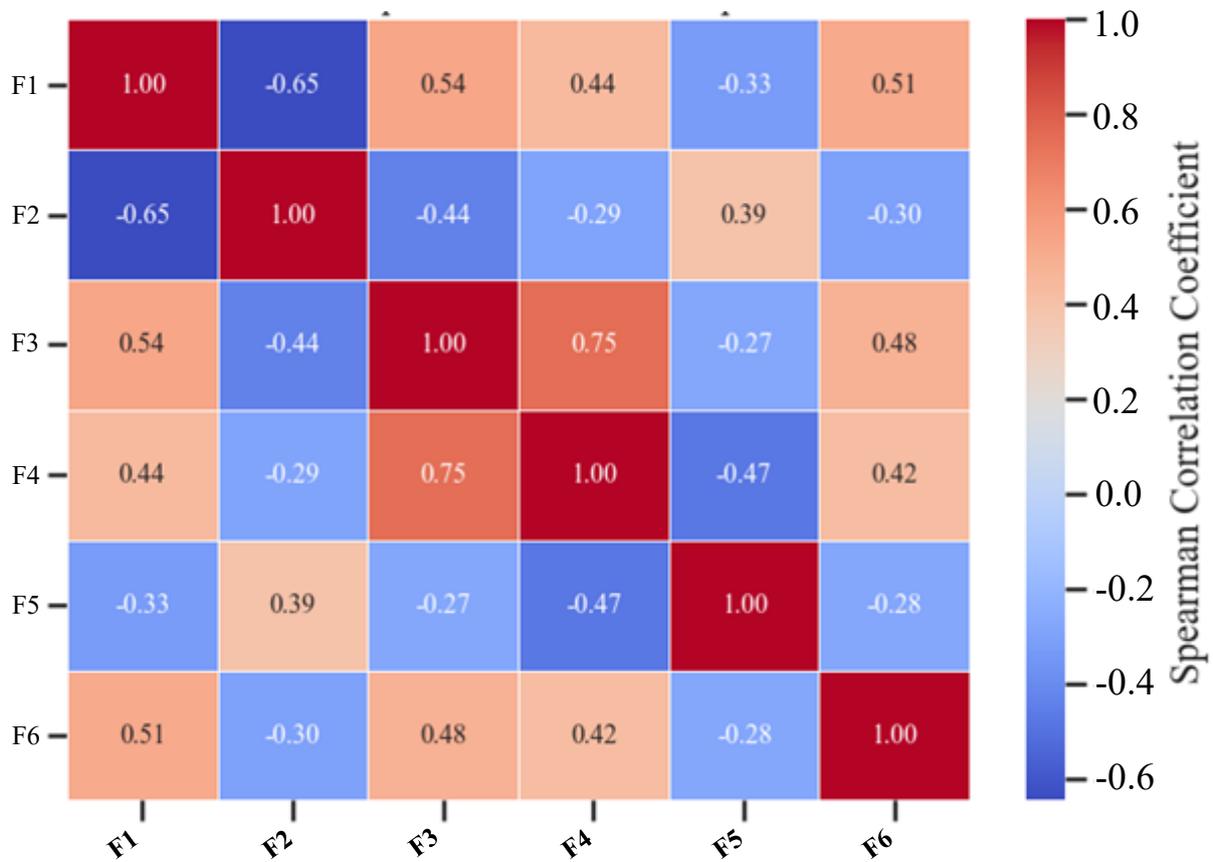
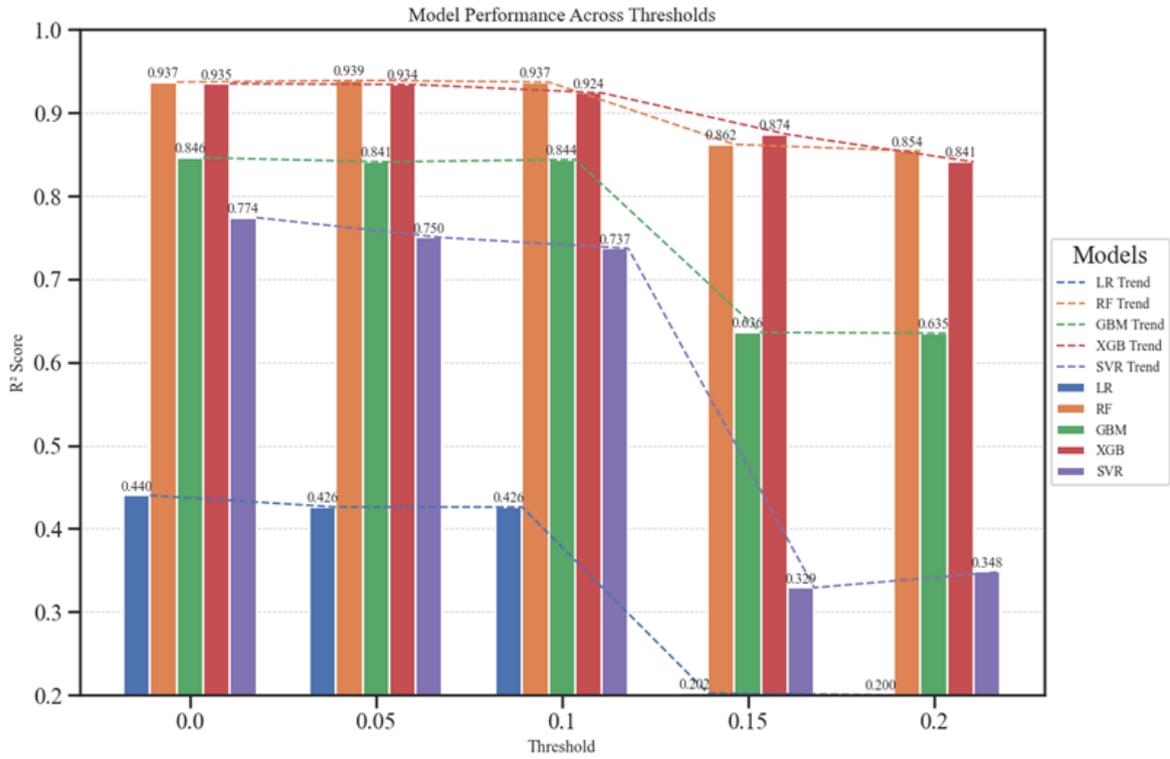


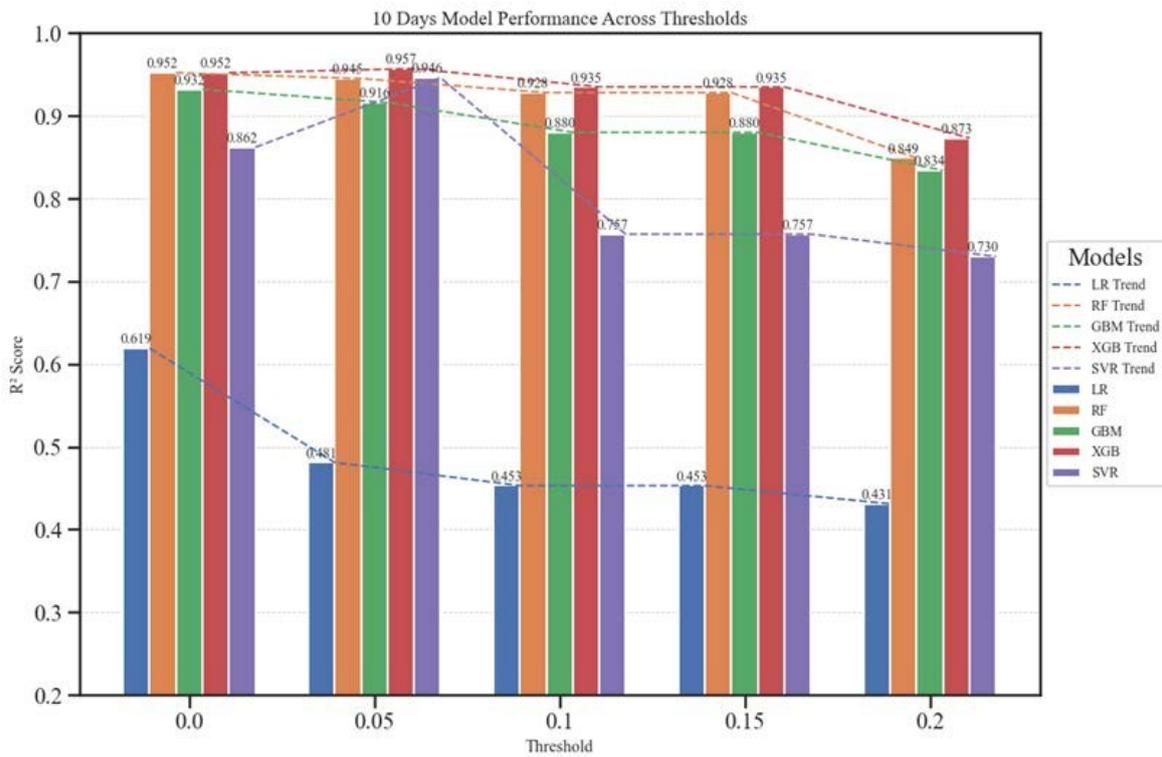
圖 4 典型 Pearson 相關係數分析熱圖

備註：

Pearson 相關係數為衡量兩變數間線性關係強度與方向的統計指標，其值介於 -1 與 1 之間，正值代表正相關，負值代表負相關，絕對值越接近 1 表示相關性越強。



( 30 日組 )



( 10 日組 )

圖 5 不同相關性閾值下的模型性能比較

(如圖 5)，無論是在低閾值還是高閾值條件下，10 日組模型的預測結果都較 30 日組更加準確。10 日組數據品質較高、測量波動較小，使模型能夠更準確地學習特徵與目標變量之間的潛在關係，進而在各模型與各閾值條件下皆有更好的預測效果。

**4. 隨機森林(RF)和極限梯度提升(XGB)演算法在 30 日組中的預測表現最佳** (如表 1 及表 2)，能夠在不同時間滯後下保持穩定且展現最優預測能力，尤其是在滯後 1 小時的情況下 R<sup>2</sup> 均達到最佳，線性回歸(LR)則因模型

表 1 隨機森林(RF)於不同時間滯後下的預測結果

Time Lag (hr)	MAE	MSE	RMSE	MAPE	R <sup>2</sup>
0	0.256	0.196	0.442	1.076	0.937
1	0.254	0.184	0.429	1.065	0.949
2	0.260	0.223	0.473	1.085	0.938
3	0.266	0.216	0.465	1.065	0.938

表 2 極限梯度提升(XGB)於不同時間滯後下的預測結果

Time Lag (hr)	MAE	MSE	RMSE	MAPE	R <sup>2</sup>
0	0.276	0.200	0.448	1.146	0.935
1	0.288	0.223	0.473	1.149	0.938
2	0.286	0.256	0.506	1.269	0.929
3	0.290	0.223	0.473	1.208	0.936

限制無法有效擬合數據，表現最差 (如表 3)。

**5. SHAP 方法進行特徵篩選**

SHAP 是一種常用於機器學習的解釋性方法，能夠評估不同輸入變數對模型預測結果的影響。本研究團隊應用 SHAP 方法 (參見圖 6)，以好氧槽溶氧濃度

表 3 線性回歸(LR)於不同時間滯後下的預測結果

Time Lag (hr)	MAE	MSE	RMSE	MAPE	R <sup>2</sup>
0	0.925	1.738	1.318	6.422	0.440
1	0.946	1.979	1.407	6.339	0.449
2	0.943	1.987	1.410	6.644	0.450
3	0.940	1.975	1.405	6.350	0.433

備註：

1. MAE (Mean Absolute Error)：平均絕對誤差，表示模型預測值與實際值之間的平均差異，數值越小代表預測準確度越高。
2. MSE (Mean Squared Error)：均方誤差，為誤差平方的平均值，對離群值較敏感，常用於評估預測值整體穩定性。
3. RMSE (Root Mean Squared Error)：均方根誤差，為 MSE 的平方根，單位與原始資料相同，利於直觀判讀預測誤差。
4. MAPE (Mean Absolute Percentage Error)：平均絕對百分比誤差，反映預測誤差相對於實際值的比例，常用於不同量級資料的比較。
5. R<sup>2</sup> (Coefficient of Determination)：決定係數，用以衡量模型對觀察資料的解釋能力，值域介於 0 到 1，數值愈高表示模型擬合效果愈佳。

DO 作為目標預測項，找出模型預測的前五重要特徵項目。分析發現好氧槽 ORP、缺氧槽 ORP、缺氧槽 MLSS、好氧槽 pH 值及缺氧槽 pH 值等變數對好氧

槽 DO 預測的貢獻度最高，建議未來的數據建模過程中應優先考慮這些變數。

綜上，數據品質對於智能污水處理系統的影響至關重要，透過感測器校正、異常數據處理、數據降取樣與時間滯後分析，可顯著提升機器學習模型的準確性。未來的污水處理廠應加強數據品質管理，確保感測設備的穩定運行，並運用大數據技術進行數據優化，以支援更高效的智慧化污水處理管理。

### 參、數位學生與機器學習在生物處理槽的應用

前章討論了污水處理數據品質對智能分析的影響，強調數據清理、降取樣及時間滯後處理對於提高機器學習模型準確度的關鍵作用。然而，單純依賴數據驅動的機器學習方法仍存在侷限性，特別是在處理非線性、生物化學反應耦合與長時間滯後影響的複雜系統時，純數據驅動的模型可能難以捕捉系統的內部動態行為。

污水處理廠的生物處理單元負責降解水中的有機污染物，其效率受微生物活性、曝氣條件、污泥迴流等多種因素影響。傳統操作方式依賴現場監測數據與經驗法則，但由於微生物群落的動態變化與水質波動，使得操作最佳化充滿挑戰。近年來，數位學生 ( Digital Twin ) 技術的發展為污水處理智能管理提供了新契機，透過數據驅動的虛擬模型，即時模擬與優

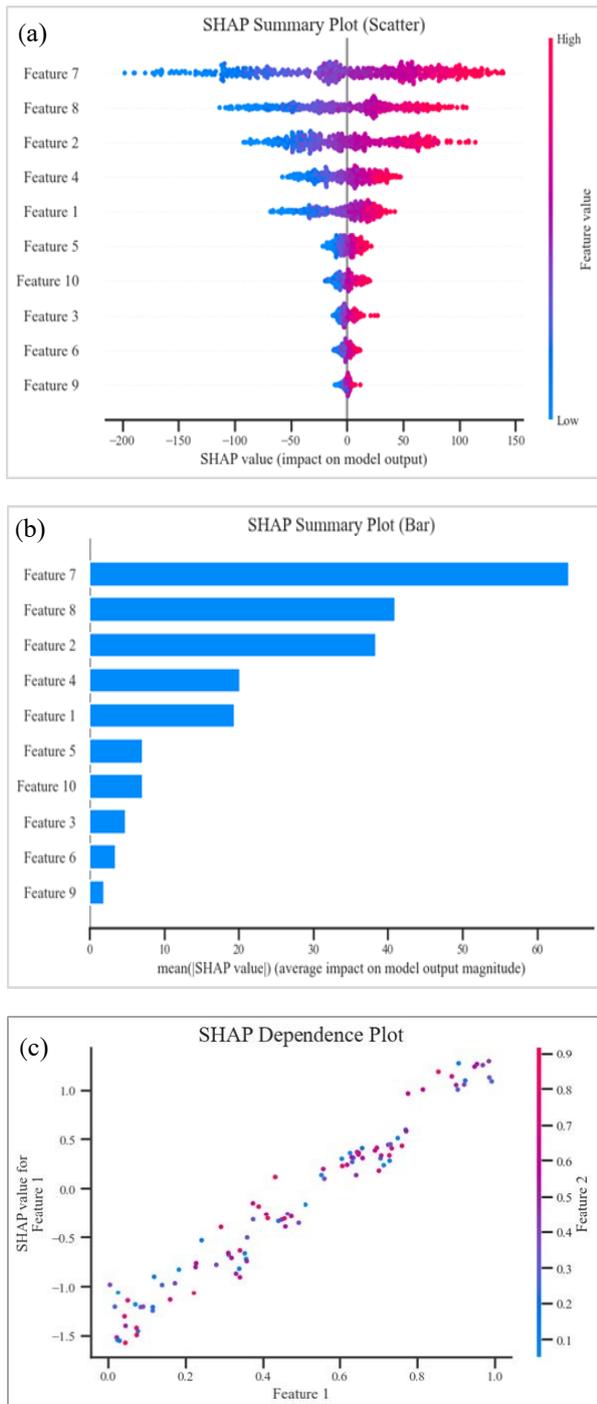


圖 6 典型 SHAP 依賴圖 (a)、SHAP 長條圖(b)及 SHAP 散點圖 (c)

化污水處理操作。

數位孿生技術整合了物理建模與機器學習(Machine Learning)，能夠動態預測處理效能，並根據實際運行狀況調整最佳操作策略(概念示意如圖7)。

本章將主要探討數位孿生技術在生物處理槽的應用，包括特徵工程、機器學習模型的應用，以及智能決策支援的發展方向。

### 一、數位孿生技術應用於污水處理

數位孿生技術透過即時數據收集與高精度數據建模，建立一個與實際污水處理

系統同步運行的虛擬模型，主要應用於以下三方面：

#### 1. 物理模型與數據驅動模型的結合

物理模型基於水力學與生物處理反應方程式，模擬曝氣、污泥迴流、硝化/脫硝等處理過程的影響。數據驅動模型則利用感測器數據與機器學習技術，通過識別關鍵模型對象和影響因素，分析歷史趨勢嘗試預測未來出水水質。

#### 2. 即時監測與預測

透過感測器蒐集生物處理槽內的水質變化，如溶氧(DO)、混合液懸浮固體

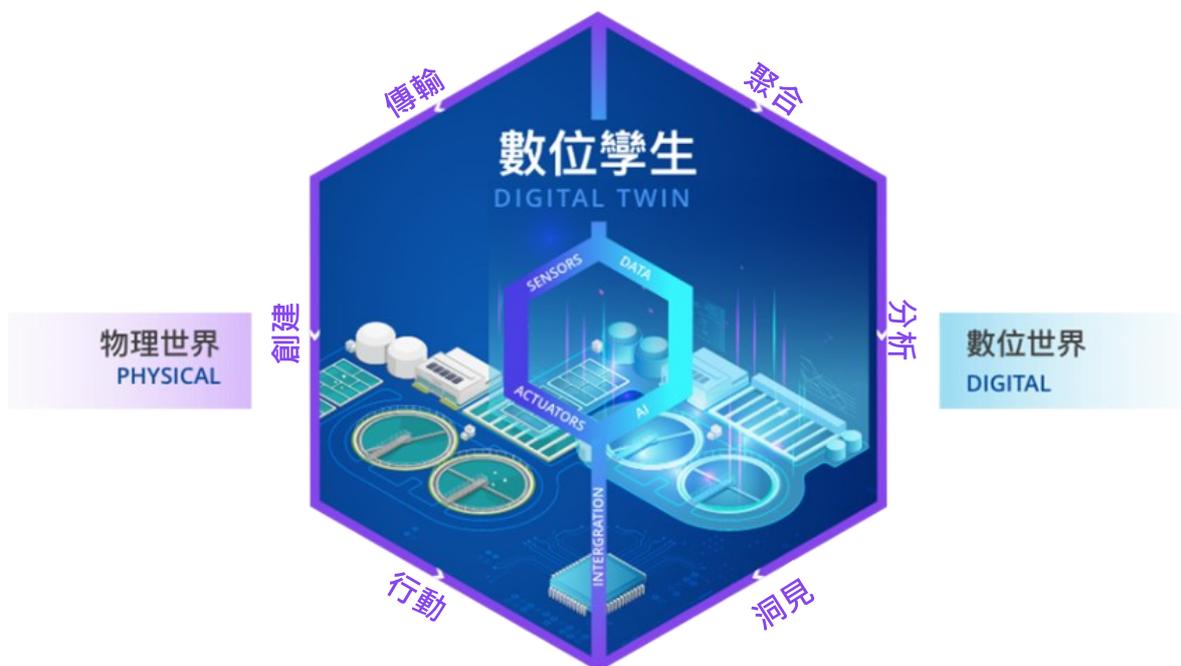


圖7 數位孿生概念示意圖

(MLSS)、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、化學需氧量(COD)等關鍵參數。由於進流水非即時影響出水數據，透過時間滯後效應的變數平移，數位孿生模型可提前預測出水水質變化趨勢，幫助操作人員及時調整曝氣與污泥迴流量。

### 3. 預防性維護

透過數位孿生技術，分析設備運轉歷史數據，建立健康狀態識別模型，識別設備異常特徵，減少非計畫性停機與維修成本。

## 二、感測數據的降取樣與特徵工程

污水處理系統的數據通常來自高頻率感測器，如 SCADA 系統每 5 分鐘收集一次數據。然而，高頻數據容易受感測器漂移與雜訊影響，若直接應用於機器學習模型，可能會影響預測準確度。因此，基於提高數據品質與降低雜訊，研究團隊針對數位孿生仿真預測模型的訓練資料，進一步結合了數據降取樣與特徵工程進行案例驗證研究。

降取樣程序請參考前章說明，針對特徵工程，研究團隊首先進行水質感測項目間的相關性分析(如圖 8)，協助辨識各水質變數間的關聯強度，揭示潛在因果關係。此步驟為模型建構奠定基礎，亦有助於資源配置與策略制定，並增進模型的預測能力。經初步分析後，建議自 24 項原始感測資料中選出關聯性較高的 22 項作

為建模變數。

主成分分析(PCA)則採用 Scikit-learn 函式庫進行計算，將高維度資料轉換為低維空間，在保留主要變異量的情況下簡化資料，降低運算成本。分析後，雖仍保留 22 維，但經標準化處理並映射至超平面，使資料結構更簡潔。

PCA 降維雖可減少訓練數據量、降低模型訓練算力需求，然亦須與原始數據集做交叉驗證，以避免簡化數據維度造成模型準確度下降。本例將關聯性分析篩選變數後的原始資料及 PCA 處理後的降維資料，分別投入模型訓練測試。在使用原始數據集的模型中，表現最佳的模型為 MLP，其平均絕對百分比誤差(MAPE)約為 26.2%；而使用 PCA 處理數據集的最佳模型為投票法模型(結合 MLP 和 SVR 模型)，其 MAPE 約為 31%。驗證顯示，本例數據集採用 PCA 降維會降低模型準確度，選用原始數據搭配單一 MLP 模型的 MAPE 低於 30% 已顯示出初步可用性，本團隊進一步應用結合深度學習概念的粒子群優化(PSO)方法，生成混合式 PSO-Single-MLP 模型，將 MAPE 成功降低至 20.1% 的可用水準。

## 三、機器學習模型應用於污水處理

數位孿生技術與機器學習的結合，可顯著提升污水處理預測與管理能力。本團隊測試了多種機器學習模型，以提升生物

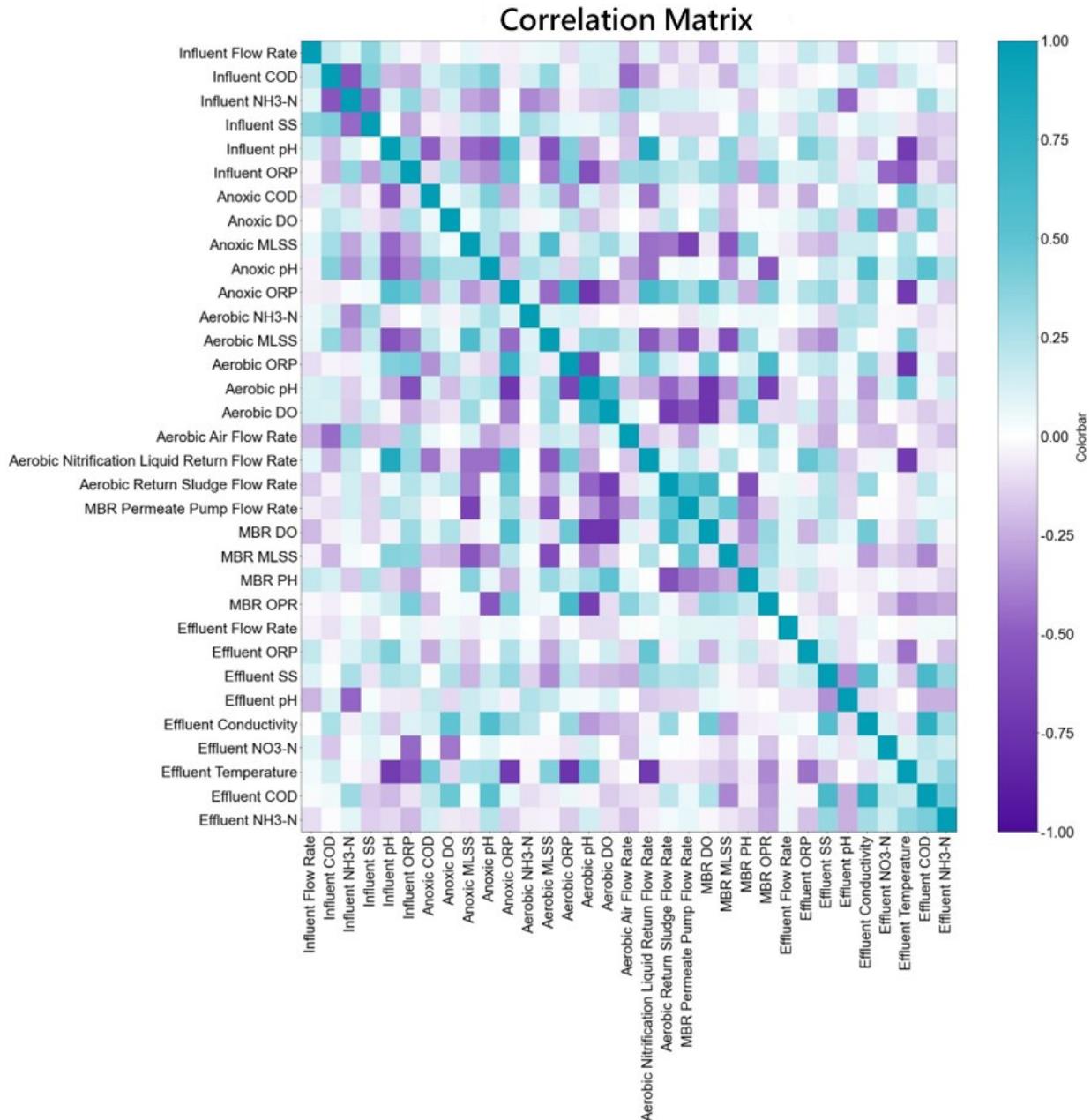


圖 8 水質感測項相關性分析圖

處理槽出水水質預測的準確性。

### 1. 機器學習演算法

在模型擬合階段，本團隊採用的機器學習演算法包括線性迴歸 (LR)、支持

向量迴歸 (SVR)、隨機森林 (RF)、多層感知器 (MLP) 與梯度提升迴歸 (GBR) 等，並進一步利用 Voting 與 Bagging 建立集成模型進行複合測試與驗證。

## 2. 模型測試驗證

採用上述不同之機器學習演算法及集成複合模型，進行模型最適化的交叉驗證與測試，分別以 20 及 60 分鐘之數據降取樣資料集投入訓練，最終以 60 分鐘資料之 Voting 集成模型 (結合 LR、RF 與 GBR) 表現最佳，MAPE 可降至 5.4%。考慮生物處理程序的時間滯後效應，進一步針對不同滯後時間進行敏感度分析，發現預測 11 小時後出水水質的模型其 MAPE 可進一步降低至 4.7% (如圖 9)。

數位孿生技術與機器學習的結合，具備提升污水處理廠生物處理槽的智能管理潛力。透過感測數據異常處理、降取樣、關聯性分析變數篩選、PCA 降維與機器學習模型的應用等技術，整合應用提升數位孿生仿真預測模型的準確度。

未來，隨著強化學習技術與 AIoT 的進一步發展持續提升模型準確度與穩定性，污水處理廠將能夠實現即時監測、智能決策與自動化控制，提升處理效率並降低能耗。

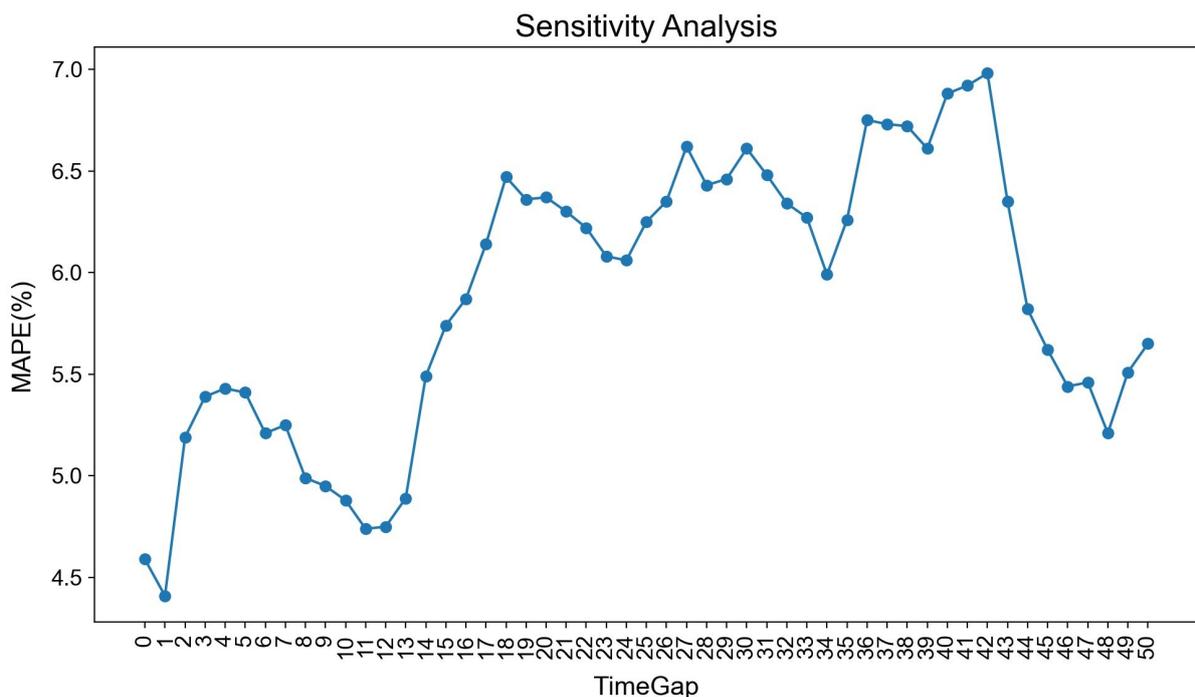


圖 9 滯後時間敏感性分析圖

## 肆、國際間 AIoT 與機器學習應用 於污水處理之回顧與展望

在前述章節中，我們探討了數據品質如何影響污水處理智能管理，以及數位孿生結合機器學習技術於污水生物處理程序的應用潛力。本章旨在進一步回顧並分析近年國際間 AIoT 技術在污水處理領域之應用發展與技術趨勢，從資料前處理方法、模型建構流程、感測器應用與資料品質挑戰等層面，探討其關鍵技術特性與應用潛力，並與前述章節之研究結果形成呼應與對照，進一步展望未來研究與實務發展方向。

### 一、AIoT 技術於污水處理的發展背景與應用動能

面對氣候變遷與全球水資源日益短缺的挑戰，污水處理廠不僅需滿足法規放流水標準，更肩負提升資源回收效率與減碳節能的使命。AIoT 技術透過結合感測器即時監測、水質參數無線傳輸、大數據分析與機器學習預測，可即時掌握各處理單元運行狀況，並提供精準的操作建議，提升運轉效率與系統韌性。

國際上，現階段常見應用包括：透過機器學習模型預測生物處理單元出流水之污染物濃度（如：COD、NH<sub>3</sub>-N），以提前進行操作調整；建構資料品質檢核與異常排除機制，提升自動監測數據可信度；運用時間窗口資料壓縮與參數延遲分

析技術，建立可解釋性高、準確度佳之智慧預測模型等。

### 二、資料前處理與品質優化技術之國際趨勢

AIoT 應用的基礎在於資料品質，過多雜訊或異常值將導致預測模型偏誤，進而誤導操作決策。回顧國際實務上常見之資料品質優化流程包含三階段：

1. **異常值剔除**，常用方法如馬哈拉諾比斯距離 ( Mahalanobis Distance ) 與穩健距離 ( Robust Distance )，可有效篩選出多變數下的不合理數據。
2. **線性補值與連續性處理**，維持時間序列資料平滑性。
3. **平均桶化(mean binning)等降取樣技術**，藉以簡化波動細節並強化主要趨勢之學習。

此外，為反映處理單元間實際物理延遲，亦會進行參數時間平移處理，搭配 Pearson 相關分析選定最佳延遲滯後值，建立反映污水流動邏輯之預測模型。

在數據處理過程中，為了有效辨識各參數的時間延遲性以還原水質變化的潛在因果關係，在統計方法的選用上，除本團隊採用之 Pearson 相關性係數外，回顧相關文獻亦常見 Spearman 和 Jackknife 方法（各統計方法特性綜整如表 4）。

此類資料處理流程，與本研究於 A 污水處理廠中實施之數據分組、滯後分析與特徵工程流程具高度一致性，亦再次驗證資料品質控制與特徵選擇為模型成功之關鍵前提。

### 三、智慧預測模型建構與比較分析

機器學習技術可視為 AIoT 應用的核心，其模型選擇與訓練策略將直接影響預測精度與運算效率。文獻顯示，國際上常見之模型包含隨機森林(RF)、支持向量機(SVM)、多層感知器(MLP)、極限梯度提升(XGB)等；部分研究更進一步採用集成學習(ensemble learning)策略，如 Voting 或 Bagging 模型，以提升穩定性與泛化能力。

針對不同模型輸入資料之特性(如 PCA 降維後之結果)，亦可搭配不同模

型進行適配性測試與敏感度分析，選定最具預測力且具備解釋性的模型架構。在本研究案例中，亦觀察到模型效能與特徵組成間高度關聯，顯示資料來源設計與特徵工程策略的重要性，與國際應用經驗相互印證。

### 四、實務挑戰與國際發展趨勢

儘管 AIoT 與機器學習技術已證實可有效應用於污水處理廠之智慧管理，然而實務推動仍面臨數項挑戰，包括感測器數據穩定性與標準化不足、歷史資料品質參差、操作人員數位素養不一，以及模型部署後之維運機制與效能再驗證等問題。

為克服此等挑戰，國際趨勢逐步朝向以下方向發展：(1)建立標準化的感測器資料格式與異常檢測規則(2)發展具解釋性與自我校正能力的 AI 模型架構(3)引入

表 4 時間延遲性常用統計方法比較表

統計方法	方法特性
Pearson 相關係數	<ul style="list-style-type: none"> <li>衡量兩變量之線性關係</li> </ul> $r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$
Spearman 相關係數	<ul style="list-style-type: none"> <li>適用於非線性關係</li> <li>將數據排名，計算排名之相關性</li> </ul>
Jackknife 法	<ul style="list-style-type: none"> <li>排除資料集中一筆數據後之 Pearson 相關係數</li> <li>對所有結果取平均，評估數據穩健性</li> </ul>

數位孿生模擬平台整合 AIoT 模型與實廠控制流程(4)推動跨部門協作，提升場域端與技術端的整合能力。

## 伍、結論與未來展望

本研究以 A 污水處理廠為實證場域，針對缺氧槽溶氧濃度與出水水質預測進行深入探討，重點聚焦於資料處理技術與預測模型效能之整合應用。在研究方法上，透過原始連續監測數據的缺失值補遺、異常值剔除、特徵工程、滯後特徵製作與特徵選擇等完整流程，嘗試建構適用於污水處理場域的 AI 模型訓練程序與方法。

研究方法上設計 30 日與 10 日資料組別，比較資料品質對預測能力之影響，結果顯示高品質資料在機器學習模型中的表現優於一般資料，隨機森林模型在 10 日資料組別中經超參數調整後，預測好氧槽溶氧濃度達到  $R^2 = 0.977$  的成效，顯著驗證資料完整性與可信度對模型效能之關鍵角色。

本研究成果亦與國際間 AIoT 與數位孿生於污水處理智慧化應用發展趨勢相互呼應。從肆、針對國際文獻的回顧可見，包括我國近期數位孿生模擬應用於實廠操作輔助與風險預控之案例，皆強調透過高頻監測、數據延遲建模與資料降維技術，提升整體模型預測的即時性與穩定性，並進一步導入 SHAP 方法輔助解釋模型邏輯，讓運轉管理決策過程透明化與科學化。

透過本研究所建立之資料處理與模型建構流程，除提供臺灣場域的具體實證依據外，亦為日後推廣至其他場域建立了實務操作模式與國際接軌基礎。未來進一步精進之方向，建議應聚焦於以下幾點：

