

114 年
01-02 月號



<雙月刊>

環境工程技師公會會訊

- ◎ 發行人：劉敏信
- ◎ 發行所：台灣省環境工程技師公會 (<http://www.tpeea.org.tw>)
- ◎ 協助策劃：中華民國環境工程技師公會全國聯合會
- ◎ 編輯：台灣省環境工程技師公會學術委員會
- ◎ 主編：黃福全
- ◎ 發行地址：台北市長安西路342號4樓之1
- ◎ 電話：02-25550353
- ◎ 傳真：02-25591853

本期要目

	頁次
■ 主編的話	2
■ 會務報告	4
■ 重要法令	5
■ 行政院公共工程委員會核備 114 年 1 至 2 月訓練積分課程表	7
■ 環保訊息	10
■ 論述園地	12
利用複合型吸附劑同時吸附水中不同類型的污染物：以層狀複合金屬氫氧化物與碳球為例—趙煥平教授、張晉璋研究員	12
小區域空污陳情事件之智慧溯源追蹤系統 (TrkAI) 開發與測試—江舟峰技師、余雅芳經理	29
低能耗生活污水全回收探討—實廠節能與結晶回收氮磷技術案例—藍家齊董事、張鎮南教授	38
■ 徵稿啟事	57
■ 各公會理監事會會議紀錄	58

主編的話

「新興或微量污染物處理技術」、「AI人工智慧技術」與「低能耗先進技術」均是目前全球關注之焦點議題，本期會訊很榮幸能針對上述焦點議題邀請國內教授專家提供最新研究與研發成果，分享予技師先進參考。

第一篇稿件邀請中原大學環境工程學系、同時也具有環工技師資格與技師實務經驗之趙煥平教授撰寫「利用複合型吸附劑同時吸附水中不同類型的污染物：以層狀複合金屬氫氧化物與碳球為例」。此議題主要因近年來由於環保意識抬頭，許多過去未被管制的污染物將納入放流水標準中進行管制，或是有些污染物的放流水管制標準被要求加嚴，在此狀況下許多傳統的處理方式已無法符合現行的放流水標準，因此需要增加高級處理的程序，吸附是一種高效率且低成本的處理方法，目前最常被使用的吸附劑為活性碳，若要使用吸附劑去除放流水中之污染物，由於放流水中可能具備不同類型的污染物，使用複合型吸附劑取代活性碳可以簡化廢水處理程序，將是未來合成吸附劑的發展方向。事實上不只針對廢水處理，由於目前自來水處理程序對於一些溶解性的污染物並無法獲得良好的處理效率，因此這類型的吸附劑也可以應用於自來水處理，例如自來水中微量的陽離子重金屬、陰離子污染物甚至不同類型的微量有機物，這些微量的污染物不適合使用沉澱處理，皆可利用複合型吸附劑加入水中，達到去除污染物之目的。

第二篇稿件邀請中國醫藥大學風險管理學系退休教授江舟峰教授撰寫「小區域空污陳情事件之智慧溯源追蹤系統(TrkAI)開發與測試」乙文，江教授為國內環境及食安風險評估專家，目前為國頂科技有限公司總經理兼主任技師。本文主因全國空氣污染陳情案件居高不下，為各縣市環保單位巡查的重點，然而傳統巡查方式未能即時追蹤舉證污染源。江技師團隊採用感測器監測所得之空污濃度，結合風速儀之風速風向資料，針對特定空污陳情事件，開發一種創新的小區域即時智慧追蹤技術 TrkAI®。該系統已於民112年高雄楠梓科學園區初步驗證TrkAI®之可行性，同年也於宜蘭大學舉辦之環境工程年會發表論文，建議環境部、各縣市環保局、產發署或私人企業等可規劃採用，提供各界參考此項最新污染智慧即時追蹤系統。

第三篇稿件邀請東海大學環科工程系榮譽退休教授張鎮南教授撰寫「低能耗生活污水全回收探討-實廠節能與結晶回收氮磷技術案例」。因節能減碳為近來大家關心之全球議題，快速城市化和人口增長帶來的污染物負荷，對全球尤其是城市污水處理廠構成了前所未有的壓力。隨著排放標準日益嚴格，以及化學藥品和能源成本的急劇上升，傳統污水處理廠面臨新的挑戰，本文主要探討五種提升污水處理效率及資源回收的先進技術，包括：1. 化學強化初級處理（CEPT）、2. 改良生物處理技術（Anoxic/Aerobic 組合技術）、3. 放流水回收再使用、4. 磷酸銨鎂（MAP）肥料回收、5. 能源回收再利用等，通過上述技術，並結合即時電價結構的轉換，可達到污水處理廠電費節省的最大化，文中有專業詳細的論述，提供各位技師先進參考。

時值歲末辭舊迎新之際，期由本期豐富之議題探討，相信對各位技師先進專業成長有所助益，春節將至，也祝大家新年快樂，蛇年財源廣進，事業順遂，事事圓滿成功！

會務報告

1. 本會協辦中華民國環境工程技師公會全國聯合會「113 年度技師技術服務專業訓練講習會」北中南三場，已分別於 11 月 16 日、9 日及 23 日圓滿結束，參與人次共 112 人。
2. 本會協辦台灣溫室氣體管理協會「能源管理績效課程（視訊課程）」，已於 12 月 21 日圓滿結束，參與人數共 91 人。
3. 114 年度常年會費繳費通知及記事本已於 113 年 11 月 21 日寄出，敬請尚未繳納 114 年度常年會費（金額 4,000 元）之會員儘速繳納。

公會匯款資訊如下：

- 戶名：台灣省環境工程技師公會
 - 銀行匯款資料：台灣企銀(050)營業部 帳號：01012241581
 - 郵局劃撥帳號：18091292
4. 會員若有更動執業資料、受聘公司、地址、電話、Email…等相關資料，敬請告知公會以便及時修改檔案。
 5. 公會網站廣告刊登：
 - (1) 費用：
 - 會員（即會員之執業機構、所營公司或受聘公司）：
5,000 元/年；一次繳交 5 年 20,000 元；一次繳交 10 年 37,500 元。
 - 非會員
6,000 元/年；一次繳交 5 年 24,000 元；一次繳交 10 年 45,000 元。
 - (2) 刊登辦法：
請繳交費用後，將貴公司或事務所之 LOGO（尺寸：288 *93）及網址 MAIL 至公會。
 6. 會訊廣告刊登：
 - (1) 費用：8,000 元/期
 - (2) 刊登辦法：
請繳交費用後，將投放廣告內容 PDF 檔（尺寸：A4 紙）MAIL 至公會。

重要法令

行政規則公告

1. 環境部環境管理署中華民國 113 年 11 月 4 日環部授管字第 1137130639 號函，修正「土壤及地下水污染整治法相關法規及環境教育講習執行要點」部分規定，自即日生效。
2. 環境部中華民國 113 年 11 月 5 日環部授研字第 1135114340 號公告，預告廢止「排放管道中總碳氫化合物及非甲烷總碳氫化合物含量自動檢測方法—線上火燄離子化偵測法 (NIEA A723.75B)」。
3. 環境部中華民國 113 年 11 月 5 日環部授研字第 1135114322 號公告，預告訂定「排放管道中總碳氫化合物等自動檢測方法—線上火燄離子化偵測法 (NIEA A723.76B)」草案。
4. 環境部中華民國 113 年 11 月 7 日環部水字第 1131069978 號令，修正「違反水污染防治法罰鍰額度裁罰準則」第 2 條附表 1 至附表 5、附表 8。
5. 環境部環境管理署中華民國 113 年 11 月 7 日環部授管字第 1137131807 號公告，「興建焚化廠(爐)申請適用特種建築物作業要點」，自即日停止適用。
6. 環境部中華民國 113 年 11 月 7 日環部循字第 1136120220 號公告，預告修正「行政院環境保護署事業廢棄物再利用管理辦法」修正草案。
7. 環境部中華民國 113 年 11 月 11 日環部循字第 1136121198 號令，修正「公民營廢棄物清除處理機構申請許可案件收費標準」。
8. 環境部中華民國 113 年 11 月 12 日環部水字第 1131069465 號，預告修正「事業及污水下水道系統水污染防治費收費辦法」草案。
9. 環境部中華民國 113 年 11 月 12 日環部管字第 1137128696 號令，修正「核能一廠、二廠環境影響評估相關計畫審查結論監督委員會設置及作業要點」，名稱並修正為「核能二廠環境影響評估相關計畫審查結論監督委員會設置及作業要點」，自即日生效。
10. 環境部中華民國 113 年 11 月 12 日環部循字第 1136121585 號令，修正「物品或其包裝容器及其應負回收清除處理責任之業者範圍」公告事項第 1 項表 1，自 114 年 7 月 1 日生效。
11. 環境部中華民國 113 年 11 月 12 日環部循字第 1136121585 號公告，修正「環保集點制度補助作業要點」，自即日生效。
12. 環境部環境管理署中華民國 113 年 11 月 19 日環部授管字第 1137132350 號函，修正「土壤及地下水污染改善貸款信用保證實施要點」，自即日生效。

13. 環境部資源循環署中華民國 113 年 11 月 19 日環循綜字第 1136123336 號公告，訂定「環境部資源循環署推動資源循環地方創生計畫補助作業要點」，自即日生效。
14. 環境部中華民國 113 年 11 月 20 日環部授研字第 1135115192 號公告，預告廢止「排放管道中總碳氫化合物及非甲烷總碳氫化合物含量自動檢測方法－觸媒轉化法 (NIEA A758.70B)」。
15. 環境部中華民國 113 年 11 月 20 日環部授研字第 1135115193 號公告，預告訂定「排放管道中總碳氫化合物等自動檢測方法－觸媒轉化法 (NIEA A758.71B)」草案。
16. 環境部中華民國 113 年 11 月 25 日環部水字第 1131072826 號公告，修正「飲用水水質標準」第 3 條之 1 條文。
17. 環境部中華民國 113 年 12 月 3 日環部循字第 1136123736 號公告，預告訂定「限制含壬基酚及壬基酚聚乙氧基醇之清潔劑輸入」草案。
18. 環境部中華民國 113 年 12 月 3 日環部循字第 1136123824 號公告，預告修正「物品或其包裝容器及其應負回收清除處理責任之業者範圍」公告事項第 6 項、第 17 項及第 1 項表 1、第 2 項表 2 草案。
19. 環境部中華民國 113 年 12 月 6 日環部氣字第 1139113061 號公告，預告修正「溫室氣體認證機構及查驗機構管理辦法」部分條文草案。
20. 環境部中華民國 113 年 12 月 10 日環部循字第 1136124852 號公告，修正「容器回收清除處理費費率」公告事項第 1 項附表。
21. 環境部中華民國 113 年 12 月 10 日環部研字第 1135115296 號公告，預告修正「環境教育設施場所輔導獎勵辦法」草案。
22. 環境部中華民國 113 年 12 月 11 日環部化字第 1138123971C 號公告，預告修正「環境用藥各項許可申請及檢驗收費標準」第 2 條、第 7 條草案。
23. 環境部中華民國 113 年 12 月 12 日環部空字第 1131080954 號令，修正「放流水標準」第 2 條附表 1 至附表 11、附表 14、附表 15。
24. 環境部中華民國 113 年 12 月 16 日環部循字第 1136123507 號令，修正「應回收廢棄物責任業者管理辦法」部分條文。
25. 環境部中華民國 113 年 12 月 18 日環部水字第 1131081975 號令，修正「大型柴油車調修燃油控制系統或加裝空氣污染防制設備補助辦法」部分條文及第 11 條附表 1。
26. 環境部中華民國 113 年 12 月 26 日環部循字第 1136125315 號公告，訂定「應執行廢行動電話回收、循環服務與標示分類回收標誌之業者範圍及其他應遵行事項」，自 114 年 1 月 1 日生效。

27. 環境部中華民國 113 年 12 月 27 日環部空字第 1131085287 號令，修正「老舊車輛汰舊換新空氣污染物減量補助辦法」。
28. 環境部中華民國 113 年 12 月 27 日環部空字第 1131087656 號函，環境部（改制前行政院環境保護署）106 年 10 月 6 日環署空字第 1060079528 號函及 108 年 5 月 1 日環署空字第 1080027774 號函有關固定污染源總量管制相關函釋，自即日起停止適用。
29. 環境部中華民國 113 年 12 月 30 日環部空字第 1131084803 號公告，修正「汰換老舊車輛空氣污染物減量效益取得計畫申請審查及媒合服務作業程序」，自即日起生效。
30. 環境部中華民國 113 年 12 月 30 日環部氣字第 1139114627 號公告，核釋氣候變遷因應法第 26 條第 5 款規定屬其他經中央主管機關認可之減量額度用途。
31. 環境部中華民國 113 年 12 月 31 日環部空字第 1131087367 號公告，修正「直轄市、縣（市）各級空氣污染防制區」，自 114 年 1 月 1 日生效。
32. 環境部中華民國 113 年 12 月 31 日環部空字第 1131083468 號令，修正「公私場所固定污染源違反空氣污染防制法應處罰鍰額度裁罰準則」第 3 條附表 1、附表 2。
33. 環境部資源循環署中華民國 113 年 12 月 31 日環循綜字第 1136126423 號令，修正「環境部資源循環署補助地方環保機關人力支援計畫作業要點」第 3、6 點及第 5 點附件一，自 114 年 1 月 1 日生效。
34. 環境部中華民國 113 年 1 月 2 日環部空字第 1131086326 號公告，修正「公私場所應設置連續自動監測設施及與主管機關連線之固定污染源」，除另定生效日期者外，自即日起生效。
35. 環境部中華民國 113 年 1 月 2 日環部研字第 1135117562 號令，修正「空氣污染物及噪音檢查人員證書費收費標準」第 2 條條文。
36. 環境部中華民國 113 年 1 月 2 日環部空字第 1131085504 號公告，修正「公私場所固定污染源應符合混燒比例及成分標準之燃料」，自 114 年 1 月 4 日生效。
37. 環境部中華民國 113 年 1 月 2 日環部研字第 1135117563 號令，修正「環境保護專責及技術人員合格證書規費收費標準」第 3 條條文，名稱並修正為「環境保護專責及技術人員證書費收費標準」。
38. 環境部中華民國 113 年 1 月 2 日環部空字第 1131083965 號公告，修正「公私場所應定期檢測及申報之固定污染源」公告事項第 2 項及第 1 項附表 1、附表 2、附表 5，自 115 年 1 月 1 日生效。

39. 環境部中華民國 113 年 1 月 2 日環部空字第 1131085067 號令，修正「鍋爐空氣污染物排放標準」。
40. 環境部中華民國 113 年 1 月 2 日環部空字第 1131084890 號令，修正「公私場所固定污染源燃料混燒比例及成分標準」，名稱並修正為「公私場所固定污染源燃料混燒比例成分及防制設施管制標準」。
41. 環境部中華民國 113 年 1 月 2 日環部空字第 1131086295 號令，修正「固定污染源空氣污染物連續自動監測設施管理辦法」。
42. 環境部中華民國 113 年 1 月 3 日環部循字第 1136125078 號令，修正「以網路傳輸方式申報廢棄物之產出、貯存、清除、處理、再利用、輸出及輸入情形之申報格式、項目、內容及頻率」公告事項第 8 項之 1，自即日生效。
43. 環境部中華民國 113 年 1 月 3 日環部循字第 1136124846 號令，修正「一般廢棄物回收清除處理辦法」第 6 條之 2 條文。

行政院公共工程委員會核備 114 年 1 至 2 月訓練積分課程表

*本項課程表係轉達工程會核備之積分課程資訊，細節請技師先進洽詢主辦單位

序號	課程名稱	課程時間	主辦單位	聯絡資訊
1	機電工程系列-五大管線及消檢申請作業流程實務	114/01/14	財團法人台灣營建研究院	聯絡人：楊小姐 電話：02-89195033 信箱：cindy.yang@tcri.org.tw
2	114「公共工程經費電腦估價系統」PCCES 4.3	114/01/15-114/01/16	滕嘉企業社	聯絡人：梁韶芸 電話：0227088090 信箱：yilinp@ms44.url.com.tw
3	工程法務系列-工程辦理開工、停工、復工、竣工作業程序及爭議處理機制	114/01/16	財團法人台灣營建研究院	聯絡人：楊小姐 電話：02-89195033 信箱：cindy.yang@tcri.org.tw
4	土壤及地下水整治技術工作坊	114/01/16	土壤及地下水整治技術聯盟	聯絡人：黃榆茜 電話：04-22840441 轉 524 信箱：sgrta.nchu@gmail.com
5	114「公共工程經費電腦估價系統」PCCES 4.3	114/01/21-114/01/22	滕嘉企業社	聯絡人：梁韶芸 電話：0227088090 信箱：yilinp@ms44.url.com.tw
6	營建產業 ESG 永續報告書撰寫指引	114/02/19	財團法人台灣營建研究院	聯絡人：楊小姐 電話：02-89195033 信箱：cindy.yang@tcri.org.tw
7	營建產業 ESG 永續報告書撰寫指引	114/02/26	財團法人台灣營建研究院	聯絡人：楊小姐 電話：02-89195033 信箱：cindy.yang@tcri.org.tw