### 一、擴大資料品質管理機制

建議結合異常值偵測與資料插補演算法，發展標準化的水質感測資料品保流程，並推廣至各地污水處理廠實務操作中，以奠定 AI 模型應用之穩固基礎。

### 二、強化跨槽體與跨參數間關聯建模

透過多源感測器資料之整合，結合資料延遲校準與空間熱點分析方法，建立具備生物行為邏輯之全場域模擬架構，進一步提升模擬解釋性。

### 三、導入數位孿生與強化學習機制

於既有模擬模型上疊加控制策略模擬與目標函數調整機制，結合專家知識與數據驅動演算法，實現進出水品質、能耗、污泥迴流等參數之整體性智慧優化。

### 四、建立智慧營運決策支持系統

以管理者日常操作需求為導向，將機器學習預測模型、SHAP 可解釋圖像與系統異常診斷結合，設計具介面互動性的儀表板，協助操作人員即時調整。

### 五、推動跨廠資料互通與模型共通化

鼓勵各污水處理廠間以標準資料格式進行匿名化資料共享，結合聯邦學習等技術發展模型共用機制，提升整體產業智慧化發展水準。

近年來，研究團隊累積多項污水處理

智慧化監測管理與操作的實務經驗（如圖 10），於部分實廠導入感測資料驅動之預測模組與操作建議機制，協助優化包含進流水管理、曝氣與加藥策略，並同步監控能耗與處理穩定性，實現具體且量化的智慧應用效益。依初步實測成效顯

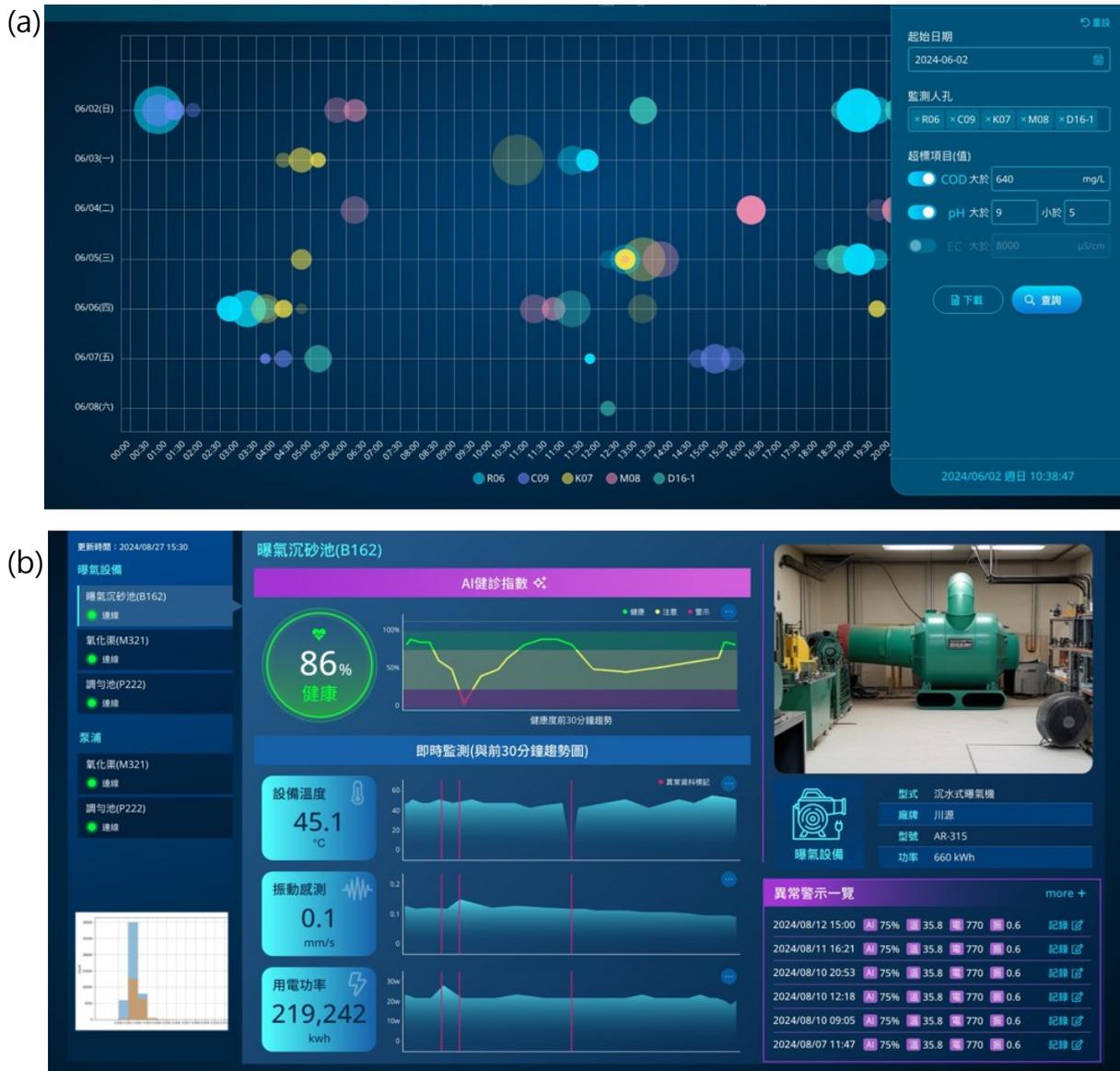


圖 10 污水處理智慧化監測管理案例 (a) 污水下水道管網水質警報圖 (b) 設備運轉 AI 健診指數

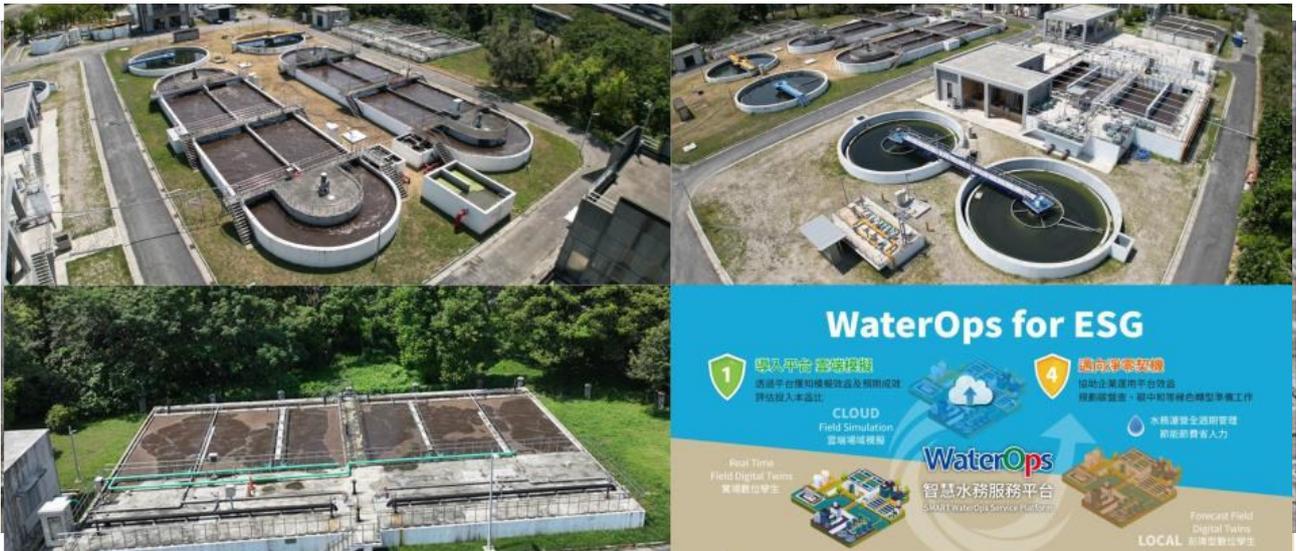
示，曝氣風機能耗降低約 9%，放流水 COD 符合率達 99.2%，整體廠區單位處理電力容量下降達 12%。此外，透過低碳節能模組估算，每年可減碳約 75 噸 CO<sub>2</sub>e。上述成果證實本研究所提資料處理流程與模型訓練策略，已具高度遷移與應用潛力，適合推廣應用於不同型態之污水處理系統，強化整體智慧水務發展基礎。

綜合而言，本研究以 A 污水處理廠為實證場域，驗證數據品質對 AI 模型表現之關鍵性，並串聯國際案例趨勢，初步建立了符合現地操作條件之智慧優化策略架構。後續建議政策面推動水質感測資料品保規範化、技術面發展數位孿生與強化學習結合模組、應用面建構具預測、解釋與建議功能的決策支持系統，逐步實現下水道智慧化與永續經營之目標。

## 參考文獻

- 張育綺，應用機器學習預測污水處理廠活性污泥槽溶氧濃度及關鍵因子探討，國立臺灣大學環境工程學研究所碩士論文，112 年 02 月 07 日。
- Chen, K.-J. and Kao, C.-M. "Digital Twin Modeling Technology for Public Wastewater Treatment Plants." *Journal of Environmental Engineering, ASCE* (in press) (2025).
- Shapley, L. S. (1953). A value for n-person games. *Contribution to the Theory of Games*, 2, 61-66.
- Sun, J., Xu, Y., Yang, H., Liu, J., and He, Z. "Machine learning facilitated the conceptual design of an alum dosing system for phosphorus removal in a wastewater treatment plant." *Chemosphere* 351: 141154 (2024).
- Wang, D., Thunéll, S., Lindberg, U., Jiang, L., Trygg, J., and Tysklind, M. "Towards better process management in wastewater treatment plants: Process analytics based on SHAP values for tree-based machine learning methods." *Journal of Environmental Management* 301: 113941 (2022).
- Yamada, M., Matsumoto, M., Arakaki, M., Hebishima, H., and Inage, S. "Estimation of discrepancy of color qualia using Kullback-Leibler divergence." *Biosystems* 232: 104774 (2023).
- Zhong, S., Zhang, K., Bagheri, M., Burken, J. G., Gu, A., Li, B., Ma, X., Marrone, B. L., Ren, Z. J., Schrier, J., Shi, W., Tan, H., Wang, T., Wang, X., Wong, B. M., Xiao, X., Yu, X., Zhu, J.-J., and Zhang, H. "Machine Learning:

New Ideas and Tools in Environmental Science and Engineering." Environmental Science & Technology 55(19): 12741 – 12754 (2021).



### 摘要

本文闡述水資源管理系統 AI 賦能技術研發及落地驗證的成果，同時分享打造 AI 賦能污（廢）水處理廠的經驗，期能為智慧水務的發展方向奠定承先啟後、繼往開來的基礎。AI 賦能污（廢）水處理系統除可提供操作維護管理之解決方案及提升營運管理績效外，在面對永續轉型的發展趨勢，可降低營運管理風險並創造低碳、綠色轉型的機會，可協助污（廢）水處理系統加速雙軸轉型、驅動淨零碳排，邁向 ESG 永續發展目標。

# 打造 AI 賦能的污（廢）水處理廠

卓伯全<sup>1</sup>、鄭博之<sup>2</sup>、謝宏晃<sup>3</sup>

**關鍵字：** AI 賦能、智慧水務、淨零碳排、雙軸轉型、ESG 永續發展目標

- 1.基士德環科股份有限公司 / 技術總監
- 2.基士德環科股份有限公司 / 董事長特別助理
- 3.基士德環科股份有限公司 / 董事長

## Abstract

This study elaborated on the results of AI empowerment technologies in water resource management systems, this article also shared the experience of building AI empowerment of sewage and wastewater treatment plants, hoping to lay a foundation for the development direction of smart water services. In addition to providing operation and maintenance management solutions and improving operational management performance, AI empowerment of sewage and wastewater treatment systems can reduce operational management risks and create opportunities for low-carbon and green transformation. It can help sewage and wastewater treatment systems accelerate dual-axis transformation, drive net-zero carbon emissions, and move towards ESG sustainable development goals.

**Keywords** : AI empowerment, smart water, Net-Zero emissions, dual-axis transformation, ESG sustainable development goals.

## 壹、前言

污（廢）水處理廠 AI 賦能，係指賦予污（廢）水處理系統智慧化管理與控制的能力。污（廢）水處理系統本身即屬一動態複雜且具高度變異性的系統，為因應污（廢）水處理系統與周圍環境的變化而引起系統特性的改變，及系統內部各單元、程序及子系統間交互關係與作用的變化，污（廢）水處理系統必須具有反饋機制及「自適應和自學習性的反饋系統」，以保持對客觀環境的適應能力。亦即，污（廢）水處理系統必須賦予解讀、分析資料及邏輯思考與輔助決策的能力。

人工智慧(Artificial Intelligence, AI) 是讓系統具有模擬人類思考模式、邏輯與行為的能力，且能自行透過數據分析的過程，持續校正、進化。亦即，AI 可透過感知、學習、推理與校正等過程，深入大量需要人類智慧判斷或涉及超出人為分析能力上限的資料規模數據、執行複雜且繁瑣的解讀及分析工作，並依人類思維邏輯規律進行思考及行動，協助突破操作者及管理者的能力限制，賦予污（廢）水處理系統執行智慧化管理及控制決策等活動的能力。

對營運管理單位而言，污（廢）水處理廠 AI 賦能的目標，主要表現在：降低管理成本、提高服務品質及強化經營體制等方面。對污（廢）水處理系統而言，AI 賦能的效益包括：(1) 智能自動化提高

行政效率，降低人力負荷；(2) 即時監測與智能化操控提高處理效率及系統穩定性，降低意外及違規風險；(3) 深度的數據收集及分析優化處理程序，預測及鑑別成效限制因子並提前調整，減少操作風險及資、能源浪費；(4) 預防性維護減少停機風險及人力成本，落實精實管理(Lean Management)；(5) 掌握設備實際運轉狀況，設立系統化及數位化標準作業程序，打造快速應變的機制；(6) 快速聚焦設備異常問題並排除設備故障，提高維護管理工作效率；(7) 將操作維護管理經驗整合進 AI，協助新人初階工作，降低入門門檻；及(8) 數據報告數位化、自動化，主動告警並自動滿足管理者需求等。

## 貳、污（廢）水處理系統 AI 賦能的關鍵要素

污（廢）水處理系統 AI 賦能的意義，係藉助新興的資料（訊）收集與數據分析技術，將各項污（廢）水處理過程相關設備及裝置所產生的數據，透過智慧物聯網(AIoT)收集、分析後，運用智能化操控及智慧型 AI 推論技術從中獲取設備運轉、程序控制及操作維護管理上的經驗知識及營運管理方式，再回饋到相關設備及程序控制上，使污（廢）水處理系統變得更具智慧，進而達到整體性提升水與污（廢）水處理系統營運管理績效，包括：管理效率最佳化、設備效能最佳化及操作效益最佳化的目標。

而污(廢)水處理系統 AI 賦能的本質為「污(廢)水處理系統操作維護及營運管理解決方案提供者」。因此, AI 賦能的污(廢)水處理系統須具備的關鍵要素, 包括: (1) 具高度數據整合, 可縮短數位落差及數位科技落差的系統; (2) 充分應用一系列新資訊化技術(如大數據分析、人工智慧、行動互聯網、雲端計算、物聯網 IoT 以及區塊鏈等)的系統; (3) AI 賦能於操作維護及營運管理機制; (4) AI 賦能於全生命週期管理; 及(5) AI 賦能驅動淨零碳排、加速雙軸轉型, 邁向可持續發展目標等。

### 參、污(廢)水處理系統 AI 賦能的內涵

就污(廢)水處理系統的「系統管理面」而言, 可歸納包括: (1)設備維護保養; (2)設備及場域巡檢; (3)水質合格及符合法規; 與(4)節省能耗及成本等需求, 以符合污(廢)水處理系統永續經營與永續發展的目標。另就污(廢)水處理系統的「營運管理面」而言, 近年來全球氣候變遷造成水資源匱乏、高科技產業對水資源需求量增加、新興污染物及氮磷管制標準的提高、水回收再利用程度與需求的增加等, 導致污(廢)水處理系統在操作維護及營運管理上的問題更加錯綜複雜也更具挑戰性, 包括人力資源、設備妥善維護率、設備汰舊換新、提標改造、耗材藥劑控管及節能減碳等需求相對提高。因

此, AI 應用於污(廢)水處理系統之設備賦能、程控智聯、智能巡檢及精確控制, 以達到設備延壽、操作優化、精實管理及節能節費等目標極為重要(圖1)。

「設備賦能」係指藉由傳感器、物聯網(IoT)、人工智慧(AI)、大數據分析以及數位孿生等技術的應用, 使污(廢)水處理系統設備從被動執行指令的角色, 轉變為能夠自主感知、分析、決策並與其他系統協同工作的智慧單元, 進而提升設備智能化水準, 從而增強其性能、效率和價值。水資源管理系統設備賦能的對象, 包括: 泵浦(陸上型/沉水式)、攪拌設備(含推流器)、供氣設備、鼓風機(含魯式、空氣懸浮式、離心式)、污泥脫水設備(含帶濾式、壓濾式)及套裝式反應器等。

賦予污(廢)水處理系統運轉設備智慧能力的過程, 首先需建置具有單機設備管理及多設備集中管理之「設備健康管理平台」。設備健康管理(Prognostic and Health Management, PHM)是指故障預測和健康管理, 為了滿足自主保障、自主診斷的要求提出來的, 是基於狀態的維修 CBM (視情況維修, condition based maintenance)的升級發展。PHM 的核心是利用先進傳感器的集成, 藉助各種 AI 演算法和智能化模型來預測、監控和管理設備的健康狀態。PHM 強調污(廢)水處理系統設備管理中的狀態感知, 監控設備健康狀況、故障頻發區

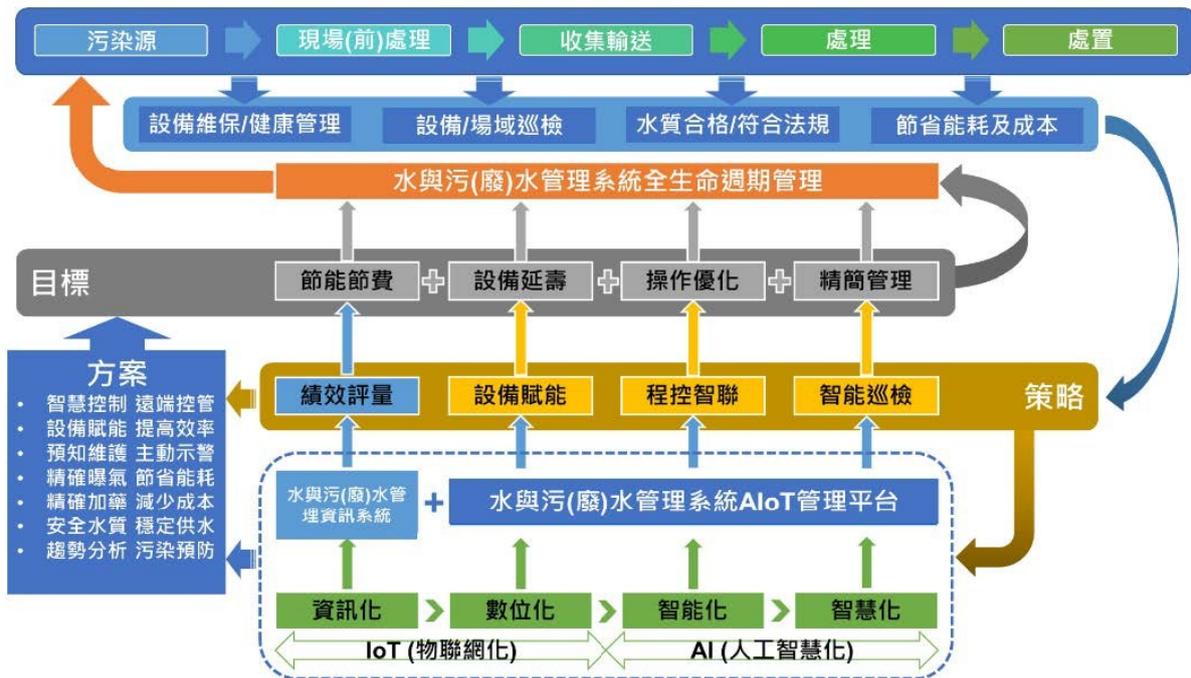


圖 1 水與污（廢）水處理系統 AIoT 管理平台組成架構

域與周期，通過數據監控與分析，預測故障的發生，從而大幅度提高運轉及維護保養的效率。

「程控智聯」係藉由智慧物聯網 (AIoT) 即時擷取污（廢）水處理系統中各處理單元及程序之狀態變數（監測變數），透過智能化操控模組對控制變數進行動態智能化操控。智慧型 AI 推論模型根據動態智能化操控的結果，以機器學習 (Machine Learning, ML)/ 深度學習 (DeepLearning, DL)/ 類神經網路 (Artificial Neural Network, ANN) 演算法 (algorithms) 建立智慧型控制、處理成效評估及水質預測推論模型，對控制變數進行智慧微調及糾偏，以達污（廢）水處理系統操作最佳化的目標。

以程控智聯技術所發展的生物、化學及物理處理單元及程序之智能化操控模組與智慧型推論模型（表 1、表 2、表 3）為例，智能化操控模組在於使受控之處理單元及程序即時且正確地被控制在可發揮其功能和成效的操作範圍；而智慧型推論模型則根據各單元及程序的動態變化行為進行診斷、評估及微調或糾偏，使受控之處理單元及程序回復到最佳的操作狀態。

「智能巡檢」主要包括：設備巡檢、場域巡檢及巡檢人員安全維護等。智能巡檢是工業 4.0 場景下，利用 AI 技術對傳統巡檢模式進行的全方位升級。與依賴人工或傳統感測器僅監控單一數值異常的巡檢方式相比，AI 賦能的智能巡檢以多模態數據融合、高效異常診斷和自主策略優

表1 生物處理單元及程序智能化操控模組與智慧型推論模型

處理單元		智能化操控模組	智慧型推論模型	適用處理程序		
生物處理	生物反應	線上生物活性監測模組		A2O	AO	ASP
		精確曝氣控制模組	曝氣量 AI 推論模型	A2O	AO	ASP
		硝化液內迴流控制模組	硝化液內迴流量 AI 推論模型	A2O	AO	
		分段進流控制模組		Step-Feed AO		
		間歇曝氣控制模組	生物硝化脫硝反應終點追蹤及鑑定 AI 推論模型	SBR/ SBBR	ICEAS	CASS
		生物硝化脫硝程序控制模組		SBR/ SBBR	ICEAS	CASS
	生物沉澱	線上污泥沉降性監測模組		以上處理程序皆可		
		污泥迴流控制模組	污泥迴流量 AI 推論模型	以上處理程序皆可		
			程序控制成效評估 AI 模型	以上處理程序皆可		
			水質預測 AI 模型	以上處理程序皆可		

表 2 化學處理單元及程序智能化操控模組與智慧型推論模型

處理單元		智能化操控模組	智慧型推論模型	適用處理程序		
化學處理	pH 調整	酸劑智能化加藥控制模組	酸劑加藥量 AI 推論模型	pH 控制	重金屬去除	
		鹼劑智能化加藥控制模組	鹼劑加藥量 AI 推論模型			
	混凝	混凝劑智能化加藥控制模組	混凝劑加藥量 AI 推論模型	化學混凝程序		
		助凝劑智能化加藥控制模組	助凝劑加藥量 AI 推論模型			
	氧化還原	氧化劑智能化加藥控制模組	氧化劑加藥量 AI 推論模型	化學氧化	高級氧化 AOPs	
		還原劑智能化加藥控制模組	還原劑加藥量 AI 推論模型	化學還原		
				化學氧化還原反應終點 AI 追蹤及鑑定模型	化學氧化/還原	
	化學沉澱	污泥沉降性監測模組	污泥影像辨識模組	以上化學處理程序皆可		
			程序控制成效評估 AI 模型	以上化學處理程序皆可		
			水質預測 AI 模型	以上化學處理程序皆可		

表3 物理處理單元及程序智能化操控模組與智慧型推論模型

處理單元		智能化操控模組	智慧型推論模型	適用處理程序			
物理處理	過濾	過濾程序濾程監測模組		重力式	壓力式		
		過濾程序反沖洗時機點控制模組	過濾程序貫穿點時機 AI 推論模型				
	活性炭吸附	活性炭吸附飽和監測模組	活性炭吸附程序貫穿點時機 AI 推論模型	重力式	壓力式		
		活性炭吸附程序反沖洗時機點控制模組	活性炭吸附能力參數 AI 推論模型				
	離子交換	離子交換再生時機控制模組	離子交換樹脂貫穿點時機 AI 推論模型	陽離子	陰離子		
		離子交換容量飽和監測模組	離子交換容量飽和時機 AI 推論模型				
	膜處理	膜過濾程序反沖洗時機點控制模組			UF	NF	RO
		膜過濾程序藥洗時機點控制模組		膜過濾程序藥洗時機 AI 推論模型	UF	NF	RO
		膜過濾程序換膜時機點控制模組		膜過濾程序換膜時機 AI 推論模型	UF	NF	RO
		膜過濾程序去除率監測模組			UF	NF	RO
		膜過濾程序結垢係數監測模組			UF	NF	RO
				程序控制成效評估 AI 模型	以上物理處理程序皆可		
				水質預測 AI 模型	以上物理處理程序皆可		

化為核心，實現了更高效、更準確的設備與場域監控。

「精確控制」是程控智聯技術中實現污（廢）水處理系統節能節費目標的最佳化控制技術。所謂的「精確控制」，指的是一種滿足供需平衡條件（或符合供需平衡原則）的控制方法，包括：「精確曝氣控制技術」及「精確加藥控制技術」。

其中，精確曝氣控制技術係指「即時滿足生物反應需氧速率的動態曝氣控制方法」，使曝氣系統可以依據活性污泥的需氧速率調整生物系統所需的曝氣量，兼具活化生物活性及控制曝氣的功能。而精確加藥控制技術則指「符合化學反應特徵點的藥劑量控制方法」。以化學混凝反應為例，其反應特徵點為完成電性中和的時機點，此時膠體粒子表面之負電荷與混凝劑正電荷當量相等，界達電位達最低點。化學混凝反應控制在此特徵點，膠體粒子濃度最低且可避免混凝劑超量添加產生電性逆轉效應，而需再藉由沉澱物掃曳作用讓多餘的混凝劑凝集沉澱的情況。

AI 應用於污（廢）水處理系統中，除可對日常操作維護營運管理數據進行即時分析及管理，並透過巨量數據分析與機器學習，提供更為精確之操作控制決策及更精準的水質預測，結合人工智慧自主學習的特性，持續優化污（廢）水處理系統之單元及程序之操作管理策略，實現污（廢）水處理系統精實管理及操作優化之

目標外；同時可迅速整合外部環境資訊、污（廢）水處理系統生命週期與內部碳排放量資訊，並結合污（廢）水管理資訊系統，產生營運管理的知識，透過數位轉型及智慧化將數據、資訊與知識，融入整體營運管理機制，以降低營運管理風險並創造低碳、綠色轉型的機會。

因此，在面對永續轉型的發展趨勢，AI 賦能之污（廢）水處理系統除具有：(1) 遠端監控：提高能源使用效率；(2) 設備賦能：降低設備運轉能耗；(3) 操作優化：節省能源降低碳排；及(4) 雲端運算：分析衡量碳排績效等特性外，更具有加速雙軸轉型的特性，包括：(1) 透過數位科技協助數位轉型，達到永續綠色目標；(2) 結合數位轉型及淨零轉型，打造具高度適應力且數位化的永續經營模式；(3) 運用 AI 科技和數據分析解決污（廢）水處理系統所面臨的問題，充分發揮雙軸轉型核心整合能力；及(4) 透過 AI 驅動的能源數據平台提供智慧減碳服務，協助進行環境永續發展及永續經營的風險管理等。

為落實我國節能減碳目標及期程，除加速關鍵領域之技術研究與創新，引導產業綠色轉型，並進行跨領域整合，以完備我國產業生態發展，達成永續發展之願景。同時考量全球節能減碳趨勢，AI 技術可協助企業以數位化、系統化、智慧化方式，進行污（廢）水處理系統溫室氣體排放即時監控，並以虛實整合系統

(Cyber-Physical System, CPS)為核心 AI 賦能之數位孿生系統，可大幅減少污(廢)水處理系統全生命週期管理所需的人力及時間資源，達到精簡管理的目標。同時，可藉由模擬、預測及優化的功能，協助污(廢)水處理系統加速雙軸轉型、驅動淨零碳排，邁向 ESG 永續發展目標。

#### 肆、污(廢)水處理系統 AI 賦能經驗分享

有鑑於基士德(GSD)應用 AI 於污(廢)水處理系統程控智聯技術在節能減碳上的豐碩成果，近年來實場驗證結果顯示，生物曝氣池精確曝氣控制之曝氣設備節能效益可達 20%以上；以化學除氟加化學混凝程序的精確加藥控制結果，鹼劑(NaOH)、除氟劑(CaCl<sub>2</sub>)及混凝劑(PAC)之節省藥劑添加量分別達 10%、25%及 35%以上。因此，AI 賦能於污(廢)水處理系統以提升整體營運管理績效並符合淨零轉型及永續發展目標的發展路徑，儼然成為各級污(廢)水處理廠亟待努力的目標。

AI 賦能之污(廢)水處理系統係充分應用 AI 技術於資訊化、物聯網(IoT)化、智能化及智慧化的過程，包括：污(廢)水管理資訊系統、AIoT 管理平台、及虛實整合數位孿生系統的建置過程。

#### 1. 污(廢)水管理資訊系統

污(廢)水管理資訊系統係整合污(廢)水處理系統於各生命週期(包括：規劃、設計、施工、建置、操作、維護、營運、管理、監督、考核)階段所產生的計畫文件及資料表單，依報告書圖文件化、作業程序標準化、資料表單電腦化、成效指標資訊化、計畫報表自動化及專家教育知識化等過程，分門別類納入污(廢)水管理資訊系統之資料庫、模式庫及知識庫中。

近年來，生成式人工智慧(Generative Artificial Intelligence, GAI)技術發展快速且應用層面廣泛。GAI 是一種更先進的人工智慧，可以創造全新內容和想法的人工智慧。GAI 技術試圖在非傳統計算任務中模仿人類智能，例如圖像識別、自然語言處理(NLP)和翻譯。同時，GAI 是一種能夠根據輸入的數據，生成全新、原創內容的人工智慧技術，甚至讓電腦執行複雜任務，例如軟體可以自行建立內容，做出決策和學習等。

因此，在建置污(廢)水管理資訊系統的過程，可以充分應用 GAI 技術強大學習及模仿能力，以達到提高工作效率及節省人力成本的效益。包括：

- (1) 於計畫書圖文件化過程擷取重要特徵資訊，作為建立標準作業程序書的基礎

- (2) 自動生成標準作業程序書初稿
- (3) 自動生成電腦化的資料表單
- (4) 擷取成效指標，並產生資訊化結果呈現
- (5) 自動產生計畫報表
- (6) 搜尋專家專知識及解決方案納入知識庫中，作為教育訓練及矯正改善措施之依據

## 2. AIoT 管理平台

污（廢）水處理系統 AIoT 管理平台係為提供污（廢）水處理系統操作維護及營運管理解決方案的平台。污（廢）水處理系統 AIoT 管理平台可用於感測數據收集、邊緣和雲端分析計算基礎架構，且必須佈署雲端/邊緣智慧運算工具，以提供機器學習(Machine Learning, ML)/深度學習 (DeepLearning,DL)/類神經網路 (Artificial Neural Network, ANN)建模、更新等功能。在智慧雲端/邊緣運算架構下，資料的分析與知識的產生，必須更接近於數據資料的來源，使能更快速且適切的處理及分析大數據。以上相關資料（訊）收集與數據分析之訊息，再藉由可視化數位儀表板進行即時顯示及預警，並進一步就整體性（或綜合性）成效評估 (Comprehensive Performance Evaluation, CPE)結果，提供污（廢）水處理系統操作維護及營運管理的解決方案，作為

污（廢）水處理系統監督考核營運管理績效與輔助研擬決策的工具。

AI 賦能之污（廢）水處理系統 AIoT 管理平台係充分應用決策式 AI (Discriminative AI，也被稱為判別式 AI 或分辨式 AI) 的工具（包括：機器學習、深度學習及類神經網路等）所發展之設備賦能、程控智聯、智能巡檢及績效評量等技術於污（廢）水處理系統的管理子系統中。

以同時具有氧化渠、A2O、MLE-AO 及 MBBR 等生物處理程序之污水處理廠為例，AI 賦能之污（廢）水處理系統 AIoT 管理平台，包括：

### (1) 污染源及前處理管制

#### ◇ 智能巡檢

- 污染源前處理稽核檢測智能化排程系統。以本案場為例，分別於食品廢水及金屬加工廢水等重大污染源之放流口，設置 pH、COD、SS 及 EC 等線上水質偵測器，以 IoT 方式連線至 AIoT 管理平台，若有水質偵測異常即會產生警報，稽查人員即刻出動進行水質檢測，而稽核檢測計畫亦同時更動及調整排程與實驗室作業程序
- 污染源前處理稽核檢測 APP

(2) 收集輸送子系統

◇ 設備賦能

- 抽水(機)站健康管理系統  
(含抽水設備巡檢 APP)

◇ 智能巡檢

- 下水道系統稽核檢測智能化排  
程系統
- 下水道系統稽核檢測 APP

(3) 處理及處置子系統

◇ 設備賦能

- 流量計/水質感測器健康管理系  
統
- 設備健康管理系統

◇ 程控智聯

- 氧化渠—硝化/脫硝智能化控制  
模組；污泥迴流智能化控制模  
組
- A2O—厭氧池污泥迴流智能化  
控制模組、厭氧池污泥迴流量  
AI 推論模型；缺氧池硝化液內  
迴流智能化控制模組、缺氧池  
硝化液內迴流量 AI 推論模型；  
好氧池精確曝氣控制模組、好  
氧池曝氣量 AI 推論模型；污泥  
沉降性監測槽+分析模組。

- MLE-AO—缺氧池污泥迴流智  
能化控制模組、缺氧池污泥迴  
流量 AI 推論模型；缺氧池硝化  
液內迴流智能化控制模組、缺  
氧池硝化液內迴流量 AI 推論模  
型；碳源/鹼度精確加藥智能化  
控制模組、碳源/鹼度加藥量  
AI 推論模型；好氧池精確曝氣  
智能化控制模組、好氧池生物  
活性(需氧速率 Oxygen De-  
mand Rate · ODR)推論模  
組、好氧池曝氣量 AI 推論模  
型。

- MBBR—脫硝反應智能化控制  
模組；碳源/鹼度精確加藥智  
能化控制模組、碳源/鹼度加藥  
量 AI 推論模型。

- 沉澱池及消毒池—污泥沉降性  
監測槽+分析模組；NaOCl 精  
確加藥智能化控制模組、  
NaOCl 加藥量 AI 推論模型。

- 污泥處理—污泥影像辨識模  
組；污泥調理劑智能化控制模  
組。

◇ 智能巡檢

- 流量計/水質感測器巡檢 APP
- 設備巡檢 APP
- 場域巡檢 APP

- 職業安全衛生檢查 APP
- 高空/缺氧作業環境檢查 APP
- 實驗室水質檢測智能化排程系統
- 實驗室水質檢測編碼 APP

◇ 績效評量

- 人力工時分析系統
- 藥劑/耗材/備品進/銷/存管理系統
- 用電績效指標評量系統
- 用水績效指標評量系統

### 3. 虛實整合數位孿生系統

虛實整合數位孿生系統可謂是污（廢）水處理系統或流程的虛擬表示，用於理解和預測處理水量及水質污染物的效能特徵。虛實整合數位孿生系統用於在污（廢）水處理系統實體原型之模擬、預測和最佳化效能、監控營運並促進決策。

污（廢）水處理系統之數位孿生系統（圖 2），除可即時監看日常程序控制及操作維護營運管理的資訊外，數位孿生打造的虛擬系統，可模擬及預測當外部物質、能量或環境條件改變，或內部微生物新陳代謝活性變異、設備運轉失能等對污（廢）水處理系統的影響及衝擊，達到污染預防、預知維護及降低異常風險等功

效。且當進流量及水質產生變異，該虛擬系統之模擬及預測功能亦具有優化操作程序及操作參數的能力，以達最佳化水質處理成效及提高系統穩定性，並符合 SDG 6-3 提昇水質、污水處理、安全的水循環再利用之永續發展目標。

在邁向淨零碳排的路徑上，數位孿生系統可結合溫室氣體盤查工作，利用 AI 工具進行節能減碳評估與制定相關減碳計畫，並同時優化溫室氣體盤查流程及溫室氣體排放、減量及管理相關數據、參數、計算方式等，並符合 SDG 13-2 將氣候變遷因應措施納入國家政策、策略和規劃當中的永續發展目標。

同時，數位孿生系統可應用於污（廢）水處理系統之全生命週期管理，以符合 SDG 9-1 發展高品質、可靠、永續、具韌性的基礎設施及 SDG 9-4 藉由提高能源使用效率、大幅採用乾淨環保的科技與工業製程，以升級基礎建設、改造工業達成永續等永續發展目標。

## 伍、結語

AI 技術的發展一日千里，且正快速的改變及促成新型態的產業價值體系，當然也包括水資源管理的環保及水務產業。隨著全球對水資源的需求不斷增長以及氣候變遷帶來的挑戰日益嚴峻，利用 AI 來提升污（廢）水處理系統營運管理績效和永續性，儼然成為至關重要的課題及勢在