環保訊息 (資料來源：環境部)

- 113/11/12【**環境部預告水污染防治費收費辦法修正 執行十年階段性合理微調，也鼓勵改善享抵減**】
為促使事業與污水下水道系統持續投入改善減排，環境部於 113 年 11 月 12 日預告修正「事業及污水下水道系統水污染防治費收費辦法」，除合理化微調有害健康物質費率，首次將氮、磷及錫納入收費項目，且推出調整報繳期程及分期付款等便民措施，精進申報效能；另新增投資能資源化抵減措施，鼓勵節能減碳達成綠色轉型。
- 113/11/15【**環境部公告列管事業均於 113 年法定期限前完成 溫室氣體盤查登錄及查驗**】
依環境部公告之特定行業別及全廠(場)溫室氣體排放量達每年 2.5 萬公噸二氧化碳當量之製造業，應辦理 112 年溫室氣體排放量盤查登錄及查驗之事業共計 302 家公司(553 廠)，均已於規定期限內完成相關作業。112 年列管事業直接溫室氣體排放量合計 214.5 百萬公噸二氧化碳當量(CO₂e)，能源間接溫室氣體排放量合計 54.6 百萬公噸 CO₂e。
- 113/11/20【**環境部回應氣候變遷績效指標 CCPI 評比結果**】
德國看守協會(Germanwatch)與歐洲氣候行動網(Climate Action Network Europe)公布今年對 63 國及歐盟氣候變遷績效指標(Climate Change Performance Index Results, CCPI)評比結果，前三名從缺，臺灣排名第 60 名。在這份評比，日本、韓國分別為第 58 名、63 名；美國及加拿大為第 57、62 名。如同以往評比結果，印度持續名列前茅列為第 10 名，且一直優於大多數歐洲國家。環境部表示，CCPI 的評比方法有爭議，不宜直接引用此評比結果評斷我國減碳努力。
- 113/11/21【**預告修正空污防制區劃分 加大污染管制力道**】
環境部已預告「直轄市、縣(市)各級空氣污染防制區」修正草案，此次係配合 113 年 9 月 30 日修正發布的空氣品質標準，採用更嚴格的判定方式，除提高濃度要求外，並規定各縣市轄內所有空氣品質監測站必須全數達標，才能列為二級防制區(符合標準區域)，取代過往以測站平均判定的方式。
- 113/12/06【**環境部預告「自願性產品碳足跡管理辦法」相關草案**】
為鼓勵事業核算產品碳足跡揭露碳足跡排放量，促進溫室氣體減量及落實淨零排放目標，環境部依據氣候變遷因應法第 37 條及第 22 條規定，於 113 年 12 月 6 日預告「自願性產品碳足跡管理辦法」草案及「溫室氣體認證機構及查驗機構管理辦法」修正草案，健全產品碳足跡揭露制度，廣徵各界意見。

- 113/12/11 【環境部預告修正「環境用藥各項許可申請及檢驗收費標準」】
環境部為落實使用付費，經參考物價指數，檢視「環境用藥管理法」各項申請審查及檢驗案件之資料審查程序、所需人力、設備成本等，預告修正「環境用藥各項許可申請及檢驗收費標準」第 2 條、第 7 條草案。
- 113/12/18 【環境部修正發布「放流水標準」】
環境部為維護水體品質與推動污染物減量及管制，於 113 年 12 月 18 日修正發布「放流水標準」，增訂或加嚴氮氮、磷、銅及自由有效餘氯等項目之管制，並減少高濃度磷排入水體之負荷，及持續降低特定流域銅濃度，提升水體品質並促進廢（污）水資源化推動。
- 113/12/31 【修正公告空氣污染防制區 環境部攜手地方強化空污管制】
環境部依 113 年 9 月 30 日修正發布的空氣品質標準，並以最近 3 年（110~112 年）空氣品質監測數據為基準，修正公告「直轄市、縣（市）各級空氣污染防制區」，自 114 年 1 月 1 日起生效。
- 113/12/31 【環境部修正工廠違反空污法裁罰準則，排放氮氧化物及 VOCs 超標將加重罰鍰】
考量近年空氣品質季節特徵，及為落實二期空氣污染防制方案目標，環境部於 113 年 12 月 31 日修正發布「公私場所固定污染源違反空氣污染防制法應處罰鍰額度裁罰準則」之附表裁罰金額計算權重，主要針對氮氧化物 NO_x 及揮發性有機物 VOCs（細懸浮微粒 PM_{2.5} 及臭氧 O₃ 之前驅物）之排放違反規定，予以加重處罰。
- 114/01/01 【環境部開始核發「環保專責人員電子證書」】
為配合政府數位轉型與證書數位化的政策，行之有年的環保專責人員紙本合格證書，將自 114 年起，新增電子證書的選項。國家環境研究院劉宗勇院長表示，電子證書具有不易偽造、快速驗證、核發快速、簡政便民、減少民眾規費及減少碳足跡等優點。
- 114/01/02 【環境部修正發布「環境保護專責及技術人員合格證書規費收費標準」第 3 條及「空氣污染物及噪音檢查人員證書費收費標準」第 2 條】
環境部為因應政府數位轉型，推動證書數位化，於 114 年 1 月 2 日修正發布「環境保護專責及技術人員合格證書規費收費標準」第 3 條及「空氣污染物及噪音檢查人員證書費收費標準」第 2 條，新增電子證書規費，收費標準為新臺幣五百元。

論述園地

利用複合型吸附劑同時吸附水中不同類型的污染物： 以層狀複合金屬氫氧化物與碳球為例

趙煥平¹、張晉瑋²

¹中原大學環境工程學系教授

²國家環境研究院副研究員

一、前言

近年來由於環保意識抬頭，許多過去未被管制的污染物將納入放流水標準中進行管制，或是有些污染物的放流水管制標準被要求加嚴，在此狀況下許多傳統的處理方式已無法符合現行的放流水標準，因此需要增加高級處理的程序，降低放流水中特定污染物的濃度。除此之外，由於一些新興或微量的污染物被發現存在於飲用自來水中，但以目前自來水的處理程序對於溶解性的污染物並無法達到有效的去除效率，若要去除這些污染物，吸附是一種高效率且低成本的處理方法，因而在此討論使用複合型吸附劑對於不同污染物的去除效率。

對於不同性質的廢水所增加的高級處理程序並非完全相同，例如對染料廢水為使放流水色度能夠符合標準，經常使用化學氧化程序與活性炭吸附程序；對於含硼酸鹽的廢水可能使用選擇性離子交換樹脂；對於含重金屬廢水可能使用離子交換樹脂。除此之外，若是考慮將廢水回收再利用，可以使用薄膜過濾方式降低污染物的濃度或製造出純水。每一種高級處理程序均可能有其適用的範圍與條件，例如吸附，大部分使用活性炭，且去除的對象以含有機污染物的廢水為主；若使用的高級處理為化學氧化，則必須考慮污染物的濃度與操作條件，若使用離子交換樹脂，則廢水可能容易造成阻塞，同時所需要的成本也較高。使用不同形式的薄膜，雖然可以處理不同類型的污染物同時可以獲的良好處理效果，但使用薄膜過濾法除了成本較高外，操作也需要相當經驗的人員。同樣地，上述的處理方法也可以應用於自來水的處理程序中，去除一些微量但無法經由傳統自來水處理程序中去掉的污染物。

在廢水高級處理技術中，吸附是一種操作較簡單且相對處理成本較低的技術，依照目前所發表的文章中，不同性質的吸附劑可以吸附性質不同的污染物，但較可惜的是目前廢水處理仍以活性炭為主要的吸附劑，活性炭被用於廢水處理主要目的為去除廢水中殘留的有機污染物，且可以去除部分重金屬離子，但對於一些特定的污染物，例如陰離子污染物

活性碳並無法產生良好的去除效果，而廢水中可能具有許多不同類型的污染物，若要達到放流水標準則需要增加不同的處理程序，同樣地自來水若是僅使用活性碳去除殘留的有機物，一些不同性質的微量污染物也可能會進入飲用水系統，進一步影響人體健康。考慮目前吸附劑發展的趨勢，複合型吸附劑是一個被廣泛研究的主題，或許現在實場被使用的經驗還非常少，但未來複合型吸附有可能成為水或廢水處理的重要程序，因而在此對於複合型吸附劑的研究進行簡單的回顧與介紹，同時以層狀複合金屬氫氧化物與碳球為例，介紹複合型吸附對於不同類型污染物之去除效率。

二、複合型吸附劑發展歷史

複合型吸附劑 (composite adsorbent) 的定義為兩種以上的物質所結合成的吸附劑，其發展的主要目的為增加單一污染物的吸附量，或是利用此吸附劑去除不同類型的污染物。在過去單一吸附劑大部分只能吸附一種類型的污染物，如沸石 (zeolite)、蒙特石 (Montmorillonite)、鈦酸鹽奈米管 (titanate nanotubes, TNT) 等可以吸附陽離子污染物，活性碳大部分被用於吸附有機污染物，層狀複合金屬氫氧化物 (layer double hydroxides, LDHs) 可以被用於吸附陰離子污染物。若要吸附較多不同類型的污染物，則必須將吸附劑表面改質或是結合兩種以上不同性質的吸附劑。例如在過去離子交換樹脂分為陽離子與陰離子交換樹脂，在水純化的過程中經常需要同時通過兩種離子交換樹脂，才能夠達到目的，為了能夠簡化水純化，因而發展出混合床的離子交換樹脂，這種方式與現今複合型吸附劑的發展有些類似。

對吸附劑進行表面改質使其可以吸附更多類型的污染物，例如對於沸石與 TNT，可以經由表面改質使其成為多功能之吸附劑 (Chao et al., 2012; Chao et al., 2013)，以疏水性有機物與前述材料表面進行鍵結，使吸附劑具備有機物質，非離子低極性的有機物如苯、甲苯等將藉由分布 (partitioning) 的情況下進入吸附材料的有機物質中，其狀況與非離子低極性有機物，在含有有機質之土壤-水系統中類似，由於改質的過程，這些礦物仍可保留表面部分負電荷之性質，因此仍然可以吸附陽離子重金屬。除此之外，若以陽離子界面活性劑對礦物進行改質，可能形成雙電性的吸附劑且同時可以吸附陽離子、陰離子與有機污染物 (Tran et al., 2018)，這種改質方式雖然許多陽離子界面活性劑皆可達到此功能，但最

常被使用之界面活性劑仍為十六烷基三甲基溴化銨 (hexadecyl trimethyl ammonium bromide, HDTMA)。另外 LDHs 原本吸附陰離子污染物，但經由有機酸插層後即可同時吸附陰離子污染物與利用錯合反應吸附陽離子重金屬 (Li et al., 2019)，但這種吸附劑用於實際水或廢水處理可能產生缺點，因為改質的物質在水中可能有少部分釋出，這些釋出的有機物可能增加水中的 COD 值。除了上述利用有機物質改變表面性質外，另一種改質方式為將特定官能基加入吸附劑上，這種多半為針對碳材料或含纖維素的農業廢棄物，例如活性碳可以吸附有機污染物，但對於重金屬的吸附效果較差，如果可以增加活性碳表面 COOH 官能基，則可以利用含氧官能基增加對於重金屬離子的吸附能力，這種改質方式並不會導致吸附過程中有污染物質釋出，且對於陽離子污染物之吸附容量約可增加 2~3 倍 (Zhang et al., 2023)。

將兩種不同的吸附劑結合成為複合型吸附劑，則為目前研究發展的主軸之一，可以被用於合成複合型吸附劑的材料非常多，如 Kim et al. (2018) 以氧化石墨烯與八面沸石 (faujasite) 合成複合性材料，用於吸附陽離子染料甲基藍 (methylene blue, MB)，Xu et al. (2018) 能經利用奈米碳管與碳酸鈣所合成之複合材料以管柱吸附方式去除 2-萘酚 (2-naphthol)，Diagboy 與 Dikio (2018) 則利用碳黑 (carbon black) 與黏土 (clay) 製成複合材料，然後用於去除水中的甲基藍染料與重金屬鎘離子。Adeleke et al. (2017) 曾以椰子殼製成活性碳後，再利用牛骨以及沸石製成組合性吸附劑，然後利用其表面特殊官能基，對於有機物與氮氮產生高去除效率，Maity 與 Ray (2018) 利用甲殼素 (chitosan) 與聚甲基丙烯酸 (polymethacrylic acid) 連結，然後與埃洛石 (halloysite) 合成奈米管狀複合材料，因為此種合成方式可以有效增加表面特定的官能基，將有利於金屬離子之吸附，此合成的材料被用於吸附鉛離子與鎘離子後，最大吸附容量可分別達 314 與 303 mg/g。Liu et al. (2019) 利用二氧化矽與甲殼素組合成吸附劑，用於純化飲用水中之 As(V) 與 Hg(II)，由於吸附劑表面具備大量的活化位置 (如羧基與胺基) 對於 As(V) 與 Hg(II) 的最大吸附容量可達 204 與 199 mg/g，Li et al. (2017) 將活性碳與甲殼素組合成的吸附劑在不同溫度與條件下吸附銅離子，最大吸附容量可達 216.6 mg/g，由於甲殼素主要利用錯合反應去除重金屬，因此對於銅離子可產生相對較高之吸附容量。Sharma et al. (2019) 利用氧化鋅與活性碳組合成奈米級複合性材料，用於動態吸附水中六價鉻，其結果顯示在 pH 為 2 的條件下可以達到最佳吸附效果，且去除率可達 97%，Wang et al. (2018) 則利用碳球與木素磺化鹽 (lignosulfonate) 以

及三乙烯 (triethylene) 製成複合性材料，先以葡萄糖製成碳球，然後再將上述兩種化學物質與碳球在水浴的條件下混合，所獲得之吸附劑在不同的 pH 值條件下吸附染料，可以得到相當的高的吸附效率。

前述的研究較常針對單一污染物進行吸附，較少對於不同的污染物進行吸附，而近年的研究較偏向於將組合型吸附劑用於吸附不同種類之污染物，例如 Yan et al. (2016) 曾利用氧化石墨烯與甲殼素合成多功能吸附材料，用於吸附陽離子染料甲基藍、二價銅離子、陰離子染料甲基橙 (methyl orange) 與六價鉻，由於氧化石墨烯可以吸附較多種類的污染物，甲殼素則是可以加強對重金屬的吸附。Zhang et al. (2022) 也以碳球與 LDHs 結合成複合型吸附劑，用於吸附陽離子重金屬、六價鉻、陽離子染料與陰離子染料對於這幾種污染物皆獲得高吸附量，事實上由於新興污染物的種類非常多，且一般在水中屬於低濃度，因此也有學者研究利用複合型吸附劑去除水中新興污染物 (Nazari et al. , 2022) ，Chenarani and Lotfollahi (2024) 即曾經以活性碳與氧化石墨烯組合成複合型吸附劑，並利用此吸附劑去除新興污染物之雙氯芬酸鈉 (Diclofenac sodium) 與布洛芬 (Ibuprofen) 發現可以得到 833.33 與 238.095 mg/g 之吸附量。

對於廢水處理而言，當傳統的處理方法無法使放流水達到標準時，使用高級處理是必須的程序，而使用複合型吸附劑具有操作簡單，且同時可以去除多種污染物的功能，若能有效應用於廢水處理，則可以簡化廢水處理程序。即使對於自來水而言，也有一些研究考慮使用複合型吸附劑去除水中污染物，這種複合型的吸附劑，可能是未來水或廢水吸附技術發展的主軸。在此研究中將以 LDHs 與碳球 (carbon sphere, CS) 作為例子，討論這兩種材料所合成之複合型吸附對於不同類型污染物之去除狀況。

三、複合材料的合成方式

CS 為碳材料因此必須使用含有大量有機碳的物質製作，一般以多醣類製作可以得到較純的物質，可以使用多醣類包含葡萄糖、蔗糖與木糖等，目前有許多合成 CS 的方法，而 CS 的形狀可能為單獨的球形或連結成串的球形，合成的方法包括模板法 [Sun et al. , 2011]、水熱合成法、熱溶劑法 [Sa' nchez-Soto et al. , 2001]、氣相沉積法 [Wu et al. ,

2009] 等，使用模板法可以製造出中空之 CS，但使用此方法需要將模板去除以增加合成程序，使用熱溶劑法需要廢棄所使用之溶劑，因此以使用水熱合成法為較簡單且較環保之合成方式，水熱合成法形成 CS 的機制為在高溫與高壓的條件下，溶液中相鄰之糖分子開始進行脫水並進行聚合反應 (polycondensation)，在其中具備疏水性烷基及親水性氫氧基兩種不同性質之分子開始聚集，在聚合反應持續進行的條件下，當這些具備兩種不同官能基的分子之濃度達到一定濃度時，這些兩性分子開始以疏水基作為核心，並以親水基佔據表面開始形成圓形之微胞，當步驟持續進行，微胞表面之氫氧基繼續和鄰近之糖分子進行結合及脫水反應，最終將形成圓形的碳球，直到糖分子被消耗殆盡時，所形成的碳材料才會停止成長 [Wang et al., 2001]。

LDHs 是由帶正電荷的主體層板和層間陰離子通過非共價鍵的相互作用組裝而成化合物，LDHs 的化學組成結構可用通用方程式表示如下： $[M_{1-x}^{II}M_x^{III}(OH_2)]^{X+}A_{x/n}^{n-} \cdot mH_2O$ ，其中 M^{II} 為二價金屬陽離子； M^{III} 為三價金屬陽離子； A^{n-} 則代表層間之陰離子 [Cavani and Vaccari, 1991]，最常見的 LDHs 為 Mg-Al- CO_3 類型之礦物，LDHs 主體層板以八面體 (Octahedral Structure) 為主要結構連結成層狀，其主要是二價與三價陽離子為中心連同其他陰離子鹽類組成，其特性為表面或層間帶正電荷，可以吸附陰離子其合成方法包括共沉澱法 [Cavani and Vaccari, 1991; He et al., 2006]、水熱合成法 [He et al., 2006]、離子交換法 [Bish, 1980]、煅燒復原法 [Rocha et al., 1999; Goh et al., 2008]、即時合成法 [呂等, 2008; 樂等, 2010]、尿素法 [Costantino et al., 1998] 等，另外還有其他的合成方式，LDHs 具備合成簡單且合成方法多元性之優點，在這些合成方法中，共沉澱法為最常被使用之方法，即時合成法則可用於現場處理水或廢水中的污染物質，只要將原料加入水中，在形成 LDHs 的過程中即可將污染物去除，但其缺點為所形成之 LDHs 結構較不穩定，而使用水熱合成法則可獲得結構較穩定之 LDHs，其他如離子交換法為使用陰離子取代 LDHs 層間陰離子，製作出想要的 LDHs，煅燒復原法則是將 LDHs 在 300~500°C 的條件下加熱，此時 LDHs 會將層間碳酸鹽釋出形成另一種化學物質，但將 LDHs 投入水中，只要結構未被明顯破壞，則將再恢復成 LDHs。

合成的複合材料為了增加對於染料的吸附量，將再經過煅燒與接枝程序，煅燒可以增加碳球的比表面積，有利於吸附有機污染物，另外對於 LDHs 而言，煅燒可能改變其性質，但當 LDHs 溶入水中後，可以再恢復原來的 LDHs，且同時可以增加對陰離子污染物的吸附量，但由於 LDHs

在溫度超過 550°C 的條件下可能造成不可逆的改變，因此大部分會將溫度控制在 550°C 以下。對於接枝程序而言，主要是因為碳球表面雖然具備負電荷，但對於陽離子染料的吸附量仍受到表面官能基的限制，當利用接枝方式增加表面 OH 或 COOH 官能基後，則可以大幅增加對於陽離子染料的吸附量。在此研究中測試將合成的複合材料放在 300~500°C 的條件下燃燒，測試表面性質是否明顯改變，另外利用硝酸銻銨與丙烯酸與含合成材料的溶液混合進行接枝程序，再測試對於陽離子、陰離子與非離子污染物的吸附量。

四、複合材料的性質分析

合成材料的性質是其是否能夠去除污染物的重點，一般經常檢測的項目包含掃描式電子顯微鏡 (SEM)、傅立葉轉換紅外線光譜儀 (FTIR)、界達電位分析儀，另外有些項目也可能列入檢測，如分析 BET 比表面積、分析材料的元素組成以及分析材料的層間距 (XRD)。使用 SEM 主要為了解合成材料的形狀與外觀是否與原材料有差異；FTIR 則為了解複合材料的表面官能基，除了低極性的有機物外，表面官能基會影響大部分化合物的吸附；界達電位可以觀察表面電荷，對於離子性的污染物吸附有決定性的影響；BET 比表面積對於有機污染物的吸附會產生重要的影響，因此不論是染料、低極性有機物或其他類型的有機物吸附，皆可受到表面積影響；XRD 主要分析材料的層間距，可以確定所合成的材料是何種礦物類型，如果所合成的複合材料具有礦物成分則必須利用 XRD 檢測確定其是否能夠保留原來礦物的性質。

複合材料的性質是決定其是否能夠去除污染物的關鍵，由於本文將以 LDHs-CS 所合成的複合型附劑為例，因此以下將針對 LDHs、CS 與 LDH-CS (接枝與未接枝兩種) 共四種材料的特性進行簡單描述。圖 1 為四種材料的 SEM 圖譜。

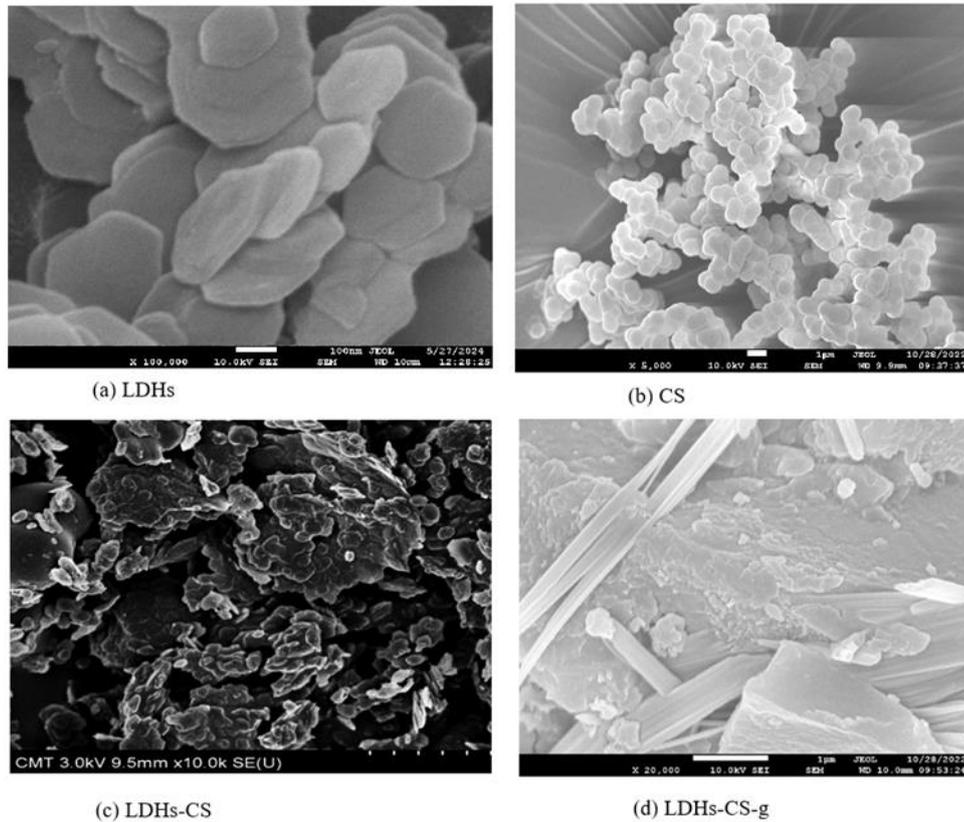


圖 1 合成材料之 SEM 圖譜

圖 1 中顯示原本的 LDHs 呈現片狀，而 CS 則呈現由球狀材料連結形成簇狀，當兩者以同樣方式製成 LDHs-CS 後，形狀則成為片狀與球狀的結合，只是有部分碳球可能包覆 LDHs，接枝後的 LDHs-CS-g，則呈現球型吸附劑變得較不明顯，但最重要的是兩種吸附劑合成組合型吸附劑後，是否可以維持個別吸附劑的功能，如果可以維持功能就能夠吸附不同類型的污染物。由於大部分 SEM 設備具有 EDS 附屬設備，可以分析所合成材料的元素組成，表 1 中顯示經過分析後 LDHs-CS，以及合成後經過 300°C (LDHs-CS-300)、400°C (LDHs-CS-400) 與 500°C (LDHs-CS-500) 缺氧鍛燒之 LDHs-CS，另外合成的 LDHs-CS 經過接枝程序所形成 LDHs-CS-g 也顯示在表 1 中，表 1 中 Mg 與 Al 的莫耳比大約為 3:1，此比例與一般常見的 LDHs 一致，顯示合成材料已成功合成 LDHs，另外經過缺氧鍛燒後，顯示 LDHs 的 C/O 比隨鍛燒溫度增加而降低，當含氧官能基增加有利於 CS 吸附污染物。

表 1 所合成吸附材料的元素組成

吸附劑	元素百分比%					
	C	O	Na	Mg	Al	Ce
LDHs-CS	79.4	14.7	0.3	4.34	1.62	-
LDHs-CS-300	75.6	16.8	0.8	4.93	1.87	-
LDHs-CS-400	73.7	18.0	0.7	5.67	1.93	-
LDHs-CS-500	69.2	21.3	0.9	6.42	2.10	-
LDHs-CS- g	67.4	26.7	0.4	3.22	1.06	1.22

對於污染物的吸附，吸附劑表面的含氧官能基是非常重要的影響因子，特別對於碳材料如本文中所選擇的碳球，表面官能基可以決定對污染物的吸附量，因為合成機制的關係，LDHs 具備明顯的 OH 官能基，而碳球經過接枝程序後 OH 官能基則隨之增加。

為了能夠了解合成吸附劑表面官能基的變化，圖 2 顯示出合成材料的 FTIR 圖譜，由圖譜中的 Al-O 與 Mg-O 官能基可以進一步確認 LDHs 存在於合成材料中，另外 CS 表面也具備 C-O、C=C、CH 等官能基，另外較重要者為 OH 官能基，此部分可以同時由 LDHs 與 CS 提供，一般考慮在高溫下鍛燒可能導致 OH 官能基減少，但由圖 2 中顯示 OH 官能基在鍛燒過程並未明顯減少，而接枝後的結果顯示 OH 官能基遠比未接枝前增加，此代表接枝後的吸附材料將有利於陽離子污染物吸附。

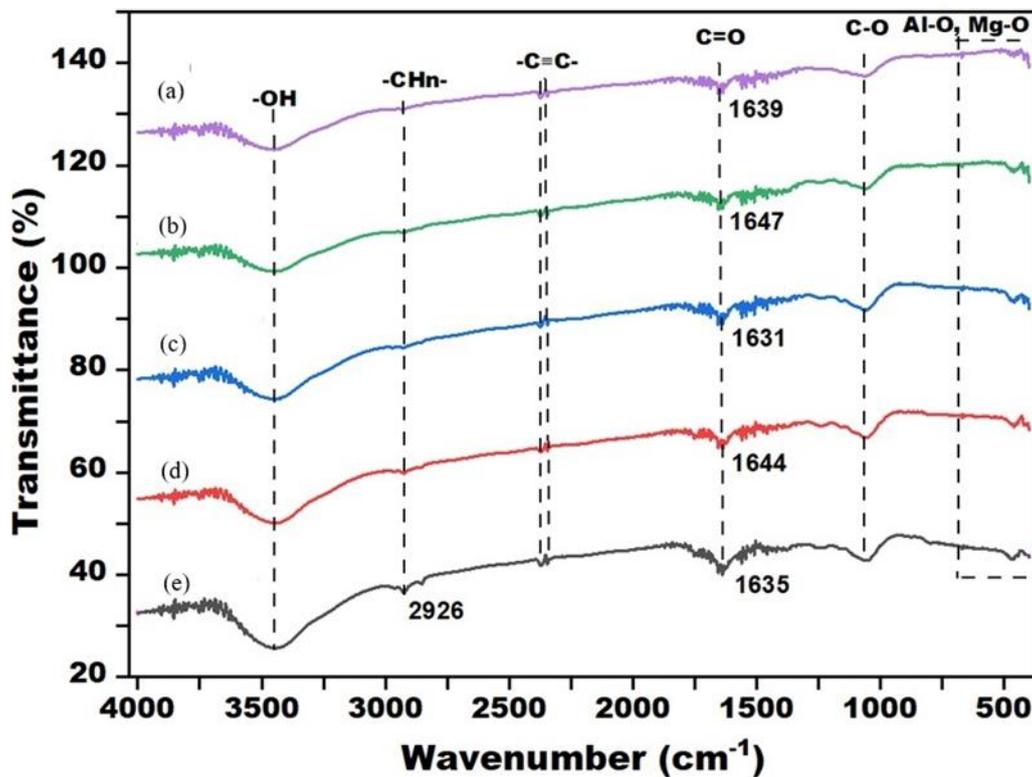


圖 2 合成吸附劑 FTIR 圖譜 (a) LDHs-CS，(b) LDHs-CS-300，(c) LDHs-CS-400，(d) LDHs-CS-500，(e) LDHs-CS- g

雖然由前面的內容證實 LDHs 已存在於所合成的複合型吸附劑，但可以進一步確認其存在的狀況，由於 LDHs 為具有特定結構的礦物，因此可以利用 XRD 的結果進行確認，而 CS 並非特定結構的礦物，因此在 XRD 圖譜中並無法顯示出明確的波峰，圖 3 為，LDHs-CS 在接枝前後的 XRD 圖譜，由圖 3(b) LDHs-CS 的圖譜中可以明顯發現在 Y 軸 2θ 約 11nm 的位置具有明顯的波峰，此波峰被認為是 LDHs 的特徵波峰，另外 LDHs 在位置為接近 24 與 35 的位置也會有明顯的波峰，由圖 3 中可以發現不論接枝與否皆可符合此特性波峰。除此之外，在接枝程序前的 LDHs-CS 具備較多的波峰，而接枝程序後的波峰的強度變弱，明顯的波峰數也減少，可以是因為 CS 受到一些影響，使原本可能呈現出的波峰變得不明顯。

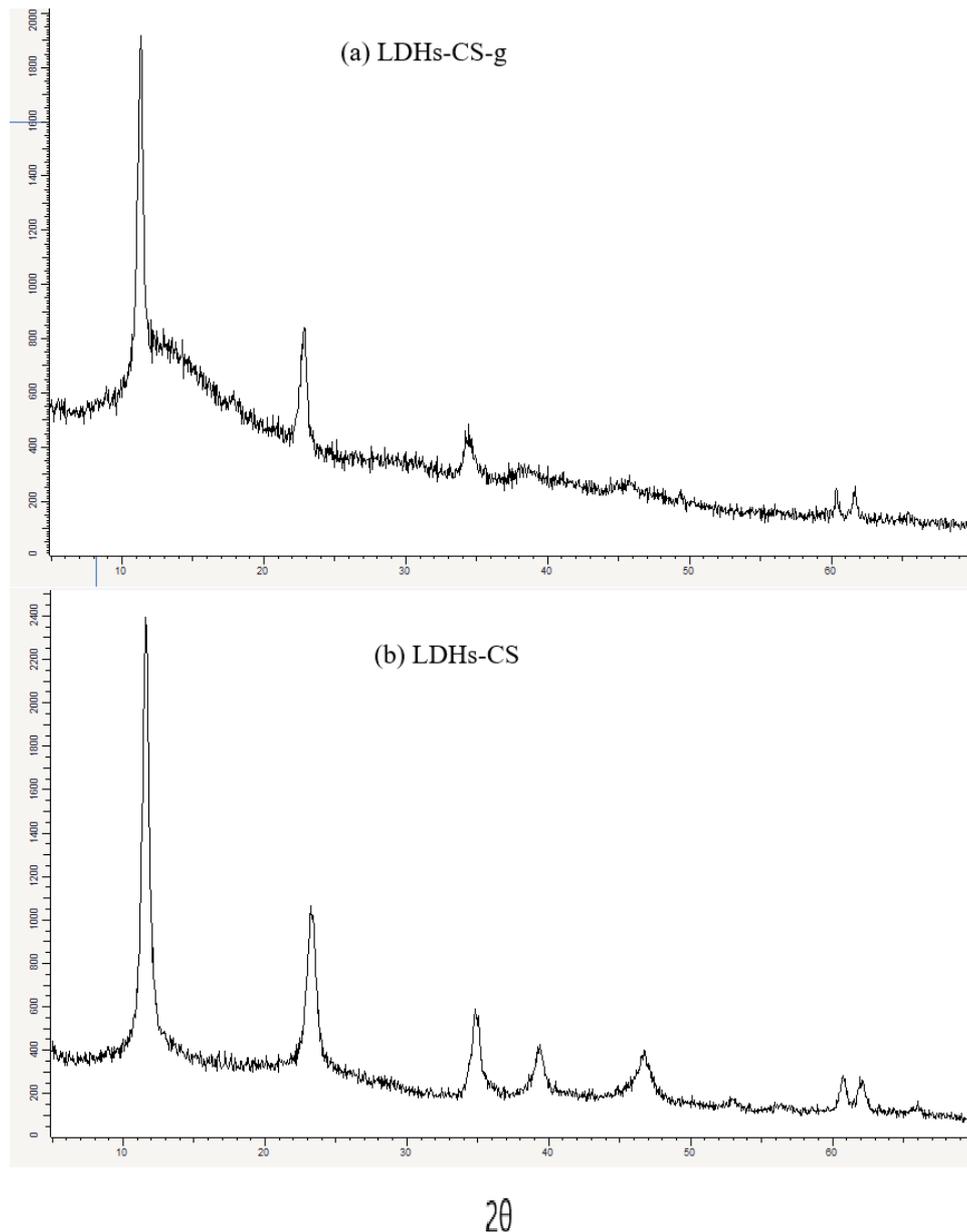


圖 3 LDHs-CS 接枝前後的 XRD 圖譜

除了表面官能基之外，表面電荷也是決定離子型污染物吸附的重點，LDHs 一般表面具備正電荷，可以有效吸附陰離子污染物，而 CS 表面以負電荷為主，LDHs 無法藉由上述程序接枝改變表面性質，因此主要接枝的對象為 LDHs-CS 中的 CS，經過接枝的複合材料，表面將具備更明顯的負電荷，當兩者結合在一起後，表面電荷的變化必須藉由界達電位判斷，圖 4 顯示出所合成吸附劑在不同 pH 溶液中所呈現的界達電位，界達電位為正即代表表面電荷為正，可以吸附陰離子污染物，界達電位為負即代表表面電位為負，可以吸附陽離子污染物，一般 LDHs 在大部分 pH 溶液中表面電荷均為正，而 CS 則在中性範圍以後的 pH 值如 pH5，皆可顯示出