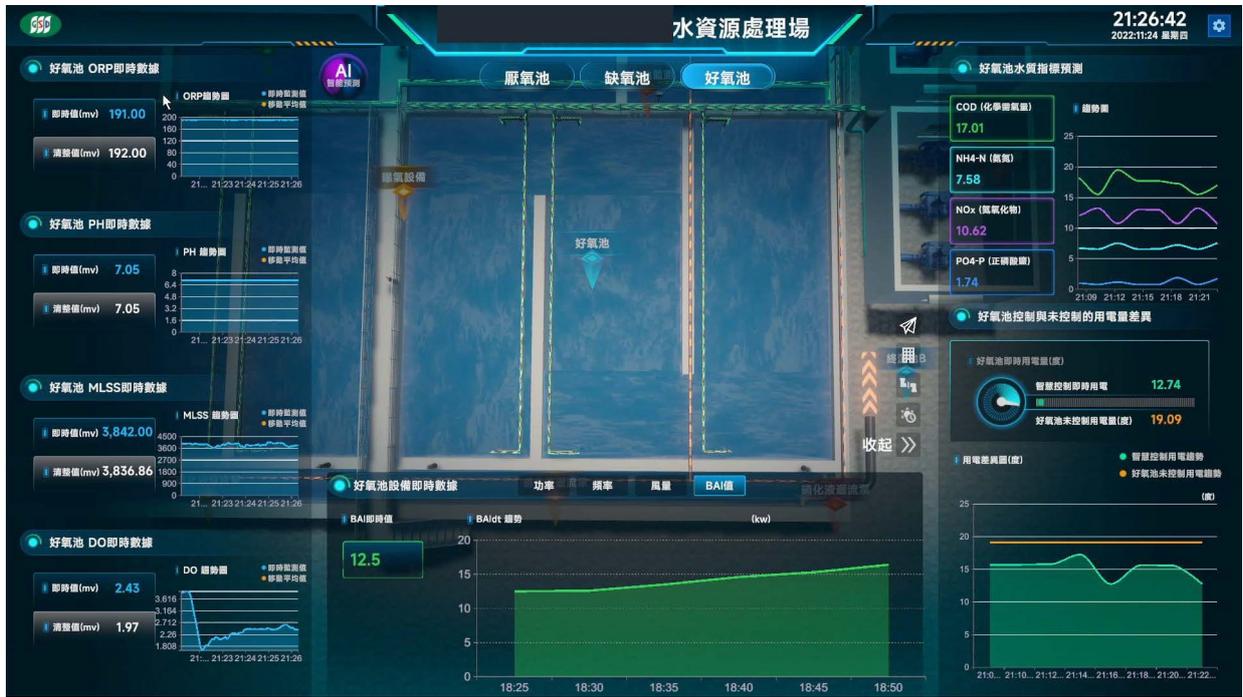


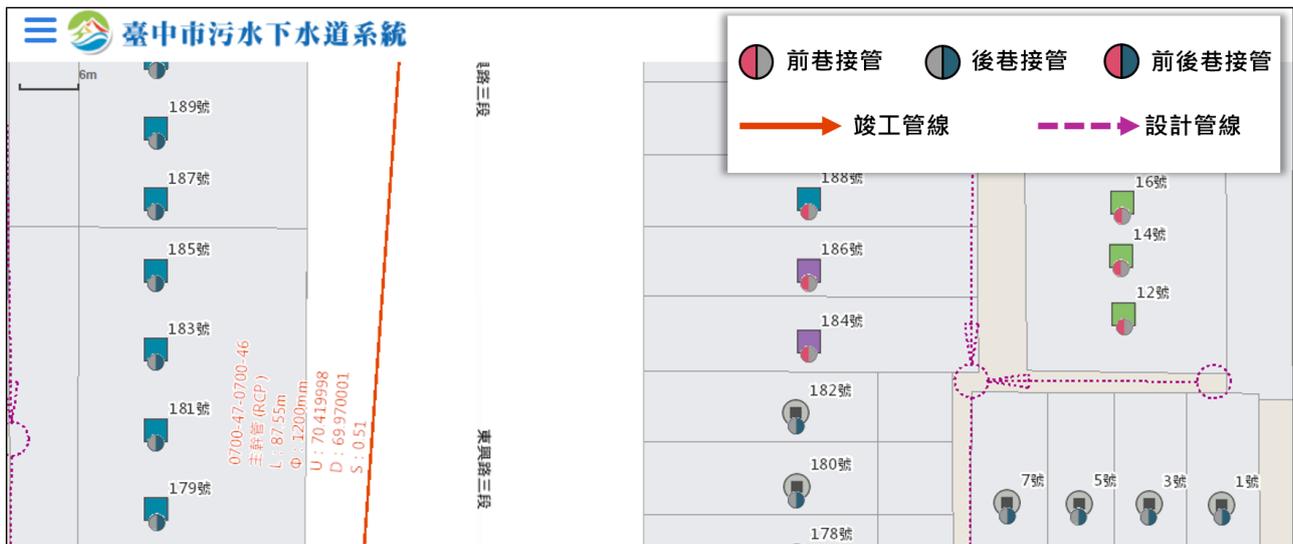
圖 2 污(廢)水處理系統之數位孿生系統

必行的趨勢。打造 AI 賦能的污（廢）水處理系統，除需要結合跨領域 AI 技術及人才外，尚需國家政策的支持及產、官、學、研各界的共同努力。

## 參考文獻

1. 卓伯全、鄭博之、謝宏炅、劉厚伯、邱俊憲，水資源AIoT管理平台的發展與應用，工業材料雜誌 440 期（2023/08）。
2. 卓伯全、鄭博之、謝宏炅，台灣污廢水處理廠智慧化管理經驗分享，中華民國環境工程學會 112 年 11 月第一期電子報。
3. 卓伯全、鄭博之、謝宏炅，污水廠智慧化管理對淨零碳排的重要性，中華民國內政部國土管理署下水道再生期刊第三卷第二期，113 年 9 月，下水道系統智慧化管理：廠站維護與管理。





## 摘要

臺中市政府積極推動污水下水道用戶接管工程，水利局以「系統化規劃、分階段推動、全面服務民眾」為核心方針，透過導入 GIS 與 MIS 技術，建立視覺化管理平台，提升施政透明度與效率。該平台整合工程案管理、資料匯入、進度監控與多層次圖表分析功能，使主管機關即時掌握各階段進展，減少人工作業負擔並掌握工程進度，期使如期完成。系統同時結合提醒功能及空間分析，強化管理效率，並以用戶接管時序地圖直觀呈現政策成效，增強民眾信心。未來，市府將持續優化管理模式，深化數值資料整合，結合歷史工程資料與戶政異動數據，提升管理精準度，以加速用戶接管施工並推動水資源循環利用，打造永續健康的城市生活環境，全面實現以民為本的施政目標。

**關鍵字：**臺中市、污水下水道、用戶接管、GIS (地理資訊系統)、MIS (管理資訊系統)

1.臺中市政府水利局 / 股長

2.臺中市政府水利局 / 幫工程司

方于芸<sup>1</sup>、莊孟欣<sup>2</sup>

臺中市用戶接管進度空間化管理 | 提升效率與推動環境永續的創新實踐

## Abstract

The Taichung City Government is actively promoting household sewer connection projects, with the Water Resources Bureau adhering to core principles of "systematic planning, phased implementation, and comprehensive public service." By integrating Geographic Information System (GIS) and Management Information System (MIS) technologies, a visualized management platform has been developed to enhance policy transparency and operational efficiency. This platform consolidates project management, data integration, progress tracking, and multi-layered graphical analysis, enabling authorities to track project advancements in real-time, reduce manual workloads, and ensure timely completion. Moreover, the system incorporates reminder functions and spatial analysis to enhance management efficiency. A sequential mapping tool for household sewer connections provides an intuitive visualization of policy outcomes and reinforces public confidence. Going forward, the city government plans to further optimize its management approach by refining data integration, incorporating historical project data and household registration updates to enhance the precision. In addition, efforts will be made to accelerate household sewer connection construction and promote water resource recycling, fostering a sustainable and healthy urban environment while fully realizing the citizen-centered governance approach.

**Keywords** : Taichung City, sewer system, household sewer connection, GIS (Geographic Information System), MIS (Management Information System)

## 壹、前言

臺中市近年來因城市發展迅速與人口持續增長，對基礎建設的需求日益迫切，特別是在污水下水道建設方面，更關係到環境保護與居民生活品質的核心議題。為了因應施工規模擴大的挑戰，臺中市政府制定了明確的污水工程接管方針，秉持「系統化規劃、分階段推動、全面服務民眾」的理念，從基礎設施的規劃、施工管理到用戶接管，逐步實現城市生活環境的全面優化。

污水工程接管以涵蓋全面、兼顧效率為核心目標，不論是大樓、巷弄或公私機構均同步進行，還針對施工條件較為困難的地區設計了靈活的應對方案，例如針對後巷滿建，無空間可進出入施工之住戶，讓民眾選擇自拆後巷增建物或者由民眾自行前巷接管等多元化之選擇。在污水下水道用戶接管的過程中，主要分前期說明、施工準備、用戶通知與配合、接管施工，以及後續的驗收與管理等階段。為了確保每一個階段順利進行，必須精準掌握施工廠商的進度，並及時通知用戶按照工期要求進行配合，例如辦理排水設備的拆除與改建。同時，當用戶未能按時完成接管時，需由歷程紀錄中快速釐清未完成原因。

臺中市政府污水下水道接管工程已取得了顯著的成效，逐年穩定提升的接管用戶數成為市府努力的最佳佐證，過去 6 年

半以來(108 年 ~ 114 年 6 月底)，戶數成長約 13.7 萬戶，每年平均完成接管戶數達 2 萬戶以上，並持續提升中。目前已全面升級污水工程管理模式，結合 GIS (地理資訊系統) 與 MIS (管理資訊系統) 技術，開發並導入用戶接管進度視覺化管理平台。該平台採用 ESRI ArcGIS API、HTML5 網頁開發技術及大臺中圖資雲戶政門牌查詢 API 等多項工具，實現了從用戶接管數據的即時更新與檢核到進度視覺化展示的一體化管理。資訊系統能夠動態追蹤用戶接管的各階段進度，進行空間或屬性統計分析，並提供多層次的數據圖表與地圖功能，分擔龐大的工作量，使得工程進度管控更加科學化、直觀化與高效化。

綜合而言，臺中市污水下水道接管工程的推進，充分體現了政府在基礎設施建設中的前瞻性與責任感。從政策方針的制定到實際執行過程中的細緻管理，無不展示出市府在推動城市環境永續發展方面的努力與成果。未來，隨著新技術的應用與管理模式的持續優化，相信臺中市的污水下水道建設將邁向更高水平，為居民創造更健康、潔淨與舒適的生活環境。

## 貳、導入視覺化管理平台，結合 GIS 及 MIS 技術，強化資訊整合效率

污水下水道用戶接管工程平均工期約

三年，期間需掌握用戶接管各階段進度，每月完成接管之戶數亦為主管機關內政部國土管理署管理督導要項之一。以文書檔案方式管理用戶接管進度，雖享有單機軟體操作的便利，但多人協作及展示、查詢較為不便，113年起於既有污水下水道GIS系統中，擴充用戶接管進度管理相關功能。結合ESRI ArcGIS API、HTML5網頁開發技術，並利用本市大臺中圖資雲戶政門牌查詢API，於圖台建立目標接管門牌點位，結合傳統MIS管理概念輔以視覺化呈現，進行後續資訊整合及管控。

### 一、工程案管理

各工程案件資料建立為在建用戶接管之基礎。於此功能設定標案名稱、基本資料、工程進度填報及設定管理權限。建立

預定接管戶數資訊後，後端自動統計實際接管戶數，便於掌握量化之接管進度，瀏覽介面如圖1。

### 二、管控資料匯入

依據用戶接管之控管文件格式及實際業務需求，決定資料匯入樣板及欄位內容，如表1。該資料表設計概念除在建工程實際管理需求外，亦兼顧後續設施營運、維護管理階段之需求，且保留欄位擴充性，可依精進需求持續擴充。

業務承辦人員完成管控資料填寫，先使用大臺中圖資雲戶政門牌查詢API批次賦予坐標，定義所有接管門牌空間位置後，經由本功能上傳進行更新。經由系統程式檢核值域合理性、日期時序合理性，

工程編號	工程名稱	契約編號	施工監造 廠商名稱	監造廠商 名稱	科別	承辦人	進度負責人	操作
1114000010266001500	臺中市文山污水下水道分支管網暨用戶接管工程(二)-文山三街、文山十街及向上路五段等鄰近區域(2-1)	114污工字第001號			臺中市水利局 污水工程科			詳細內容 修改 填寫進度 結案 刪除此標案 匯出此標案目前之所有門牌
114-4000-0102-6609-1180	臺中市豐原區污水下水道用戶接管工程(1-2)-南陽路以南及圓環東路以東等鄰近區域	112污設字第005號			臺中市水利局 污水設施科			詳細內容 修改 填寫進度 結案 刪除此標案 匯出此標案目前之所有門牌
109-4000-0102-6600-1090	臺中市太平區(新光地區)污水下水道分支管網暨用戶接管工程(1-2)-宜昌路等鄰近區域	110污設字第001號			臺中市水利局 污水設施科			詳細內容 修改 填寫進度 結案 刪除此標案 匯出此標案目前之所有門牌

圖1 工程案管理功能

表 1 在建工程用戶資料欄位定義

欄位名稱	填寫值範例
欄位編號	( 數字 )
工程名稱	( 文字 )
完整地址	( 由系統組成 )
區	南屯、豐原...
里	陽明、文山...
路街段	台灣大道一段...
地區	樹義二巷、永安市場...
巷	17、150 之 1...
弄	2、71 之 3...
號	150 號、2 之 1 號、38 號之 26...
樓	5 樓之 1、2 樓...
X 坐標	非戶政門牌則需填寫
Y 坐標	
公管完成	日期 YYYY/MM/DD
公告日期	
改建通知	
限期改善	
改善完成	
陳述意見書	
裁罰階段	
接管完成	
公告到期日	( 系統自動計算 )
備註	( 文字，非必填 )
接管位置	1/2/3
排水意願調查	1/2/3/4
特殊標註	1/2/空白
暫緩接管	1/空白
建物用途	01~07
用戶姓名	機關、事業或接管完成必填
用戶聯絡資訊	( 文字，非必填 )
代碼說明： 接管位置：1 前巷，2 後巷，3 前後巷 排水意願調查：1 前巷，2 後巷，3 依多數人意見，4 未提供 特殊標註：1 前巷持續延遲戶，2 後巷第一戶 暫緩接管：1 暫緩接管戶 建物用途：01 一般用途，02 住商混合，03 商業，04 事業，05 學校，06 機關，07 其他	

可更新既有資料之進度，或新增用戶資料，並保持資料乾淨及一致性。匯入及檢核介面如圖 2。

### 三、進度管理

此功能提供用戶資料單筆編輯與管理，並結合地圖顯示。各標案負責人可於此功能進行資料編修及附件上傳，並可依需求進行圖層套疊及瀏覽。其中，「限期改善」、「陳述意見書」、「裁罰階段」可記錄歷程日期，用戶接管位置、目前工程階段、特殊用戶標註等皆以不同圖例表示，便於瀏覽。並提供環域分析功能，可知該用戶附近已竣工用戶或在建中用戶，系統畫面如圖 3、圖 4。

### 四、提醒功能

用戶接管歷程中，重要節點繁多，為協助業務承辦人員掌握輕重緩急，可利用此功能提醒各標案負責人，列出工程進度於 14 天內將到期或已逾期之用戶，並以摘要、篩選功能供承辦人員快速管理進度資料。除系統所提供摘要、查詢功能外，另以電子郵件方式通知承辦人員，系統畫面及電子郵件示意如圖 5。

### 五、圖面框選，動態統計

此功能以框選方式提供所繪範圍內的基本戶數統計，並分別呈現特殊用戶數量，適用於小區域統計，如街廓、鄰近社區接管情形等情境，系統畫面如圖 6。

※ 步驟說明如下：

1. 上傳管制Excel檔案，會先進行基本檢查(工程名稱、地址組合、日期合理性檢查等等)，並將結果顯示於下方表格中。
2. 檢查有誤可以利用「匯出目前資料(含錯誤訊息)」匯出目前資料(含錯誤訊息)，可針對錯誤的地方進行修正，修正後請清除整份檔案的底色，以免後續顯示異常，謝謝。
3. 可重新上傳重複第一步，全部資料檢查無誤可進行「2. 利用API取得XY資料」，利用組合出的地址進行XY坐標取得，若無戶政門牌則採取所填寫之XY坐標，並確認是否落在填報的「里」。
4. 若出現：「XY檢查不在此里中」，請確認里別是否正確，此訊息僅供參考提醒之用，門牌地址仍以戶政編訂為準，若確認地址無誤，請進行下一步「3. 寫入資料」。
5. 若出現：「【提醒】此欄位時間超過目前時間一年，請確認是否正確」，請確認時間是否正確，此訊息僅供參考提醒之用，若確認時間無誤，請進行下一步「3. 寫入資料」。

匯出目前資料(含錯誤訊息)		XY檢查有誤，無法寫入，請重新檢查地址。(XY點位為必要項目)																								
工程名稱	完整地址	區	里	路街	地	巷	弄	號	樓	X坐標	Y坐標	公管完成	公告日期	改建通知	限期改善	改善完成	陳述意見書	裁罰階段	接管完成	公告到期日	備註	接管位置	排水意願調查	持續延遲戶或巷口第一戶	暫緩接管	建物用途
258	中山區南門里國光路479號 (API取用:中山區南門里國光路479號)	中山	南門	國光路				479號		X坐標有誤	X:Y坐標有誤	2025/06/01	2025/07/01							2026/01/01	29街廓	前巷	是			01

圖 2 管控資料檢核結果

用戶住址	公管完成	公告到期日期	目前進度	目前進度日期	操作
西區忠誠街里精誠六街12號	2023/12/02	2024/08/07	完	2025/09/13	查看
西區忠誠街里精誠六街10號	2023/12/02	2024/08/07	完	2025/09/13	查看
西區忠誠街里精誠六街4號	2023/12/02	2024/08/07	完	2025/08/27	查看
西區忠誠街里精誠六街8號	2023/12/02	2024/08/07	完	2025/08/22	查看
西區忠誠街里精誠六街6號	2023/12/02	2024/08/07	完	2025/08/20	查看

目前現況圖層  
 接管位置 (●: 前巷接管, ●: 後巷接管, ●: 前後巷接管)  
 公: 公告日期     改: 改建通知     限: 限期改善  
 善: 改善完成     陳: 陳述意見書     罰: 裁罰階段  
 完: 接管完成     緩: 暫緩接管  
 特殊標誌:  
 前巷持續延遲戶     後巷第一戶  
 設計圖:  
 人孔     管線

圖 3 進度管理功能

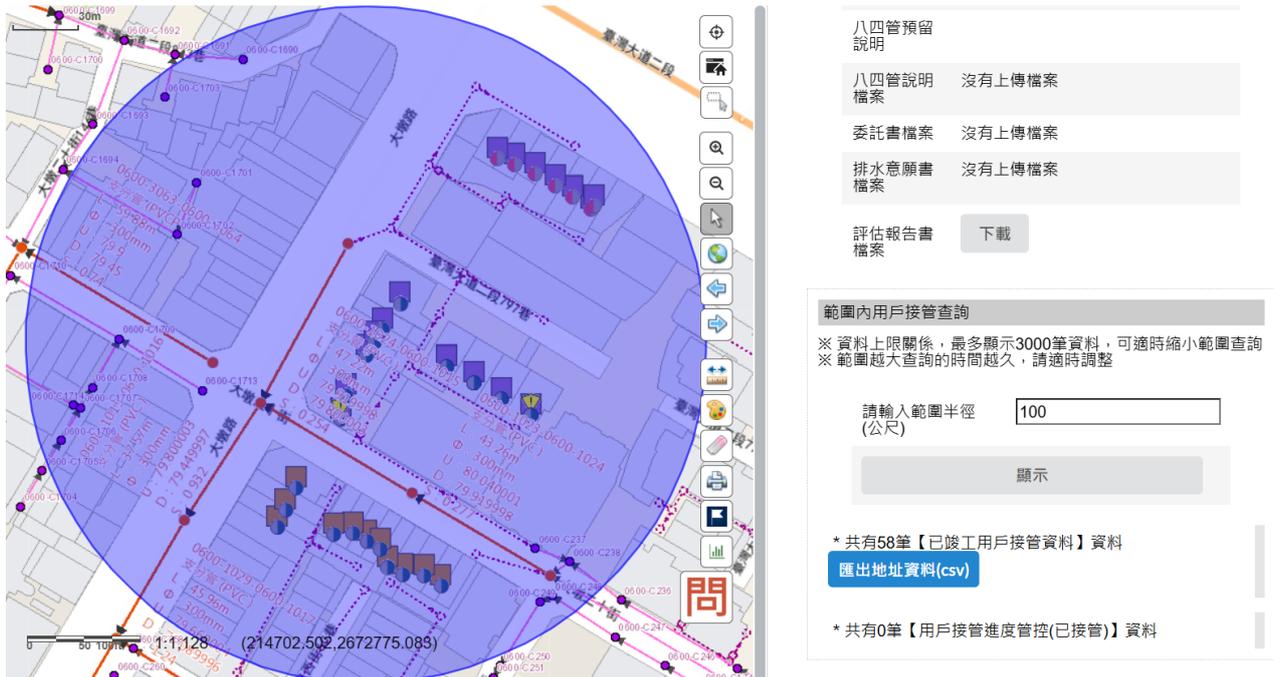


圖 4 環域分析功能



圖 5 待辦事項及屆期提醒電子郵件

傳統圖表方式則用於進行固定範圍統計，例如以標案或行政區為單位統計各管控階段之在建用戶數量，並提供圖表匯出功能，系統畫面如圖 7。

## 六、用戶接管時序地圖

此功能以展示接管用戶分布為主要目的，可選擇自動播放或拖曳時間軸，呈現不同時間點的接管完成用戶分布，隨時間

及資料累積，可逐漸呈現家戶接管的成效，如圖 8。

## 七、資通安全維護

臺中市政府水利局近年來積極提升資通安全，依據數位發展部「資通安全責任等級分級辦法」，將本系統的資通安全防護需求定為中級等級。針對系統資料、程式碼及各類日誌，採用加密與多重備份的



圖 6 圖面框選統計功能



圖 7 圖表統計功能

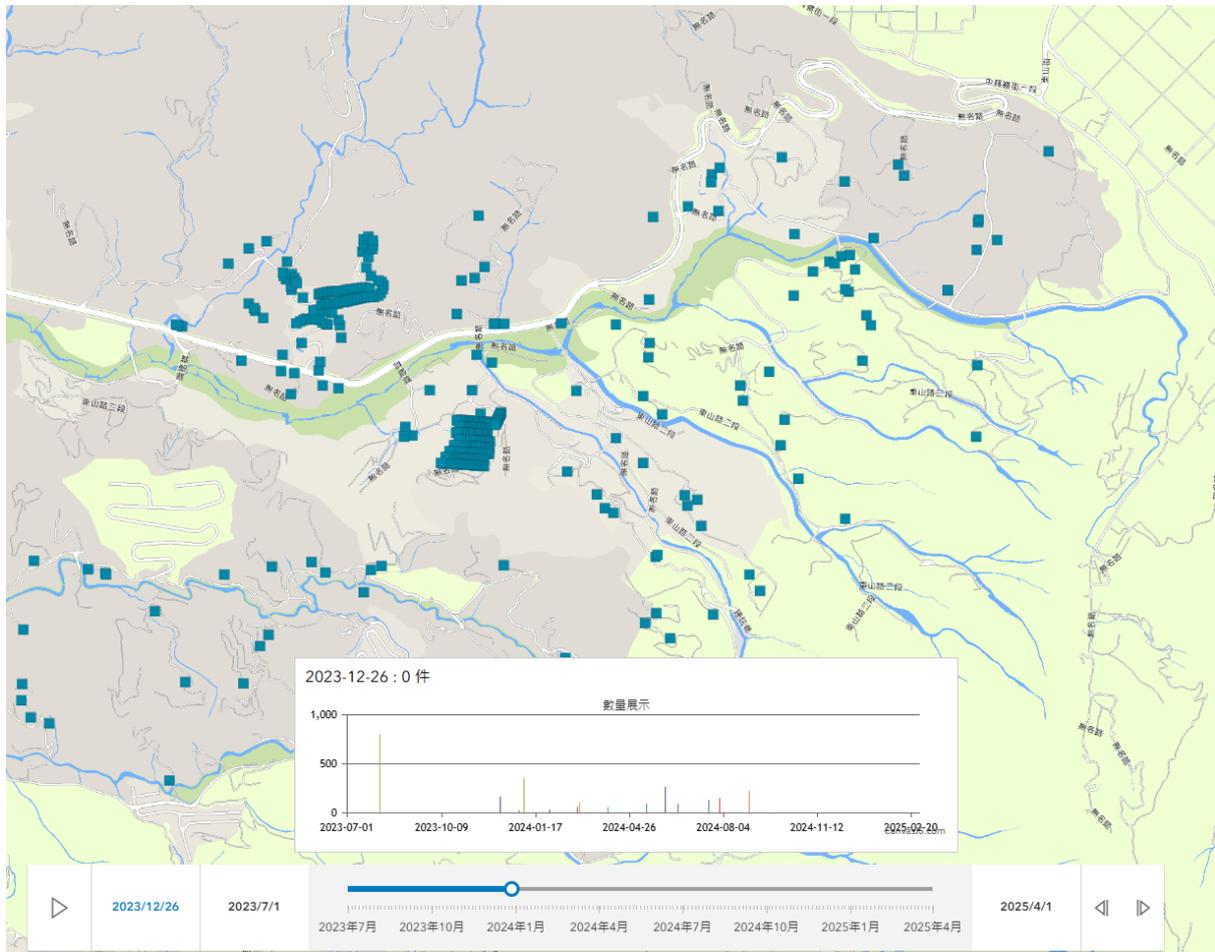


圖 8 用戶接管時序地圖

方式進行保護，並結合多樣化的自動化監控機制，為系統管理人員提供即時且可靠的參考資訊。在強化功能使用性並納入更多使用者的同時，亦注重資訊安全的全面保障，系統針對不同使用者需求，設置適當的權限控管，確保業務推動高效順暢，並維持資訊更新的同步性與一致性。

## 八、預期效益

透過導入 GIS 與 MIS 結合技術，臺中市污水下水道用戶接管工程將實現管理效率與精準度的全面提升。首先，接管進度視覺化平台可動態呈現即時數據，協助主管機關快速掌握各階段進展，提升工程規劃與執行的透明度與效率。其次，系統整合了標案管理、資料匯入、進度追蹤及圖表統計等多功能，有效減少人工作業的負擔，並透過提醒功能降低進度延誤的風險，確保工程任務能如期完成，轉入營運階段。此外，接管進度的空間化與時序化展示，能直觀地呈現用戶分布與接管成效，增強政策宣導與民眾信心。

## 參、結語

臺中市近年發展迅速，人口成長遙遙領先，下水道是看不見的建設，卻與人民的生活環境與健康息息相關。近年水利局著力推動污水下水道用戶接管，仍需持續解決後巷環境複雜、施工空間不足等問題。工程進行過程中，動員人員極多，各單位窗口及介面複雜，為提升工作效率與

為民服務之品質，期許能經由資訊整合及視覺化輔助，呈現明確且直觀的量化成果。

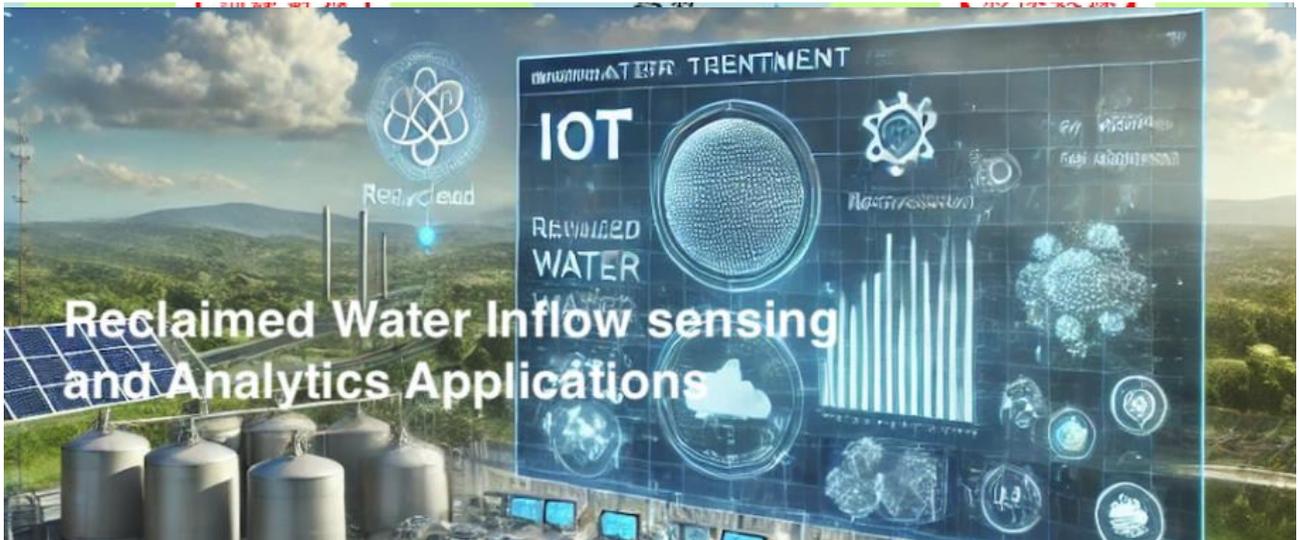
污水下水道接管後，將大幅改善民眾、社區的生活品質，實現環境永續的目標。透過有效處理家庭產生的污水，能大幅減少水污染，保護河川與海洋生態系統。此外，改善的水質將為當地居民帶來更清潔的生活環境，進一步降低疾病傳播的風險，提升公共衛生與健康水準。

展望未來，我們希望透過基礎資料的建立，將管理過程細緻化，並建立家戶接管履歷。未來可持續精進，納入下水道規劃設計資料、戶政異動歷程資料、建管資料、自來水使用資料，進一步結合臺中市自 111 年起全面線上化之用戶排水設備申請作業，以及持續進行歷史工程資料的補遺，採取空間與屬性資料並行的資料管理方式，串連機關掌握之龐大資訊；同時，具高度一致性及重複性的業務交由資訊系統管理，不僅能減輕人工作業負擔，維持成果品質標準，亦能有效提升服務民眾的效率。而藉由下水道系統的全面普及，讓每一位居民都能享有安全的水資源與高品質的生活環境，為未來世代打造永續的家園，推動綠色基礎建設，結合再生水技術，將污水轉化為可再利用的資源，促進水資源循環利用。同時，也將促進城鄉發展平衡，吸引更多投資，帶動經濟成長。

## 參考文獻

1. Esri(2024) 。 TimeSlider Widget – API 參考文件。檢自 <https://developers.arcgis.com/javascript/latest/api-reference/esri-widgets-TimeSlider.html>
2. Esri(2024) 。 TimeSlider component 小工具應用範例。檢自 <https://developers.arcgis.com/javascript/latest/sample-code/timeslider/>
3. W3C(2017) 。 HTML5 – A vocabulary and associated APIs for HTML and XHTML。檢自 <https://www.w3.org/TR/html5/>
4. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「113 年度臺中市下水道管理資訊系統建置及維護服務」成果報告書，臺中市政府水利局，113 年 11 月。





## 摘要

污水下水道建設是現代化都市發展重要的基礎建設，更是提升整體競爭力的重要指標，影響環境衛生、水資源循環與產業發展，面對全球氣候變遷與水資源短缺挑戰，污水系統不再僅止於污廢水處理放流，更朝向減碳、節能、污泥再利用及智慧監測發展，推動再生水回收與智慧水管理，促使水資中心與水資源運用導入節能減碳措施，以確保水資源永續供應與產業穩定發展。

鳳山水資中心建構遠端水質監測系統，有效監測污水下水道非法排放與管網水質異常，提高污水處理設施安全性，進而確保再生水的供水品質。鑑於再生水供應已是臺灣水資源循環經濟的重要一環。未來，運用 IoT、雲端運算、大數據與 AI 技術等技術發展再生水進流水監測預警應用，持續朝向「資源循環」與「減碳延壽」的願景邁進，更將確保再生水生產穩定，顯示出智慧水管理技術在提升污水處理效能與環境安全方面的重要價值，將有助於強化水資源韌性，建立全循環水管理體系，確保水資源永續利用。

**關鍵字：**再生水、監測預警、循環經濟、水資源韌性

1. 昕傳科技股份有限公司 / 副總經理

2. 昕傳科技股份有限公司 / 副總經理

3. 昕傳科技股份有限公司 / 總經理

# 污水下水道系統智慧管理應用與發展

吳文峰<sup>1</sup>、賴仕詠<sup>2</sup>、李成偉<sup>3</sup>

## Abstract

The construction of sewage systems is a key infrastructure for urban development and a crucial indicator of competitiveness, affecting sanitation, water resource circulation, and industry. With climate change and water shortages, wastewater management now extends beyond treatment and discharge, focusing on carbon reduction, energy efficiency, sludge reuse, and smart monitoring. These efforts promote recycled water use and smart water management to ensure sustainable water supply and industrial stability. The Fengshan Water Resources Center in Kaohsiung City has implemented remote water quality monitoring and CCTV license plate recognition to detect illegal discharges and pipeline anomalies, enhancing the stability of supply facilities. The system could help the development of re-claimed water in Taiwan's circular economy, integrate IoT, cloud computing, big data, and AI for predicting wastewater treatment efficiency and operational stability, highlight the value of smart water management. Looking ahead, sewage systems will advance in alignment with global net-zero trends. Governments and industries must strengthen smart water management, drive innovation in recycled water technology to build a resilient and sustainable water resource system.