負電荷，但由圖 4 中的結果顯示 LDHs-CS 的等電位點，隨鍛燒溫度增加往低 pH 方向移動，而接枝後的 LDHs-CS-g 在所選擇的 pH 範圍表面均為負電荷，這是兩種不同表面電荷材料結合在一起所呈現的結果。但由於兩種材料仍然可以維持其本身的特性，因此可以預期所合成的材料可以同時吸附陽離子與陰離子污染物。

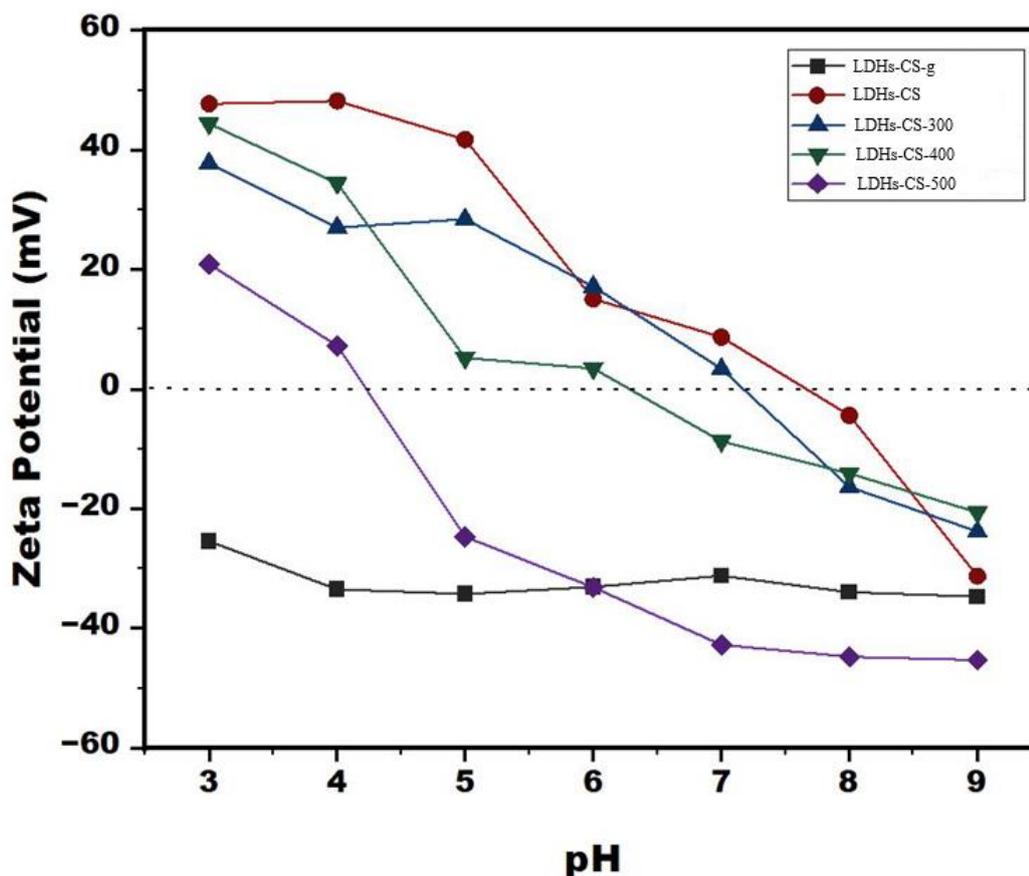


圖 4 所合成吸附劑的界達電位

除了上述影響因子外，吸附劑的比表面積與孔洞大小也會影響對於有機物的吸附，表 2 為合成吸附劑的表面孔洞特性。由於碳球並非高比表面積的材料，其比表面積一般小於 $5 \text{ m}^2/\text{g}$ ，LDHs 雖然具備略高的比表面積，但基本上 LDHs 的比表面積將小於 $100 \text{ m}^2/\text{g}$ ，且大部分介於 15~30 之間，由表 2 中可以觀察出 LDHs-CS 如預期的比表面積為 $24.3 \text{ m}^2/\text{g}$ ，而經過接枝後則表面積略微降低，但經過鍛燒後比表面積則隨鍛燒溫度增加而增加，在 500°C 下鍛燒，比表面積可達 $226 \text{ m}^2/\text{g}$ ，雖然此數值仍遠低於活性碳，但增加的比表面積已可有效增加對於有機物吸的吸附效率。除此之外，孔徑大小也可能影響對於染料的等大分子有機物的吸附量，若孔徑大小集中於微孔(孔徑小於 2nm)，則可能影響染料進入孔洞中吸附，即使具備高比表面積，也有可能只產生低吸附量。

表 2 合成吸附劑的孔洞性質

吸附劑	BET 表面積 (m ² /g)	孔隙體積 (cm ³ /g)	平均孔徑 (nm)
LDHs-CS	24.3	0.04	7.21
LDHs-CS-300	54.5	0.12	7.32
LDHs-CS-400	125	0.28	6.96
LDHs-CS-500	226	0.41	6.54
LDHs-CS- g	18.2	0.04	8.65

五、複合材料的性質分析

為了要驗證複合型吸附劑對於不同污染物之吸附量，在此選擇了陽離子重金屬 Cu(II)，Cd(II) 與 Pb(II)，陰離子重金屬鉻酸鹽 (Cr(VI))、砷酸鹽 (As(V))，具有極性的有機物苯酚 (phenol) 與非離子低極性的有機物甲苯 (Toulene) 等污染物進行測試。由過去的結果得知，除了甲苯外，其他污染物的吸附接受到溶液的 pH 的影響，一些由於陽離子重金屬雖然吸附容隨 pH 增加而增加，但可能在 pH 超過 5 以後產生微量沉澱，無法判定是吸附或沉澱去除，陰離子重金屬則在低 pH 的條件下有較好的吸附效果，而苯酚則在 pH 超過 5.5 後有部分解離形成離子態，因此選擇在 pH 5 的溶液中進行測試，溫度則設定在接近 25°C。由於必須比較對不同污染物的吸附效率，因此將以 Langmuir 模式計算出所合成吸附劑對於不同污染物的最大吸附量，了解其是否可以有效吸附不同類型的污染物。Langmuir 模式所假設的吸附方程式顯示於方程式 1。

$$\frac{x}{m} = \frac{KCb}{(1+Kc)} \quad (1)$$

其中 x/m 為單位吸附劑對污染物的吸附量 (mg/g)； C 為吸附平衡時，吸附質在液相中的濃度 (mg/L)； K 為吸附平衡常數，其所代表的是吸附達平衡吸附與脫附速率的比值，其值為吸附劑與吸附質的性質和溫度決定； b 為最大吸附量 (mg/g)。所合成吸附劑對於不同污染物吸附所計算出的 Langmuir 模式參數則顯示於表 3。

表 3 所合成吸附劑對於 Langmuir 模式所估算之吸附參數

吸附劑	最大吸附量 (mg/g)	最大吸附量 mmol/kg	平衡常數 (L/mg)	R-square
Cu				
LDHs-CS	239	3,760	0.03	0.98
LDHs-CS-300	331	5,210	0.00	0.99
LDHs-CS-400	364	5,740	0.04	0.97
LDHs-CS-500	330	5,190	0.02	0.99
LDHs-CS- g	615	9,690	0.05	0.97
Cd				
LDHs-CS	188	1,680	0.08	0.96
LDHs-CS-300	239	2,130	0.07	0.96
LDHs-CS-400	260	2,320	0.00	0.98
LDHs-CS-500	301	2,690	0.09	0.94
LDHs-CS- g	559	4,995	0.04	0.98
Pb				
LDHs-CS	253	1,220	0.04	0.97
LDHs-CS-300	416	2,010	0.06	0.95
LDHs-CS-400	482	2,330	0.04	0.97
LDHs-CS-500	412	1,990	0.09	0.93
LDHs-CS- g	706	3,410	0.05	0.98
Cr (VI)				
LDHs-CS	116	2,230	0.04	0.90
LDHs-CS-300	149	2,860	0.03	0.94
LDHs-CS-400	167	3,220	0.04	0.94
LDHs-CS-500	186	3,570	0.06	0.95
LDHs-CS- g	121	2,330	0.05	0.96
As (V)				
LDHs-CS	197	2,620	0.04	0.93
LDHs-CS-300	260	3,470	0.04	0.95
LDHs-CS-400	298	3,970	0.05	0.90
LDHs-CS-500	323	4,310	0.04	0.91
LDHs-CS- g	236	3,150	0.02	0.97
Phenol				
LDHs-CS	17	180	0.06	0.99
LDHs-CS-300	89	950	0.07	0.99
LDHs-CS-400	114	1,210	0.05	0.99
LDHs-CS-500	173	1,840	0.06	0.99
LDHs-CS- g	43	460	0.03	0.99

Toluene				
LDHs-CS	13	140	0.02	0.98
LDHs-CS-300	86	940	0.06	0.98
LDHs-CS-400	121	1,320	0.09	0.99
LDHs-CS-500	148	1,610	0.04	0.97
LDHs-CS-g	11	120	0.06	0.99

由表 3 的結果可以發現所合成的複合型吸附劑對於測試的污染物均具備吸附效果，且 LDHs-CS 除了甲苯吸附量較低外，對其他均具備高吸附量，若吸附劑為礦物且本身不具備有機質，無法有效吸附非離子低極性的有機物，因此 LDHs-CS 中 LDHs 的成分無法吸附甲苯，但 CS 本身為碳材料，僅此部分可以提供位址吸附甲苯，碳球本身可以利用離子交換或錯合反應吸附陽離子重金屬，LDHs 雖然表面為正電荷，但可以利用表面吸附的方式去除陽離子重金屬，因此可以產生高吸附量。LDHs 本身為具備正電荷的礦物，因此可以有效吸附水中陰離子污染物，因此 LDHs-CS 也可以去除鉻酸鹽與砷酸鹽。苯酚與甲苯雖然都是有機污染物，由於 CS 表面具備豐富的含氧官能基，因此具極性的苯酚能夠較有效吸附於 CS，此外，礦物對於具極性的有機物也具有部分吸附效能。

對於陽離子重金屬而言，鍛燒後的 LDHs-CS 由於 CS 表面 OH 或 COOH 官能基並未有明顯的破壞，因此吸附量將略高於未鍛燒的 LDHs-CS，但鍛燒溫度增加，並無法對於吸附量產生明顯的影響，而接過接枝程序後，吸附量將明顯的增加 2~3 倍。當 LDHs 經過鍛燒後，只要結構未受到不可逆的破壞(溫度小於 550°C)則對於陰離子的吸附量將隨鍛燒溫度增加而增加，對接枝對於陰離子重金屬的吸附量僅輕微的增加，這可能為 LDHs-CS-g 上的含氧官能基明顯增加，雖然接程序增加了陰離子與 CS 的表面斥力，但增加的含氧官能基仍吸引了少部分陰離子污染物吸附於表面。苯酚與甲苯在 LDHs-CS 皆隨鍛燒溫度增加而增加，則主要原因為經過鍛燒後，比表面積隨之增加，但兩者明顯不同的地方，當 LDHs-CS 經過接枝後，苯酚的吸附量將增加，但甲苯的吸附量卻些微減少，苯酚可能因為 CS 表面含氧官能基增加，然後利用氫鍵或其他作用力增加苯酚的吸附量，而甲苯則因為接枝後比表面積略微減少，導致吸附容量下降。

若比較不同化合物間的吸附量，依照以 mmol/kg 為單位之吸附量，可以發現 Cu 具有最高的吸附容量，特別在接枝後，吸附量更可高達 9,690 mmol/kg，Cu 是一個較容易形成錯合反應的陽離子重金屬，且可以與 O 元素形成錯合反應，因此較容易吸附於 LDHs-CS，而 Pb 較不具備與 O 元素產生錯合反應的能力，因此吸附量在重金屬中最低。鉻酸鹽與砷酸鹽的吸附主要依靠 LDHs，砷酸鹽的吸附量略為高於鉻酸鹽，由於砷酸鹽較容易以表面沉澱的方式吸附於 LDHs-CS 因此可以獲得略高的吸附量。有機物如苯酚與甲苯，因為苯酚的吸附量會受到吸附劑表面含氧官能基的影響，因此吸附量高於甲苯；兩者吸附量的主要影響因子為吸附劑的比表面積，雖然經過鍛燒後 LDHs-CS 將展現出較高的比表面積，但因為此表面積仍遠低於活性碳，因此有機物的吸附量仍低於陽離子與陰離子重金屬。整體而言，不同污染物間的吸附量，大致上呈現出陽離子重金屬>陰離子重金屬>有機物。

六、複合型吸附劑用於水及廢水處理

目前最常被使用的吸附劑為活性碳，但未來對於放流水標準不斷加嚴的條件下，使用傳統的處理方法可能已無法達到放流水的標準，此時必須在廢水處理程序中加入高級處理程序。若要使用吸附劑去除放流水中之污染物，由於放流水中可能具備不同類型的污染物，使用複合型吸附劑取代活性碳可以簡化廢水處理程序，將是未來合成吸附劑的發展方向。在本研究中針對水中可能產生不同類型的污染物進行試驗，以 LDHs 與 CS 合成複合型的吸附劑，可以同時具備吸附陽離子與陰離子的功能，當此吸附劑經鍛燒後，亦可以增加對於非離子型有機物的吸附容量，若是經過接枝程序，增加表面含氧官能基，則可以進一步增加陽離子污染物的吸附容量 2~3 倍，但對於陰離子污染物之吸附容量卻不會因此明顯減少，未來若能應用於廢水處理，可以有效簡化具多重污染物的廢水高級處理程序。事實上不只針對廢水處理，由於目前自來水處理程序對於一些溶解性的污染物並無法獲得良好的處理效率，因此這類型的吸附劑也可以應用於自來水處理，例如自來水中微量的陽離子重金屬、陰離子污染物甚至不同類型的微量有機物，這些微量的污染物不適合使用沉澱處理，皆可利用複合型吸附劑加入水中，達到去除污染物之目的。

參考文獻

- [1] Adeleke, A.O.; Latiff, A. A. A.; Al-Gheethi, A.A.; Daud, Z. (2017) Optimization of operating parameters of novel composite adsorbent for organic pollutants removal from POME using response surface methodology. *Chemosphere*, 174, 232-242.
- [2] Bish, D. (1980) Anion exchange in takovite: Applications to other hydroxide minerals. *Bulletin de Mineralogie*, 103, 170-175.
- [3] Cavani, F.; Trifirò, F.; Vaccari, A. (1991) Hydrotalcite-type anionic clays: Preparation, properties and applications. *Catalysis Today*, 11, 173-301.
- [4] Chao, H.-P.; Chen, S.-H. (2012) Adsorption characteristics of both cationic and oxyanionic metal ions on hexadecyltrimethylammonium bromide-modified NaY zeolite. *Chemical Engineering Journal*, 193-194, 283-289.
- [5] Chao, H.-P.; Lee, C.-K.; Juang, L.-C.; Han, Y.-L. (2013) Sorption of organic compounds, oxyanions, and heavy metal ions on surfactant modified titanate nanotubes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 9843-9850.
- [6] Chenarani, B.; Lotfollahi, M. N. (2024) Adsorptive performance of graphene oxide-activated carbon composite for simultaneous removal of diclofenac sodium and ibuprofen from aqueous solutions in batch mode. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 21, 1691-1707.
- [7] Costantino, U.; Marmottini, F.; Nocchetti, M.; Vivani, R. (1998) New synthetic routes to hydrotalcite-like compounds - characterisation and properties of the obtained materials. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 10, 1439-1446.
- [8] Diagboya, P.; Dikio, N. E. (2018) Scavenging of aqueous toxic organic and inorganic cations using novel facile magneto-carbon black-clay composite adsorbent. *Journal of Cleaner Production*, 180, 71-80.
- [9] Goh, K.H.; Lim, T.T.; Dong, Z. (2008) Application of layered double hydroxides for removal of oxyanions: a review. *Water research*, 42, 1343 - 1368.
- [10] He, J.; Wei, M.; Li, B.; Kang, Y.; Evans, D.G.; Duan, X. (2006) Preparation of layered double hydroxides, in layered double hydroxides, X. Duan and D.G. Evans, Editors. Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. 89-119.
- [11] Kim, D. W.; Hana, H.; Kim, H.; Guo, X.; Tsapatsis, M. (2018) Preparation of a graphene oxide/faujasite composite adsorbent. *Microporous and Mesoporous Materials*, 268, 243-250.
- [12] Li, J.; Jiang, B.; Liu, Y.; Qiu, C.; Hu, J.; Qian, G.; Guo, W.; Ngo, H. H. (2017) Preparation and adsorption properties of magnetic chitosan

- composite adsorbent for Cu²⁺ removal. *Journal of Cleaner Production* 158, 51-58.
- [13] Li, L. ; Qi, G. ; Wang, B. ; Yue, D. ; Wang, Y. ; Sato, T. (2018) Fulvic acid anchored layered double hydroxides: A multifunctional composite adsorbent for the removal of anionic dye and toxic metal. *Journal of Hazardous Materials*, 343, 19-28.
- [14] Liu, J. ; Chen, Y. ; Han, T. ; Cheng, M. ; Zhang, W. ; Long, J. ; Fu, X. (2019) A biomimetic SiO₂@chitosan composite as highly-efficient adsorbent for removing heavy metal ions in drinking water. *Chemosphere* 214 738-742.
- [15] Mait, J. ; Ray, S. K. (2018) Chitosan based nano composite adsorbent—Synthesis, characterization and application for adsorption of binary mixtures of Pb(II) and Cd(II) from water. *Carbohydrate Polymers*, 182, 159-171.
- [16] Nazari, M. T; Schnorr, C. ; Rigueto, C. V. T. ; Alessandretti, I. ; Melara, F. ; da Silva, N. F. ; Crestani, L. ; Ferrari, V. ; Vieillard, J. ; Dotto, G. L. ; Silva, L. F. O. ; Piccin, J. S. (2022) A review of the main methods for composite adsorbents characterization. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 88488-88506.
- [17] Rocha, J. ; Arco, M. Del; Rives, V. ; Ulibarri, M. (1999) Reconstruction of layered double hydroxides from calcined precursors: a powder XRD and 27 Al MAS NMR study. *Journal of Materials Chemistry*, 9, 2499-2503.
- [18] Sańchez-Soto, P. J. ; Avile's, M. A. ; del Rı'ıo, J. C. (2001) Thermal study of the effect of several solvents on polymerization of acrylonitrile and their subsequent pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 58-59, 155-172.
- [19] Sun, G. ; Li, K. ; Wang, J. (2011) A novel approach for fabrication of hollow carbon spheres with large size and high specific surface area. *Microporous and Mesoporous Materials*, 139, 207-210.

小區域空污陳情事件之智慧溯源追蹤系統 (TrkAI) 開發與測試

國頂科技有限公司 環工技師 江舟峰
國頂科技有限公司 系統經理 余雅芳

摘要

全國空氣污染陳情案件居高不下，每年約有 8.5 萬件，為各縣市環保單位巡查的重點，然而傳統巡查方式未能即時追蹤舉證污染源，近年來政府廣佈區域空品微感測器（含風向風速計）。文獻中常使用逆軌跡 (backward trajectory) 或正矩陣因子 (positive matrix factorization, PMF) 等受體模式，來追蹤污染源，但這些受體模式多適用於中大尺度範圍（10 ~ 100 公里），小區域（2 ~ 10 公里）事件導向的污染追蹤技術及相關研究並不多見。本公司針對特定空污陳情事件，於 Google Map 動態圖台上，結合條件機率 (conditional probability, CP) 演算法，開發一種創新的小區域即時智慧追蹤 (tracking) 技術，稱為 TrkAI®，屬於非監督式學習 (unsupervised learning)，以 asp.net 撰寫操作介面 (graphical user interface, GUI)，可以介接感測器之風向風速及濃度資料，進行環域分析 (zone analysis)，每 5 分鐘自動刷新圖台，以條件機率花圖 (conditional probability rose, CPR) 及排放資料判斷上風處之疑似污染源。本研究以南部某科技園區陳情事件進行案例測試，選用該事件附近之 B 監測站，進行陳情時間前 3 時之逐 5 分鐘 3 小時移動平均 CP (n=36) 演算，結果顯示最高機率 (0.14~1.0) 風向來自東北至南方，風速範圍為 0~3 m/s，最高 CP 值 (1.0) 之風向為南風，南風出現比例最高 (72%)。進一步以環域分析進行異味物種比對，判定上風處最可能污源為 F2。

關鍵詞：陳情事件、溯源追蹤、AI 系統、條件機率

一、前言

臺灣工業區與住宅區經常毗鄰而居，導致空氣污染陳情案件居高不下，全國每年平均達 8.5 萬件（含空污異味），為各縣市環保單位巡查的重點。然而，傳統的巡查方式因無法即時追蹤與舉證污染來源，難以及時解決問題。為此，政府近年來在許多工業區及敏感區域廣設空品微型感測器及風速儀，主要針對總揮發性有機物 (TVOC) 及細懸浮微粒 PM_{2.5} 等常見污染物進行即時監控。

文獻中常使用逆軌跡或 PMF 等受體模式，來追蹤污染源，但這些受體模式多適用於中大尺度之範圍（10 ~ 100 公里）(Cai et al., 2021; Hu et al., 2018)。國內外針對小區域（2 ~ 10 公里）事件導向的污染追蹤技術及相關研究並不多見。有鑒於此，本公司將採用感測器監測所得之空污濃度，結合風速儀之風速風向資料，針對特定空污陳情事件，開發一種創新的小區域即時智慧追蹤技術 TrkAI®。

二、溯源追蹤系統架構

TrkAI® 之系統架構如圖 1 所示，包含：查詢類、演算類、模擬類模組 (module) 及儀表板。每個模組以 3 個英文縮寫來命名，如原物料 raw material 以 RMT 表示、固定源 stationary sources 以 STS 表示、氣象 meteorological 以 MET 表示、陳情 petition 以 PET 表示等，針對具有特殊功能之模組會再新增 3 個字母，如 AutISC 之 Aut 代表自動組合 Auto 的意思，以利快速辨識各模組。模組分類原則及方式詳述如下：

- 查詢類模組：自原始資料，經查核補遺後，手動批次匯入資料庫，或是介接即時監測資料，透過 GUI 直接抽取資料庫所需欄位，並以圖表呈現，無涉及其他演算及統計程序。本類模組包含 5 個關聯式資料庫 (relational database)：原物料、固定源、氣象、異味閾值及陳情，及 7 個模組-動態圖臺 (MAP)、原物料 (RMT)、固定源 (RMT)、氣象 (MET)、周界 (BND)、異味閾值 (ODT)、陳情 (PET)。
- 演算類模組：圖表呈現涉及複雜演算或統計程序，如累積頻率分配、空間差值演算、高端估計及異味 (風險) 比值演算等。本類模組包含自評排放量 (SefSTK)、風花圖 (WDR)、濃度花圖 (CWR)、異味比值花圖 (OUR)、等濃度圖 (CTR)、關切風向 (ConWID)、條件機率花圖 (CPR)。
- 模擬類模組：外掛模擬程式，如空污擴散、逆軌跡或網格模式等，屬高階運算之模組類型。本類模組主要外掛空污擴散模式 ISCST3，包含自動組合 ISC3 擴散模擬 (AutISC) 及短均期 ISC3 擴散模擬 (SatISC)。
- 儀表板 (dashboard)：以命題為導向，介接線上即時監測資料，結合多個模組演算功能，產出多個圖表，協助決策者決策。TrkAI® 其結合 7 個查詢模組及 1 個 CPR 演算模組。



圖 1 TrkAI® 之系統架構圖

TrkAI® 系統入口首頁採用響應式網頁 (responsive web design, RWD) 之方塊入口 (portal) 方式，具有簡潔、外顯 (explicit)、直覺的優點，點選該方塊即可進入該儀表板或模組首頁。將滑鼠游標移到 TrkAI®，其組成該儀表板之資料及功能相關模組，皆以特定顏色呈現，其目的在於使用者可以第一時間知道該儀表板結合的資料庫及功能模組，如圖 2 所示。

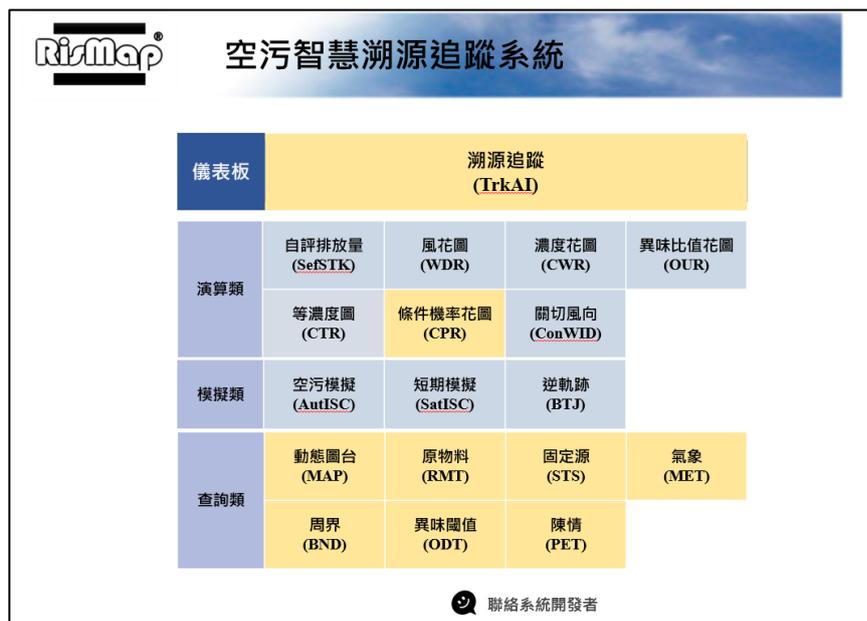


圖 2 TrkAI® 系統首頁圖

三、陳情事件溯源追蹤演算法

3.1 氣象站即時風向圖

TrkAI® 介接當地風速風向資料，於 Google map 動態圖台上呈現陳情點及監測點，透過環域分析自動比對環域範圍內之疑似污源及其排放物種，並呈現即時風向圖及風資料表。所謂的即時風向圖，係以監測站為中心點，使用者可透過 GUI，選取特定事件陳情點附近之一或多個監測站，設定環域半徑後，系統會將風向角度轉換為經緯度座標，並標示於圖台上，以箭頭表示風去的方向。即時風向圖每 5 分鐘會自動刷新，協助判斷上風處疑似污源，如圖 3 感測器 (含風速儀) 及 TrkAI 儀表板示意圖所示。

TrkAI® 亦可進行歷史事件查詢，使用者僅需於查詢類別選擇歷史資料，並輸入特定陳情日後，其餘操作步驟與上述相同，按下執行鍵後，即會產出「氣象站風資料表」呈現逐分風速風向資料，點擊資料表上的特定時間 (年/月/日/時/分)，於圖台上即呈現該時間之風向圖，按下匯出鍵，可儲存為 Excel 檔。

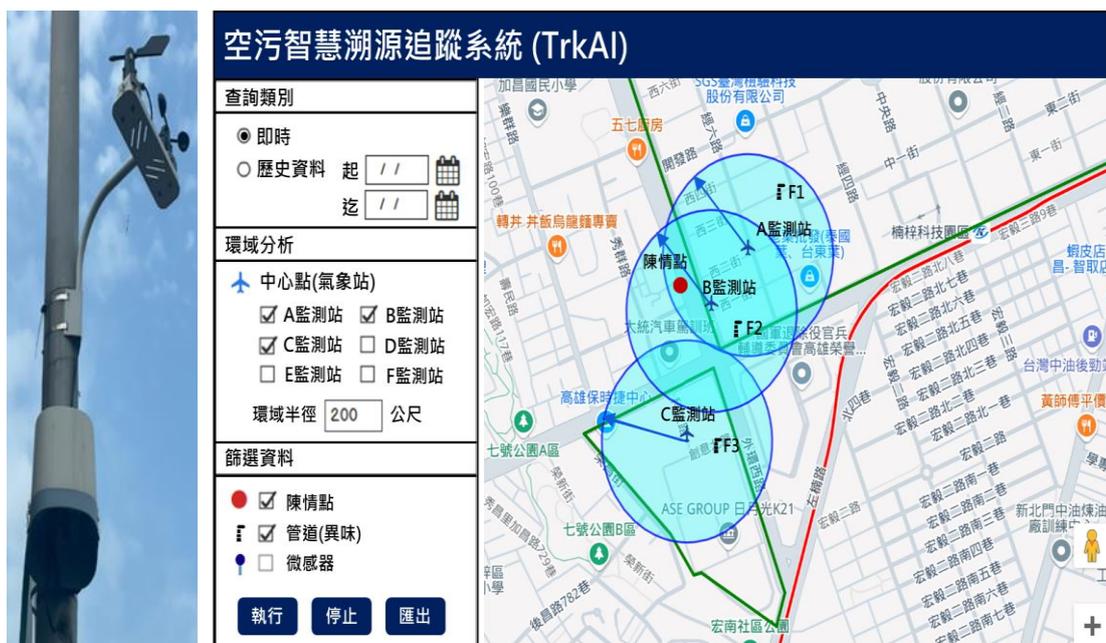


圖 3 感測器 (含風速儀) 及 TrkAI 儀表板示意圖

3. 2 氣象站即時風向圖

CPF (conditional probability function) 係指在特定風向風速之污染物濃度超過某設定閾值之機率 (Uria-Tellaetxe and Carslaw, 2014), 公式如下:

$$CPF = m_{\Delta\theta\Delta u} / n_{\Delta\theta\Delta u} \dots \dots \dots (1)$$

其中, m 為在 $\Delta\theta$ 風向及 Δu 風速範圍內超過閾值的次數, n 為在 $\Delta\theta$ 風向及 Δu 風速範圍內的總次數。一般常用的閾值為 75 百分位, 簡稱 P75 (Amato and Hopke, 2012)。透過 CPF 分析, 我們可以獲得最大條件機率 (CP) 值發生在那一個風向及風速條件下, 結合動態圖台之環域範圍, 繪製 CPR, 比對疑似污源。詳細演算步驟如下:

1. 透過 GUI 選取特定事件陳情點附近之一個或多個監測站
2. 考量陳情時間可能有所延遲, 統計陳情前 3 時之逐 5 分鐘 ($3 \times 60 / 5 = 36$) 風向風速及污染物濃度 (C)
3. 於各風向風速組 ($16 \times 5 = 80$), 計算各組次數 (n) 及 $C > P75$ 之次數 (m), 依公式 (1) 計算各組 CP 值
4. 設定環域分析範圍 (如 200~1000 m)
5. 繪製 CPR 且以多組顏色呈現不同 CP 值
6. 比對環域內高 CP 值之 ± 22.5 度之上風處含異味物種之疑似污源
7. 表列各監測站之最大 CP 值、風向、風速及疑似污源等資料
8. 也可分析特定歷史事件並呈現最大 CP 值表

以南部某科技園區陳情事件進行測試，該事件陳情點附近有 3 個監測站(如圖 3)，檢視 B 監測站，其陳情時間前 3 時之 3 小時移動平均 CPR 如圖 4，結果顯示 36 張 CPR 最高機率(0.14~1.0)風向來自東北至南方，風速範圍落在 0~3 m/s，表列 36 張 CPR 最高 CP 值之風向風速(如表 1)，發現最高 CP 值(1.0)為#21，其風向為南風，風速為 1~1.5 m/s，亦發現風向為南風出現比例最高(72%)。

本研究建議以最高 CP 之風向或最高出現比例之風向，判定最可能上風處之疑似污染源。本案例測試最高 CP 之風向及最高出現比例之風向均為南風，比對圖 3 及固定源及原物料資料庫之物種，判定上風處疑似污染源可能為 F2。其餘兩個監測站依照上述演算流程，其結果彙整如表 2 所示，結果顯示疑似污染源 F2 之機率(1.0)較其餘污染源來得大。



圖 4 B 監測站事件前 3 時之 3 小時移動平均 CPR

表 1 B 監測站 36 張 CPR 最高 CP 值之風向風速表

序號#	最高 機率	風向	風速 (m/s)	序號#	最高 機率	風向	風速 (m/s)
1	0.9	南南東	1~1.5	19	0.6	南	1~1.5
2	0.6	南南東	1~1.5	20	0.6	南	1~1.5
3	0.6	南南東	1.5~2	21	1.0	南	1~1.5
4	0.35	東北東	2.5~3	22	0.7	南	1~1.5
5	0.45	東北東	2.5~3	23	0.45	南	1~1.5
6	0.6	東北東	2.5~3	24	0.45	南	1~1.5
7	0.3	東北東	2.5~3	25	0.4	南	1~1.5
8	0.18	NA	<0.5	26	0.4	南	1~1.5
9	0.14	NA	<0.5	27	0.4	南	1~1.5
10	0.16	NA	<0.5	28	0.4	南	1~1.5
11	0.8	南	1~1.5	29	0.25	南	1~1.5
12	0.25	南	1~1.5	30	0.25	南	1~1.5
13	0.35	南	1~1.5	31	0.25	南	1~1.5
14	0.35	南	1~1.5	32	0.35	南	1~1.5
15	0.5	南	1~1.5	33	0.18	南	1~1.5
16	0.6	南	1~1.5	34	0.35	南	1~1.5
17	0.6	南	1~1.5	35	0.9	南	1~1.5
18	0.35	南	1~1.5	36	0.8	南	1~1.5