**Keywords** : Reclaimed water, monitoring for early warning, circular economy, Water Resilience

## 壹、前言

污水下水道建設是現代都市發展的重要基礎設施，也是國際發展趨勢與國家競爭力評估的關鍵指標。目前，臺灣推動污水下水道建設已進入第六期階段，公共污水下水道普及率達 41.99%，整體污水處理率達 69.48%（114 年 5 月）。另一方面，從水資源運用的角度，透過污水處理廠放流水的回收再利用，將民生污水轉化為穩定的再生水源，經內政部國土管理署（簡稱：國土署）「公共污水處理廠再生水推動計畫」逐步實施水資源循環再利用，有效應對氣候變遷對下缺水的危機，以及產業用水需求增加等經濟與社會議題。

目前，國土署污水建設的推動策略在「持續公共污水下水道建設」與「建構永續與智慧化系統」重點下，期望逐步建立完備的「新世代污水下水道循環體系」。逐步整合多年來建置的污水系統雲端整合、大數據分析等智慧技術，提升系統永續性與智慧化管理手段，持續改善環境衛生、提升生活品質，恢復清澈水域，塑造親水都市，提升國家整體競爭力，並吸引投資商機。而且，從下水道治理的角度，國土署同步積極推動都市總合治水，透過雨水下水道工程與低衝擊開發等跨域防洪措施，擴大全國下水道系統的建設，進一步強化民眾生命財產的安全保障。

回顧國內污水下水道建設的管理思維

與策略演進，可見從過去單純著重於降低環境衝擊、促進公共衛生、提升都市生活品質及國家競爭力，逐步轉向符合國際趨勢與國內經濟發展的策略。在這個發展的關鍵時刻，以「資源循環」與「減碳延壽」為核心願景的污水下水道建設與管理，銜接全球減碳趨勢，透過多元策略提升污水處理效能、強化技術執行力，藉由社會溝通與產業合作，打造全循環系統，促進污水下水道建設與國際淨零碳排發展接軌，提升水資源循環再利用的效能，進一步增強整體水韌性與應變能力。

## 貳、污水道系統新角色需求

污水下水道系統與處理廠的建設最初旨在解決都市地區的水環境衛生與水污染問題，對於改善都市生活品質與保護水資源具有重要貢獻。而隨著全球暖化與氣候變遷日益加劇，水資源短缺與供應不穩定的問題愈發嚴峻，加上國際社會對永續發展的高度關注，污水下水道系統的建設與科技發展之間的關聯性愈加密切。現代污水下水道系統不僅需擴大建設涵蓋範圍，更需要推動公共污水處理廠放流水的回收再利用並發展污泥再利用技術。此外，節能減碳、延長設施壽命、智慧化管理與提升系統韌性，也成為新世代污水下水道系統的重要發展方向。這些創新技術與管理策略，使得污水下水道系統在水資源循環、淨零減碳與永續發展等議題中扮演起關鍵角色。

隨著智慧化科技落實與自然及社會環境挑戰的加劇，污水下水道系統已成為實現水資源永續利用與環境保護的重要基礎設施之一。因此，如何重新檢視水資源智慧管理架構，並透過發展成熟的人工智慧技術應用，順應時代變遷、引領產業升級，發揮污水下水道系統在新時代的角色，已成為機關與產業關心的議題。本節將探討污水下水道系統在減碳、淨零排放及 ESG 指標等國際趨勢下，再生水需求與營運風險的背景，並於後續章節介紹具體智慧管理系統應用案例。

#### 一、再生水營運背景及風險管理

使用再生水是臺灣特殊水資源背景的重要手段。再生水水源主要為都市污水處理廠之既有處理後放流水，生活污水具有不受氣候雨季乾季影響之特性，因此可以長期且穩定的供水，在面對天然水資源的挑戰與困境時，再生水廠開發後增加水資源的供應，近年被視為永續水資源發展重點。行政院已核定推動的「公共污水處理廠再生水推動計畫（110至115年度）」包含16座再生水推動個案。恰逢110年國內發生嚴重乾旱，導致許多縣市陷入缺水危機，桃竹苗地區農田休耕停灌、部分縣市開始實施減量供水及科技廠商啟動水車買水，以及112年南部大旱，超過

### 行政院核定16案再生水廠分佈與產量



資料來源：本文整理

圖 1 現階段再生水廠分佈與產能

1,200 天無颱風登陸，曾文水庫庫容降至 10% 以下，水情嚴峻吃緊，使得再生水市場受到社會與產業的重視。因此，行政院將原本規劃的再生水案經計畫修正程序後擴大供水規模，增加更多再生水個案，帶動整體再生水產業發展與技術升級契機。

因再生水具有穩定供水的特質，不僅提升水資源利用效率、降低缺水風險，還能提高整體供水可靠度，確保使用再生水的產業在缺水期間仍能維持製程穩定，避免因缺水造成的經濟產值損失。同時，再生水的穩定供應也能使上、下游供應鏈廠商維持穩定的進、出貨，促進整體關聯產業的穩定發展。因此，負責將生活污水收集至水資源回收中心的污水下水道系統，便扮演了極為重要的水源輸水管線角色。

接著，從再生水營運管理的風險角度來看，掌握集污管線的水質水量資訊，以及各截流設施的操作狀況，能夠有效提升對異常水質或異物的應變能力，並增加事件應對的彈性，避免影響後續污水處理廠生物處理設施及再生水廠正常運作。以高雄鳳山再生水案為例，109 年起，針對嚴重或可能遭偷倒熱區以及集污區主次幹管匯流處，開始推動建置「遠端水質監測及廠內增置異常入流處理設施」，期以透過即時監控掌握下水道水質及集污區人孔狀況等，配合建立主管機關橫向通報平台，有效杜絕不法偷排業者。因而，後續國土署推動在高雄橋頭、楠梓再生水案、臺南仁德再生水案及桃園桃北再生水案陸續規

劃辦理相關的異常入流監測預警措施，期待透過自動化智慧管理，提高再生水供水的穩定性與可靠性，強化了再生水系統韌性。

## 二、水資源產業數位轉型與績效

水資源產業在「節能減碳」與「循環經濟」的大趨勢下，產業也想盡辦法朝向「節能」、「創能」、「減廢」與「水回收」等永續發展目標前進。鑑於污水系統節能減碳乃至於延壽與效能的策略與營運需求，其中，營運管理績效優化則包括管理效率優化、操作效益優化及設備效能優化等。因此，結合 IoT (物聯網)、Big data (大數據)、AI (人工智慧) 技術特色的智慧水務(Smart Water)，歷年來已經漸漸成為水處理產業的主要思維與行動。特別是數位轉型(digital transformation)挑戰了污水處理這樣屬於「數位轉型巨象」(digital transformation elephant)的產業。刺激廠商以及上下游產業如何在已普遍的自動化作業基礎上，有效整合並展示營運操作技術(Operational Technology)與資訊技術(Information Technology)，並且進一步適當融合資料科學與人工智慧的發展潛力，以利成功促進高效、優化且永續的產業生態系統。運用長期的數據資料與營運人員的專業知識，透過智慧化方案並且發掘可行的行動準則，推動水管理產業實質經營能力，以實現「節能」、「創能」、「減廢」與「水回收」等多元管理的目標，成功推動

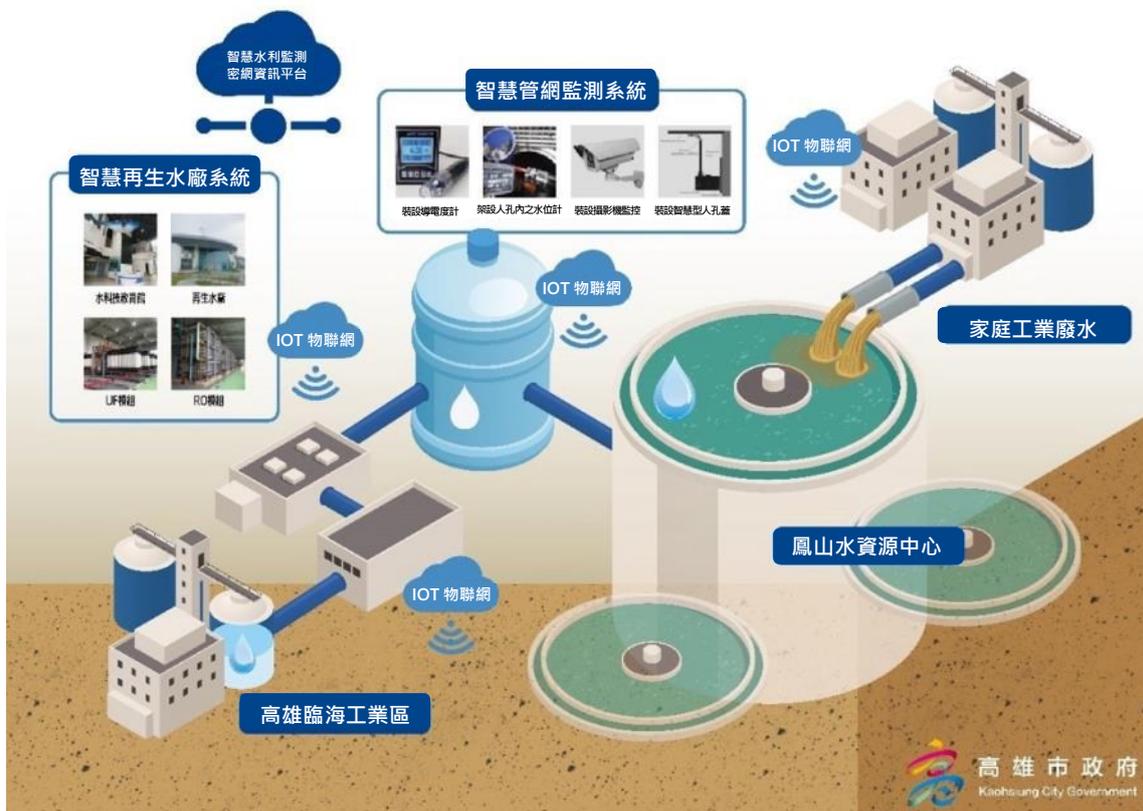
水資源產業在再生水領域的企業營運績效，將是水資源產業的長期競爭力所在。

### 參、再生水監測預警系統應用

如前述，再生水供應與營運風險以及數位轉型的營運績效需求下，污水系統已陸續並成功結合數位手段發展出多樣智慧應用，以下謹就經驗所知，針對國內再生水源監測現況與未來預警系統發展應用願景，簡要建議整理如下：

#### 一、再生水源水質安全

「公共污水處理廠再生水推動計畫（110至115年度）第1次修正」明確指出為確保再生水水質，應需要即時掌握再生水源的水質與水量資訊，以及各截流設施的操作狀況，並提高應對異常水質的能力，因此建議再生水計畫應將「下水道系統遠端水質監測及廠內異常水入流處理設施」納入規劃，從而確保污水系統進流水質與水量，並降低再生水廠營運風險。



資料來源：高雄市政府

圖 2 高雄市再生水廠智慧管網監測系統

以目前國內首套成功上線運轉的下水道系統遠端水質監測系統為例，由於高雄鳳山水資中心的污水下水道系統屢次發生廢油污流入事件，導致廠內生物處理系統失效並嚴重影響放流水質與再生水供應。因此，規劃結合感測、預警與通報功能的「遠端水質監測及廠內異常入流處理設施」，在污水下水道系統中增設智慧型遠端水質監測設施，將監測點的水質污染資訊，透過物聯網技術傳輸至水資中心中央監控室，實現早期預警並提升應變能力。

此外，該系統還針對集污區污染物偷倒熱區問題，安裝了具車牌辨識系統的 CCTV 攝影機和高科技智慧型人孔蓋傳感器等設備，有效地發揮了對可疑槽車違規排放行為的即時監控與錄影證據保存等功能。

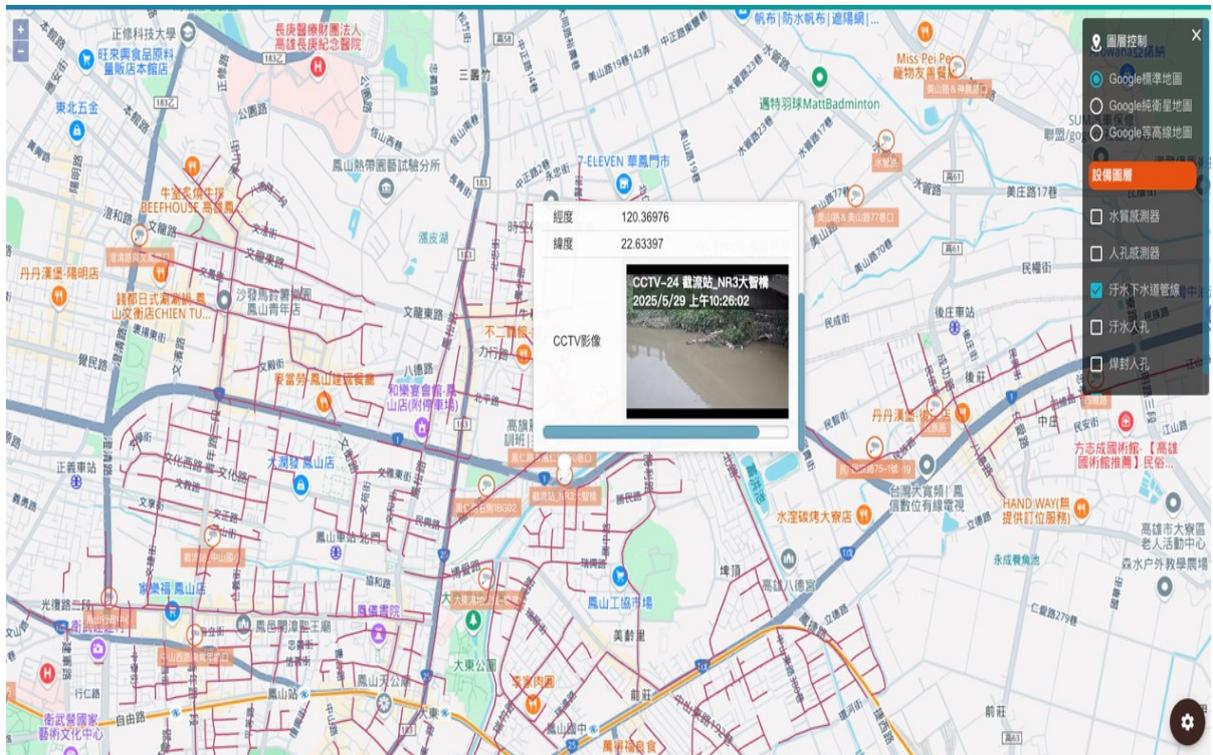
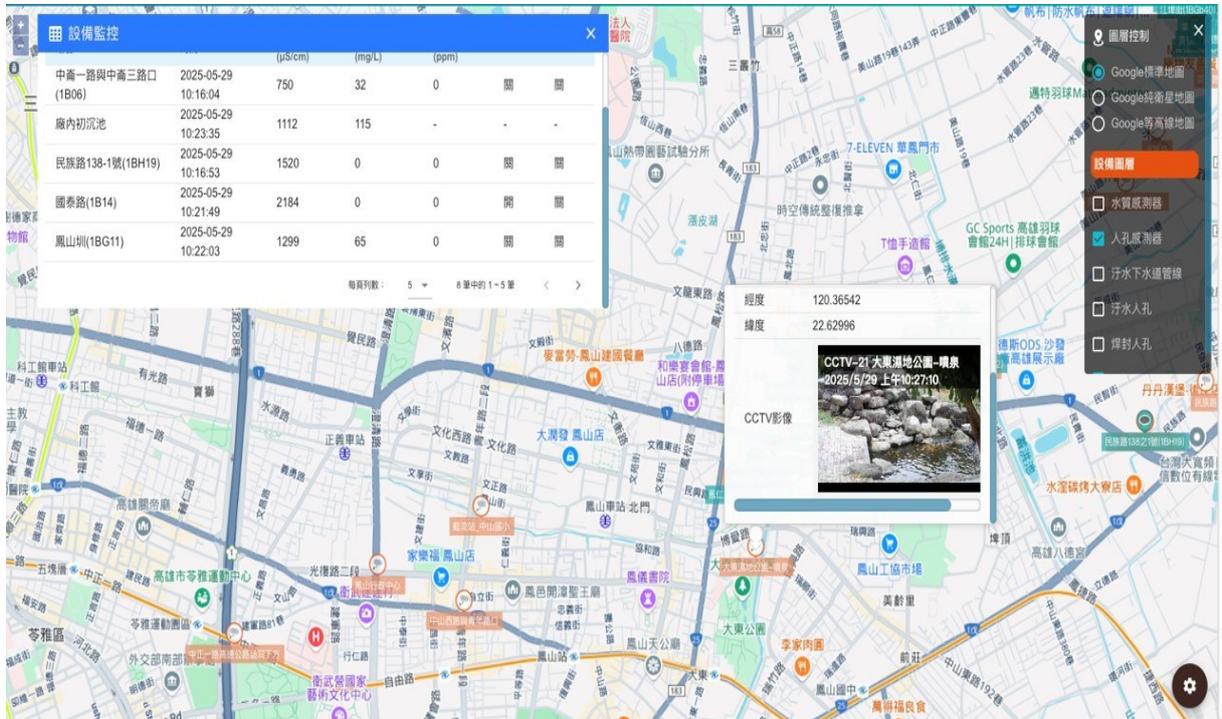
本智慧型遠端水質監測系統整合水資中心集污區地圖，套疊相關污水管線、人孔點位以及監測設施與儀器位置，提供視覺化瀏覽介面與使用經驗。操作人員可完整掌握廠外遠端監測的最新數據，包含水質、人孔點位感測器、CCTV 影像等。系統透過介面特定欄位圖示或是地圖上顏色變化提醒發生異常狀態。同時，透過系統平台可以直接設定各監測之水質警戒值、查詢車牌辨識結果、查閱現場影像等多種功能。搭配施政措施宣傳、再生水廠營運廠商現場巡查、集污地區人孔焊封與河川巡守等一系列配套作為，可以發現，該系統自 111 年 8 月完工上線以來，過去經

由巡查或通報的嚴重油污排事件，已經大幅降低，有效發揮保護再生水水源與處理設施的目標。

## 二、從遠端監測邁進智慧預警

目前下水道系統遠端水質監測系統透過自動化技術整合感測數據，確實為水資中心針對異常進流水水質與違法偷排事件提供相當程度的保護作業。然而，以再生水處理設施安全與水源穩定性而言，未來在設計上應朝向整合具備多元感測、AI 分析與早期預警等功能的「再生水進流水監測預警系統」（以下簡稱預警系統）發展，預警資訊經由整合污水管線圖資的監控平台上顯示與推播，提早掌握進流水異常資訊、降低對於水資中心處理設施以及再生水供應的影響，確保再生水穩定供應無虞。

在設計上，首先預警系統應針對污水收集系統範圍內，篩選出主次幹管匯流或截流站等監測點位，其評估的條件以偏僻偷排高風險區、工商住宅混合排放水質異常高風險區以及超負荷水量高風險區等為主，以利於佈設符合污水系統環境需求監測設備，提供異常預警和告警通知。其次，每個經過篩選的監測點應至少設置流量計、水位計及水質感測器、異丁烷計與總有機碳分析儀等主要感測設備。其中流量與水位計提供匯流點位的水量，在截流站送水泵出水管線可採用電磁式流量計，或是在幹線管網運用低功耗雷達波表面流



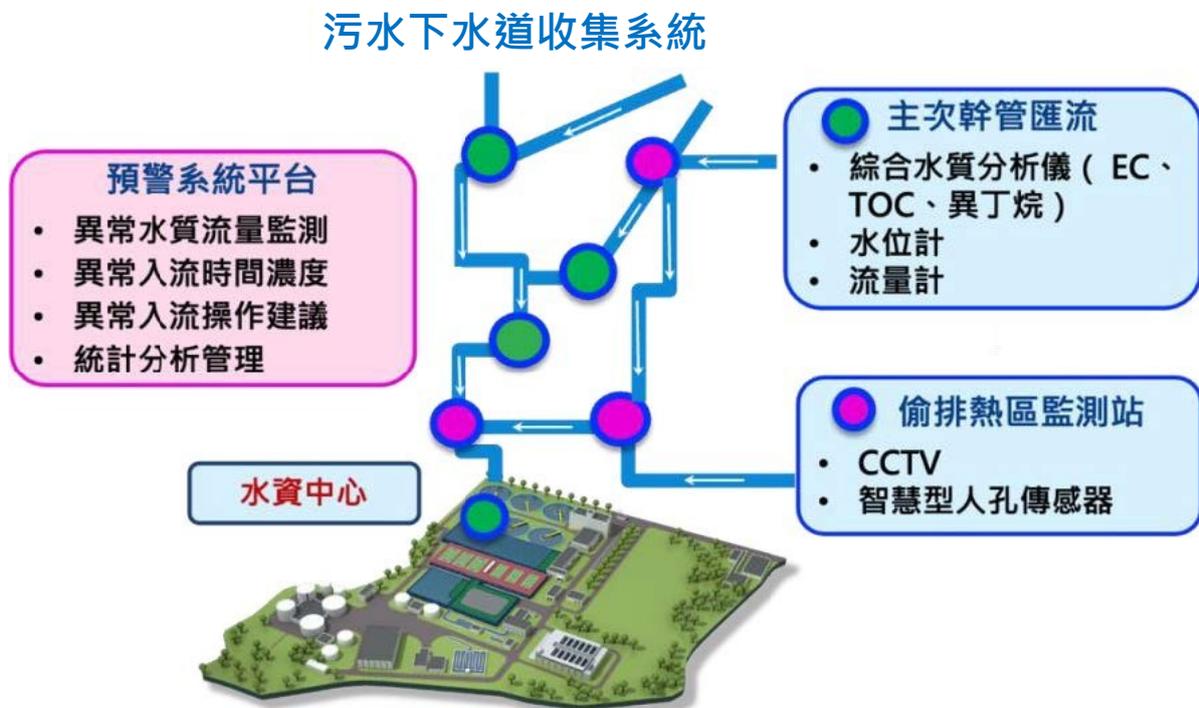
資料來源：高雄市政府

圖3 高雄市鳳山水資中心遠端水質監測系統應用

速計經濾波器與流量演算法取得水量。至於水質監測環節，可透過沉水式採樣泵將人孔內污水採樣至監測箱，並透過酸鹼與導電度等水質檢測電極，搭配異丁烷計偵測下水道中氣體濃度，若有廢棄油污進入下水道中，揮發性氣體如異丁烷濃度將上升，而總有機碳分析則偵測水體中有機物濃度，藉以研判是否有嚴重污染威脅的有機溶劑出現。

再者，異常排放事件熱區的人孔蓋導入安裝智慧型傳感器，運用三軸加速器(3

-axis accelerometer)與低功耗傳輸網路，隨時主動偵測人孔蓋開啟傾角，減少機械式開關操作過程所產生的損害風險，同時輔以即時數據傳輸與觸發通報功能，全程監控集污區人孔蓋異常開啟狀態。此外，這些熱區也同步裝設具備車牌辨識系統的 CCTV 監視設備，運用邊緣運算(edge computing)能力啟動現場影像辨識模組，快速分析車牌、車形，針對異常逗留或出現管制區域之車輛進行通報，提升包含警政、環保等跨部門協作效率與證據保全作業。



資料來源：本文整理

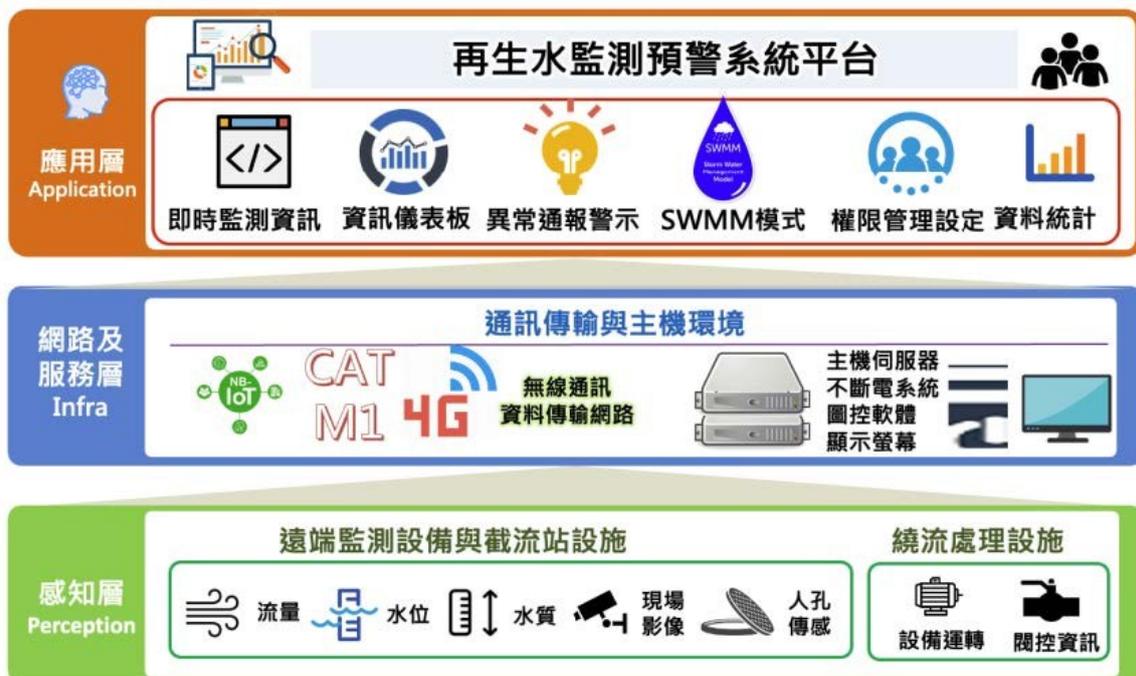
圖 4 再生水進流監測預警系統架構

### 三、雲端服務靈活延展

鑑於預警系統資訊即時性(immediacy)、可及性(accessibility)以及產業長期營運發展的可擴充性(scalability)，整合雲端物聯網(Cloud IoT)技術的軟體應用架構，符合提供高效的數據處理、資料存取以及資訊取用之便。架構上包含支援大數據特性，搭配高吞吐量之資料佇列平台(istributed Data Streaming)、高性能、低延遲的 NoSQL 資料庫以及具備機器學習 (ML)影像辨識技術優化，從而發揮預警系統所轄設備針對污水管網異常排放事件熱區建立監測能量，快速透過低遲延行動通網路，即時掌

握主要集污區監測點位的水質水量變化或是可疑車牌辨識結果，針對異常情事啟動快速反應。

為符合資訊服務的通透性與部署彈性，預警系統平台採用感知層、網路與服務層、應用層等多層次架構(如圖5)，運用資料佇列平台介接與解析感測資料，考量預警系統生命週期，從系統擴充彈性角度，應用層透過微服務(micro service)模組提供不同處理單元資料服務，服務間的資料介面以標準化的 HTTP(s)網路協定、輕量化 JSON 格式來進行傳遞。因此，可針對單一服務進行修改、升級版本，而不會影響其他功能的正常運作，微



資料來源：本文整理

圖5 再生水監測預警系統平台軟體架構

服務設計搭配容器化技術(Container)與自動整合部署，服務也更容易被部署或擴展在不同的實體或虛擬主機上，可快速開發與維護、減低時間與人力成本，這種鬆散耦合(loosely coupled)的特性，非常適合系統彈性擴展的需求。

鑑於系統核心功能在於預警能力，因此運用水理模式（例如 SWMM）參數核算進行水理分析，並且導入 AI 深度學習模型，藉由整合長期監測數據與即時氣象預報資料，過程中透過監督式學習以及強化式學習訓練方式，以智慧化分析提供暴雨期間強降雨之尖峰流量、異常進流水液位及流達預估時間等預警資訊，推演異常水源的擴散路徑並優化緊急截流策略，甚

至於配合自動調控抽水站運作，如調整抽水泵的頻率與運行台數，以穩定進流污水量；同時，搭配廠內緊急應變機制，建立自動化電動閥門控制與繞流調節措施，確保標準化應變程序，降低再生水廠停擺風險。

除此之外，這些長期透過物聯網監測數據與 AI 訓練成果，可研議進一步構建資料驅動(Data-Driven)的動態風險管理架構並建立完善的應變程序，確保操作人員能即時執行分流調控、加藥處理等應對措施。運用機器學習分類污染事件特徵（如濃度異常上升、重金屬頻譜峰值變化），建立風險評估矩陣以量化衝擊等級，並依此觸發分級應變機制。而 AI 代



資料來源：本文整理

圖 6 再生水監測預警系統智慧管理願景

理人(AI Agents)可結合自然語言處理(NLP)與專家知識圖譜(Knowledge Graph)，提供操作人員決策建議系統，將具備更高的自適應調控能力，確保水資源穩定供應與永續利用。

## 肆、結語

污水下水道的建設與發展，是國家環境永續與城市治理的重要課題。透過多年來的努力，臺灣的污水處理與再生水利用已逐步邁向智慧化與永續發展的方向。面對全球氣候變遷、產業用水需求上升，以及國際社會對淨零碳排的要求，污水管理需進一步提升資源循環利用效率，確保水資源的穩定供應。

本文透過實際案例，分析智慧監測、再生水營運風險管理及數位轉型的應用可能性。透過物聯網技術、人工智慧與大數據分析，污水管理模式已逐步從傳統的被動處理轉向即時監控與智能調控，提升污水處理的效率與應變能力，不僅降低了異常污染排放的風險，也確保了再生水的穩定供應，強化了水資源的可持續利用。

甫於倫敦舉行 2025 世界水技術創新高峰會(World Water-Tech Innovation Summit)邀請政府機關與水資源、科技產業領導者針對智慧水管理、污水處理、減碳和營運效率提升等面向，分享了數位轉型的工具，包含數位孿生(digital twins)、及生成式人工智慧(generative

AI)，對於水資源政策、產業管理與企業營運的衝擊。此外，針對水資源回收(Water Reuse)的循環經濟與長期安全性等議題，探討水資源再利用所需要的資料投入、技術創新、系統彈性以及政策與投資的吸引力等，融合技術、政策、金融等面向的討論，可以發現污水下水道系統在這個多變環境趨勢下的關鍵轉換角色，應積極地與國際趨勢接軌，透過技術革新與政策推動，臺灣有機會在水資源管理領域建立更具韌性與永續發展的模式，確保未來世代擁有更安全、穩定的水資源環境。

## 參考文獻

1. 林翰璘、張冠甫、黃廷涵、黃智，廢 / 污水生物處理單元曝氣節能控制技術，下水道·水再生期刊，2023 年 11 月。
2. 蔡大偉、王雅玢、游勝傑，我國再生水科技之應用與發展，水資源管理會刊 第二十二卷第一期，2020 年 7 月。
3. 卓伯全、鄭博之、謝宏炅，台灣污廢水處理廠智慧化管理經驗分享，中華民國環境工程學會 2023 年 11 月。
4. 黃靖修，協助推動高雄市鳳山溪再生水廠之實務經驗分享，2021 台灣下水道協會工程實務研討會，2021 年 12 月。

5. 戴元良、羅英維、李庭熙, 從自動化到智能化-以AIoT 促進水處理產業轉型, 工業材料雜誌 440 期, 2023 年 8 月。
6. 羅英維、張王冠、梁德明, 數位科技「大人物」於智慧水處理之運用, 工業污染防治, 第 158 期, 2023 年 9 月。
7. 蔡長展、顏慧敏、黃靖修, 全國首件都市污水回收再利用計畫 - 鳳山水資源中心推動經驗分享, 政府審計季刊, 第 43 卷第 1 期, 2022 年 10 月。
8. Gorur Bettaiah Janardhana Swamy , AIoT Integrated Autonomous Sewage Management, Sewage - Management and Treatment Techniques, 16 September 2024.
9. Radhika Kotecha, Demystifying the Role of AIoT for Sustainable WASH Conditions: Analysis and Research Journal of Engineering Trends and Technology Volume 71 Issue 10, 278-287, October 2023.
10. World Water-Tech Innovation Summit  
( <https://worldwatertechinnovation.com/agenda/> )





## 摘要

因應淨零減碳議題，國土管理署（簡稱：國土署）針對高耗電、高排碳之設備辦理優化，規劃研擬污水下水道設備驗證機制並設立效能驗證場所。本研究蒐集國外曝氣效能測試的流程準則、綜整影響曝氣效能的相關參數，並建置 1.5 m x 1.2 m、高 7.0 m 的測試水槽進行薄膜式散氣盤之曝氣效能試驗。清水曝氣試驗結果顯示曝氣量為最主要影響標準氧傳速率(SOTR)和標準氧傳效率(SOTE)的因子、其次是散氣設備的沒水深度，經測試 SOTE 與沒水深度呈正相關，所蒐集文獻在 0.5 m – 12 m 實廠操作水深下也有相同的趨勢。示蹤試驗與流場數值模擬成果顯示，建議至少以 4.2% 之曝氣密度進行效能測試，流場方足夠均勻。本研究於國內三座污水處理廠進行曝氣池斷面調查，結果顯示曝氣量操作在設備建議區間內者、尚能滿足氣混擾動活性污泥的功能，依現場水質、溶氧和相關生化參數也建置相關數值模型，以模擬不同除氮策略下的成效。

**關鍵字：**氧傳速率、氧傳效率、計算流體力學、混合時間

1. 國立成功大學水工試驗所 / 助理研究員
2. 國土管理署下水道建設組 / 科長
3. 國土管理署下水道建設組 / 工程員
4. 國立成功大學水工試驗所 / 研究員
5. 國立聯合大學環境與安全衛生工程學系 / 助理教授
6. 國立成功大學環境工程學系 / 特聘教授

陳緻紘<sup>1</sup>、葉信宏<sup>2</sup>、馬翊宸<sup>3</sup>、黃國書<sup>4</sup>、吳怡儒<sup>5</sup>、黃良銘<sup>6</sup>

污水處理廠薄膜式散氣設備曝氣效能與混合情形探討

## Abstract

To achieve net-zero emissions by 2050 in Taiwan, the National Land Management Agency plans to develop device verification requirements for high-energy-consuming units, such as assessing the oxygen transfer efficiency of diffusers during aeration in wastewater treatment plants (WWTPs). This study summarizes key parameters influencing aeration efficiency through a literature review and evaluates the hydrodynamic mixing patterns and corresponding oxygen transfer performance under various flow rates and aeration densities. These evaluations were conducted using both pilot-scale tests (in a 1.5 m × 1.2 m tank with a height of 7 m) and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. The results indicate that both the Standard Oxygen Transfer Rate (SOTR) and the Standard Oxygen Transfer Efficiency (SOTE) are primarily affected by flow rate, followed by submergence depth. A linear correlation was observed between the SOTE and submergence depth. Moreover, a minimum aeration density of 4.2% was recommended to ensure homogeneous mixing in clean water oxygen transfer tests. Additionally, the spatial distribution of activated sludge and dissolved oxygen, induced by bubbly flow through diffusers in WWTPs, was investigated. Consequently, this study has demonstrated the potential of multiphase CFD models in evaluating aeration mixing performance.

**Keywords** : oxygen transfer rate, oxygen transfer efficiency, computational fluid dynamics (CFD), mixing time.

## 壹、前言

在污水處理廠設計階段，曝氣池設計仰賴散氣設備所提供的曝氣效能曲線，尤其是標準氧傳效率(Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE)，但設備商所提供之相關效能曲線結果只對該測試場域(試驗水槽)負責，相關效能參數應用在實廠設計時需考量水深、曝氣密度、曝氣量等主要影響因子之差異。另外實務操作上，污水處理廠曝氣的關鍵在供氧及需氧的平衡以及曝氣所提供的氣動攪拌效果，對於污水處理廠因應節能減碳以變頻降低曝氣量等策略而言，對於活性污泥擾動混合情形之影響仍待釐清。

回顧污水處理及回收整個流程，為解決生物處理單元的能耗、尤其是曝氣，國際上正積極開發智慧程控技術，藉由監測與回饋來控制系統中的氧氣供給與有效微生物族群濃度，除提昇對污染物的處理效能，也是降低及管理能耗最有效的方法。

國際間的曝氣效能測試標準的基礎原理以及大方向上的測試流程相仿，都闡明是清水試驗、方具有代表性與再現性，不能直接代表實際曝氣池有活性污泥時的氧傳速率/氧傳效率；另外，試驗流場需足夠均勻，若曝氣密度(散氣設備出氣表面積佔測試水槽底面積的百分比)過低、試驗場域內局部的氧傳速率可能不一致、便不具代表性。

為了解我國污水處理廠微生物族群組成和處理效率與曝氣效能之間的關係，本研究主旨在測試清水氧傳試驗時，適用的曝氣量與曝氣密度之範圍與限制，並藉由現場曝氣池斷面調查，分析評估其好氧槽中微生物族群與處理效率、溶氧間的關係，以尋求最佳的處理操作參數。

## 貳、曝氣設備效能試驗與評估指標

蒐集在國際上有關曝氣效能測試相關準則，綜觀國際上與曝氣設備效能測試相關之規範，目前對於污水處理系統所使用的曝氣設備，其效能測試主要有美國土木工程師學會(ASCE)和歐洲標準委員會(European Committee for Standardization, 簡稱 CEN)建立發展相關規範(Uby, 2019)。

曝氣效能測試準則的發展歷程演進如圖 1 所示，自 1913 年活性污泥法(activated sludge process)開創以來，直至 1970 年代爆發能源危機、以及美國於 1977 年公告的清潔水法(Clean Water Act)的同時，污水處理成為必要條件，也促使相關技術與產品開發問世，以尋求更經濟性、高效率、低能耗的處理程序(Ardern and Lockett, 1914)。由於曝氣池為污水處理主要能耗的單元，在尋求低能耗曝氣方式的同時，如何界定散氣裝置的曝氣效率、不同形式的散氣裝置要如何有個比較基準的議題便油然而生，因此美國環保署於 1977 年委託 ASCE 建立測試

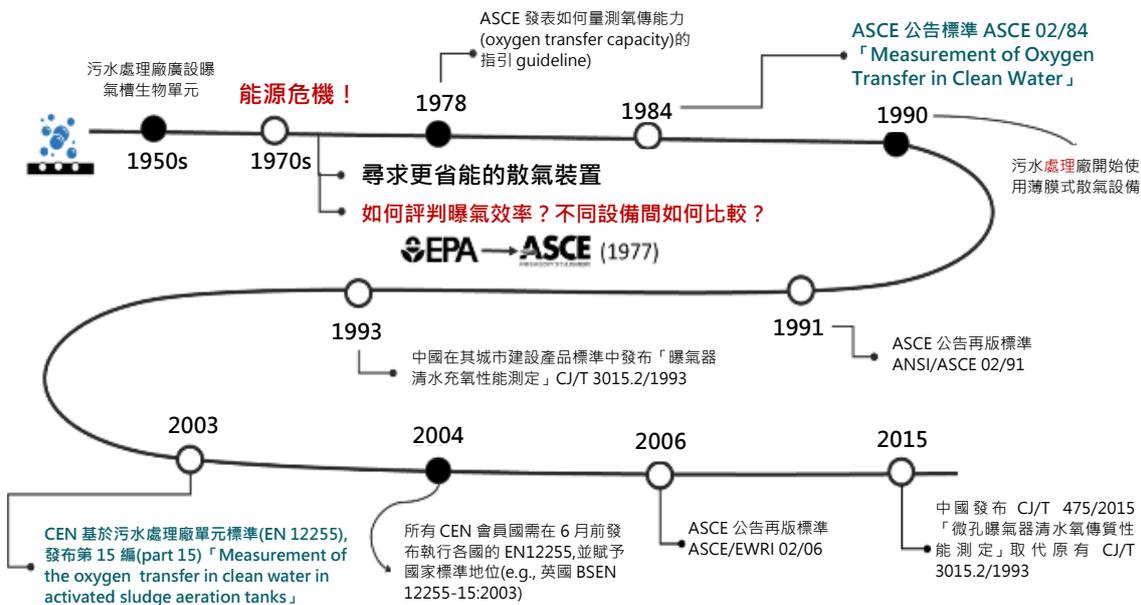


圖 1 曝氣效能測試標準發展歷程示意

氧傳能力的相關指引，ASCE 也在 1978 年發布相關指引，探討污水處理單元中曝氣池使用設備之氧傳效能定義，以及客觀的測試方法。ASCE 隨後在 1984 年經過多方研究討論，公告了正式的標準，提出了一種在清水量測曝氣效能的方法「Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water, ASCE 02/84」。為了提升曝氣效率，細氣泡型態的薄膜式散氣設備在 1990 年陸續被引用到污水處理廠的曝氣池中使用，ASCE 也在 1991 年經過第二版再修，並經過美國國家標準學會 (ANSI) 認證，頒布測試標準「ANSI/ASCE 02/91」。目前 ASCE 公告最新的完整修訂版本為 ASCE/EWRI 02/06，該標準則適用於各種曝氣元件，可應用於實驗

室規模以及實廠規模之測試。

另一方面，歐洲自工業革命開始，便投入都市污水中有機物的去除，可說是最早發展衛生工程污水處理的區域，早期主要為制訂電氣相關標準的歐洲標準委員會 (CEN)，組織了技術委員會團隊-WG40，對大型污水處理廠(EN 12255)各單元陸續設置規範，並給予國家標準的地位。其中，基於其第六章曝氣池-活性污泥單元，該團隊於 2003 年公告第 15 編 (part)「EN 12255-15, Part 15: Measurement of the oxygen transfer in clean water in activated sludge aeration tanks」，描述在活性污泥曝氣池中於清水條件下進行氧傳效能測試的方法，也成為歐盟體系主要採納的曝氣效能測試

的標準。

上述國際間的曝氣效能測試標準的基礎原理以及大方向上的測試流程相仿，都闡明是清水試驗，方具有代表性與再現性，不能直接代表實際曝氣池有活性污泥時的氧傳速率/氧傳效率；另外，試驗流場需足夠均勻，若曝氣密度（散氣設備出氣表面積佔測試水槽底面積的百分比）過低、試驗場域內局部的氧傳速率可能不一致、便不具代表性；再者，試驗水槽尺度原則上不受限制，但散氣設備效能測試報告僅對該曝氣條件負責，對應到不同水深、曝氣量、曝氣密度時應如何對應修正，便成為污水處理廠曝氣單元在設計時的重要環節。

國際間兩大曝氣設備效能測試相關之規範，便是以工程實務的方式建立動態測試法(Unsteady-State Test Procedure)，以推得標準狀態下的氧傳係數。該法是以高靈敏度的溶氧計來監測場域內的溶氧濃度變化。首先須將測試水體達到無氧狀態（溶氧 < 0.5 mg/L），可加入足量脫氧劑-亞硫酸鈉(Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>)及催化劑氯化亞鈷(CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O)以化學方式脫氧，再於系統內通入空氣或純氧（藉由各種散氣裝置），同時記錄溶氧變化以計算法得到質傳係數。在連續曝氣下會觀察到溶氧濃度增加直至趨近飽和，取增氧曲線 25% - 98%飽和溶氧的部分根據式(1)進行非線性迴歸，分別求得 C<sub>S,p\*,T</sub>、C<sub>0</sub>、k<sub>LaT</sub> 三個

參數：

$$C_t = C_{S,p*,T} - (C_{S,p*,T} - C_0) \times \exp(-k_{LaT} \times t) \quad \text{式(1)}$$

C<sub>t</sub> 為實測時間 t 下的溶氧值，C<sub>S,p\*,T</sub> 為測試條件（溫度壓力）下的清水飽和溶氧值，C<sub>0</sub> 是無氧狀態下的初始溶氧值，而 k<sub>LaT</sub> 則為測試條件下的氧傳係數。

由於不同水溫之飽和溶氧量不同，進而影響水中氧氣傳遞的速度，故設定 20°C 為標準狀態，並依照式(2)修正得到標準氧傳係數值 K<sub>La20</sub>。

$$k_{La20} = k_{LaT} \times 1.024^{(20-T)} \quad \text{式(2)}$$

計算出各量測點位的標準氧傳係數後，工程上通常採用以下二項指標代表整體水槽的曝氣效能，藉此來探討設備對曝氣增氧的效果。第一個是標準氧傳速率(Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR)，代表在標準狀態(20°C、1 atm)時，曝氣過程中單位時間內有效自氣相質傳至液相溶氧的總量，其計算式如式(3)。

$$SOTR = V \times k_{La20} \times C_{S,20} \quad \text{式(3)}$$

SOTR 單位為(kg O<sub>2</sub>/hr)，V 為水體體積，C<sub>S,20</sub> 為 20 °C時的飽和溶氧值(mg/L)。

第二個為標準氧傳效率(Standard

Oxygen Transfer Efficiency, SOTE) · 代表在標準狀態下 · 單位時間內有效質傳至水中液相的氧氣總量佔曝氣設備供氧量的比例 · 亦即將逸散至大氣的氧氣量納入考量 · 標準化後的傳氧效率 · 同時標準化後也可將純氧曝氣/空氣曝氣的效能相互比較 · SOTE 的計算式如式(4) ·

$$SOTE = SOTR / w_{O_2} \quad \text{式(4)}$$

SOTE 通常以(%)表示 ·  $w_{O_2}$  為曝氣設備單位時間提供的氧氣量(kg  $O_2$ /hr) · 亦即曝氣流量( $m^3$ /hr)經轉換後單位時間之供氧總質量 · 除了標準氧傳速率外 · 設備商提供效能曲線時 · 亦經常以比標準氧傳效率(specific standard oxygen transfer efficiency, sSOTE, %/m)的方式呈現 · 定義為散氣設備沉水深度下 · 每公尺被水體吸收的氧氣比例 · 推測是為了讓不同水深量體的散氣設備可以相互比較使用 ·

### 參、曝氣效能受水深、供氣量、曝氣密度的影響

平均氧傳係數  $k_{La20}$  是最直接學理上因氧傳而產生的係數 · 而 SOTR 和 SOTE 則是工程上考量整個試驗場域的指標參數 · SOTR 和 SOTE 因為將曝氣量和水體體積納入計算 · 便會受到測試場域幾何尺寸(尤其是深度)的影響 · 換言之 · 在相同風量與曝氣密度的場域下 · 其氧傳係數  $k_{La20}$  並不會因為測試水深差異而有顯著變化 · 但是 SOTR 和 SOTE 因為水深影

響到容積大小 · 因此我們可以在相關的測試報告上看到不同測試水深時 · 其效能曲線會有顯著差異 ·

以流體力學的角度剖析氧傳速率 ·  $K_{La}$  值是眾多參數相互影響下所得 · 包含曝氣池長(L) · 池寬(B) · 水深(H) · 曝氣量(Qa) · 散氣設備沒入水深(h) · 散氣設備膜面積( $A_d$ ) · 平均氣泡粒徑( $d_b$ ) · 水體密度 $\mu$  · 氧氣擴散係數 D · 重力 g 等 · Al-Ahmady (2011)利用無因次分析法將  $K_{La}$  轉換為無因次的冪函數 · 並綜整多篇文獻的參數經統計回歸後得到經驗式如式(5)所示 · 可以看到影響  $K_{La}$  最大的是雷諾數(Re) · 具體由曝氣量帶來的流速所造成 · 其次 · 代表慣性力/重力效應的福祿數(Froude number, Fr) · 氣泡粒徑與沒水深度 · 曝氣池的 H/L 比 · 曝氣密度(即曝氣面積  $A_d$ /曝氣池底面積  $A_t$ ) 都有關聯 ·

$$K_{La} = \frac{0.03254}{L^2} \cdot Re^{1.4647} \cdot Fr^{-0.4857} \cdot \left(\frac{d_b}{h}\right)^{-0.7261} \cdot \left(\frac{H}{L}\right)^{-1.7685} \cdot \left(\frac{A_d}{A_t}\right)^{0.2368} \quad \text{式(5)}$$

1998 年 Newbry 基於穿透理論(penetration theory)提出的 model 如式(6)所示 · 原則上和式(5)雷同 · 氧傳速率 OTR 會和散氣設備沒入水深(h) · 曝氣量(Qa) · 水槽體積(V)和氣泡粒徑( $d_B$ )有關 ·

$$OTR \left( \frac{g}{m^3 s} \right) = 0.00317(H + 0.0033H^2) \frac{0.21Q_a}{V} d_B^{-\frac{7}{4}} \text{式(6)}$$

曝氣量越大由於多數空氣未能有效質傳便逸散、因此標準氧傳效率(SOTE)會降低至特定限值，SOTE 根據所蒐集文獻、與沒水深度有線性關係，而量化後的比標準氧傳效率(sSOTE, %/m)是無因次分析後的參數，與 SOTE 理論上為線性關係。在一般操作的曝氣條件下，曝氣密度對曝氣效率的影響相對低，在相同曝氣量下、曝氣密度越高會有對應較佳的 SOTE 值，但仍會趨於定值。

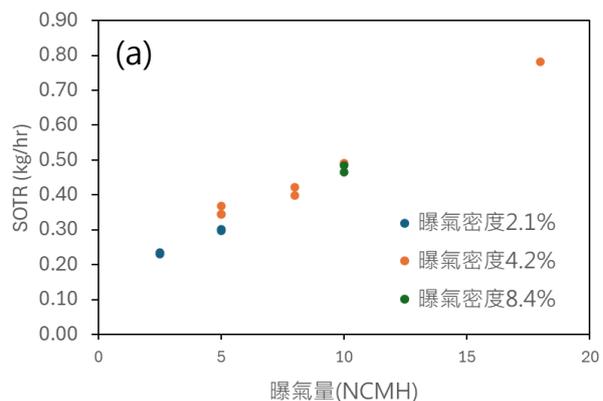
為探討曝氣量、沒水深度、曝氣密度對曝氣效能的關係，本研究建置一內部尺寸為 1.5 m x 1.2 m x 7 m 之黑鐵低碳鋼構材質水槽，底部設計多功能鞍座、可彈性安裝 1~6 只不同尺寸的薄膜式散氣盤（圖 2）。試驗採用之散氣盤(AFD-270, SSI, US)直徑 268 mm，有效膜面積 0.0375 m<sup>2</sup>，涵蓋 6,600 個狹縫、狹縫長度 1 mm。本研究參考 ASCE/EWRI 02-06 與 EN 12255-15 國際間兩大準則進行清水曝氣氧傳試驗，在特定的曝氣條件下連續曝氣，待系統穩定後加入足量的脫氧劑（亞硫酸鈉）與催化劑（氯化亞鈷）、連續監測水槽內的溶氧變化。試驗水槽內距表層 1 m、中層（1/2 沒水深度）、以及散氣盤面 0.5 m 處共安裝 5 只光學式溶氧電極(AQUALABO OPTOD)，搭配所建

置 IoT 平台進行線上即時量測。



圖 2 曝氣測試水槽內部與散氣裝置

試驗結果如圖 3 所示，實驗結果顯示在 6 m 沒水深度下、不同曝氣密度對應 SOTR 和曝氣量為線性關係，與文獻表現相同（圖 3(a)）、曝氣密度對 SOTR 影響不如曝氣量顯著。而圖 3(b)進一步將 SOTR 轉換為 SOTE，可看出 SOTE 會很顯著地隨曝氣量增加而指數遞減、最後維持在 15%左右，顯示曝氣量雖然提高單位時間內溶氧質傳的速率、但高曝氣量亦伴隨大量的氣泡尚未反應便逸散；另一方面，相同水深和曝氣量下，曝氣密度確實會影響 SOTE，但在高風量下影響不顯著。



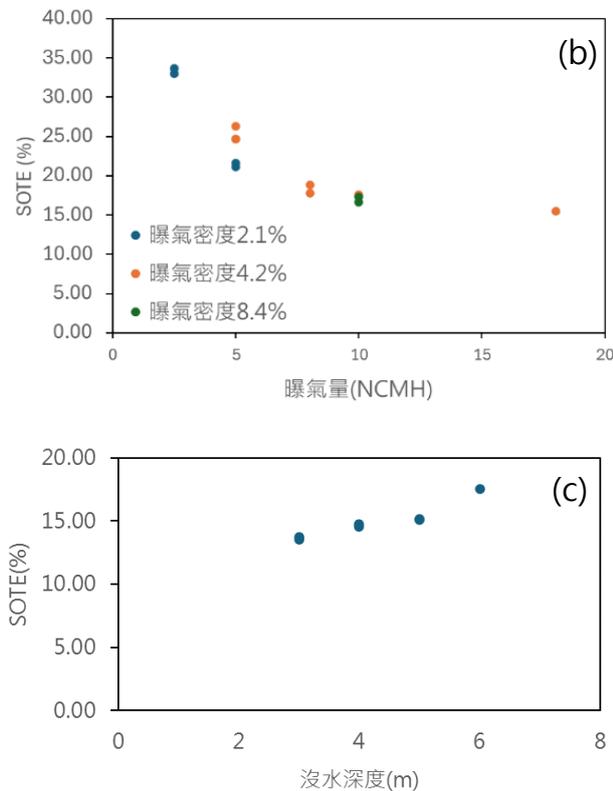
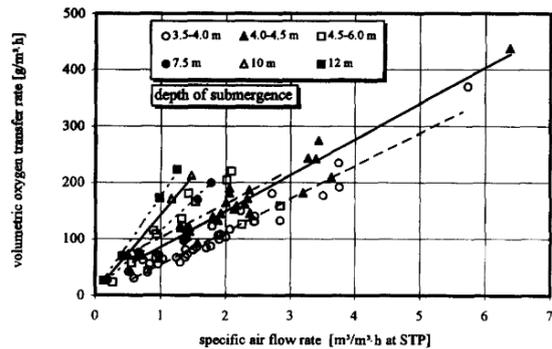


圖 3 清水曝氣氧傳試驗結果(a)SOTR 對應不同曝氣量與曝氣密度；(b) SOTE 與曝氣量關係；(c) SOTE 與沒水深度關聯

圖 3(c)為曝氣量 10 NCMH、曝氣密度 4.2%下不同沒水深度分別進行清水曝氣氧傳試驗的 SOTE 表現差異，和文獻所推算的趨勢相同，SOTE 和沒水深度間有線性關係，但也可以看出沒水深度影響 SOTE 的顯著性，本研究建議未來進行散氣設備的效能驗證時，應以接近的曝氣密度布置進行測試，測試曝氣量應涵蓋實廠設計值、而測試水深能與現場相同為宜，若無法以現場水深進行測試，則至少應以 3 種沒水深度求得 SOTE 對應沒水深度的關係後，再線性推算之。

圖 4 為 Wagner 和 Pöpel (1998)蒐集 98 組實廠規模的清水氧傳試驗結果，可看出 SOTR 與曝氣量等參數間的關係，從 3.5 m 到 12 m 都有相同的趨勢，也顯示從不同沒水深度的曝氣效能外插至目標深度的合理性。



資料來源：(Wagner & Pöpel, 1998)

圖 4 文獻蒐集實廠規模 SOTR 對應曝氣量的線性關係

#### 肆、氣動混和程度評估

ASCE/EWRI 02-06 與 EN 12255-15 國際間兩大準則進行清水曝氣氧傳試驗時，都有流場需均勻的前提、溶氧量測點位理論上便也無須設限，但是並沒有對應的評估方式，僅能在試車階段確認各測點之增氧曲線是否有差異，確認空間上標準氧傳係數  $K_{La20}$  之相對誤差在 15% 以內。

本研究參考 ASCE/EWRI 02-06 準則內建議，利用多組水質電極量測添加脫氧劑後、水中導電度的空間濃度變化，來評估水槽內氣動混合的程度。如同示蹤劑般，導電度會因溶質 (脫氧劑，亞硫酸鈉) 流達而增加，後續因為整體流場的帶

動而擺盪，最終趨於穩定，電極間反應濃度變化僅代表溶質流達，但最終穩定代表在當下已達混合平衡，我們推算第一個電極從起始反應為起始點，各電極到達平衡的時間為其混合時間(mixing time, s)，並參考相關文獻、以最大值作為該組的代表 (Javed et al., 2006)。圖 5 綜整示蹤試驗最大混合時間對應各組氧傳係數的相對誤差(RSD)的關聯，結果顯示最大混合時間和 RSD 之間有中度正相關，相關係數  $r = 0.49$ 。圖 5 顯示溶質在本研究所建置曝氣水槽場域內，各測試點位要達混合均勻的最大混合時間(mixing time)在 50-120 秒之間，初步評析，最大混合時間在 90 秒

內較不致有空間上擾動不均勻的問題。

由於物理試驗模型僅能局部量測空間中的少數點位，本研究引入計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics Model, CFD) 技術，來協助評估曝氣試驗過程紊流擾動的流場之擾動混合情形，作為示蹤試驗的輔助工具。計算流體力學自 1970 年代發展迄今，在廢水處理活性污泥單元 (曝氣池) 的流場也持續穩定發展，CFD 數值模擬可以幫助理解場域空間內、在固體-液體-氣體環境中的物理現象以及化學溶質傳輸。

本研究採用商用套裝軟體 ANSYS

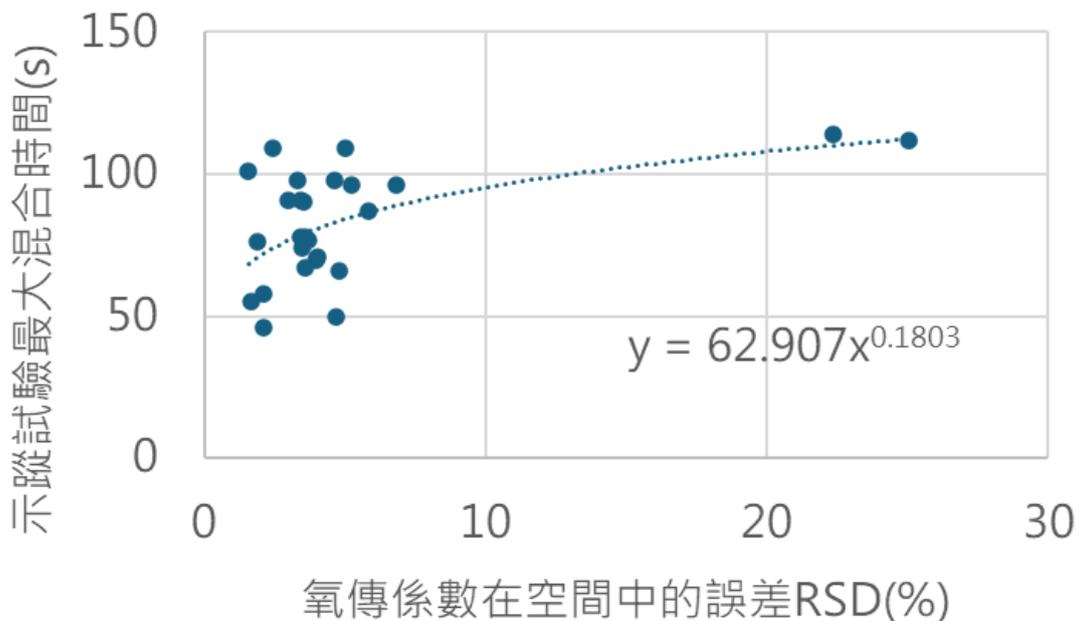


圖 5 示蹤試驗最大混合時間對應氧傳係數的關聯

Academic CFD (2024 R1)進行曝氣水槽在不同曝氣條件下的流場模擬，利用流線分析(pathline)、藉由投入虛擬的粒子觀察流線是否有局部滯留區、達到示蹤試驗之效果。圖 6 為單盤 (曝氣密度 2.1%) 和雙盤 (曝氣密度 4.24%) 在每盤曝氣量 5 CMH 情況下、趨於穩定(1,200 step)的流線分析圖，值得注意的是單盤曝氣在相同 800 step 下，流線尚未抵達底層，

相對穩定要延滯至 1,200 step。

流線分析結果可以清楚地看到單盤曝氣時多數的虛擬粒子隨著邊界流到底層後便因為流場靜穩而遲滯在底層、顯示混合均勻度較差；反觀雙盤 (曝氣密度 4.2%) 曝氣情境下，虛擬顆粒多能隨著水流分布在各區域、本研究建議至少以 4.2% 之曝氣密度進行清水曝氣效能測

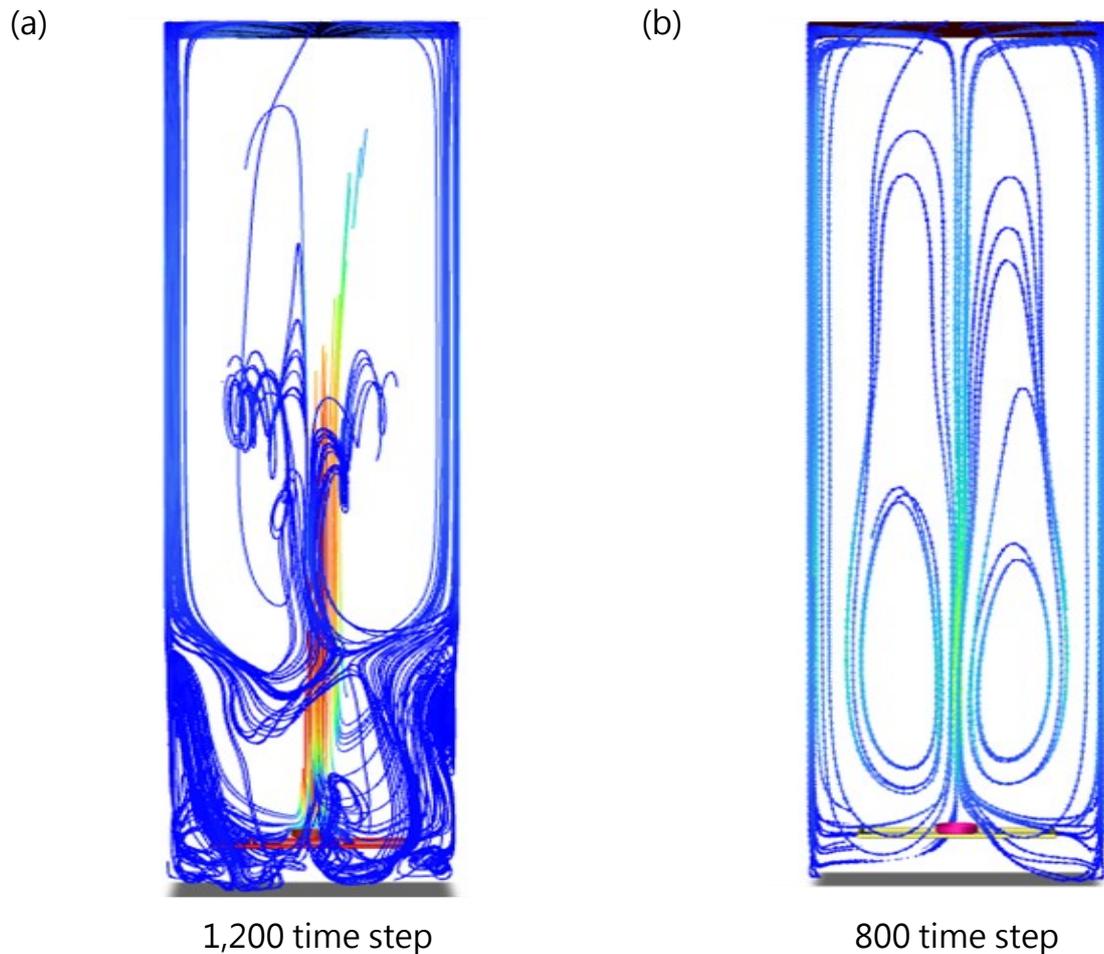


圖 6 數值模擬(a)單盤曝氣(b)雙盤曝氣流線分析結果

試，確保流場有足夠的混合均勻度。

## 伍、曝氣池曝氣擾動情形調查

污水處理廠好氧曝氣池藉由鼓風機和散氣設備除了提供溶氧外，也幫助擾動曝氣池內的活性污泥，使之呈現混和擾動狀態(Mixed Liquor)。在節能議題上，利用變頻控制曝氣量、符合微生物生物作用所需溶氧，避免過度的曝氣皆直接溢散浪費，然而在相對低曝氣量的操作下，活性污泥是否能保持均勻混合則成為潛在的議題。

本研究實際於污水處理廠曝氣池單元採樣調查不同深度的活性污泥濃度變化。圖 7(a)為國內 A 污水處理廠(採多段氮磷去除系統 TNCU 生物處理法)第一好氧池前段(O1 前)和後段(O1 後)的懸浮揮發性固體物(MLVSS)濃度分布，可以看到曝氣密度 12.7%、採用 21 cm 散氣盤的好氧池，在製造廠商建議操作曝氣風量範圍內大致上仍能保持一定的混和均勻性，惟 O1 前段受到進流和回流影響，有較顯著的污泥沉降於底層 50 cm 處，建議可針對前端定期清淤。

圖 7(b)為國內 A 污水處理廠相同斷面下溶氧的垂直分布情形，可以看出在第一好氧池在前段溶氧量平均低於 1.0 mg/L，在距表面 3 m 內溶氧變化劇烈、平均在 0.8-1.0 mg/L，然而在距表面 4 m 處溶氧顯著降低，距表面 5 m 以下的溶氧

均低於 0.3 mg/L。另一方面，到第一曝氣池後端(進 O2 前)，底層溶氧較前端高、在 0.4-0.5 mg/L 浮動，且表層溶氧可達 2 mg/L，推測在 O1 槽前段仍有部分區塊會進行脫硝作用。

圖 8 為國內 B 污水處理廠生物處理單元 MLVSS 和溶氧分布情形，該廠將曝氣池分成三部分，前段採缺氧脫硝除氮，中間為混合槽、為添加載體的移動床生物膜反應器(MBBR·Moving Bed Biofilm Reactor)，後段則為好氧槽。在 MBBR 槽和好氧槽皆採用中氣泡散氣管，其氧傳效率為 17%，和薄膜細泡式散氣管有別。可以看出 MBBR 槽屬於劇烈曝氣擾動區域，溶氧和 MLVSS 都混合均勻，然而好氧槽為了讓迴流水 ORP 不要過高，調整分流使好氧槽溶氧不要過高。然而現場調查發現好氧槽為控制回流溶氧、混合效果差，底部污泥嚴重蓄積，建議增加攪拌器。

另一方面，約 4.5 m 操作水深的好氧池，在水深 3 m 內溶氧大致在 2.5 – 4.2 mg/L，但是更深處溶氧驟降、並且分布不均，作為監測控制溶氧的電極裝設點位可能也需要合宜地調整、使其更具代表性或是更能滿足實務操作需求。

由現場調查可以了解到曝氣量操作會影響活性污泥的攪拌混和情形，圖 9 為本研究 CFD 數值模擬，在不考慮活性污泥流變特性前提下，假設活性污泥為密度

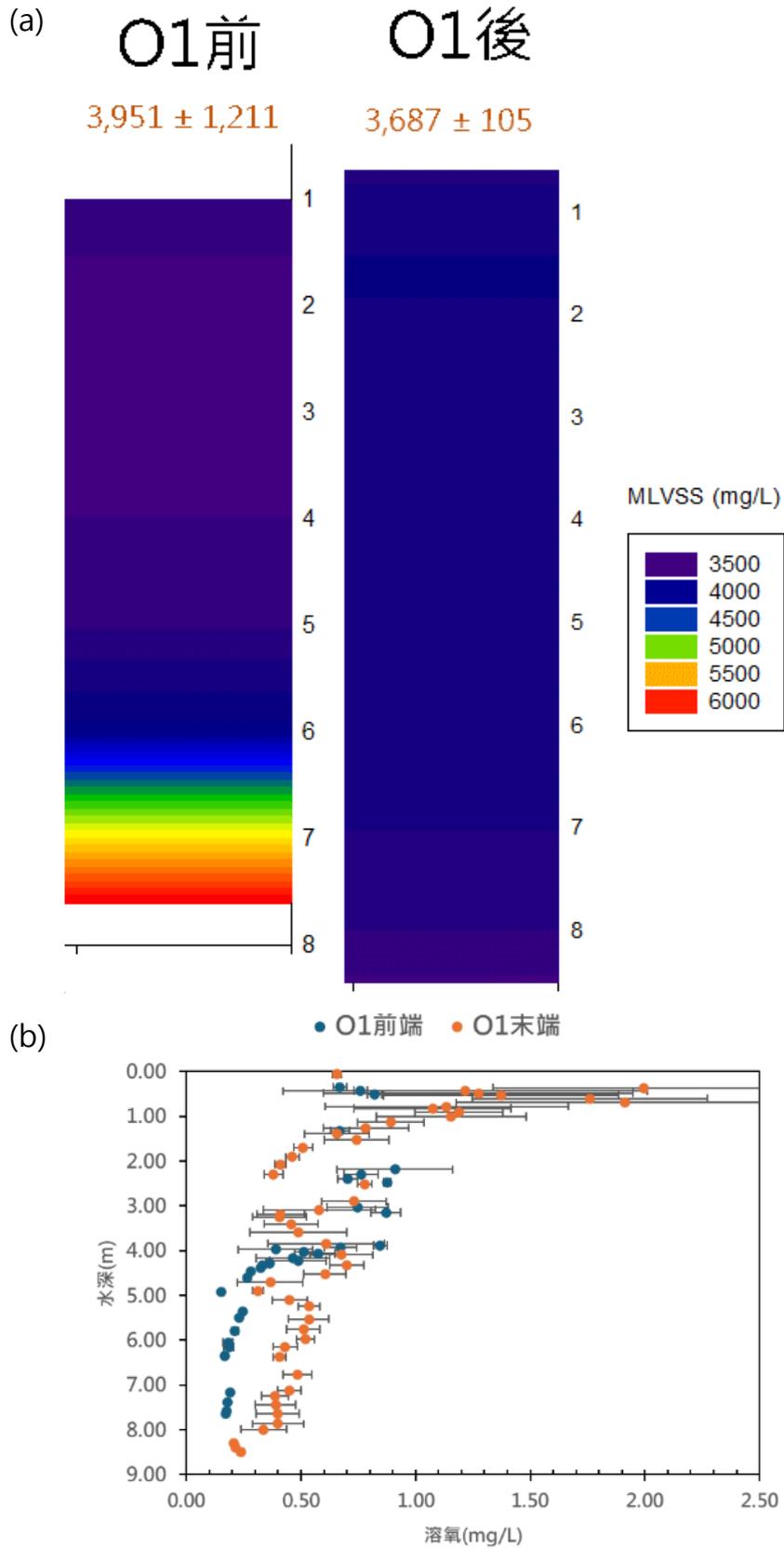


圖 7 現場調查 A 污水處理廠第一好氧池(a)MLVSS(b)溶氧垂直分布情形

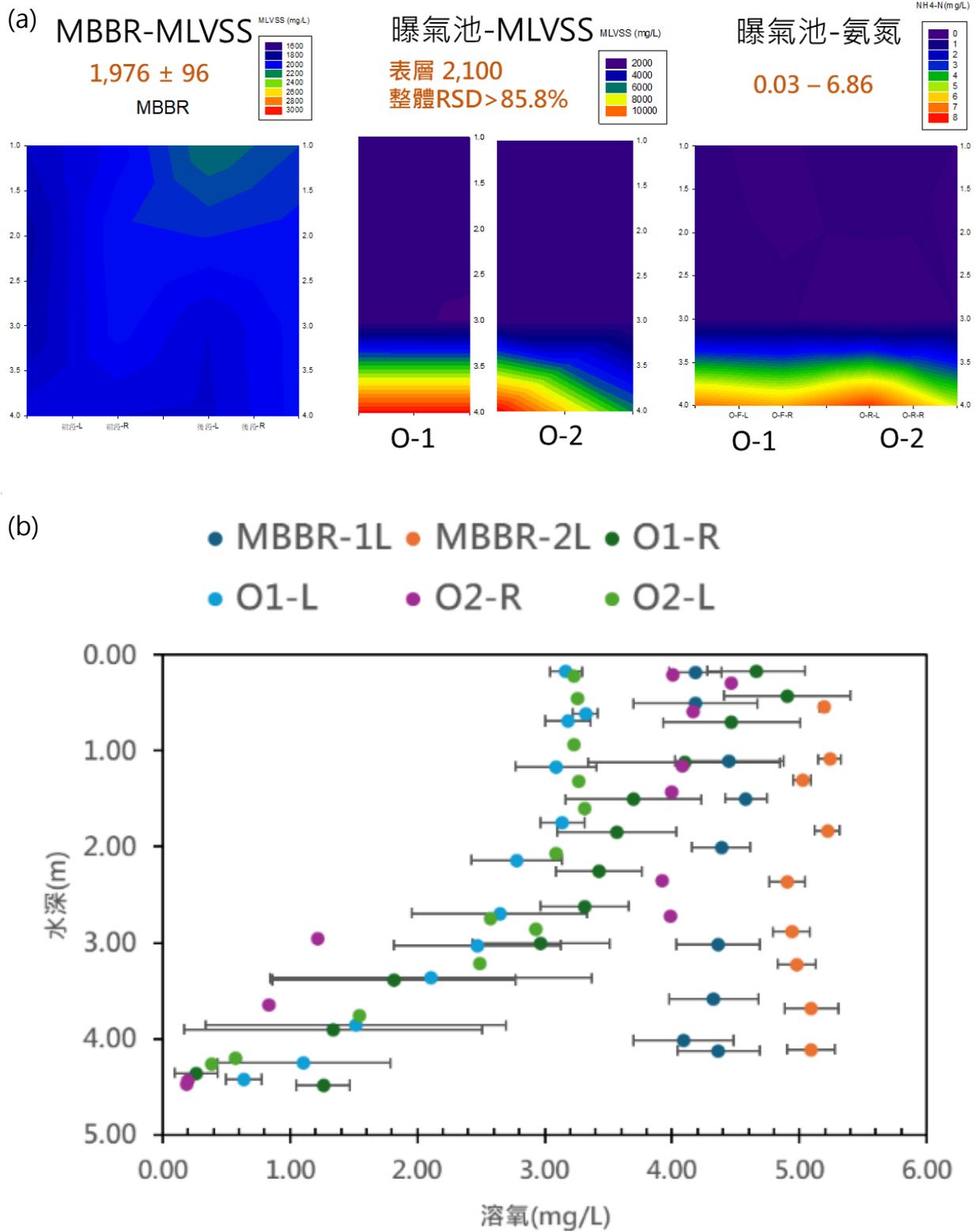


圖 8 現場調查 B 污水處理廠 MBBR 槽和好氧槽 ( O1 前端、O2 末端 ) 之  
 (a)MLVSS(b)溶氧垂直分布情形(L 表示左岸、R 表示右岸)

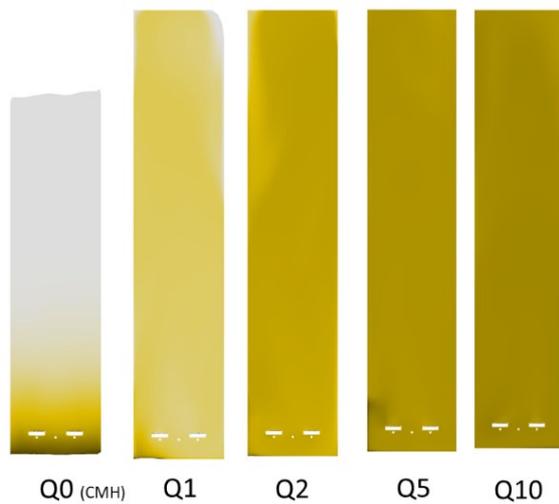


圖9 CFD 模擬不同曝氣量對活性污泥在曝氣水槽的分布情形

1050 kg/m<sup>3</sup>，黏度為定值(0.001284 / m.s)，並假設平均粒徑為 0.2 mm，模擬初始 MLSS 4,000 mg/L、在合理曝氣密度下(4 盤，8.4%曝氣密度)的混合情形。結果顯示正常操作風量(Q10)是足以達到攪拌的功能，但若低於廠商建議風量除了實際上會曝氣不均外，數值模擬結果也顯示會有污泥沉降的情形。

## 陸、結論

回顧影響氧傳的相關參數中影響  $K_La$  最大的是雷諾數(Re)、具體由曝氣量帶來的流速所造成，其次，代表慣性力/重力效應的福祿數(Froude number, Fr)、氣泡粒徑與沒水深度、曝氣池的 H/L 比、曝氣密度都有關聯。SOTE 和膜面上沒水深度經試驗有正相關，但建議未來進行氧傳測試時還是以目標水深為主，或是重複測

試不同水深的線性關係後，再行線性推算。清水曝氣氧傳實驗顯示單盤曝氣、曝氣密度 2.1%情況下示蹤劑和溶氧變化都有空間上的差異，顯示曝氣密度過低、即便在建議操作的高風量下仍無法讓流場達均勻擾動。建議最少以曝氣密度 4.2% (雙盤) 進行、曝氣量至少達建議操作風量(9" 散氣盤建議單盤至少 2.5 NCMH)。現場調查生物曝氣單元，曝氣量的確會影響活性污泥的混和攪拌情形、溶氧等水質也有空間上的差異，對於是否會有明顯停滯區(stagnant zone)則可以用 CFD 流場數值模擬輔助評估之。

## 參考文獻

1. Uby, L. (2019). Next steps in clean water oxygen transfer testing – A critical review of current standards. *Water research*, 157, 415-434.
2. Ardern, E., & Lockett, W. T. (1914). Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters. *Journal of the society of chemical industry*, 33(10), 523-539.
3. Al-Ahmady, K. K. (2011). Mathematical Model for Calculating Oxygen Mass Transfer Coefficient in Diffused Air Systems. *Al-Rafadain Engineering Journal*, 19(4).

4. Newbry, B. W. (1998). Oxygen-transfer efficiency of fine-pore diffused aeration systems: energy intensity as a unifying evaluation parameter. *Water environment research*, 70(3), 323-333.
5. Wagner, M. R., & Pöpel, H. J. (1998). Oxygen transfer and aeration efficiency—influence of diffuser submergence, diffuser density, and blower type. *Water Science and technology*, 38(3), 1-6.
6. Javed, K. H., Mahmud, T., & Zhu, J. M. (2006). Numerical simulation of turbulent batch mixing in a vessel agitated by a Rushton turbine. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(2), 99-112.