註：NA 表示靜風

表 2 3 監測站陳情前 3 小時之最高 CP 值、風向、風速及疑似污染源

監測站	最高機率	風向	風速 (m/s)	疑似污染源
A	0.2	東北~東北東	1~1.5	F1
B	1.0	東南~南南東	1~1.5	F2
C	0.5	東~東南東	0.5~1	F3

四、結論與建議

本公司針對小區域空污陳情事件，開發一套即時自動智慧追蹤系統 TrkAI®，該系統介接陳情點附近之微型感測器資料，包含：風向、風速及空污濃度資料。TrkAI® 具有環域分析、即時風向圖、異味源辨識及歷史事件查詢等功能，且每 5 分鐘自動追蹤疑似污源。當陳情事件發生時，可於動態圖台呈現陳情前 3 小時逐 5 分鐘之 3 小時移動平均 CP，以及最高 CP 值之風向風速表，藉由最高 CP 之風向或最高比例之風向，判定可能上風處之疑似污源。本公司於民 112 年高雄楠梓科學園區初步驗證 TrkAI® 之可行性，同年也於宜蘭大學舉辦之環境工程年會發表論文，並以歷史陳情事件資料批次測試 CPR 演算法，未來將進行線上測試，精進 AI 系統效能。建議各環保主管機關、業務主管機關或私人企業等採用這套先進的 AI 追蹤系統。

參考文獻

- [1] I. Amato F., Hopke P.K., “Source apportionment of the ambient PM2.5 across St. Louis using constrained positive matrix factorization,” *Atmospheric Environment* 46, 329-337. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.062> (2012).
- [2] Cai A., Zhang H., Wang L., Wang Q., Wu X., “Source Apportionment and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM2.5 in Handan: A Typical Heavily Polluted City in North China,” *Atmosphere* 12(10): 1232 (2021).
- [3] Hu W., Wang H., Dong L., Huang B., Borggaard O. K., Hansen H. C. B., He Y., Holm P. E., “Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: An integrated approach,” *Environmental Pollution* 237: 650-661 (2018).
- [4] Uria-Tellaetxe I., Carslaw David C., “Conditional bivariate probability function for source identification,” *Environmental Modelling & Software*, 59, 1-9 (2014).
- [5] 江舟峰、蔡清讚、余雅芳、葉嘉宏、鄭榕真、蔡經綸，「空污事件管理決策支援系統之建立與測試-以台灣臺中市工業區異味陳情為例」，第四屆海峽兩岸環境保護會議-福州論壇 (2014)。
- [6] 江舟峰、蔡清讚、余雅芳、葉嘉宏、鄭榕真、蔡經綸，「健康風險評估決策支援系統 - 異味陳情事件分析」，第十六屆兩岸環境保護會議 (2015)。
- [7] 江舟峰，「台塑六輕基地風險導向之環境管理決策支援系統 (RisMap®) 之開發與操作」，台灣塑膠工業股份有限公司，成果報告 (2019)。
- [8] 江舟峰，「臺灣重金屬總膳食調查 (TDS) 與台西村 XRF 監測之溯源分析」，環保署簡報 (2019)。
- [9] 江舟峰，「空污異味陳情事件追蹤與預警之決策支援系統開發」，日月光環保永續基金會，期末簡報 (2023)。
- [10] 余雅芳、吳勇興、吳承諺、江舟峰，「石化廠突發排放追蹤 AI 儀表板之開發與驗證」，第 31 屆環境工程學會研討會 (2019)。
- [11] 余雅芳、陳冠伊、倪詩蓓、張嘉津、江舟峰，「小區域異味事件溯源追蹤技術之開發與案例測試」，第 35 屆環境工程學會研討會 (2023)。

低能耗生活污水全回收探討-實廠節能與結晶回收氮磷技術案例

藍家齊¹、張鎮南²

¹美國喬治亞州 Gwinnett County 水資源中心董事

²東海大學環科工程系榮譽退休教授

Email: cnchang@thu.edu.tw

摘要

本文探討了五種種提升污水處理效率及資源回收的先進技術：

1. 化學強化初級處理 (CEPT)：此技術旨在提高初級沉澱的沉澱效率，從而減少後續生物處理的有機負荷，降低生物處理池的氧氣需求達 30%至 40%。通過增加初沉污泥的產量，進入厭氣消化池後可產生沼氣，進一步用於發電，實現污水處理廠的能源再生，朝向零能耗的目標邁進。
2. 改良生物處理技術 (Anoxic/Aerobic 組合技術)：該技術結合兼氧池與好氧池，微生物利用結合形式的氧 (如 NO_3^- 或 NO_2^-) 在兼氧池中進行有機物的代謝，並顯著提升氧氣轉移效率，降低曝氣能耗 30%至 50%。
3. 放流水回收再使用：通過高標準的污水處理技術，放流水可超過飲用水標準，安全放入湖中作為水源再使用。
4. 磷酸銨鎂 (MAP) 肥料回收：此技術透過污泥厭氧酸化以及污泥消化，回收氮和磷資源，將污泥中的氮磷轉化為高附加值的肥料 (如 Crystal Green®)，有效減少養分直接排放對環境的影響，實現廢物資源化。
5. 能源回收再利用：通過集中管理廢棄污泥，回收高濃度有機污水和餐館廢棄油脂，產生沼氣，用於尖端時段發電。並結合即時電價結構的轉換，達到污水處理廠電費節省的最大化。

一、背景與挑戰

快速城市化和人口增長帶來的污染物負荷，對全球尤其是城市污水處理廠構成了前所未有的壓力。自 1970 年美國《清潔水法案》實施以來，污水處理設施的普及，極大改善了水資源品質及環境質量。然而，隨著排放標準日益嚴格，以及化學藥品和能源成本的急劇上升，傳統污水處理廠面臨新的挑戰，包括：

1. 高能耗問題：曝氣環節作為生物處理的核心技術，佔據了污水處理廠 45%-75% 的操作總成本，是最大的耗能來源。
2. 資源回收需求：在全球水資源短缺和肥料價格上漲的背景下，污水處理廠的營養物回收（特別是氮和磷）成為降低環境負擔和創造經濟效益的關鍵方向。
3. 台灣的新挑戰：為保護周邊水體生態，2025 年起環境部將逐步落實部分廢水氮磷濃度的逐期加嚴管制，進一步促使污水處理技術向高回收與低能耗方向發展。

本研究聚焦於美國污水處理廠的真實案例，探討能耗降低及資源全回收技術的應用與成效。

二、污水廠降低能耗程序

2.1 化學強化初級處理（Chemically Enhanced Primary Treatment，CEPT）

通常在污水處理廠中，傳統的初級處理是利用初沉池處理技術，通過重力方法去除懸浮固體，進而去除廢水中的無機和有機污染物。為了增強初級處理效果，化學強化初級處理是一種提升污水處理效率的方法。在初沉池中加入適量混凝劑和聚合物可加速固體沉降，和提升污染物去除效率 [1] [4] [6]：

- 生物需氧量（BOD）去除率從 25%-50% 提升至 50%-80%。
- 懸浮固體（TSS）去除率從 40%-60% 提升至 70%-90%。

此技術能顯著減少進入傳統生物處理池的有機物負荷，相對減少生物處理的氧氣需求約 30%至 40%[2]，從而降低能源消耗，實現節約能源。與傳統初沉池相比，CEPT 因其高效能和成本效益，已成功應用於許多污水處理廠中。如美國喬治亞州亞特蘭大的 R. M. Clayton 水回收中心 (140 MGD) 及 Cobb County 的四個水回收設施 (20 MGD Noonday WRF, 12 MGD Northwest WRF, 40 MGD South Cobb WRF, and 60 MGD RL Sutton WRF) 均已運行 CEPT 超過 20 年，節能效果顯著 (圖 1)。

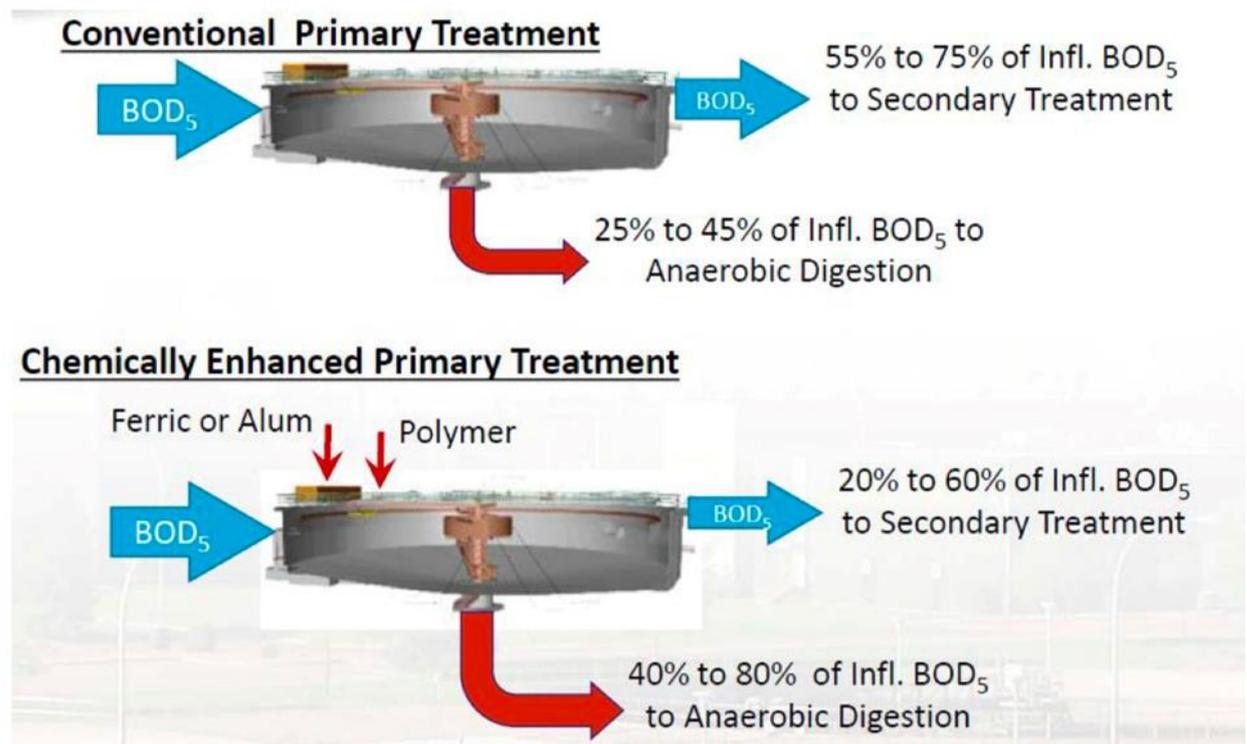


圖 1 化學強化初級處理 (CEPT) 功能示意圖[3], 可以轉移水中大量有機物至污泥, 有助後端處理單元減能及大幅增加污泥消化產能

CEPT 常用藥劑：

鐵鹽和鋁鹽 (FeCl_3 、 FeCl_2 、 AlCl_3 、and $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) 是常用的混凝劑。根據廢水特性及處理目標，劑量可能會有所不同，研究發現，25-40 mg/L 的混凝劑劑量及 0.5-2.0mg/L 的聚合物 (polymer) 劑量，能在效率與成本之間達成最佳平衡 [2] [5] [6]。

混合條件的影響：

快速混合和膠凝階段的設置對 CEPT 處理效率至關重要。快速混合階段需確保溶液均勻，而膠凝階段則強調顆粒的聚集與沉降。因此，適當

調整速度梯度及水力停留時間，不僅能提升去除效率，也能避免大幅改造基礎設施所帶來的經濟負擔[6]。

化學強化初級處理 (CEPT)，因為混凝劑的添加，初沉池所產生的初級污泥，沒有通過好氧處理，故而污泥中含有的能量 (BTU) 較高，另外因為混凝劑的加入，產生額外的 30% 到 50% 的初級污泥，此污泥送到厭氣消化池時，它將產生大量的沼氣，可用作電力生產的能源，進一步提升能量的回收[4]。

2.2 生物脫氮處理 (Biological Nitrogen Removal, BNR)

「厭氧」(Anaerobic)

「厭氧」是指環境中不含溶解氧 (O_2)，或結合形式的氧，例如硝酸鹽 (NO_3^-) 和亞硝酸鹽 (NO_2^-)。在這種情況下，微生物依賴無氧代謝來生存和繁殖。

「兼氧」(Anoxic)

「兼氧」是指環境中不含溶解氧 (O_2)，但存在結合形式的氧，例如硝酸鹽 (NO_3^-) 或亞硝酸鹽 (NO_2^-)。與厭氧條件不同的是，兼氧條件中微生物利用結合氧進行代謝。

「好氧」(Aerobic)

「好氧」好氧是指氧氣 (溶解氧) 充足的環境，進行有氧的微生物代謝。在有氧呼吸中，微生物利用水中的溶氧 (O_2) 作為代謝反應的電子受體，以支持其能量轉換過程和生命活動。微生物在水中若有溶氧的存在，則優先使用水中的溶氧，來進行其能量轉換和生命活動。若無溶氧的存在，則採用結合氧，來進行代謝。若溶氧及結合氧都不存在，微生物則依賴無氧代謝來進行生存和繁殖。

人類活動是導致水中高濃度的氮和磷營養物聚集的主要原因。這種優養化現象最明顯的表現是夏季發生藻類水中的生長，過度營養化的問題造就了水中的低溶氧，以及甚至魚類死亡的慢性癥狀。此外，藻類和渾濁度的增加，增加了對飲用水進行加氯消毒的需求，反而又導致更高的消毒副產物，這些副產物已被證明會增加罹癌的風險。過量的營養物質還會刺激微生物的活動，例如 *Pfisteria*，這可能對人體健康有害[7]。大約 25% 的水體損害是由於營養相關原因 (例如營養物質、氧氣

消耗、藻類生長、氮和磷、有害藻類、生物完整性和渾濁度)。為了減少營養物損傷的數量，許多點源排放者對氮和磷的排放限制更加嚴格。為了實現這些新的、更低的出水限制，設施已經開始超越傳統的處理技術。

2.3 生物脫氮處理 (BNR) 的低能耗分析

生物脫氮是一種用於去除污水中總氮 (TN) 污染物的技術，主要依賴硝化作用 (Nitrification) 和脫硝作用 (denitrification) 進行總氮的去除。在一般污水處理廠中，取決於水溫，在曝氣池中，5 到 8 天以上的平均細胞停留時間 (MCRT)，則會產生硝化作用，一類自營性細菌，最常見的是硝化單胞菌，在有氧呼吸中，微生物需要水中的溶氧 (O_2) 作為代謝反應的電子受體，將氨氮氧化為亞硝酸鹽，然後亞硝酸鹽被另一個自營性細菌群氧化成硝酸鹽，最常見的是硝酸桿菌。硝化作用降低水中 pH 值。

而脫硝作用的過程，則是在兼氧的狀況下，將硝酸鹽還原為氮氣，放出鹼度 (alkalinity)，提高水中 pH 值。異營細菌和自營細菌都能夠脫硝化。最常見和分佈最廣泛的脫硝化細菌是假單胞菌屬，它們可以使用氫、甲醇、碳水化合物、有機酸、醇、苯甲酸鹽和其他芳香族化合物進行脫硝 [9]。在 BNR 系統中，硝化是控制反應，因為氨氮氧化細菌缺乏功能多樣性，具有嚴格的生長要求，並且對環境條件敏感。硝化作用本身實際上並不能去除廢水中的氨氮。相反，脫硝作用將氧化形式的亞硝酸鹽 or 硝酸鹽轉化為氮氣。硝化作用發生在有溶氧條件下，脫硝作用發生在無氧條件下 [9][10]。

目前，許多污水處理廠採用硝化-脫硝化 (Nitrification and Denitrification) 的改良處理技術 (圖 2)。於曝氣池 (Aerobic Basin) 之前端，設置一個兼氧池 (Anoxic Basin)。曝氣池中的懸浮污泥通過回流泵回流至兼氧池的前端，回流液中含有硝酸鹽 (NO_3^-) 和亞硝酸鹽 (NO_2^-) 的結合氧，這些物質在兼氧條件下被微生物利用進行生物代謝。經過兼氧池處理的懸浮污泥則重力回流至曝氣池。由於兼氧池流出的活性污泥液體不含溶氧和結合氧，這樣可以有效避免絲狀菌造成的污泥膨脹，從而提高污泥的穩定性，並提升溶氧的曝氣轉移效率 (Oxygen Transfer Efficiency)。NDN (兼氧/好氧技術) 的氧氣轉移效率提升主要與氧氣轉移效率的 α 因數相關，常規處理為 0.2-0.5，單硝化技術為 0.4-0.7，而 NDN 可達 0.5-0.75 [11]。