## 摘要

我國公共污水處理廠於前處理單元廣泛採用渦流沉砂池單元，以有效去除進流水中的砂礫雜質，俾利保護後續處理設備與確保去除效能。內政部國土管理署（以下簡稱本署）自民國 100 年起實施「全國污水處理廠營運評鑑計畫」，旨在提升污水處理廠營運管理績效，歷年評鑑過程中，發現多數廠站之渦流沉砂單元發生常見問題包含進流量偏低導致渠槽沈積、流速過高造成砂礫隨水流流出、攪拌葉片轉向與轉速不當及池體容積不足等，導致未能發揮應有的作用或運轉成效不彰。本研究依據歷年評鑑成果彙整現況我國公共污水處理廠之渦流沉砂池常見問題與建議改善對策，以期該項設備妥善設計與運轉，符合設備節能延壽原則，邁向我國污水處理廠永續營運務實之需，各項改善建議包含：(1)適當的進流水力條件、(2)確保攪拌葉片正確安裝並動態調整操作參數、(3)充分的水力停留時間與均勻的流場分佈、(4)加強細粒去除及後續處理整合、(5)建立例行檢核與維護制度，並提出沉砂系統操作常見問題檢核表。

**關鍵字：**渦流沉砂池、污水處理廠營運評鑑、沉砂系統操作常見問題檢核表

- 1.內政部國土管理署下水道永續管理組 / 科長
- 2.內政部國土管理署下水道永續管理組 / 組長
- 3.財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 / 副工程師
- 4.財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 / 助理研究員
- 5.財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 / 正研究員
- 6.財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 / 組長

邱明祺<sup>1</sup>、陳志偉<sup>2</sup>、吳鳴峯<sup>3</sup>、盧沐恩<sup>4</sup>、楊文儀<sup>5</sup>、黃育德<sup>6</sup>

公共污水處理廠渦流沉砂池效能改善評估與建議

## Abstract

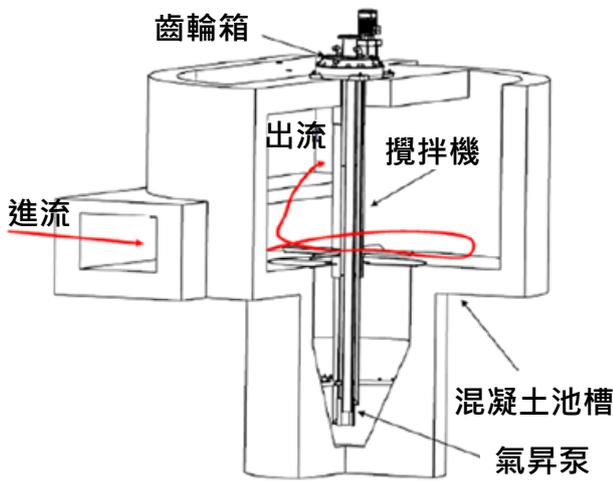
This study compiles and analyzes the common problems of vortex grit chambers in Taiwan based on years of "Wastewater Treatment Plant Performance Evaluation Program" results. Improvement strategies are also proposed to ensure the proper design and operation of such facilities. Key recommendations include: (1) ensuring appropriate hydraulic conditions for influent, (2) verifying proper installation of mixing blades and dynamically adjusting operational parameters, (3) providing sufficient hydraulic retention time and uniform flow distribution, (4) enhancing fine particle removal and integration with subsequent treatment processes, and (5) establishing routine inspection and maintenance systems, including a checklist for common operational issues in vortex grit chambers.

**Keywords:** Vortex Grit Chambers, National Wastewater Treatment Plant Performance Evaluation Program, Vortex Grit Chamber Operation Checklist.

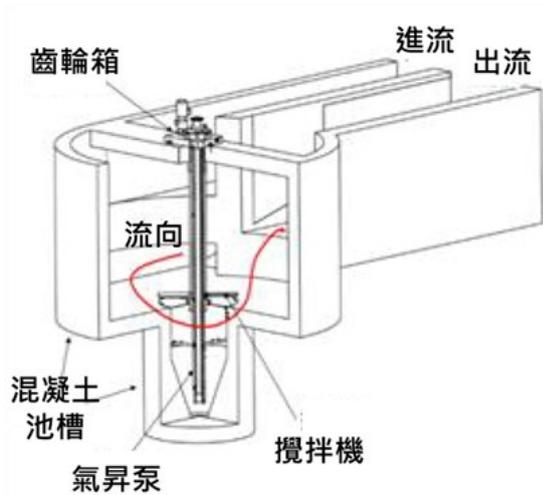
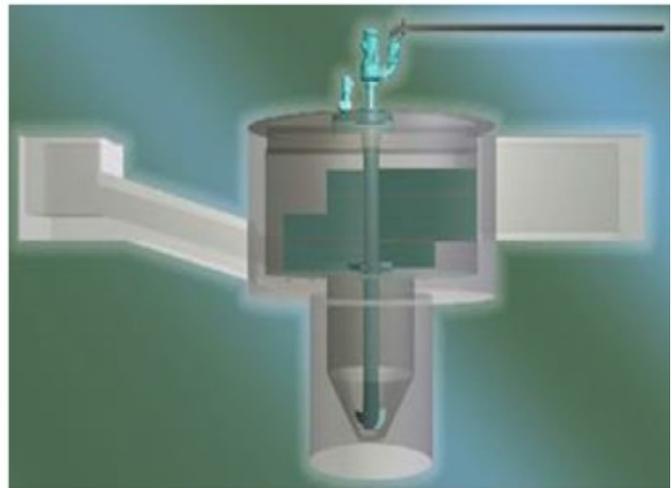
### 壹、前言

渦流沉砂池在污水處理廠的前處理單元中扮演關鍵角色，其主要功能為去除廢水中較大的無機顆粒（砂礫），以防止後續設備因磨損、阻塞或容積損失而性能下降<sup>[2]</sup>，其工作原理如圖 1。相較於傳統橫

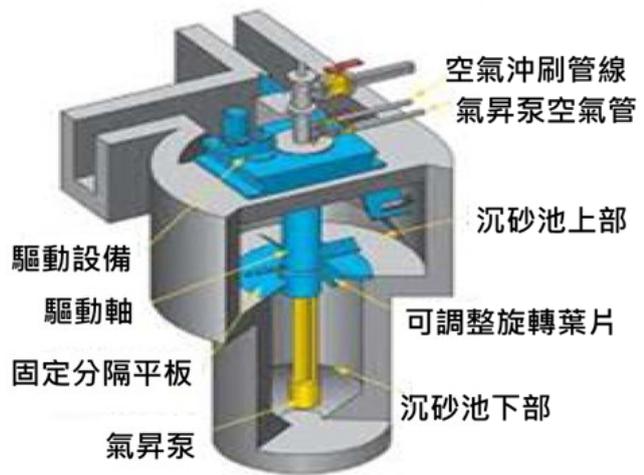
流沉砂池或曝氣沉砂池，渦流沉砂池具有占地面積小、水力停留時間短且能耗低等優點<sup>[2]</sup>。我國公共污水處理廠多採用此類型設施，但於用戶接管初期，許多廠站在營運初期進流量遠低於設計值，進流水偏低導致管道內流速不足，砂礫易在管道中提早沉積，減損沉砂池效能。反之，某



(a) 水流 360 度轉動之平底渦流沉砂池構造示意圖



(b) 水流 270 度轉動之平底渦流沉砂池構造示意圖



資料來源：國土管理署，2024，下水道系統設計及解說（增修訂）（第三版）上冊

圖 1 渦流沉砂池之工作原理示意圖

些廠站可能因進流水驟增，造成進流流速過高，導致砂礫不及沉降便隨出流水流失。

本署自民國 100 年起實施「全國污水處理廠營運評鑑計畫」，旨在提升污水處理廠營運管理績效，歷年評鑑過程中，常見影響渦流沉砂池效能的攪拌葉片旋轉方向與進流不匹配、葉片轉速設定不當、停留時間不足，以及進入沉砂池的砂礫粒徑過細等。上述問題若未改善，不僅沉砂效率低落，累積的砂礫還可能進一步磨損泵浦、管線，甚至在曝氣池或初沉池沉積，形成“水泥化”現象，縮短設備使用壽命<sup>[1]</sup>。為確保渦流沉砂池達預期效能，本署公告「廠站設備延長使用年限之基本原則」明訂渦流沉砂池設計標準：於設計水量下，對粒徑大於 50 mesh (約 0.3 mm) 之砂礫去除率需達 95% 以上，50~70 mesh (約 0.21 mm~0.3 mm) 粒徑需達 85% 以上，70~100 mesh (約 0.15 mm~0.21 mm) 粒徑亦應有 65% 以上之去除率。本研究針對我國公共污水處理廠渦流沉砂池進行系統性調查評估，探討影響沉砂效能的因素，並彙整評鑑作業各項建議改善對策。

## 貳、全國評鑑發現常見問題

彙整歷年全國污水處理廠評鑑結果，影響渦流沉砂池效能的因素眾多，但可歸納出數項全國各廠普遍存在的問題，說明如下：

### 一、進流水動力條件不符設計：

多數新建或初期營運廠站的進流水量僅達設計容量的 20~50%，導致進入渦流沉砂池前的渠道流速偏低( $<0.1$  m/s)。使得砂礫在進入沉砂池前即於進水渠道發生沉降累積。長年累積導致渠道內堆積的砂泥不僅減少有效過流斷面，更可能突然被湍流捲入後續處理單元造成衝擊。此外，部分廠站在暴雨或錯誤操作下出現遠超設計的進流水，管道和池內流速過高( $>0.5$  m/s)，導致細顆粒來不及沉降即流出沉砂池。這兩種情況都使得實際去除效率低於設計值。

### 二、攪拌葉片安裝與操作異常：

渦流沉砂池中央的攪拌葉片對維持流場至關重要。經現場評鑑作業發現，部分廠之葉片安裝方向與設計不符，旋轉方向與水流切線方向相反。葉片反轉將嚴重干擾流場，破壞原本應形成的穩定旋渦，導致沉砂效率驟降。此外，葉片轉速設定也常見偏差。有廠站長期以固定低轉速運行，未隨進流量與砂礫特性調整，導致攪拌不足或過度。過低轉速時池內環流強度不夠，砂礫可能淤積；過高轉速則產生過度紊流，反而將已沉降的砂礫重新攪起。因此葉片的轉向與轉速需要視現場情況適時校正。

### 三、池體容積與水力停留時間不足

依設計，渦流沉砂池應提供至少 20

秒以上的 HRT，以確保粒徑約 0.2~0.3 mm 的砂礫有充分時間沉降。然而部分既有廠因原設計餘裕不足或擴建後流量增加，實際 HRT 縮短至 10 秒以下。水力停留時間過短時，沉降尚未完成，部分砂礫即被帶出池外，造成去除率下降。此外，池體容積不足也使系統對流量驟變的緩衝能力降低，在高峰流量時更難維持預期效能。

#### 四、截留砂礫粒徑組成變化

數據顯示，不同廠站進流水中砂礫粒徑組成差異甚大。有的廠進水主要含粗砂 (>0.5 mm)，較易截留；但也有廠因集水區土質或管網沖刷情形，進水夾帶許多細砂 (<0.2 mm) 甚至粉砂。後者對渦流沉砂池挑戰較大，典型設計對細砂去除效率有限。例如某廠原水中約有 30% 質量的砂礫小於 100 目 (~0.15 mm)，改進前整體沉砂去除率僅約 50%。此類情況下，需透過調整操作（如葉片轉速）或輔以其他單元（如旋風分離器）才能有效提升細粒去除率。

### 參、改善對策與措施

針對上述問題，本研究彙整歷年評鑑過程，經邀集專家學者討論提出之改善建議，歸納主要改善對策如下：

#### 一、維持適當進流流速

對於初期低流量或用戶接管水量不

如逾期之系統，導致低流速運行的廠站，採取縮小進水渠道有效寬度或另配水管週期性沖刷渠道的措施，以提高渠道的流速。例如某中型廠在進口管道加裝可調節堰板縮減斷面，使低水量時管道水位抬升，成功將最低流速提高至 0.2 m/s 以上。此舉防止砂礫在渠道的沉積並提升平均截砂量。對於過高流速的情況，則透過在渠道中增設消能工或改造進流方式（如增加迂迴導流板）以降低流速，使進入沉砂池流速均能維持在 0.15~0.3 m/s 的理想區間，確保系統在各種流量條件下都有穩定的截砂表現。

#### 二、校正葉片轉向與優化轉速

經現場評鑑作業發現，部分廠之葉片安裝方向與設計相反，葉片反轉將嚴重干擾流場，造成流況短流導致沉砂效率驟降。為避免此一情形發生應檢視並校正所有攪拌葉片的轉動方向，確保其與進水切向方向一致。

此外，依據各廠進水砂礫粒徑分析結果，重新調整並優化葉片轉速設定。一般而言，當進水含較多細砂時，適度提高轉速可增強軸向旋流以輔助細砂向中心集聚；反之則可降低轉速以減少紊流。某大型污水處理廠在調速前後的對比試驗顯示：將葉片轉速從原先的 5 RPM 提升至 8 RPM 後，對粒徑小於 0.2 mm 之砂礫的去除率由 60% 增至約 75%，而較大砂礫的去除率維持在 95% 以上，顯示轉速

優化對細砂截留有明顯助益，惟仍建議各廠應針對系統之進流水質進行粒徑分析實驗，以掌握水質中砂礫分布與最佳去除率。

### 三、增加有效容積與停留時間

面對池體容積不足問題，部分廠採取工程與操作並行的對策。工程方面，新建平行的沉砂池，在高流量時兩池並聯運行以增加總容積；或於池內加裝垂直隔板形成延長流路，以增加顆粒沉降路徑長度。操作方面，透過調整進流水在不同單元間的分配，避免單池過載運行。經過上述調整，多數廠站在常態流量下 HRT 應能升至 20 秒以上，高峰負荷下應維持 15 秒以上。以某擴建廠為例，擴建前因流量增大導致 HRT 僅 10 秒，改以兩座沉砂池並聯後 HRT 恢復至 25 秒，改善後測得的總截砂率由 50% 左右提升至 90%，效果顯著。

### 四、細砂去除技術之輔助應用

進流水細粒含量高的廠站，除上述調整外，曾引入輔助技術加強對細砂的去除。在一處案例中，於渦流沉砂池出水端增設一組水力旋風分離器 (hydrocyclone)，利用離心力進一步捕集未沉降之細微砂礫。該措施使 100 mesh (約 0.15 mm) 以下微粒的總去除率額外提高約 10%。另有廠更新砂水分離與洗砂設備，例如採用新型高效洗砂機，有

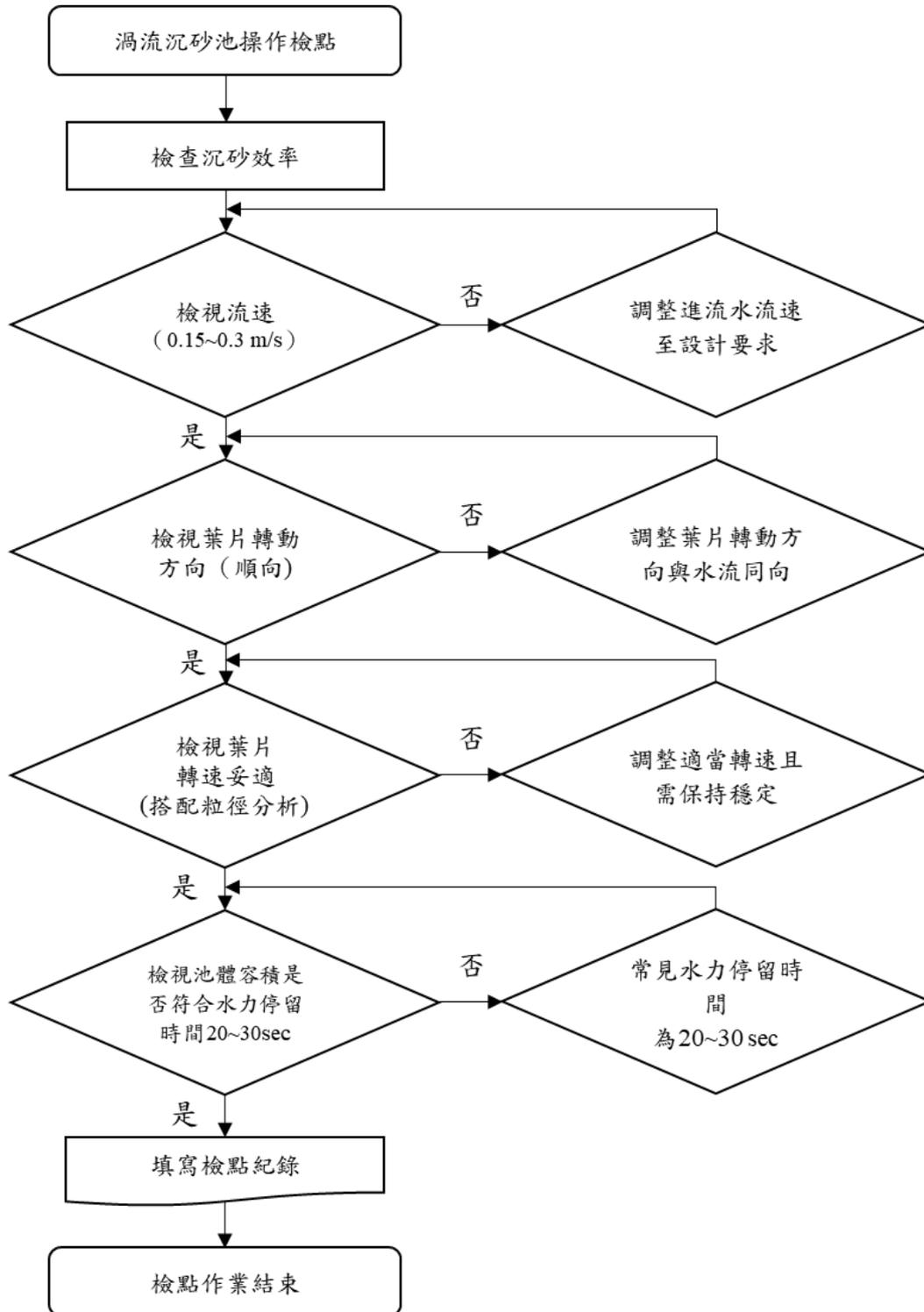
效洗除附著於砂礫表面的有機質並篩除更細微的砂泥。這些輔助措施雖增加了設備投資與操作，但在部分需特別控制細砂的場域，確實提升了整體截砂效果。

渦流沉砂池的典型流場如圖 1 所示，經適當設計後，渦流系統可在 360 度圓周範圍內維持均勻的旋轉流速，確保砂礫沿池底被順利帶入中央集砂口。此外，透過在池內安裝導流板以誘導理想渦流，亦可有效改善流場分佈。例如，王等人 (2020)<sup>[2]</sup> 縮尺模型與數值模擬發現，在進水渠加設環狀導流板後，渦流沉砂池內部流動更穩定，砂礫與有機物分離更有效，當進水流速約 0.32 m/s 時可達到 71.1% 的最大除砂率，較無導流板時提升約 5~15%<sup>[2]</sup> 這些技術的應用顯示出優化流態對提升沉砂效能具有積極作用。

### 肆、操作檢點建議

本研究透過歷年評鑑針對公共污水處理廠渦流沉砂池的效能確認，釐清影響沉砂效能的主要因素，提出效能檢點流程圖 (如圖 2)，並依照操作時可能面臨問題，包含渦流沉砂池沉砂效能不佳、曝氣沉砂池沉砂效能不佳、抽砂泵抽砂效能不佳、氣昇泵抽砂效能不佳、螺旋洗砂機效能不佳、水力旋風分離器出砂狀況不理想等面向，提出操作檢核表 (如表 1)，完整資訊可至本署公共污水處理廠智慧管理雲平台 (<https://scloud.nlma.gov.tw/>)

下載參閱。



資料來源：國土管理署，2025，評鑑改善建議彙編-沉砂系統與洗砂設備

圖 2 渦流沉砂池操作檢點流程圖

表 1 沉砂系統操作常見問題檢核表

問題描述	項次	可能原因	建議改善方案
渦流沉砂池沉砂效能不佳	1	進流量偏低，砂粒沉積於進流渠道中。	1. 渠道縮減截面積逾增加流速（低流量之最低可接受流速為 0.15 m/s）。 2. 設置沖刷設施，使用回收水沖洗渠道。
	2	進流流速過高。	調整進流流速至設計要求(0.15~0.3 m/s)。
	3	葉片轉動方向與水流流向不匹配。	開蓋檢點葉片轉向。
	4	葉片轉速不適當。	依進流粒徑分析結果，調整適當的葉片轉速。攪拌速度需保持穩定，避免速度過高或過低導致沉砂效率下降。
	5	池體容積無法滿足實際需求。	常見水力停留時間為 20~30 sec。
	6	砂粒細小不易沉降。	1.對沉砂池進出流做粒徑分析，並檢核去除率。 2.依據國土署公告之「廠站設備延長使用年限之基本原則」，渦流沉砂池設計處理效率，當砂粒徑分析篩網篩號小於 50 mesh 時其去除率≥95%；砂粒徑分析篩網篩號小於 70 mesh，大於 50 mesh 其去除率≥85%；砂粒徑分析篩網篩號小於 100 mesh，大於 70 mesh 其去除率≥65%。

表 1 沉砂系統操作常見問題檢核表

問題描述	項次	可能原因	建議改善方案
抽砂泵抽砂效能不佳	7	抽砂頻率偏低、啟動間隔太長泥砂壓密不易抽除。	調整操作參數，例如每小時抽砂 5 分鐘。
	8	抽砂（水）量過大，造成水溢流回到前處理單元。	可結合變頻器調整泵流量。
	9	進水口或泵腔內壓力過低，導致水汽化產生氣泡，對葉輪造成損害。	增加進水液位或降低吸程高度。
	10	進水管線設計不合理或水位過低。	優化泵和管道設計，避免進水口處壓力過低。
	11	泵位置過於狹窄，維護空間不足。	停機維修時間長，影響整體污水處理進度。
	12	泵的流量或揚程與實際運轉需求不匹配。	1.依現場管線配置及高程再檢核壓損。 2.根據實際泵浦流量揚程曲線檢核泵浦是否匹配。
	13	泵送沉砂管線設計不良，管徑過小或長度過長。	調整泵送管線設計，增加管徑或減少彎管。
	14	管線內部有沉積物，導致阻塞。	定期清理管線內部沉積物，保持通暢。
氣昇泵抽砂效能不佳	15	壓縮空氣的供應量過多或過少，會影響氣昇泵的提升效果。	使用精確的氣量調節閥進行控制。
	16	過多的氣泡會導致提升效率下降，甚至可能使部分沉積物滯留。	調整供氣量以減少過量氣泡的產生。
	17	過大的顆粒或高濃度砂粒沉積物不易被氣昇泵提升。	定期清理沉積物，降低積累濃度。
	18	氣昇泵吸入口或管道易被沉積物或漂浮物堵塞	在吸入口加裝過濾裝置，防止大顆粒進入。

表 1 沉砂系統操作常見問題檢核表

問題描述	項次	可能原因	建議改善方案
螺旋洗砂機效能不佳	19	泵體磨損嚴重：污水中含有大量的砂粒、碎石和其他顆粒物，這些物質在泵內高速運動會對葉輪、泵殼造成磨損。	選用耐磨材料製作泵殼和葉輪、定期檢查和更換磨損零件。
	20	螺桿泵運行振動過大、安裝不穩定或基座未固定牢固。	確保泵體基座穩定，安裝時調整水平。
	21	螺旋葉片和耐磨條在長期運轉中受到砂粒磨損。	定期更換葉片或耐磨襯墊。
	22	螺旋軸心歪斜。	更換軸心。
	23	進水水量的波動影響砂水混合物在螺旋洗砂機內的去除效果，導致過多的砂回流至前處理單元。	保持穩定的進水水量。
	24	洗砂機的沖洗水量不足或壓力不夠，導致泥沙分離效果差。	增加洗砂機的沖洗水量或提高水壓。檢查噴嘴設置，確保水流能均勻覆蓋砂料。
水力旋風分離器出砂狀況不理想	25	因進流水流速過大，加上溢流長度不足，導致末端易產生虹吸現象與氣塞	建議加裝排氣閥、增加溢流長度，並優化管徑與斜度配置，以穩定流量與防止負壓。
	26	入口壓力顯示不足（因管線過長及部分沉積阻塞）	水力旋風分離器入口壓力建議(0.5~1.5 kgf/cm <sup>2</sup> )

## 伍、結論

本研究綜整前述各類問題與改善對策，提出以下五點結論。

一、適當的進流水力條件是沉砂效率的前提：

建議各污水處理廠定期檢視進入沉砂池前管道之流速，特別是在用戶接管初期或枯水季節低流量時，確保流速不低於 0.15 m/s；在暴雨高流量時亦應避免超過 0.3 m/s。可透過可調堰板、管道縮窄或合流分流等工程手段，將各種狀況下的流速控制在設計範圍。

二、確保攪拌葉片正確安裝並動態調整操作參數：

葉片旋轉方向與速度對渦流沉砂池效能影響顯著。建議廠站在年度檢修時都檢查葉片磨蝕情形，轉動方向是否與水流一致，並根據進流水量和砂礫特性適時調整轉速。當監測到出流水含砂量增加時，可適度提高轉速增強旋流；反之則降低轉速節能。在未來設備升級時，可考慮導入自動變頻控制，以便在不同流量條件下維持最佳旋轉速度。

三、充分的水力停留時間與均勻的流場分佈必不可少：

對已營運多年且進水量穩定的老舊廠站，應重新評估現有沉砂池在當前最大進流下的 HRT 是否足夠，必要時進行擴充或改造。例如增加平行單元、調整池形（如增設導流板或部分阻隔形成延長流路）等，以提升對顆粒的截留能力。

四、加強細粒去除及後續處理整合：

雖然渦流沉砂池主要針對較大粒徑的砂礫，但隨著管網延伸和沖刷，細顆粒所占比例可能提高。建議對沉砂池截留物定期進行粒徑分析，若發現大量細砂未被去除，可評估增設水力分離器等輔助設備的可行性。同時，務必確保現有的洗砂機等附屬設備正常運作，以去除砂礫所夾帶的有機質並避免細砂回流。砂礫控制不僅有助於保護後續單元，也能減輕後段污泥處理系統的負擔。

五、落實例行檢核與維護：

沉砂池屬於無機顆粒處理單元，相對不易出現突發故障，但長期效率低落會累積隱患。建議營運單位制定每日/每週檢點清單，包含管道沉積觀察、葉片磨蝕情形及運轉聲響與振動、出水清澈度等項目；每半年對截留砂進行稱重和粒徑分析，評估效率是否隨時間衰

減。一旦發現異常，應及時清理管道或池底淤積，並檢修相關設備，防患未然。

未來在新建或擴建污水處理廠時，除遵循設計規範確保足夠的沉砂能力外，更應重視運轉管理上的彈性與調適。例如，採用可調節的管道和變速攪拌設備，以及預留擴充空間，以因應水量水質的變遷。透過工程設計與操作管理並重，我國各地污水處理廠之渦流沉砂池效能勢必能持續提升，確保下水道系統長期穩健運行並達成污水妥善處理之目標。

### 參考文獻

1. 內政部國土署(2019)。廠站設備延長使用年限之基本原則(公告稿)。臺北：內政部營建署下水道工程處。
2. 王旭博、王延濤(2020)。新型導流板旋流沉砂池數值模擬及水處理效能研究。工業水處理，40(5): 106-111。
3. 王雪原(2001)。Pista 360°渦流沉砂池的特色與設計要點。《中國給水排水》，17(8): 36-38。
4. Smith & Loveless Inc. (2019). Forced Vortex Baffle Developments Improve Grit Removal Performance & Design Flexibility. Water & Wastes Digest, Dec 2019.
5. U.S. EPA (2003). Wastewater Technology Fact Sheet: Screening and Grit Removal. EPA 832-F-03-011.
6. C. Chebbo & M.C. Gromaire (2009). Quality characterization of urban runoff and combined sewer overflow. Water Science and Technology, 59(12), 2451-2458.
7. Liz Manning et al. (2022). Evaluating Grit Characteristics and Removal Performance (Grit Symposium).



## 摘要

因應氣候變遷議題，國際間逐步加大減碳力道。我國除將 2050 年淨零排放目標納入氣候變遷因應法第 4 條，並逐步擴大減碳目標，將 2030 年減碳目標由原較基準年（2005 年）減少 24±1%，提高至較基準年減少 28±2%，能源、製造、運輸、住商、農業及環境六大部門亦皆同步提高減碳目標。生活污水排放屬環境部門管理範疇，2022 年我國環境部門碳排放量占全國排放量約 0.98%，生活污水則占環境部門 16.9%；雖然生活污水碳排放量看似不高，惟在國家整體減碳目標下，各部門皆須肩負減碳責任。污水下水道系統建設係以提高污水處理率，降低生活污水碳排放為目標。惟下水道工程增建時使用的工程材料與機運具，將使其他部門碳排放量增加；另污水處理廠營運期間，亦會因操作設備之能源使用增加其他部門負擔。因此，污水下水道系統長期碳管理思維，應朝向生命週期碳管理架構，於生命週期各階段皆納入減碳思維，以期能為國家朝向淨零排放目標盡一份心力。

**關鍵字：** 碳排放、淨零排放、生命週期碳管理

1. 中興工程顧問股份有限公司 / 總監

2. 中興工程顧問股份有限公司 / 組長

3. 中興工程顧問股份有限公司 / 資深工程師

生命週期碳管理邁向下水道系統淨零排放

周武雄<sup>1</sup>、許珮蓓<sup>2</sup>、鄭亦卉<sup>3</sup>

## Abstract

In response to climate change, countries around the world are gradually strengthening their carbon reduction efforts. In addition to incorporating the 2050 net-zero target into Article 4 of the Climate Change Act, Taiwan has progressively expanded its goals of carbon reduction. The 2030 emission reduction target has been raised from the originally planned  $24\pm 1\%$  reduction compared to the 2005 baseline to a more ambitious  $28\pm 2\%$  reduction. The targets have also been simultaneously increased across six major sectors: energy, manufacturing, transportation, residential and commercial buildings, agriculture, and the environment. Domestic wastewater discharge falls under the management of environmental sector. In 2022, carbon emissions from environmental sector accounted for approximately 0.98% of the total emissions, with domestic wastewater contributing approximately 16.9% of the sector. Although emissions from domestic wastewater may appear relatively low, every sector must share the responsibility for emission reductions under the national targets.

The construction of sewerage systems aims to increase wastewater treatment rates and reduce carbon emissions from domestic wastewater. However, the materials and machinery used to expand the sewer infrastructure contribute to increased emissions in other sectors. Additionally, the operation of wastewater treatment plants involves energy consumption by equipment, further increasing the burden on other sectors.

Therefore, the long-term carbon management of sewerage systems should adopt a life cycle carbon management framework, incorporating carbon reduction strategies at every stage of the lifecycle to contribute meaningfully to the nation's goal of achieving net-zero emissions.

**Keywords** : Carbon emission, net-zero emissions, lifecycle carbon management.

## 壹、前言

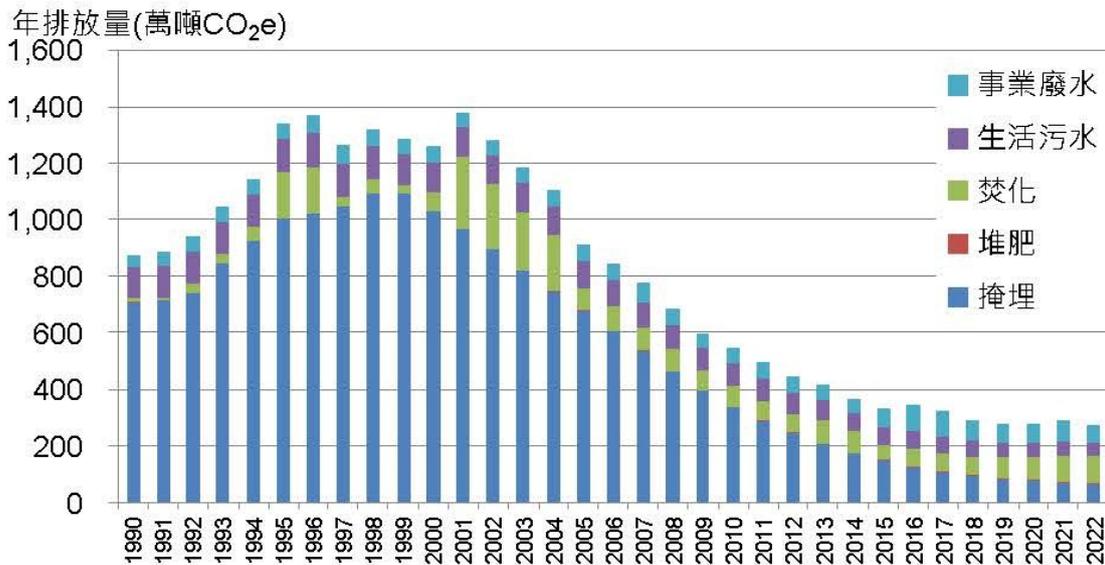
面對全球氣候變遷造成極端氣候事件的頻度增加，2015 年聯合國氣候變遷綱要公約 (United Nation Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 第 21 屆締約國大會 (Country of Party, COP) 通過巴黎協定 (The Paris Agreement)，目標希望將升溫控制在不超過 1.5°C。並於 2018 年發布之 1.5°C 全球暖化特別報告提出，在增溫不超過 1.5°C 的目標下，須於 2050 年前達到溫室氣體淨零排放，2050 年淨零排放儼然已成為國際共同努力之目標。

而我國除於 2022 年發布國家 2050 年淨零排放路徑，更於 2023 年 2 月將溫室氣體減量及管理法修正公布為氣候變遷

因應法 (以下簡稱氣候法)，將 2050 年淨零排放目標入法。在長期減量目標下，能源、製造、運輸、住商、農業及環境六大部門，依據國家分階段減碳目標積極落實減碳工作。

環境部門長期溫室氣體排放量呈現下降趨勢，然近年減量趨勢減緩，2022 年排放量約 270 萬噸 CO<sub>2</sub>e，僅占國家溫室氣體總排放量約 0.98% (圖 1)。2022 年排放來源以廢棄物處理排放量最高占 34.8%，掩埋、廢水及污水排放量占比相近，分別占環境部門總排放量之 24.5%、22.0%及 16.9%。

為能降低生活污水水體碳排放，及提供國民良好之水環境，我國持續提高生活污水處理率。惟污水處理率提升同時，因應處理過程所需消耗之能資源，亦增加其



資料來源：環境部，中華民國國家溫室氣體排放清冊報告,2024。

圖 1 環境部門歷年溫室氣體排放量統計

他部門溫室氣體減量壓力。因此，如何兼顧水體碳排放降低並減少處理過程之能資源使用，確為污水處理管理機關後續之思考重點。

## 貳、污水處理廠減碳作為

生活污水碳排放來源包含妥善及未妥善處理兩類，妥善處理排放係指經污水下水道收集後至處理廠處理之情境，在此過程中於處理程序及開放水體之碳排放；而未妥善處理則為僅經化糞池處理或直接至開放水體排放。因未妥善處理之碳排放量高於妥善處理，目前主管機關係以提高生活污水處理率並減少未妥善處理污水量，進而降低整體污水之碳排放量。

然而因應提升污水處理率以降低水體

碳排放之目標下，污水處理過程所使用之能資源成為須面對之議題。

因應 2050 淨零目標我國提出「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，並以提出 12 項關鍵戰略來整合跨部會資源（圖 2），共同推動淨零工作。

污水處理之溫室氣體排放雖僅占環境部門 16.9%，惟仍應思考在維持民眾生活所需外，需要兼顧降低溫室氣體排放量。據此，整體污水處理減碳工作，應可扣合國家淨零轉型關鍵戰略，搭配國家減碳技術發展方向，共同為國家完成淨零排放目標努力。建議可搭配之戰略包含：

關鍵戰略 3「前瞻能源」，生活污水處理除肩負國家生活污水碳排放降低之責



資料來源：國家發展委員會，臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明。

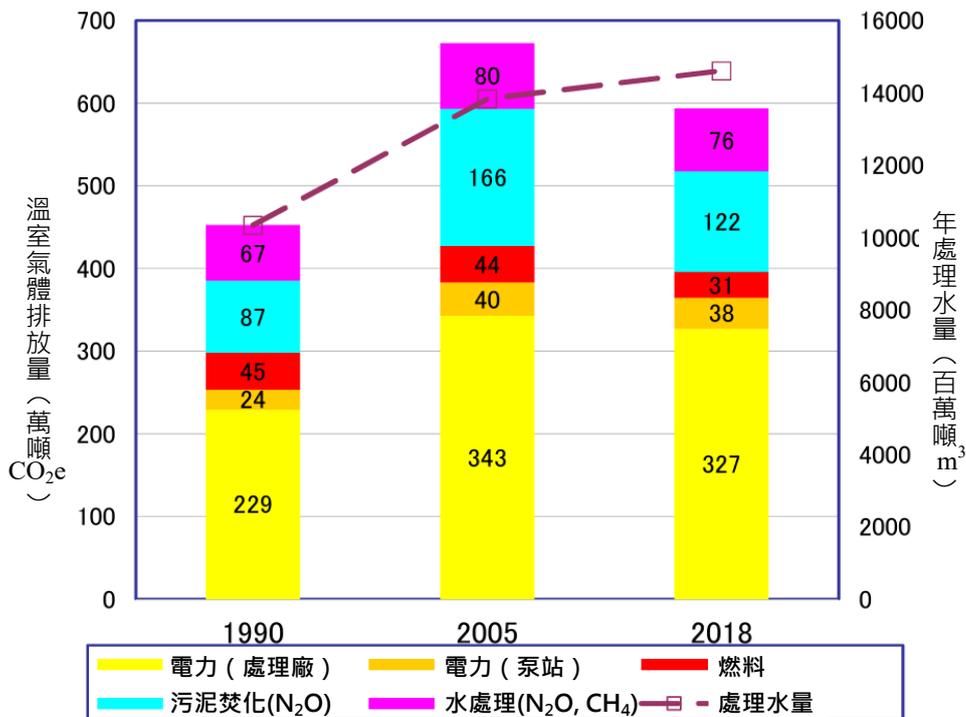
圖 2 2050 淨零轉型 12 項關鍵戰略

任，於處理過程中產生之沼氣若能有效利用發展沼氣發電。產生之電力除可自發自用，降低處理廠能源使用外，亦可降低國家電網負擔。

關鍵戰略 1「風電/光電」，污水處理廠之未利用空間可考慮擴大再生能源設置，如太陽能板裝設。初期可優先於發電效率較高區域裝設，待太陽能板之技術提升，再逐步擴大至其他區域。策略上可採分區分階段推動污水處理廠加裝太陽能板能；另因應太陽能發電之午間尖峰發電量高，再搭配儲能系統，以利多餘能源儲存及利用。

近期，高雄旗美污水處理廠規劃透過更換低能耗高效率設備，以大幅減少廠內用電量，並以廠內架設之太陽能板提供廠區內用電，期能達到全廠零碳排放目標。

關鍵戰略 5「節能」，污水處理過程之用電為主要之碳排放來源，減少設備能耗或是改善操作程序提高效率等作為至為關鍵。依據日本國土交通省污水處理技術發展會議能源小組委員會報告(下水道技術開發會議エネルギー分科會報告2021)資料顯示，下水道系統之溫室氣體排放以污水處理廠內電力使用最高，占比超過5成(圖3)，其次為污泥焚化產生之N<sub>2</sub>O，水體排放再次之。我國污水



資料來源：日本國土交通省，污水處理技術發展會議能源小組委員會報告 2021

圖 3 日本下水道系統溫室氣體排放量分析圖

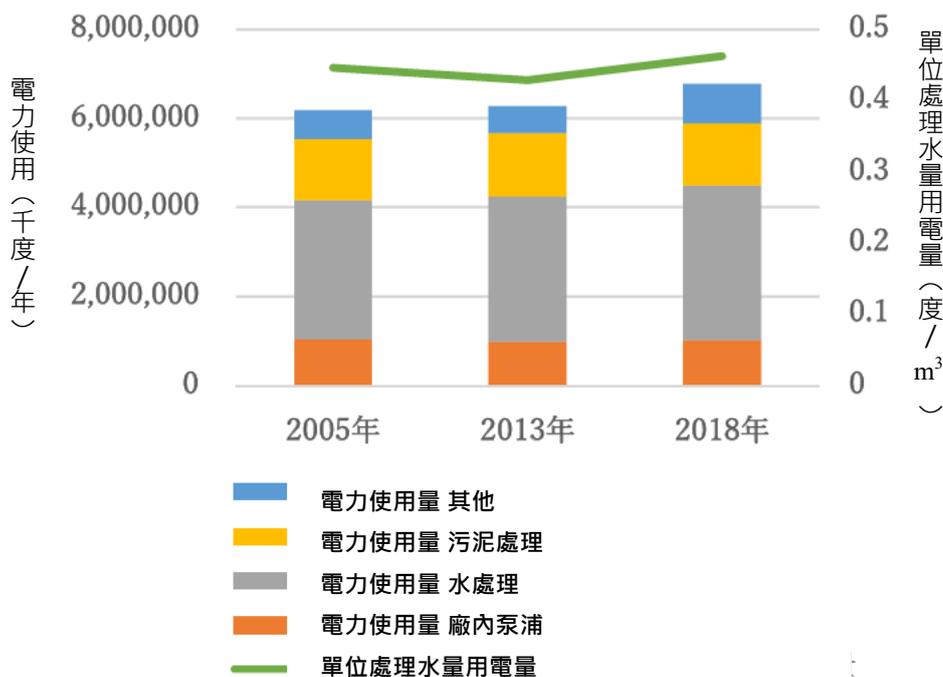
處理廠並無污泥焚化處理設施，故廠內用電排放比例在扣除焚化之 N<sub>2</sub>O 排放後，將較日本的超過 5 成更高。顯示廠內電力使用所造成之碳排放減量，為首要考慮之重點。

另該報告亦統計污水處理廠電力使用來源 (圖 4)，由圖中顯示日本污水處理廠單位處理污水之電力使用約在 0.45 度電/m<sup>3</sup> 左右，而主要之用電來源以廠內污水處理、污泥處理及泵浦為主。有關污水處理廠內水處理設備及相關泵浦電力使用量降低之重要性不言可喻。

統計我國 2023 年全國公共污水處理

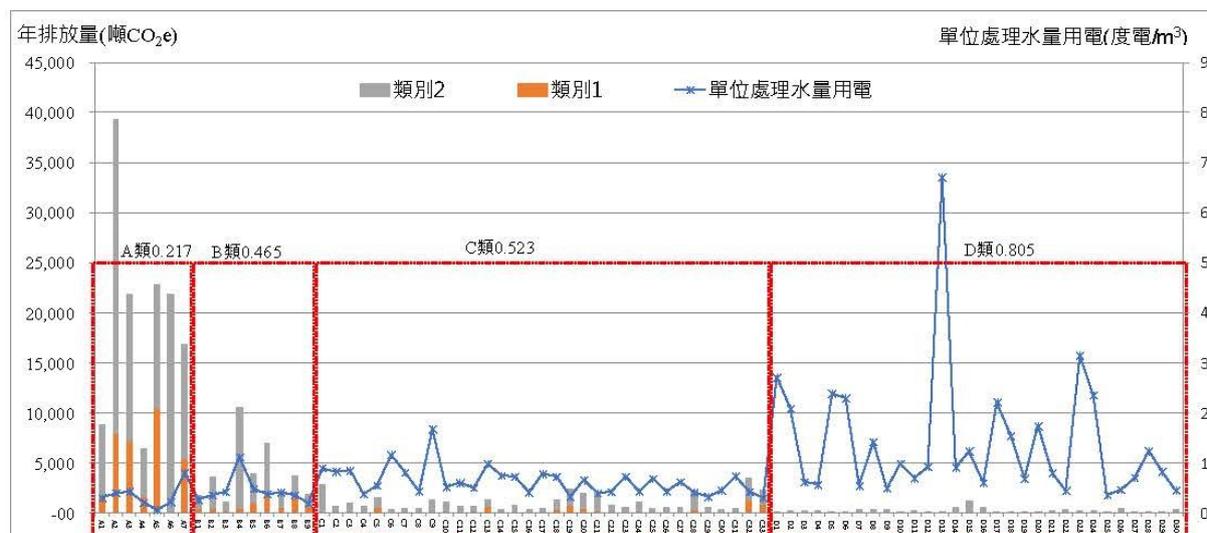
廠溫室氣體盤查資料顯示 (圖 5)，類別 1 直接碳排放量明顯低於類別 2 輸入能源的間接碳排放量，而就我國污水處理廠特性，類別 2 幾乎即為電力。

比較不同規模污水處理廠單位處理水量用電可看出，A 類 (處理水量最大) 之單位處理水量用電量最低為 0.217 度電/m<sup>3</sup>，B 類之單位處理水量用電量 0.465 度電/m<sup>3</sup>。A 類中包含八里及中區兩座初級污水處理廠，在扣除八里及中區污水處理廠後，其餘 5 座污水處理廠之平均單位處理水量用電量為 0.402 度電/m<sup>3</sup>，仍為最低。我國 A 類與 B 類污水處理廠之單



資料來源：日本國土交通省，污水處理技術發展會議能源小組委員會報告 2021

圖 4 日本污水處理廠用電量



資料來源：2023 年度全國公共污水處理廠溫室氣體盤查數據統計資料

圖 5 2023 年全國公共污水處理廠碳排放量及單位用電量統計

位處理水量用電量與日本（圖 4）相近。惟中小型之 C 類及 D 類分別為 0.523 及 0.805 度電/m<sup>3</sup> 則高出日本平均用電量，特別 D 類不僅平均用電量高，且不同廠之用電量差異大，值得注意。

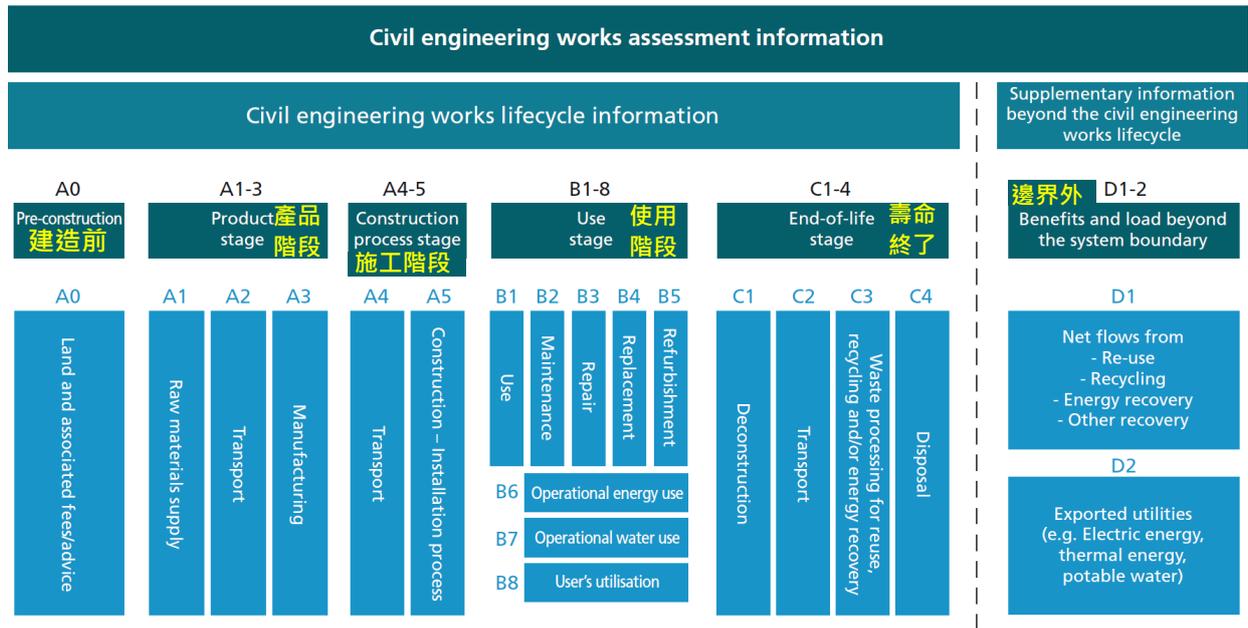
目前污水處理廠節能延壽計畫係針對污水處理廠之耗能設備進行汰換，以提升用電效率。建議可搭配裝設智慧電表，藉由雲端資料掌握用電結構，評估高耗能設備汰換優先順序。此外，並可訂定節能減碳規範，納入定期評鑑，增加減碳之誘因。

關鍵戰略 8「資源循環零廢棄」，有關污水處理之污泥資源再利用、再生水及再生或回收工程材料使用等，皆有助於落實資源循環零廢棄。

### 參、污水下水道系統生命週期碳管理思維

根據聯合國環境規劃署 (United Nations Environment Programme, UNEP) 2021 年研究指出，建築與營建業占全球溫室氣體排放 37%。因此，國際間針對工程碳排放管理，已逐漸朝向全生命週期碳管理概念（圖 6）。依據工程不同階段管理其碳排放量，並據以擬定相關減碳措施。

污水下水道系統長期因應氣候變遷所面臨之減碳工作包含：提高污水處理率降低未妥善處理生活污水碳排放、降低污水處理廠營運碳排放及因應提升污水處理率下之低碳工程推動三大面向。



資料來源：ICE, Guidance Document for PAS 2080 -Practical actions and examples to accelerate the decarbonisation of buildings and infrastructure,2023.04. P58, Fig 4.3, Source : BS EN 17472:2022.

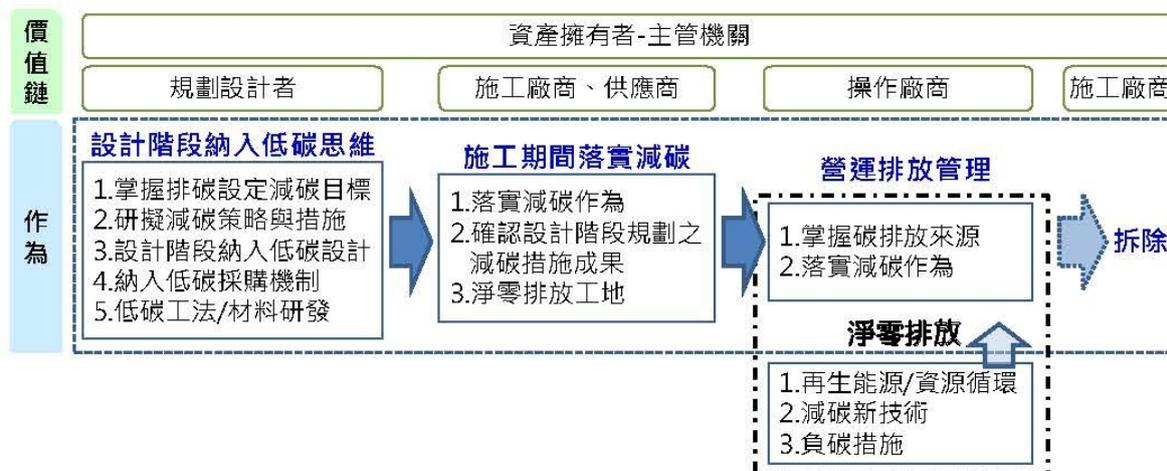
圖 6 工程全生命週期碳管理

未來下水道新建工程所帶來之溫室氣體排放，涉及工程興建與後續維運之碳排放。在長期淨零排放目標下，須兼顧營運期間與工程興建所帶來之價值鏈碳排放影響。因此，未來下水道系統之興建與營運，應納入整體生命週期碳排放管理概念（圖 7）。

建議未來可由主管機關訂定整體下水道系統之分階段減量目標，並初擬減碳策略及其對應之減碳措施，如經由低碳採購機制來實踐；要求設計廠商於設計階段納入低碳設計；並透過不斷之低碳工法（例

如：工區機具電動化）及低碳材料（例如：低碳水泥、耐久性材料-高性能混凝土）研發，提高工程減碳空間。延續設計理念及低碳採購策略，除於施工階段確認落實設計階段所要求之減碳措施外，並可進一步要求施工廠商主動提出減碳作為及與材料或機具供應商共同合作，達到實際減碳成果，逐步邁向淨零工程目標。

營運期間則除掌握碳排放來源，落實減碳作為外；並可透過資源循環再利用降低資源使用，另可擴大再生能源自產自用，降低外部能源使用依賴，加上新減碳



資料來源：本文整理

圖 7 污水下水道系統生命週期碳排放管理概念

技術納入，及逐步納入負碳措施，以達成淨零排放目標。

在各生命週期階段，亦應由價值鏈成員進行碳揭露，明確掌握各階段碳排放量及減碳成效，確認朝向減碳路徑前進。

#### 肆、結語

下水道系統除肩負國家水環境改善責任，近年因應氣候變遷壓力下亦加重降低環境部門溫室氣體排放之目標。污水處理率提升確能改善水體碳排放，惟相對也增加工程興建及後續營運使用能資源所帶之碳排放量。

因此，整體下水道系統碳排放減量，應朝向生命週期管理，以期能兼顧水體排放降低，又不造成其他部門之負擔，與其

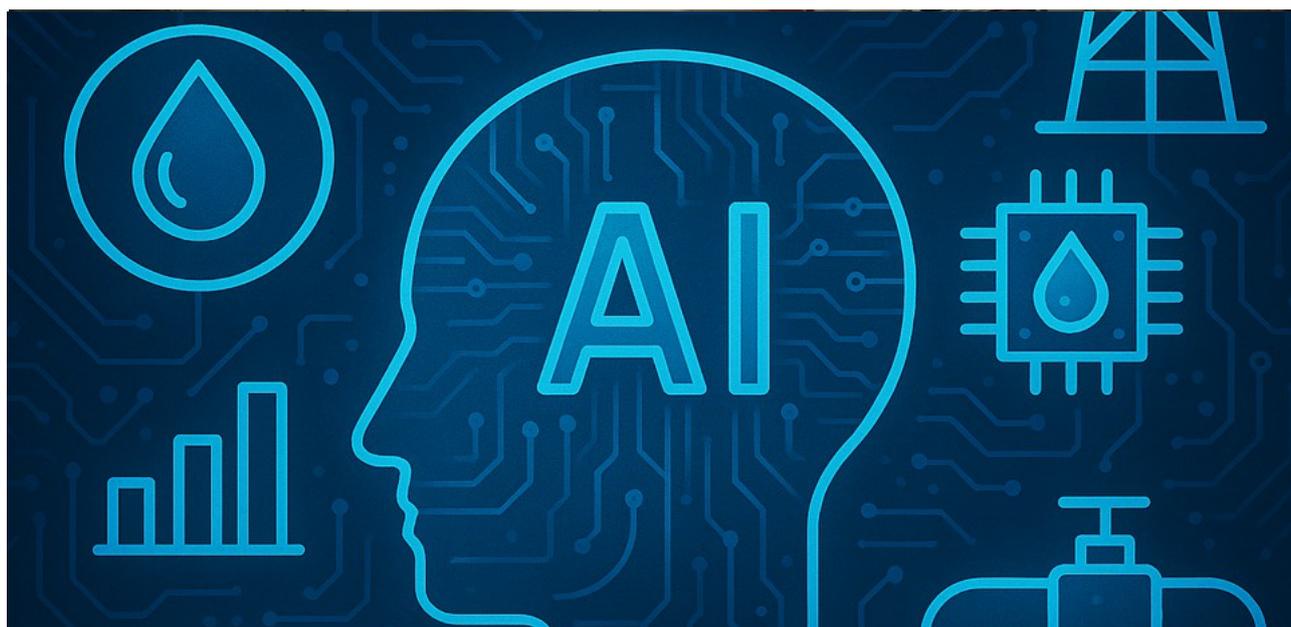
他 5 大部門共同為國家達成淨零排放努力。

#### 參考文獻

1. 環境部，中華民國國家溫室氣體排放清冊報告，2024 年 6 月。
2. 國家發展委員會等，臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明，2022 年 3 月。
3. 高雄市政府水利局全球資訊網，打造 2050 淨零城市旗美污水廠啟動全國首座碳中和計劃，2024 年 6 月。
4. 国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部，国土技術政策総合研究所資料-下水道技術開発会議 **工ネル**

ギ一分科会報告 2021・2022 年 8  
月。

5. ICE, Guidance Document for PAS 2080 -Practical actions and examples to accelerate the decarbonisation of buildings and infrastructure,2023.04.



## 摘要

臺灣依據污水下水道第六期建設計畫持續加速下水道系統各項建設，以提升國家競爭力，其中藉由「建構永續及智慧化系統」，解決因人力不足且操作難度提高問題為推動重點之一。本研究彙整國外最新相關研究，國際水協會收錄研究指出可應用智慧水務技術，針對下水道系統沉積物阻塞問題提出解決方案，應用 RFID 感測器高效低成本的優勢，可快速精準偵測可能發生管道堵塞地點，加速管理阻塞議題因應效率。而美國水務協會收錄研究則指出應用水理模型技術，可廣泛評估回收放流水或再生水利用可能造成的供水風險，有助於提供決策者再生水利用可能風險議題之參考。日本科研計畫則研發應用 AI 來快速分析下水道管渠影像，以偵測與判釋管渠可能破損情形，結果顯示在 AI 判釋的結果中高度與熟練技術者判斷一致，可藉此快速執行損傷識別任務，可加速維護工作之推動。藉由本研究所蒐集彙整之最新研究，可做為國內下水道系統未來重要管理議題科技解決方案之參考，以持續提升系統管理效能。

**關鍵字：**下水道系統、科技解決方案、管理效能

1. 國立中興大學環境工程學系 / 助理教授
2. 中原大學環境工程學系 / 助理教授

# 科技解決方案應用於下水道系統管理議題 因應策略之研析

陳漫愷<sup>1</sup>、蔡大偉<sup>2</sup>

## Abstract

In accordance with the Sixth Phase of the Sewer Construction Project, Taiwan continues to accelerate the development of various aspects of its sewerage infrastructure to enhance national competitiveness. Among the key initiatives is the establishment of sustainable and intelligent systems to address challenges arising from labor shortages and increasing operational complexity. This study compiles the latest international research. According to findings published by the International Water Association, smart water technologies can be employed to detect sewer sediment blockages. The application of RFID sensors, known for their efficiency and low cost, enables rapid and accurate detection of potential clogging sites, thereby enhancing the efficiency of blockage management. Meanwhile, research from the American Water Works Association highlights the use of hydraulic modeling technologies to assess water supply risks associated with the reuse of reclaimed or recycled water. These evaluations provide valuable insights for policymakers regarding the potential risks of water reuse. In Japan, scientific projects have focused on developing AI-driven analysis of sewer pipe imagery to detect and interpret potential structural damages. Results indicate that AI results closely align with those made by experienced technicians, allowing for the swift execution of damage identification tasks and the acceleration of maintenance operations. The insights gathered in this study serve as valuable references for future technological solutions to critical sewer system management challenges in Taiwan, aiming to continually enhance system performance and management efficiency.

**Keywords** : sewage system, technology solution, management efficiency

## 壹、前言

隨著最新科技的發展以及下水道系統提高管理效能與自動化管理的需求，科學家們致力於研發應用新科技於因應下水道系統管理議題之最新解決方案，如智慧水務 (smart water)、模式模擬 (modeling)、人工智慧 (artificial intelligence, AI) 等，其中智慧水務與模式模擬多年來已逐步推廣至現代化管理，應用智慧感測器的數據蒐集與研析，結合模式模擬分析結果嘗試尋找提升管理效率之方案。而人工智慧發展浪潮已成為目前最新的科技發展趨勢，經過短短約 80 年左右的發展，現階段已引發世界大量對 AI 技術的投資，也促進應用於下水道管理效能提升的廣泛多元應用研究。本研究彙整國際重要學術單位之最新研究成果，以供國內下水道系統升級或操作優化之參考。研究中共計彙整國際水協會 (International Water Association, IWA)、美國水務協會 (American Water Works Association, AWWA) 等重要國際組織之收錄研究，以及日本國家 B-DASH (Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology) 計畫實廠應用技術研發成果。在 IWA 期刊的研究中，紐西蘭研究團隊研發應用最新智慧水務技術，以提升下水道管線阻塞偵測效果。在美國水務協會的期刊研究中，美國團隊嘗試應用模式模擬技術，協助評估水資源再利用可能造

成的供水或生態風險。在日本的研究中，則是應用 AI 技術強化下水道管渠破損的偵測能力，加速系統維護工作的執行。

## 貳、研究方法

本研究透過彙整國際代表性重要學術單位之最新研究成果，包括國際水協會、美國水務協會等代表性國際組織，以及日本最新企業科研應用研究成果，研究最新有關應用智慧水務、模式模擬與 AI 技術於解決下水道系統管理議題相關研究，分別以各組織所發表之代表性期刊 Water Research、Journal of the American Water Resources Association 之收錄學術文章作為蒐集範圍進行研析，並參考日本企業界重要技術研發相關成果如 ID&E Holdings 技術期刊等技術刊物，可提供做為國內後續下水道系統提升管理效能或是新建處理設施之參考。

## 參、研究成果分析

### 一、國際水協會發表研究成果

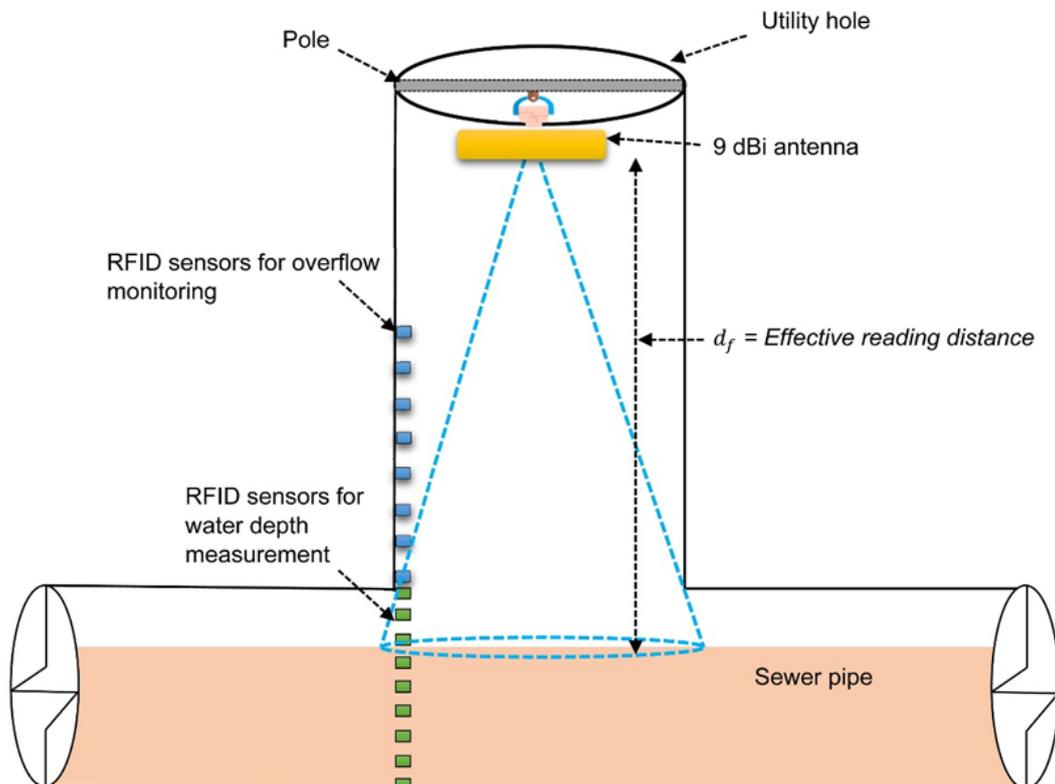
國際水協會收錄應用智慧感測器於下水道系統阻塞偵測研究成果，下水道堵塞和流入滲透對老化的城市基礎設施為重大管理議題之一，下水道阻塞常常導致污水溢出和人類病原體對環境的污染。傳統檢測方法包括超音波感測器、攝影機、紅外線攝影機和光纖分佈式溫度感測系統等，但傳統技術具有成本高、勞力需求高、可

擴展性有限等缺點。該研究介紹使用基於超高頻射頻識別 (UHF-RFID) 的感測器即時監測模擬下水道系統中的水位和流速，為檢測下水道堵塞提供了一種新穎、強大且經濟高效的解決方案。

該研究選擇型號為 ThingMagic Mercury 6e 的 UHF RFID 讀取器做為感測器，並在紐西蘭奧克蘭大學流體實驗室進行試驗，進行水深、流速、堵塞辨識、降雨影響等測試，感測器應用模式概念圖如圖 1 所示，該系統的運作方式是當水位

達到嵌入每個 RFID 模塊中的 RFID 標籤 IC 時，RFID 標籤與天線之間的通信會停止。因此可根據不回應的 RFID 標籤及其相應的高度來計算水深。水位測量的精確度 (即解析度) 取決於傳感器標籤與其 IC 芯片之間的接近程度，透過這個系統可自動監測下水道系統即時流況與阻塞情形，來協助評估後續相關因應措施之管理。

研究結果顯示 RFID 感測器可有效幫助即時預測堵塞情況，透過感測器可以快



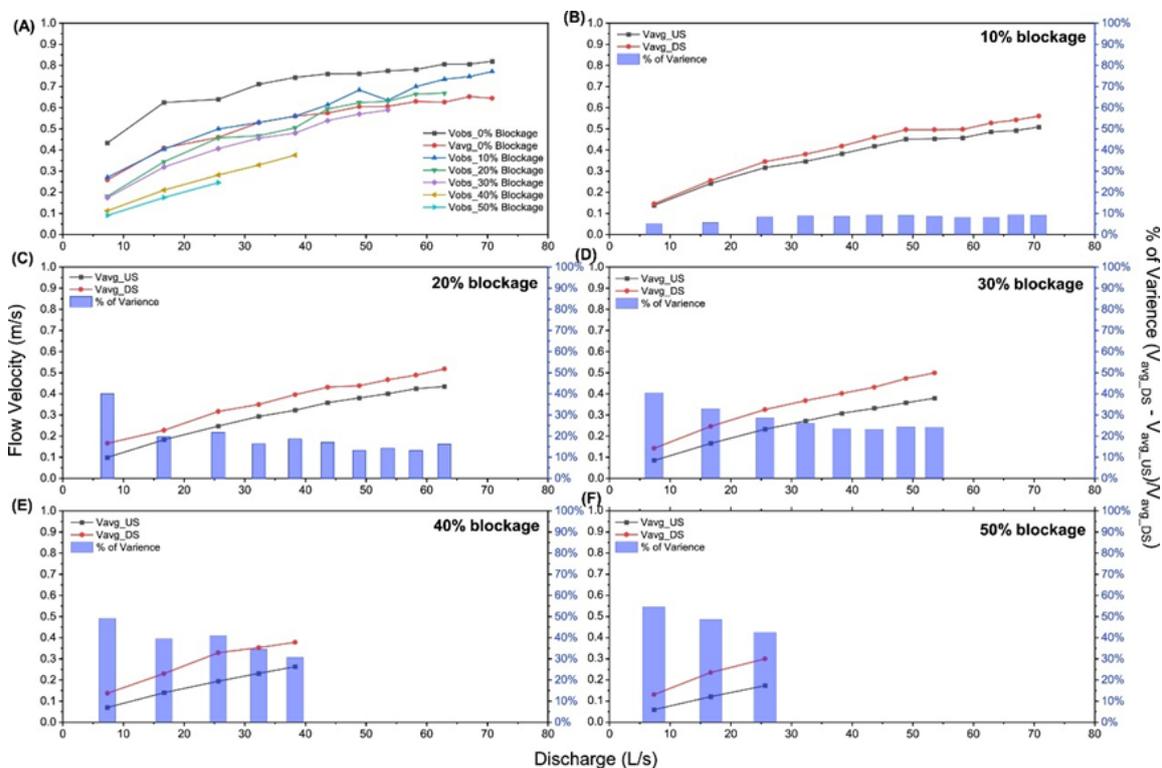
資料來源：Tatiparthi et al., 2025.

圖 1 RFID 感測器應用於下水道人孔示意圖

速檢測上游和下游的流動行為，確定空間堵塞大小並確定其可能的位置。相較於攝影機、染色和吸煙等傳統方法具有顯著優勢，因為這些傳統方法很難在發生液壓故障或堵塞之前評估下水道系統的性能。研究以五種不同場景（阻塞率 10%-50%）中的阻塞物測試鑑別能力，結果如圖 2 所示。隨著堵塞嚴重程度的增加，上游和下游位置之間的平均流速差異變得更加明顯，阻塞率為 10%時流速差異<10%，但阻塞率達 50%時流速差異可達 60%，可透過監測兩感測器間（該研究設計約為 50 公尺）若有明顯流速或水位的變化，則指出可能在這個區段有阻塞的情形發

生。

依據該研究實驗結果感測器可達水深測量 7 mm 高精度水準，證實 UHF-RFID 感測器系統能夠對下水道系統進行經濟高效、高通量的初步篩選。儘管 CCTV 目前仍是精確定位堵塞最先進的技術，但其對大型下水道系統的勘測成本很高。雖然超音波感測器和支援機器學習的攝影機等替代技術也能提供即時監控，但超高頻 RFID 感測器具有獨特的優勢，包括更低的功率要求、大規模佈建的成本效益以及與現有下水道基礎設施的無縫整合。RFID 標籤對於非侵入式應用（例如資產



資料來源：Tatiparthi et al., 2025.

圖 2 RFID 感測器偵測堵塞情況分析

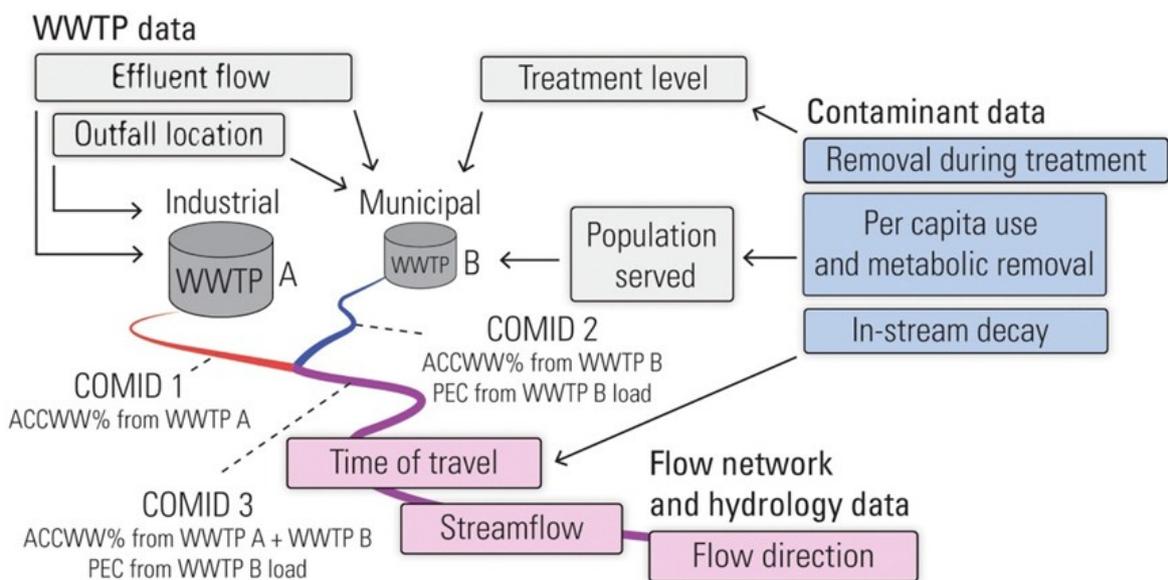
追蹤和地理資訊系統建立圖資) 特別有利，因此低成本的初步篩選方法仍可作為智慧下水道系統中解決下水道堵塞問題的重要解決方案，有助於推動下水道系統智慧管理工作，協助減緩阻塞這個重要管理議題。

## 二、美國水務協會發表研究成果

美國水務協會收錄了應用模式分析法於再生水利用的風險研究成果，雖然不論是生活污水或工業廢水處理廠，均在各國管理標準下進行管制，已盡量降低處理後放流水對水體環境之衝擊。但污水處理廠放流水已廣泛在世界多個國家進行回收再利用，或甚至作為淡水資源之補充(Luthy et al., 2015; Rice & Westerhoff, 2015)。

在大型流域亦有可能被下游地區供水系統再利用。而這些放流水水資源雖已經過一定程度處理，但在考量新興污染物或是其他可能殘餘有害物質的影響下，仍可能對再生水利用或是當地水域生態導致一定程度的風險，然而經採樣實驗方法雖可更有效確認相對應的風險，但亦需要龐大的資源支持並且耗時，因此該研究應用水文模式分析法，計算各種可能殘留有害物質(包括阻燃劑、塑化劑、環境荷爾蒙、農藥、重金屬等)並預測其對應總環境濃度(PEC)，以快速模擬放流水進入地面水體之水污染物負荷，並進行可能產生之風險進行估算，可做為放流水資源再利用評估之參考。

該研究選擇美國波托馬克河流域



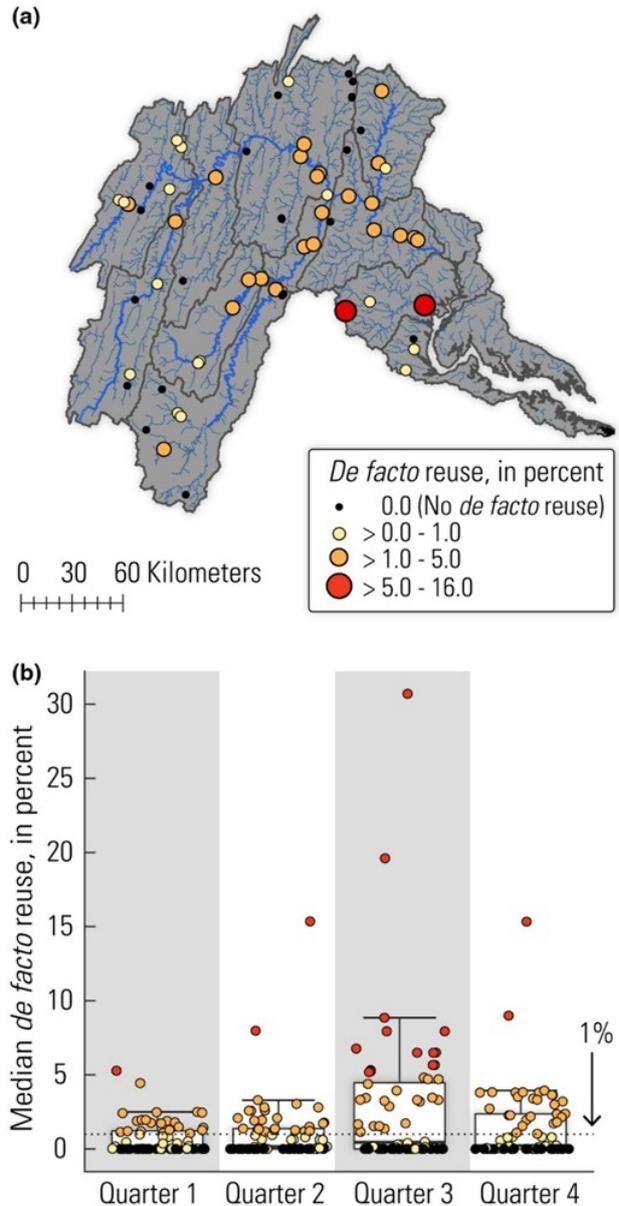
資料來源：Faunce et al., 2023.