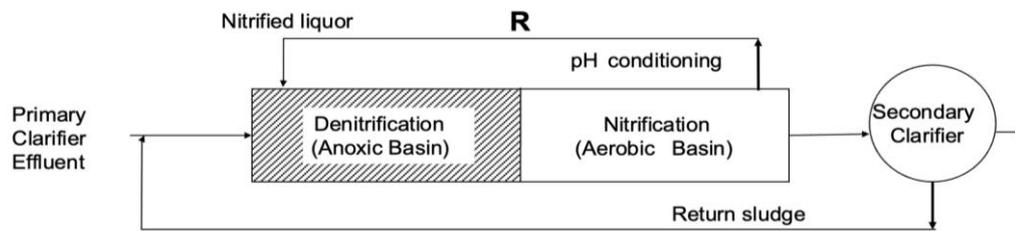


圖 2 生物硝化及脫硝處理程序示意圖 [8]

經濟分析呈現，NDN 運營具有較低的曝氣成本，減少氧氣的消耗，若是一個較大的污水處理廠，設有初沉池，採用兼氧及好氧 (Anoxic/Aerobic) 的廢水處理程序，有降低 30%到 50%的能耗機會 [11]。

2.3 脫氮處理系統的設計與選擇要點

選擇最合適的系統配置主要取決於目標排放濃度以及設施是新建還是改造。新建設施在選擇 BNR 配置時更加靈活，而改造現有廠房時需考慮以下因素：

- 曝氣池的大小與曝氣系統類型
- 沉澱池容量
- 污泥處理單元
- 操作人員技能

這些因素決定了 BNR 系統的經濟性與可行性，並影響改造成本和運行效果。

三、污水廠降低能耗程序

3.1 水資源的回收與利用

FWHWRC，位於美國喬治亞州，是一座屢獲殊榮的先進污水處理設施，設計處理能力達 60 MGD（約 27.3 萬噸/日），進流水總磷 (Total Phosphorus) 9 mg/L，總氮 (TKN) 45 mg/L。由於當地水資源匱乏，經處理後的放流水全回收，被排入 Lake Lanier 湖，儲留稀釋一段長時間後，成為全縣飲用水的主要水源，因此對放流水水質的要求極為嚴格，該設施被視為全美污水淨化技術的主要典範之一。

該廠採用三段式生物去除法（厭氧/兼氧/好氧）進行二級生物處理（圖 3a），去除污水中的總氮和總磷。此外，還結合多項三級處理技術，包括添加混凝劑沉澱剩餘的總磷 (TP)，使用薄膜過濾固體顆粒物，並進行兩段式臭氧處理，分別為“前臭氧”和“後臭氧”（圖 3b）。“前臭氧”處理將生物處理後的不可分解有機物（如藥物化合物）氧化為可生物分解的有機物。隨後，通過活性碳吸附過濾，利用附著在活性碳上的微生物分解“前臭氧”產生的可分解有機物，這種活性碳的生物過濾器每 15 年才需更換一次介質。最後，使用“後臭氧”進行消毒。

在消毒方面，20 年前全美污水處理廠多以加氯進行消毒，而目前許多污水廠已轉向使用紫外線 (UV) 消毒。由於對高水質放流水及回收的要求，FWHWRC 選擇使用臭氧進行消毒。

FWHWRC 在總磷和氨氮濃度的控制上達到全球領先水平，為有效防止飲用水水源藻類的過度生長及水質惡化，放流水的總磷濃度標準必須低於 0.08 mg/L，氨氮濃度低於 0.5 mg/L。因此，該廠超越了傳統污水處理標準，採用薄膜過濾、臭氧氧化、活性碳吸附及臭氧消毒等先進三級處理技術，成為全球廢水淨化技術的領先者。這些創新技術不僅滿足了環境保護的嚴格要求，還確保了當地居民飲用水的安全與可持續性 [13]。

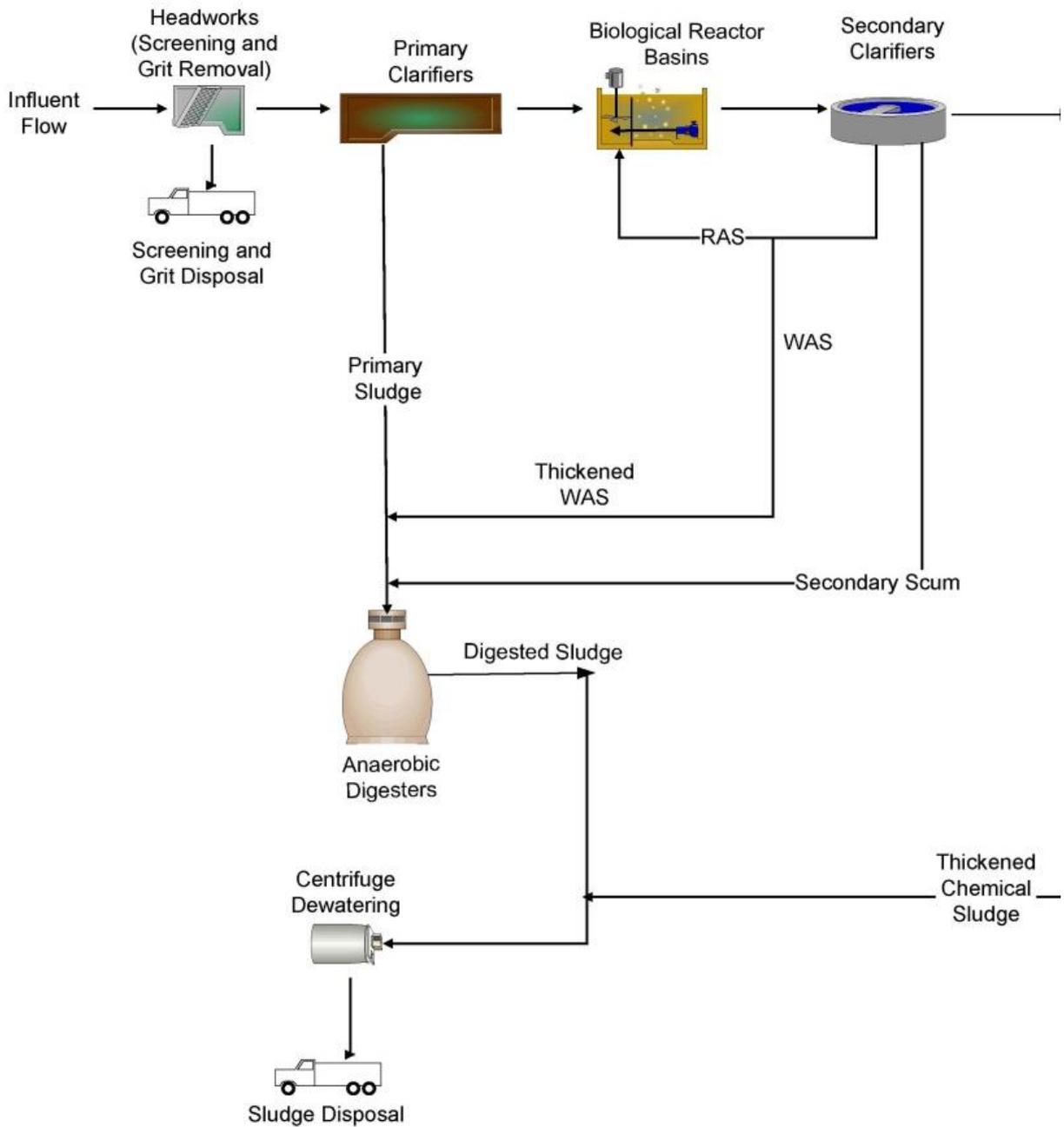


圖 3a F. Wayne Hill 水資源中心二級處理程序流程圖

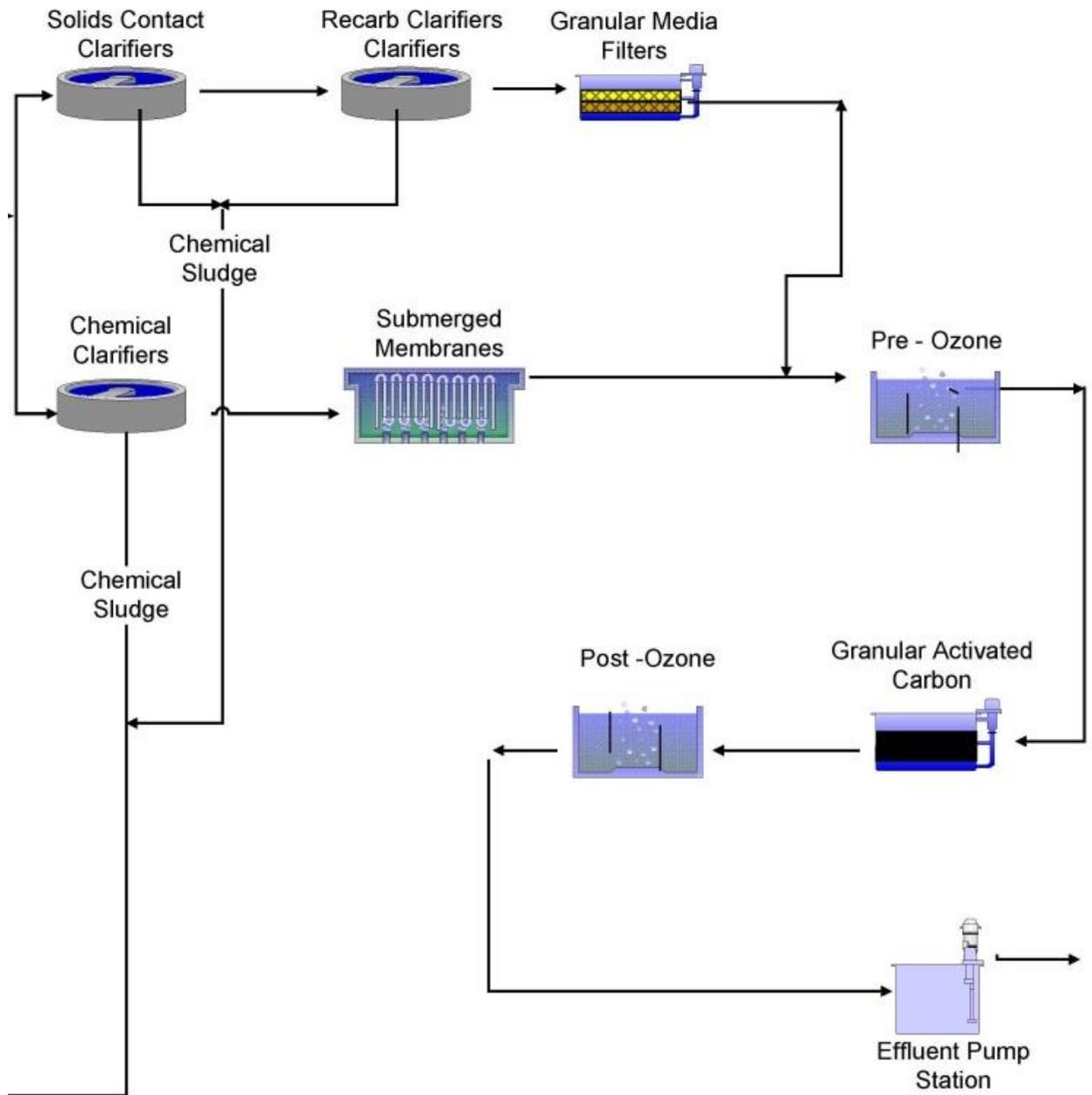


圖 3b F. Wayne Hill 水資源中心三級處理程序流程圖

3.2 磷酸銨鎂 (Struvite) 的回收與利用

磷是地殼中排名第十一的豐富元素（約占 0.1%），主要以磷酸鈣岩石形式存在。作為一種不可再生的有限資源，磷是植物生長的必要營養素，對保障全球糧食安全至關重要。然而，隨著人口增長和磷資源的過度開採，大量磷隨廢水排入水體，導致水體富營養化及藻類過度繁殖，進一步惡化水質，影響飲用水供應、休閒用途，並顯著增加水處理成本。同時，全球磷資源的儲量正迅速縮減，據估算僅能供應約 100 年，這引發了人們對未來資源短缺的深切憂慮[12]。

在台灣，廢污水處理後的排放水中，磷酸鹽及氨氮濃度仍然偏高，恐對水體造成污染。為有效控制此類污染，回收磷酸銨鎂 (Struvite) 成為一種可行方案。在美國，雖然磷酸銨鎂回收技術仍處於發展初期，但其巨大的潛力已得到初步驗證。

實施 OSTARA Pearl® 肥料結晶回收系統之前，FWHWRC 的固體處理技術，包括使用初級污泥和生物污泥機械濃縮機 (RDT)、濃縮污泥的厭氧消化、消化污泥儲存，離心機脫水。卡車再將脫水處理後的濾餅運到垃圾填埋場進行最終處理。實施肥料結晶回收之前污泥處理流程示如圖 4。

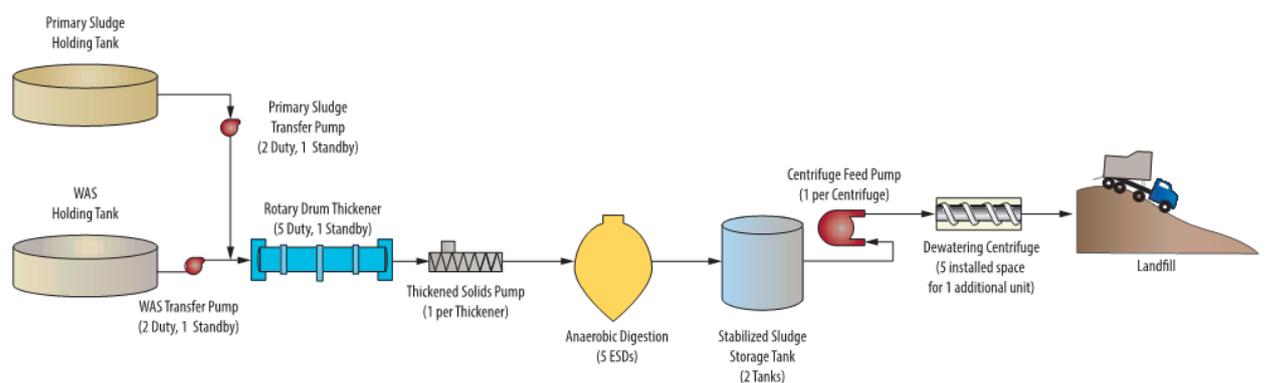


圖 4 F. Wayne Hill 水資源中心實施肥料結晶回收之前的污泥處理流程

3.2.1 挑戰與解決方案

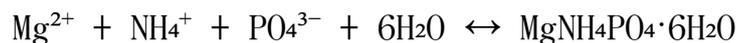
然而，FHWRC 長期面臨磷酸銨鎂沉澱 (Struvite) 帶來的挑戰。磷酸銨鎂是一種類似混凝土的結晶物質，會在污水管道和設備內沉積，導致管道堵塞、設備損壞，並降低污泥處理效率。過去，該設施採用高壓水射流清理沉積物，但此方法耗時費力，且可能引發下游設備的操作問題。

為解決這一問題，FHWRC 探索多種解決方案。最終，Gwinnett County 選擇了 OSTARA Pearl® 養分回收技術，將磷酸銨鎂轉化為高價值的商業肥料產品 Crystal Green®。這一創新解決方案成功解決了磷酸銨鎂的堆積問題，同時實現了經濟效益與環境效益的雙贏成果[13]。

在全球磷資源日益短缺的背景下，這類資源回收技術的重要性不僅限於提供額外收入，更有助於確保設施安全，進一步提升水資源管理的可持續性與韌性。FHWRC 的實踐為其他地區提供了重要的參考，展示了如何將挑戰轉化為機遇，實現環境保護與經濟增長的協調發展。

3.2.2 磷酸銨鎂的基本化學結構

磷酸銨鎂 ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 的形成來自過飽和溶液中遊離的鎂離子 (Mg^{2+})、銨離子 (NH_4^+) 和磷酸根離子 (PO_4^{3-}) 之間的化學反應，該反應可表示為以下化學方程式[12]：



根據此反應式，形成磷酸銨鎂的條件是三種離子以等摩爾比例存在於溶液中。也就是說，每消耗 1 摩爾的 Mg^{2+} ，需要同時消耗 1 摩爾的 NH_4^+ 和 1 摩爾的 PO_4^{3-} ，並與 6 摩爾的水分子結合，才能生成 1 摩爾的 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 結晶。

這一反應受到溶液 pH 和濃度條件的影響，通常在 pH 值介於 8–9 之間時最有利於磷酸銨鎂的形成 (圖 5)，因為此時離子態的 PO_4^{3-} 濃度相對較高。若某一種離子 (例如 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 或 PO_4^{3-}) 的濃度不足，反應可能無法完全進行，導致沉澱生成效率降低。