圖 3 NHDPlus V2 模式運行概念示意圖

(Potomac River)作為研究範圍，該流域橫跨馬里蘭州、賓夕法尼亞州、維吉尼亞州、西維吉尼亞州和華盛頓特區，居住超過 600 萬人口，為美國重要流域之一。研究中採用 NHDPlus V2 模式進行分析，模式概念圖如圖 3 所示，透過估算生活污水與工業廢水處理廠放流水累計污水百分比 (ACCWW%)，來評估放流水對地面水體之影響。

該流域共有 68 座公共給水系統供應 450 萬人飲用水，根據模式模擬結果其中共有 46 座(68%)供水站受到放流水影響 (ACCWW% = 0.01% -16%，如圖 4a)，以年平均流量進行估算，所獲得 PEC 為 0.002-1,000  $\mu\text{g/L}$ ，受到影響最高的 ACCWW% 達 16% 河段則高達 17  $\mu\text{g/L}$ ，代表部分河段顯示具有較高風險值。研究結果顯示該流域之公共用水系統可能具有更高範圍受到上游區放流水的影響，研究指出可能高達近 70% 有受到影響，高於環境部研究報告的 50%，甚至可能已超過佔總供水量 1% 的門檻值，也可能因此而開始推動執行該流域針對污水處理廠進行升級的計畫(Upper Occoquan Service Authority, 2022)。

另外研究中亦針對水環境生態風險進行評估，應用美國 ECOSAR 模式進行風險分析，分析結果顯示有 6% 的河段被認定具有風險，可能對水域生態最敏感的生物具有高度風險，尤其在 8 月份枯水期風險值有顯著提高的現象。研究中指出所模



資料來源：Faunce et al., 2023.

圖 4 (a) 再利用率空間分布 (b) 再利用率各季時間分布

擬之混合水污染物質風險，對魚類影響大於無脊椎動物和植物的影響；而由於水體稀釋淨化程序的影響，可以發現上游河段風險會高於下游地區。然而重要生態水棲生物棲息地多數位於上游區，因此可能造成之影響更為顯著。

依據現有研究成果，應用水文模式可作為高度靈活應用的有力工具，可協助快速模擬分析放流水再利用的可能風險與影響範圍，可做為再生水資源利用管理措施的重要參考。值得注意的是該研究僅針對污水處理廠放流水影響進行研究，模式分析所產生的誤差可能來自於其他點源或非點源污染，如該流域的農業活動之影響；模式亦排除潮汐之影響，因此潮汐對污染物濃度變化與水力之影響未納入模式。更廣泛考量其他可能污染源/污染物之影響，將在未來的相關研究中受到特別關注，以提高下水道系統再生水利用之安全性。

### 三、日本重要企業發表研究成果

#### 3-1 研究對象與分析方法

##### 1. 使用資料

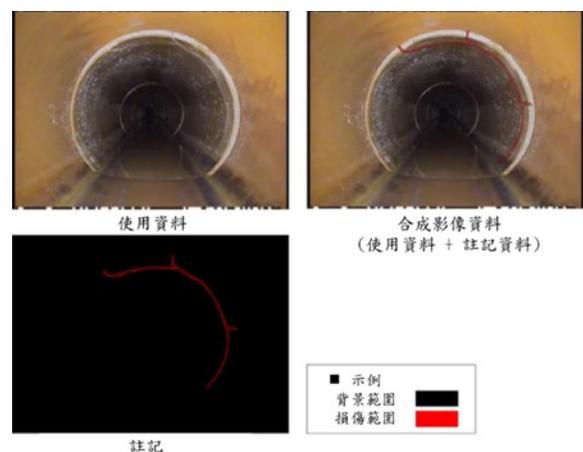
該研究所使用的影像資料包含來自下水道管渠（瓷化黏土管）之篩選性調查與詳細調查所取得的圖像。其中，篩選性調查指的是在未進行清洗作業的情況下，直接確認管渠內部是否存在損傷；而詳細調查則是在清洗管渠內面後，依據損傷程度進行等級判定（等級分為 a ~ c 或健全）。所有使用影像資料皆為含有損傷之影像，影像為 372,945 畫素（橫 705×縱 529），總數為 140 張。

##### 2. 抽樣對象

下水道管渠（瓷化黏土管）內部常見的損傷類型包括：管體破損、軸向裂縫、以及圓周方向裂縫等。根據日本《下水道維持管理方針》，上述損傷依裂縫長度進行等級分類，分為 a ~ c 三個等級，其中 a 級代表損傷最嚴重，c 級則為較輕微或接近健全狀態。舉例來說，若圓周方向裂縫之長度超過管道圓周的三分之二，則該損傷判定為 a 級。鑑於上述情況，為了減少損害評估所需的勞動力，希望能夠整理出損害類型和等級等詳細資訊。然而，由於不同損傷類型與等級之樣本數分布不均，且整體影像數量有限，故該研究中之深度學習模型僅以損傷的存在與否作為提取的對象，未區分具體損傷類型與等級。研究對象之陶管直徑為 200 mm，接頭間距為 660 mm。

##### 3. 註記(Annotation)方法

本研究針對影像資料中之損傷區域進行註記處理（詳見圖 5）。註記



資料來源：菅田大輔等，2023。

圖 5 註記資料使用示意圖

(annotation)係指於影像中標示特定區域並賦予其意義性標籤(此處為損傷資訊)，以作為模型訓練之依據。損傷之判讀由具經驗之診斷技術人員以目視方式進行，註記作業則透過 labelme 軟體實施。

#### 4. 模型架構

本研究所採用之 DeepLabv3+ 模型設定如表 1 所示。

#### 5. 檢討條件

本研究所設定之檢討條件彙整於表 2。除了以原始影像作為訓練資料的「檢討條件 1」外，為提升模型的損傷辨識性能，進一步設定了「檢討條件 2 ~ 6」，導入資料擴增策略進行性能評估。

##### (1) 適用之影像處理方式及其理由

- 本研究採用了左右翻轉、對比度降低

表 1 DeepLabv3+ 模型設定內容

項目	設定內容
主幹網路架構(Backbone Architecture)	ResNet-50
訓練次數(Epochs)	700 次
輸出步長(Output Stride)	16
批次大小(Batch Size)	8
學習率(Learning Rate)	0.0001
裁切尺寸(Crop Size, 正方形)	256×256
評估頻率(每 N 次訓練進行 1 次)	每 1 次訓練執行 1 次評估

資料來源：菅田大輔等，2023。

表 2 檢討條件

檢討條件	圖像數量	分類
1	學習： 84 張 驗證： 28 張 測試： 28 張	僅使用原始影像
2 ~ 5	學習： 168 張 驗證： 56 張 測試： 56 張	原始影像 + 擴增影像 (各條件為 1 種擴增方式)
6	學習： 420 張 驗證： 140 張 測試： 140 張	原始影像 + 擴增影像 (4 種擴增方式混合)

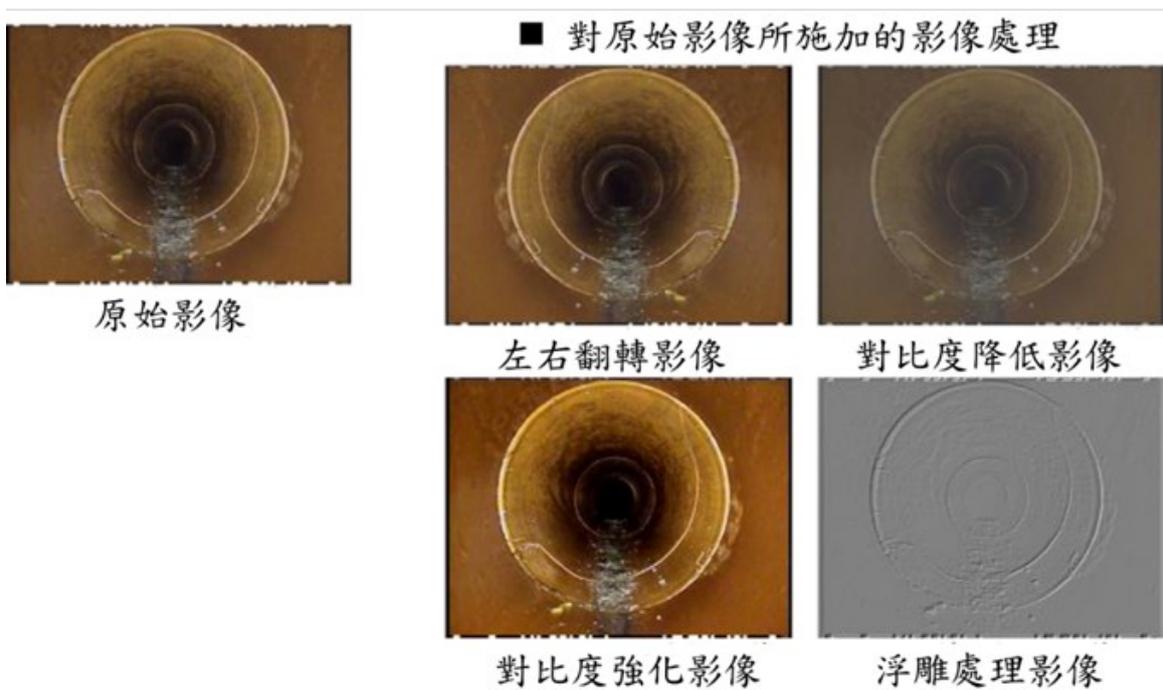
資料來源：菅田大輔等，2023。

與強化、浮雕處理等共四種類型的資料擴增技術。由於本研究可使用的影像資料數量僅有 140 張，數量有限，因此有必要進行資料擴增。以下說明本研究在資料擴增中所選定之影像處理方式及其採用理由。此外，經過影像處理後的樣本影像如圖 6 所示。

- 檢討條件 2 的擴增影像為左右翻轉影像。由於若進行上下翻轉，將導致管道內的水面出現在影像上方，產生不符合現實情況的影像，因此未進行上下翻轉處理。
- 檢討條件 3 的擴增影像為施加對比度

降低處理之影像。此項設定主要為了驗證與檢討條件 4 中所採用之對比度強化影像相比，是否會產生不同的辨識結果。

- 檢討條件 4 的擴增影像則施加了對比度強化處理。相較於原始影像，整體亮度提高，並強化了影像中邊緣形狀的呈現。因此，預期可提升損傷部位的可辨識性。此外，對比度強化處理係透過非銳化遮罩 (Unsharp Masking, 鮮銳化濾波器) 進行影像強化所製成。
- 檢討條件 5 的擴增影像則施加了浮雕



資料來源：菅田大輔等，2023。

圖 6 影像處理在管道中的應用

(Emboss)處理。藉由增加影像的凹凸感與立體感，得以強化損傷區域的輪廓線，進而提升其辨識度。值得一提的是，浮雕處理係採用強調損傷輪廓線的浮雕濾鏡所產製。

- 檢討條件 6 則為將檢討條件 2 至 5 所產製的所有擴增影像進行混合。此設定的目的在於觀察單純增加資料量是否能提升模型性能。

## (2) 訓練與推論之條件

在檢討條件 1 中，將整體資料中的 80% 作為訓練資料與驗證資料，並採用四分交叉驗證方式進行模型訓練。其餘 20% 則作為測試資料。此外，為了評估不同影像處理方法對推論性能的影響，研究中將測試資料進行複製，並分別施加左右翻轉、對比度降低、對比度強化與浮雕處理等影像處理方法，以進行性能比較。

在檢討條件 2~5 中，除了採用與檢討條件 1 相同的訓練與驗證資料外，另加入對上述資料所進行影像處理後所生成的擴增資料，並以此為基礎進行四分交叉驗證。至於所使用的影像處理方法，推論所使用的測試資料與檢討條件 1 相同。

在檢討條件 6 中，將檢討條件 1 的訓練與驗證資料，與檢討條件 2~5 所產出的影像擴增資料整合後，進行四分交叉驗證。推論所使用的測試資料亦與檢討條件 1 相同。

本節中所提及各類資料之定義如下：

- 訓練資料：用於讓深度學習模型學習損傷特徵的資料。
- 驗證資料：用於訓練過程中調整深度學習模型超參數的資料。
- 測試資料：用於評估訓練完成後模型泛化能力的資料。

## (3) 訓練次數與訓練環境

為確保模型訓練過程能夠充分收斂，本研究將訓練次數設定為 700 次。推論階段則採用對驗證資料產生最小損失值之訓練階段模型進行。

在訓練環境方面，所使用之計算機配備為第 12 代 Intel® Core™ i7-12700 2.10 GHz 處理器、NVIDIA GeForce RTX 3070 顯示卡、32GB 記憶體。各檢討條件下的訓練時間為檢討條件 1 約需 1 小時；檢討條件 2~5 約需 2 小時；檢討條件 6 約需 6 小時。

## 3-2 分析結果與討論

### 1. 根據評估指標整理推論器性能

各檢討條件下推論器的性能如表 3 至表 8 所示。關於表中的評估指標，IoU (Intersection of Union) 是指技術人員判定之損傷區域與推論器所檢出的損傷區域之間，共通區域面積與兩者聯集區域面積的比值。適合率是指在所有被判定為損傷

區域的畫素中，實際上在正解資料中也屬於損傷區域的畫素比例。再現率則是指在正解資料中屬於損傷區域的畫素中，在推論結果中也被正確判定為損傷區域的比例。F 值則為適合率與再現率的調和平均數。另外，推論器的性能為交叉驗證所生成之 4 個模型的平均值。

### (1) 抽出性能較高的推論影像種類

能夠良好重現正解影像的推論影像為原始影像或左右翻轉影像。表 3~表 8 中以色塊標示的推論影像，即為抽出性能最高的影像種類。起初預期，相較於原始影

像，對比度強化影像與浮雕處理影像能提升損傷部位的視認性，因此應該能提高抽出性能，但實際結果顯示，這些影像處理並未對抽出性能產生貢獻。綜上所述，輸入與原始影像亮度一致、在現實中可能出現的影像，更有助於提升推論器的性能。

### (2) 推論性能較高的資料擴增類型

能提升推論性能的資料擴增方式為左右翻轉。表 9 以檢討條件 1 的 IoU 為基準，整理了其他條件的 IoU。表 9 的列為輸入至推論器的影像種類。在表 9 中聚焦於抽出性能較高的推論影像種類，即原始

表 3 檢討條件 1 的推論器性能

推論影像	IoU	適合率	再現率	F 值
原始影像	16.9%	24.7%	37.7%	27.8%
左右翻轉影像	17.1%	25.4%	37.5%	28.2%
對比度降低影像	16.4%	25.5%	33.1%	27.0%
對比度強化影像	15.4%	23.6%	34.5%	25.6%
浮雕處理影像	7.7%	13.6%	15.3%	13.4%

資料來源：菅田大輔等，2023。

表 4 檢討條件 2 的推論器性能

推論影像	IoU	適合率	再現率	F 值
原始影像	17.5%	26.9%	36.5%	28.9%
左右翻轉影像	17.2%	26.4%	35.9%	28.1%
對比度降低影像	15.7%	25.2%	30.5%	25.9%
對比度強化影像	15.2%	25.9%	31.1%	25.5%
浮雕處理影像	7.6%	13.7%	16.2%	13.4%

資料來源：菅田大輔等，2023。

表 5 檢討條件 3 的推論器性能

推論影像	IoU	適合率	再現率	F 值
原始影像	16.7%	27.6%	32.4%	27.4%
左右翻轉影像	17.1%	28.4%	31.8%	27.8%
對比度降低影像	16.6%	26.7%	33.4%	27.4%
對比度強化影像	15.8%	27.6%	30.3%	26.2%

資料來源：菅田大輔等，2023。

表 6 檢討條件 4 的推論器性能

推論影像	IoU	適合率	再現率	F 值
原始影像	16.0%	25.6%	32.0%	26.4%
左右翻轉影像	16.3%	26.6%	32.0%	26.9%
對比度降低影像	15.3%	25.1%	31.2%	25.5%
對比度強化影像	16.0%	26.9%	30.5%	26.3%
浮雕處理影像	7.5%	14.1%	14.2%	13.2%

資料來源：菅田大輔等，2023。

表 7 檢討條件 5 的推論器性能

推論影像	IoU	適合率	再現率	F 值
原始影像	15.4%	26.1%	30.5%	25.6%
左右翻轉影像	15.7%	26.1%	30.8%	25.9%
對比度降低影像	14.6%	26.5%	27.5%	24.2%
對比度強化影像	15.0%	25.0%	30.4%	25.0%
浮雕處理影像	13.8%	23.6%	27.8%	23.2%

資料來源：菅田大輔等，2023。

表 8 檢討條件 6 的推論器性能

推論影像	IoU	適合率	再現率	F 值
原始影像	15.6%	29.0%	27.5%	25.8%
左右翻轉影像	16.5%	30.2%	29.8%	27.0%
對比度降低影像	15.3%	28.7%	27.3%	25.4%
對比度強化影像	15.5%	28.7%	27.0%	25.5%
浮雕處理影像	13.8%	24.2%	26.0%	23.0%

資料來源：菅田大輔等，2023。

表 9 各檢討條件的 IoU 比較

影像	條件 1	條件 2	條件 3	條件 4	條件 5	條件 6
原始影像	0.00%	0.70%	-0.20%	-0.90%	-1.40%	-1.30%
左右翻轉影像	0.00%	0.10%	0.00%	-0.80%	-1.40%	-0.60%
對比度降低影像	0.00%	-0.70%	0.20%	-1.10%	-1.80%	-1.10%
對比度強化影像	0.00%	-0.20%	0.40%	0.60%	-0.40%	0.10%
浮雕處理影像	0.00%	-0.10%	0.60%	-0.20%	6.20%	6.10%

資料來源：菅田大輔等，2023。

影像與左右翻轉影像，可以看出，檢討條件 2 (採用左右翻轉資料擴增) 表現最佳。透過資料擴增，使得具備現實可能性 (即與原始影像亮度相同) 的影像納入學習資料之中，以及學習資料數量相較於僅使用原始影像時有所增加，這兩項因素被認為有助於推論器性能的提升。

## 2. 損傷位置的對照

透過前述的分析可以確認，即使輸入影像相同，推論器在不同條件下的損傷抽出性能仍會有所差異。因此，有可能在不同推論器之間，所能抽出的損傷位置或長度也會產生差異。因此，本研究對損傷位置的正解區域與推論區域進行了對照分析。對照時所使用的測試資料，依下列方式進行抽出。

- 各檢討條件中，分別選出抽出性能較高的影像資料與抽出性能較低的影像資料。
- 在上述影像資料中，計算其於不同條

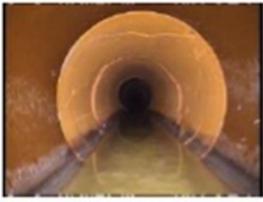
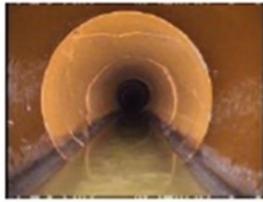
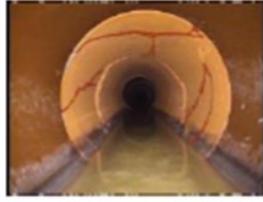
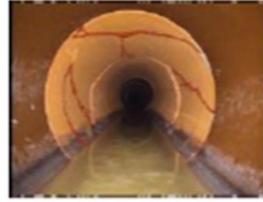
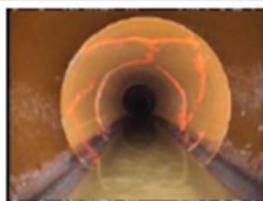
件下的 IoU 差值 (最佳條件與最差條件之差)，並依差值大小排序，從中各選出 3 件影像資料。

- 為了比較不同推論器所能抽出的損傷位置與長度，選用了 IoU 差值較大的影像資料進行分析。

### (1) 關於抽出性能較高影像的考察

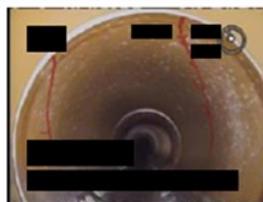
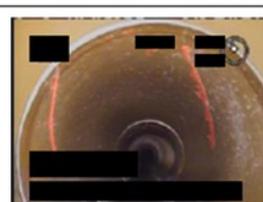
針對抽出性能排名前 3 位的影像資料，進行了損傷位置的對照分析。具體來說，是將抽出性能最高的推論器與抽出性能最低的推論器之結果進行比對。對照結果如圖 7~圖 9 所示。圖中正解影像與推論影像中以紅色表示的區域，分別代表損傷部位。其考察內容如下：

- 即使是抽出性能較低的推論器，仍大致能夠辨識出損傷的整體形狀。此外，其所抽出的損傷長度約為正解影像損傷長度的 5 成至 6 成 (詳見表 10)。此處所稱的損傷長度比例，是指推論影像中損傷長度相對於正解影

	檢討條件2 (IoU最低的條件)	檢討條件3 (IoU最高的條件)
輸入影像		
正解影像		
推論影像		

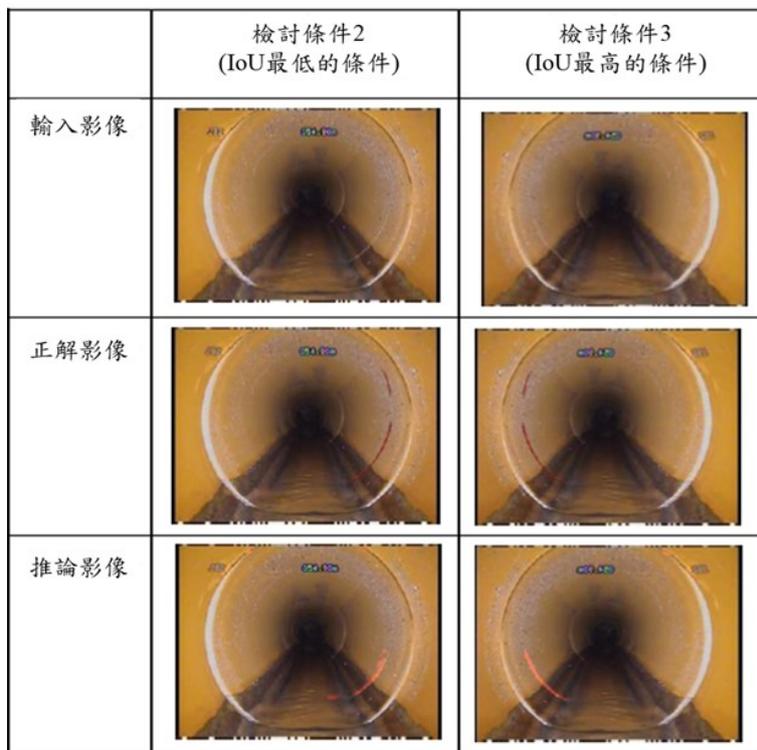
資料來源：菅田大輔等，2023。

圖 7 高抽出性能影像的對照結果（影像編號 1）

	檢討條件3 (IoU最低的條件)	檢討條件2 (IoU最高的條件)
輸入影像		
正解影像		
推論影像		

資料來源：菅田大輔等，2023。

圖 8 高抽出性能影像的對照結果（影像編號 2）



資料來源：菅田大輔等，2023。

圖9 高抽出性能影像的對照結果（影像編號3）

表10 推論影像損傷長度的吻合率

影像編號	條件1	條件2	條件3	條件4	條件5	條件6
1	79.2%	60.2%	54.6%	68.5%	65.0%	66.2%
2	62.1%	43.2%	58.1%	53.6%	59.0%	62.1%
3	66.0%	74.4%	40.2%	53.1%	52.7%	65.0%
平均	69.1%	59.2%	51.0%	58.4%	58.9%	64.4%

資料來源：菅田大輔等，2023。

像中損傷長度的百分比。此外，表 10 中的編號對應圖 7~圖 9 的影像編號。

- 抽出出來的損傷寬度約為 2 mm~2.5 mm。然而，對於小於 1 mm，甚至連人工判讀也會感到困難的極細小損傷（例如髮絲裂縫），並未能成功抽出。

(2) 關於抽出性能較低影像的考察

針對抽出性能排名後 3 位的影像資料，進行了損傷位置的對照分析。照合結果如圖 10~圖 12 所示。各影像的對照結

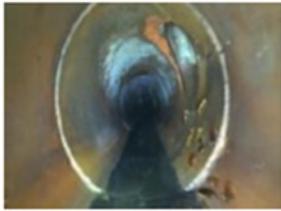
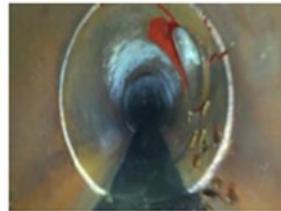
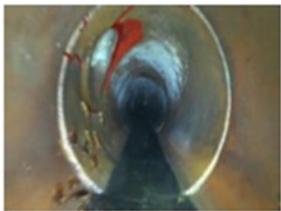
果與考察如下：

- 圖 10 的案例中，在損傷寬度由 6 個像素構成的情況下，可以確認損傷得以被抽出。該影像中損傷的實際寬度約為 1.8 mm，但在相機近端與遠端的抽出區域有所不同。每像素的損傷長度分別為近端約 0.3 mm/pix、遠端約 0.6 mm/pix。
- 圖 11 的案例中，儘管損傷區域大部分已破裂，從人眼來看容易辨識，但深度學習模型卻無法成功抽出。其原因推測可能是作為破損標註的訓練資

	檢討條件6 (IoU最低的條件)	檢討條件5 (IoU最高的條件)
輸入影像		
正解影像		
推論影像		

資料來源：菅田大輔等，2023。

圖 10 高抽出性能影像的對照結果（影像編號 4）

	檢討條件3 (IoU最低的條件)	檢討條件1 (IoU最高的條件)
輸入影像		
正解影像		
推論影像		

資料來源：菅田大輔等，2023。

圖 11 低抽出性能影像的對照結果 (影像編號 5)

	檢討條件5 (IoU最低的條件)	檢討條件2 (IoU最高的條件)
輸入影像		
正解影像		
推論影像		

資料來源：菅田大輔等，2023。

圖 12 低抽出性能影像的對照結果 (影像編號 6)

表 11 損傷所構成之畫素數的整理

影像編號	損傷幅(mm)	損傷規模(mm/pix)	損傷所構成之畫素數
1	2	0.8	3
2	2.5	0.4	7
3	2	0.5	4
4	1.8	0.5	4
5	1.9	0.6	4
6	3	0.7	5

資料來源：菅田大輔等，2023。

料量不足，導致模型學習不足。

- 圖 12 的案例中，表現最佳的推論器大致能夠抽出損傷形狀，但性能較差的推論器則無法辨識水面附近的損傷區域。此一性能下降的原因可能是由於浮雕處理使得影像亮度低於原始影像，從而降低了對水面附近損傷特徵的識別能力。

### (3) 每像素單位的損傷長度

為了對損傷抽出的判斷標準進行量化，本研究根據損傷寬度，整理了每像素單位的損傷長度（詳見表 11）。此計算是針對損傷存在的管路斷面，將直徑的實際尺寸與對應的影像畫素數進行換算後所得。結果顯示，若損傷以 3~7 個畫素構成，則具備被模型成功抽出的可能性。此外，無法由推論器抽出的髮絲裂縫(hair crack)未達上述畫素條件，因此無法辨

識。

## 肆、結語

本研究彙整國際對應用最新科技於下水道系統管理議題解決方案最新研究進行彙整，國際水協會發表研究針對應用 RFID 感測器智慧水務技術，協助進行下水道系統阻塞監測研究，利用低成本高精度的感測器佈建，可有效即時監測管道可能發生堵塞區段，改善傳統依賴 CCTV 檢測成本高昂且準確性不高的缺點，將有效提升系統阻塞處理效能。美國水務協會發表研究應用水理模式分析技術，來評估放流水對供水系統所造成的風險，有助於提供決策者制定未來再生水利用措施時，作為後續推動改善供水風險之參考。日本研究成果應用 AI 影像辨識技術來快速分析下水道管渠內部損傷異常情形判釋，利用各地方政府所蒐集的超過法定耐用年限 50 年的瓷化黏土管渠影像進行分析，已

取得初步自動化判釋與操作處理流程成果，在 AI 判釋技術的協助下可有效快速判斷管渠損傷情形，有助於提高系統管渠維護效能。藉由國際最新相關研究的整理，可作為臺灣未來下水道系統科技解決方案之重要參考。

### 參考文獻

1. 菅田大輔・古木宏和・一言正之・山口智, 2023。深層學習を用いた下水道管渠内面の損傷抽出に関する性能評価。こうえいフォーラム第 31 号・p.1-6。
2. 日本下水道協会・下水道維持管理指針(実務編)-2014-(2014)。
3. Faunce, K. E., Barber, L. B., Keefe, S. H., Jasmann, J. R., & Rapp, J. L. (2023). Wastewater reuse and predicted ecological risk posed by contaminant mixtures in Potomac River watershed streams. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 59(4), 779-802.
4. Luthy, R.G., D.L. Sedlak, M.H. Plumlee, D. Austin, and V.H. Resh. 2015. "Wastewater-Effluent-Dominated Streams as Ecosystem-Management Tools in a Drier Climate." *Frontiers in Ecology and the Environment* 13(9): 477 – 85.
5. Rice, J., and P. Westerhoff. 2015. "Spatial and Temporal Variation in de Facto Wastewater Reuse in Drinking Water Systems across the U.S.A." *Environmental Science and Technology* 49(2): 982 – 89.
6. Tatiparthi, S. R., De Costa, Y. G., Wyllie, D., Zhong, R. Y., Hu, S., Yuan, Z., Whittaker, CN & Zhuang, W. Q. (2025). Real-Time detection of sewer water levels and blockages using UHF-RFID sensors. *Water Research*, 278, 123380.
7. Upper Occoquan Service Authority. 2022. "Upper Occoquan Service Authority."

# 下水道·水再生期刊稿約

## 壹、誠徵稿件

- 一、本期刊為內政部國土管理署針對下水道領域所發行之期刊，每年三、七、十一月下旬出版，誠徵稿件。
- 二、歡迎下水道從事人員以及設計、產銷有關下水道工程之器材業者提供相關文稿，如創見或新研究成果；國外新知或工程報導；下水道工作現場發表感想；國內有關下水道發展之研究計畫；國內、外與下水道相關之新書介紹等。
- 三、惠稿每篇以伍千至壹萬字為宜，特約文稿及專門論著不在此限，本期刊對於文稿之文字有刪改權，如不願刪改者，請於來稿上註明；無法出刊之稿件將儘速通知。
- 四、惠稿（含圖表及著作權讓渡同意書，並請提供一張圖片作為封面圖片）請用電子檔寄至 [twea900606@gmail.com](mailto:twea900606@gmail.com)，並請註明真實姓名、通訊地址（含電話及電子郵件地址）、服務單位及撰稿人之專長簡介，以利刊登。
- 五、本刊原則上不刊載譯文或已發表之論文。

## 貳、稿件格式

- 一、版面設定：頁面紙張請以 A4 規格 21cm \* 29.7cm 直式編排；本文版面規格：版面上下左右邊界各為 1.27 cm；內文段落採單行間距，並設定左右對齊。除摘要，其餘皆以兩欄型式呈現。內文首行需位移 2 字元。
- 二、字型設定：字體中、英文請採微軟正黑體字型。字體大小：頁首頁尾及頁碼採 12 號字，標題採 18 號粗體字（置中）作者姓名、任職單位及職稱採 12 號字（置右），"摘要" 標題採 14 號粗體字（置中），各章節標題採 14 號粗體字（置左），內文採 12 號字，圖表標題採 11 號字。
- 三、文章篇幅：每篇文章以 10 頁為限（含所有內容及圖表）
- 四、文章架構：
  - ◆中&英文標題：宜簡明
  - ◆作者姓名、任職單位及職稱：請以置右方式依序條列
  - ◆中文摘要（300 字為限）及中文關鍵字（3 至 5 個）

◆英文摘要 (300 字為限) 及英文關鍵字 (3 至 5 個)

◆本文 (章節之編序以：壹、一、(一)、1、(1)、… 為原則)

◆參考文獻

五、圖表配置：本文中之圖表請隨文插入 (與文字排列)，圖表之編號一律以 1,2,...等阿拉伯數字表示，圖標題請以置中方式標註於圖下方；表標題以置中方式標註於表正上方。

六、數據規範：內文中之數字請以阿拉伯數字呈現，並採用半型，可量化數字超過 3 位數請以逗號區隔，如 1,234；年份請以西元紀年；文中所使用數據單位請以公制單位，如：min、 $^{\circ}\text{C}$ 、mg/L 等，數字及單位之間請空半形 1 格。

七、參考文獻格式

期刊：作者，篇名，出處，卷期，頁數，年月。

書籍：作者，篇名，出版，頁數，年月。

機關出版品：編寫機構，篇名，出版機構，編號，年月。英文之作者姓名應將姓排在名之縮寫之前。

【參考文獻 格式範例】

1.歐陽嶠暉，下水道工程學，長松出版社，增訂版，第 45-56 頁，臺北(1992)。

2.黃國文、李方中、於望聖、陳志偉、顏慧敏、施上粟、林旺德、林佳薇 (2017)，公共污水下水道維護管理訪評計畫之研訂與推動，農業工程學報，63(2)，第 1-10 頁。

3.陳余育、劉振宇、鍾淑女、李金靖、陳怡寧、游勝傑，“臺灣地區性水資源回收中心新冠肺炎病毒檢測初探”，中華民國環境工程學會 2021【廢水處理技術研討會】研討會，110 年 8 月 19 日，第 132 頁(2021)。

八、文章內文格式範例 (請洽本期刊編輯組)

參、本期刊內容將刊載於內政部國土管理署資訊入口網歡迎各界參閱。



# 著作權授權使用同意書

\_\_\_\_\_(作者/機關名) 保證除本次投稿至「下水道·水再生」期刊之  
文章\_\_\_\_\_ (文章名) \_\_\_\_\_，相同內容未專屬授權至國內外其他有版  
權之期刊或有抄襲之情事，若有涉及著作權之侵權或其他不法行為，本人  
願負相關之法律責任。

\_\_\_\_\_(作者/機關名) 同意將本篇文章之著作權自接受刊登日起，授  
權內政部國土管理署有重新編排並將本篇文章置於所屬網站及刊物等刊載  
供外界查詢之權利，但需註明本文章作者。

此 致

內政部國土管理署

立 書 人 ：

通 訊 處 ：

聯 話 電 話 ：

( 親簽後掃描為電子檔與文稿一併寄送至編輯組 )

中 華 民 國                      年                      月                      日

中華民國 一百一十四年七月出刊

第 4 卷第 2 期

中華民國 一百一十一年七月創刊

**發行人**：吳欣修

**指導委員**：宋德仁、於望聖、邱忠川、范世億、陳志偉、黃一平、劉振宇、  
蔡長展 (依姓氏筆畫順序)

**編輯委員**：王朝民、朱錫麟、阮春騰、邱敏錦、周黎明、林舜宏、侯嘉洪、  
洪俊雄、胡念英、康世芳、陳立儒、張添晉、莊順興、黃成龍、  
黃良銘、黃靖修、楊仁彰、廖宗銘、鍾志成、蘇玫心 (依姓氏筆  
畫順序)

**總編輯**：曾淑娟

**副總編輯**：周世銘、張建偉

**執行編輯**：游勝傑

**出版單位**：內政部國土管理署

地址：臺北市松山區八德路 2 段 342 號

電話：(02)8771-2345

網址：<https://www.nlma.gov.tw/>

**執行單位**：社團法人台灣水環境再生協會

地址：臺北市松山區復興南路一段 1 號 1204 室

電話：(02)2777-2675

網址：<https://www.twea.org.tw/contact.html>

---

GPN:2011100010 ISSN:27913805

★☆☆本刊文章版權所有，非經同意不得轉載★☆☆

★本刊文章屬個人學術發表，不代表內政部國土管理署立場★