因此，在實際應用中，需確保溶液中這三種離子的供應量接近等摩爾，並調整溶液的 pH 值以優化沉澱生成的條件。

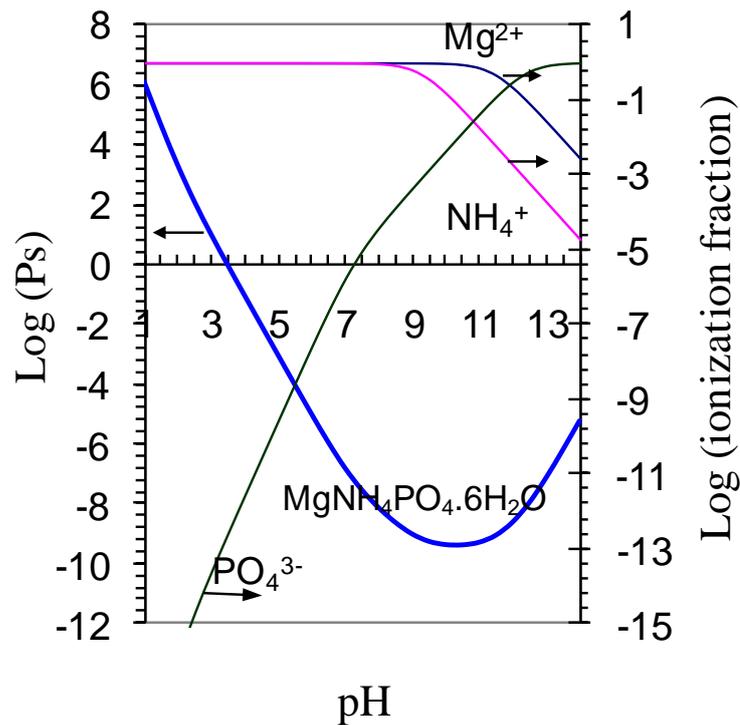


圖 5 磷酸銨鎂的條件溶解度與 pH 值的關係

OSTARA Pearl® 技術結合專利 WASSTRIP® 技術，促進磷酸銨鎂的受控沉澱與回收。該技術利用富含磷和鎂的濾液，生成 0.9 至 3.0 毫米的 Crystal Green® 顆粒。FWHWRC 於 2015 年啟用磷酸銨鎂結晶回收系統，成為美國第三個全面安裝此技術的污水處理廠。

3.2.3 回收技術及實施

Ostara 系統回收與萃取肥料的經濟可行性，與污水處理廠的規模和處理量密切相關。若污水處理廠規模過小，回收作業可能缺乏經濟效益。此外，該系統的運作還取決於氫氧化鎂的加入，因為 Ostara 技術需要通過向污水中添加鎂，與氮和磷結合後形成沉澱。

在 Gwinnett County，氫氧化鎂的加入有其特殊應用，主要是在污水管道上游添加化學藥品 $Mg(OH)_2$ ，提升污水的 pH 值，從而抑制硫化氫的釋放，減少臭味對環境的影響。經過此步驟處理後，含鎂的污水流入污水處理廠，可進一步用於 Ostara 回收系統所需的鎂資源。

此外，該技術與污水處理過程中去除磷的方法密切相關。若採用化學強化初級處理 (CEPT)，可在略高於中性的 pH 值下，將進流水中的磷與混凝劑結合，於初沉池中生成磷酸鹽沉澱。如果採用厭氧、兼氧和有氧結合的生物處理方式，生物污泥中的磷含量可從 1% 提高至 2.3% 以上。然後不論是初步沉澱池的化學污泥或是高磷酸的生物污泥，經過 WASSTRIP 反應器，大約 2 到 4 小時的厭氧反應，由於污泥酸化作用，磷酸會大量溶解於水中，然後再將經過脫磷後的污泥，再送入長時間厭氧硝化處理，硝化後的污泥脫水過濾液中則含豐富的氨氮。這時，將兩股廢水（含高濃度磷的廢水和含高濃度氮的廢水）混合至 Pearl® 反應器中，調整 pH 值至 8.5，便可自然生成磷酸銨鎂 (MAP) 的結晶沉澱，實現高效回收利用（圖 6）。

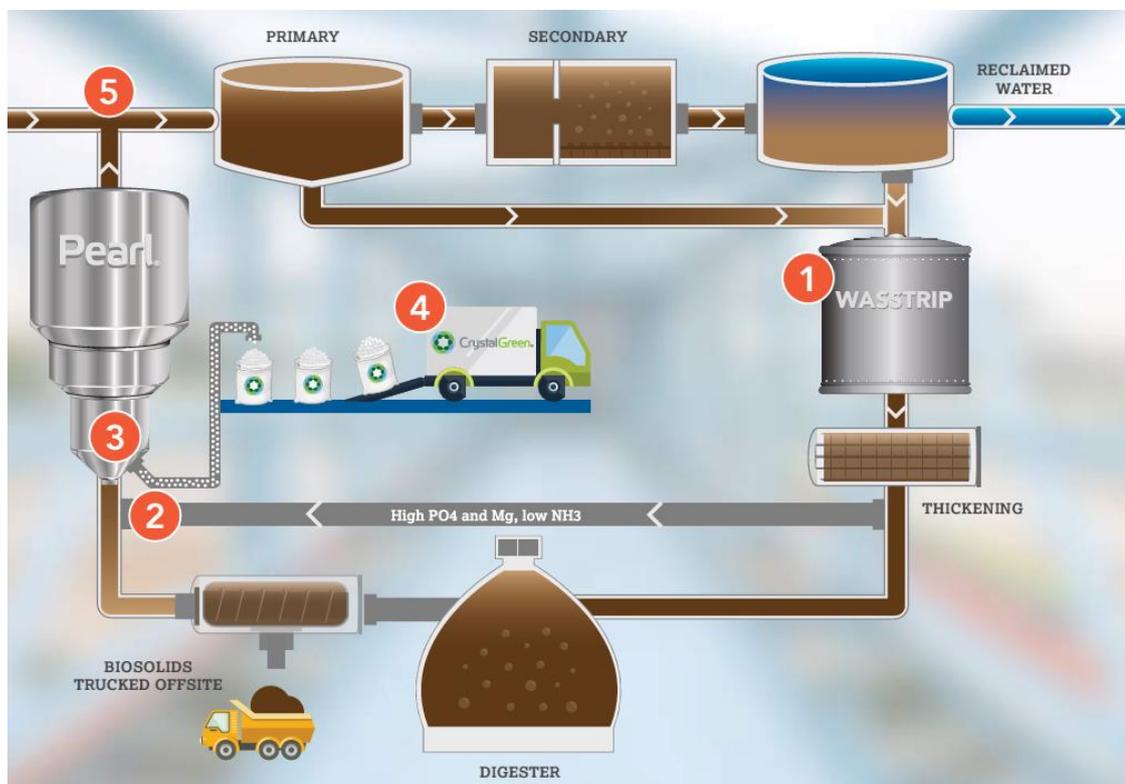


圖 6 OSTARA Pearl® 肥料結晶回收技術 [14]

磷酸銨鎂結晶經過脫水、乾燥、根據顆粒大小進行分類，然後轉移到儲存筒倉。成品裝在一噸重的超級袋中，並在現場儲存起來，以便最終用作肥料（圖 7）。



圖 7 裝在袋中的磷酸銨鎂肥料 [14]

3.2.4 設計技術與性能

1. 磷酸銨鎂回收系統組成與功能：

- 系統包括 WASSTRIP 反應器、Pearl® 反應器（圖 8）、濾液儲罐及化學添加系統。
- 每個反應器每日產出約 2 噸高附加值結晶肥料，成品以每噸 400 美元的價格出售，帶來穩定收入。

2. 技術特點：

- 在污水管綫上游添加 $Mg(OH)_2$ （氫氧化鎂），有效控制管道臭氣和腐蝕，同時降反應器鎂源的需求，進一步降低運行成本。
- 使用 PVC 與 HDPE 管道設計，防止磷酸銨鎂沉積，顯著降低系統維護成本。

3. 操作優勢：

- 系統每年節省超過 100 萬美元的化學藥品，污泥處理與能源費用。
- 通過穩定肥料銷售和運行成本降低，實現 15 至 20 年內回收投資成本，充分展現其經濟可行性。

磷酸銨鎂回收系統, 不僅有效實現高附加值肥料回收, 減輕環境負擔, 同時通過創新設計和運行管理降低系統維護與化學品需求, 確保其在污水處理中的競爭力和可持續性。



圖 8 磷酸銨鎂回收結晶系統 Pearl® 反應器 [14]

3.2.5 設計技術與性能

磷酸銨鎂回收技術很好地展示了在經濟和環境層面的雙重價值。

經濟效益

1. 降低運行成本：減少污泥處理和設備維護需求，直接降低運行成本。
2. 創造額外收入：通過肥料銷售，不僅抵消磷酸鹽和氨氮去除成本，還能創造穩定的經濟回報。
3. 市場競爭力：在全球肥料價格上漲的背景下，磷酸銨鎂回收具有更高的經濟吸引力和市場潛力。

環境效益

1. 高效去除污染物：總磷去除效率達 85%，氮氮去除效率達 30%，顯著減輕了對水體的環境壓力。
2. 高純度產品：如 Crystal Green®，其磷（33%）和氮（8%）含量，滿足農業市場對優質肥料的需求，推動資源的循環利用。

實例與未來發展

Gwinnett County 的磷酸銨鎂回收系統成功驗證了該技術在實際應用中的創新性和經濟效益。隨著技術的進一步改良與普及，該技術將成為全球污水處理和資源利用的一個標杆模式，助力可持續發展目標。這些技術與成果不僅符合經濟需求，也能緩解資源短缺和環境壓力，具有廣闊的應用前景。

3.3 能源再生與利用

再生能源旨在提升能源生產效率並降低電力成本。全縣污水處理的基本原則是將處理後的污水就近放流（Decentralized），並對廢棄污泥進行集中管理（Centralized），以減少污泥處理的設備及降低操作成本。自 2008 年以來，Gwinnett County 建造了另一座 22 MGD (8.3 萬 CMD) 的污水再生設施，該污水處理廠的初沉池污泥及生物廢棄污泥通過管道輸送至 FWHWRC。FWHWRC 的進流水包括另一污水廠的液體污泥，其平均特性包括：COD (730 mg/L)、BOD (300 mg/L)、TSS (500 mg/L)、TKN (45 mg/L)、NH₃ (30 mg/L) 及 TP (9 mg/L)。因此，FWHWRC 的厭氣消化槽，不僅接收了大量的初沉污泥及廢棄生物污泥，並設置了高濃度有機廢水和廢棄油脂 (HSW) 的接收設施，以提供厭氣消化池的沼氣產量最大化，並利用 2.1 MW 的沼氣發電機產生的電力，滿足全廠 20% 的電力需求。

研究顯示，高濃度有機廢水和廢棄油脂是共消化的最佳高強度廢物。然而，HSW 總輸入有機物的比例（以化學需氧量 COD 衡量）超過 20% 的初沉污泥及廢棄生物污泥，則會對厭氣消化槽的沼氣產量產生負面影響。

此外，FWHWRC 與 Georgia Power 電力公司進行了協商，將基本電價從日費率 (Daily Rates) 改為時費率 (Hourly Rates)，電力成本根據公用事業公司的系統需求每小時調整一次。FWHWRC 根據電力定價結構，確定運行沼氣發動機的最佳時機。在電價高峰期，電力成本可能超過 0.40

美元/kWh，這一時期正是發電機發電的最佳時機，從而使 FWHWRC 的平均電力成本從每千瓦時 (kWh) 0.07 美元降至 0.038 美元/kWh。

通過集中管理廢棄污泥，回收高有機廢棄物和廢棄油脂並注入厭氧消化器以增加氣體產量，加上即時電價結構的轉換，使 FWHWRC 能夠顯著降低其平均電力成本，從而每年節省超過 200 萬美元操作成本。

四、結論與展望

本文探討了污水處理技術的前沿趨勢及其資源回收的實際應用價值，總結如下：

1. 化學強化初級處理 (CEPT) - 不僅降低了生物處理的氧氣需求和能耗，還提高了能源回收的效率，特別是在沼氣產量的提升上有顯著成效。
2. 兼氧/好氧技術 (NDN) - 結合技術的優勢，通過減少曝氣需求來提升整體氧氣利用效率，從而降低運營成本，符合節能要求。
3. 資源回收技術 -
 - 3.1 放流水回收：通過高標準的污水處理程序，三級處理後的放流水達到超過飲用水標準，安全地放入湖中作為水源使用
 - 3.2 磷酸銨鎂 (MAP) 回收：將廢水中的氮、磷等成分轉化為高附加值產品（如肥料），不僅減輕了環境負擔，實現了廢物資源化，還創造了額外的經濟效益。
 - 3.3 能源回收再利用：通過集中管理廢棄污泥，回收高濃度有機廢水和廢棄油脂，並結合即時電價結構的調整，最大化污水處理廠的電費節省。

在面對嚴格的排放標準和能源挑戰的背景下，低能耗與資源再生技術的結合將成為污水處理廠永續發展的關鍵方向，並為台灣及全球其他地區提供重要的參考依據。

參考文獻

- [1] Checa-Fernández, L. M. Ruiz, J. M. Torre-Marín, A. Muñoz-Ubina, J. I. Pérez, and M. A. Gómez, “Direct application of chemically enhanced primary treatment in a municipal wastewater treatment plant: A case study”, *Chemical Engineering Research and Design* Volume 204, (April 2024, Pages 183-192).
- [2] Maktabifard M., and E. Zaborowska, J. Makinia “Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants through energy savings and enhancing renewable energy production” *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, (October 2018).
- [3] Johnson, T., “Chemically Enhanced Primary Treatment for Carbon Redirection”, *Sustainable Wastewater Infrastructure of the Future*, (August, 2018).
- [4] Ansari, M., and M. Farzadkia, “Chemically enhanced primary treatment of municipal wastewater; Comparative evaluation, optimization, modelling, and energy analysis” *Bioresource Technology Reports* (June, 2022).
- [5] Wang H., F. Li, A. Keller, and R. Xu “Chemically enhanced primary treatment (CEPT) for removal of carbon and nutrients from municipal wastewater treatment plants: a case study of Shanghai”, *Water Sci Technol* (2009).
- [6] Hea, Q., H. Wanga, C. Xub, J. Zhanga, W. Zhanga, Z. Zoua and K. Yan, “Feasibility and optimization of wastewater treatment by chemically enhanced primary treatment (CEPT)”, *CHEMICAL SPECIATION & BIOAVAILABILITY*, (2016).
- [7] U.S. EPA water quality standards, (USEPA 2007).
- [8] Taniguchi N., S. Koike, T. Murakami, and S. Nkayama, “High Efficiency Nitrogen Removal Using Multi-Stage Air-Lift Recirculation for Nitrogen and Denitrification Process”.
- [9] Metcalf & Eddy, “Wastewater Engineering – Treatment, Disposal Reuse”, (4th Edition, 2011).
- [10] Benefield, L. D., and C. Randall, “Biological Process Design for Wastewater Treatment, (1993).
- [11] D. Rosso, and Stenstorm M., “Energy-Saving Benefits of Denitrification”, *American Academy of Environmental Engineers and Scientists* (2007).
- [12] Krishnamoorthy N., B. Dey, Y. Unpaprom, R. Ramaraj, G. Maniam, N. Govindan, S. Jayaraman a, T. Arunachalam, and B. Paramasivan, “Engineering principles and process designs for phosphorus recovery as struvite: A comprehensive review”, *Journal of Environmental Chemical Engineering* (October 2021).

- [13] Mohan, G. R., J. C. Lan, R. Latimer, M. Lynch, and P. Pitt, “Nutrient Recovery Performance and the Optimization of Biological Phosphorus Removal at the F. Wayne Hill Water Resources Center”, Environmental Science, Biology (2018).
- [14] “Basics of Biological Phosphorus Removal and Operational Lessons Learned” WEF Webcast (May 2017).

致謝

感謝東海大學環科工程系莊硯勛博士後研究員及環興工程顧問公司王志遠經理協助，特表感謝。

徵稿啟事

- 一、本會會訊提供會員及專家學者發表環境領域新知、技術與專業經驗等。
- 二、專題稿件以環境相關理論與實務、環境法規、環境保護理念之論述為原則，採技術報導或論文等撰寫形式皆可，文長以 8000 字以內為原則，所附圖表或照片應清晰，稿件禁止以公司集體智慧，有著作權、業主版權疑問或抄襲複製等情事，以免觸法。
- 三、會訊以雙月刊週期出版，出版日期為奇數月 10 日，投稿稿件須於出版日之 15 日以前，以電子檔案寄（送）抵公會。
- 四、專題稿件稿酬之文字單價為每字新台幣 2 元，原創照片與圖表單價為每幀新台幣 500 元，每篇稿酬以新台幣 12,000 元為上限；特殊專文之稿酬另案處理。
- 五、本會負有以下權利與義務：
 - （一）專題稿件之審閱。
 - （二）提供審閱意見請撰稿者修改或回覆。
 - （三）決定專題稿件刊登與否。專題稿件之審閱及審閱意見之提供，必要時得請相關專長之專家學者擔任。
- 六、會訊為專業交流之發佈管道。具名撰稿者刊登之稿件內容，不代表本會的意見或立場。具名撰稿者應遵守智慧財產權等相關法令，以及無條件負擔因其稿件內容刊登所衍生之責任。

各公會會員大會、理監事會會議紀錄

中華民國環境工程技師公會全國聯合會

無

台灣省環境工程技師公會

無