

農業水域(埤塘及水庫)太陽光電案場對灌溉水質之影響評估

Impact Assessment of Floating Photovoltaic Systems on Irrigation Water Quality in Agricultural Ponds and Reservoirs

助理研究員¹

陳凱琳

Kai-Lin Chen

助理研究員¹

彭美禎

Mei-Jen Peng

助理研究員¹

陳信安

Hsin-An Chen

研究員¹

張大偉

Ta-Wei Chang

專門委員²

黃瓊瑤

Huang, Chiung-Yao

副組長²

梁秋萍

Chiu-Ping Liang

摘要

臺灣積極推動再生能源以達成「2050 淨零排放」目標，農業部農田水利署亦配合相關政策推行設置水域性太陽光電設施，為確保埤塘與農業水庫設置太陽光電設施後，水質不受影響，故定期進行相關水質調查。本研究彙整桃園大圳 8-20 號池、社子一號池、北勢埤、下社埤及烏山頭水庫等 5 處光電案場，於 2020 年、2022 年、2023 年及 2024 年各進行 1 次水質調查，水質調查項目為灌溉水質基準值（pH 值、導電度、懸浮固體、氨氮、鈉吸著率、氯鹽、硫酸鹽及重金屬等）、特殊重金屬（鎘、銻及鉍等）、常見塑化劑、優養化相關指標（總磷、透明度及葉綠素 a 等），並進行主成分分析（PCA）探討水質特性差異。監測結果顯示各光電案場水質監測項目皆符合灌溉水質基準值，特殊重金屬與常見塑化劑檢測皆低於方法偵測極限。然而，下社埤水體鈉吸著率、氯鹽、總磷及葉綠素 a 均高於其他案場，推測與引水源有關，並非受太陽光電設施影響。水質優養化評估結果顯示，社子 1 號池與烏山頭水庫呈現普養等級，其他光電案場則為優養等級，除與引水源有關外，推測與置換率低有關。另外，PCA 分析結果推測各光電案場水體差異主要反映原有水質條件，並未因設置太陽光電板而趨向一致變化。本研究顯示各光電案場設置水域型太陽光電設施後，未發現影響灌溉水質，但仍建議持續累積相關水質資料，以確保農業用水安全無虞，並能作為管理參考依據之一。

關鍵詞：埤塘、農業水庫、再生能源、水質監測

Abstract

Taiwan is actively promoting renewable energy to achieve the “2050 Net Zero Emissions” target, with the Irrigation Agency, Ministry of Agriculture implementing floating photovoltaic (FPV) systems on ponds and agricultural reservoirs. To ensure that irrigation water quality is not compromised, water quality monitoring was conducted at five FPV sites—Taoyuan Canal Pond No. 8-20, Shezi Pond No. 1, Beishi Pond, Xiashen Pond, and Wushantou Reservoir—in 2020, 2022, 2023, and 2024. Parameters included irrigation water quality standards (pH, electrical conductivity, suspended solids, ammonia nitrogen, sodium adsorption ratio, chloride, sulfate, and heavy metals), specific heavy metals (gallium, indium, molybdenum), common plasticizers, and eutrophication indicators (total phosphorus, transparency, chlorophyll-a). Principal Component Analysis (PCA) was applied to evaluate site differences. Results showed that all sites met water quality standards for irrigation, and specific heavy metals and plasticizers were below detection limits. Xiashen Pond showed higher sodium adsorption ratio, chloride, total phosphorus, and chlorophyll-a than other sites, attributed to inflow sources rather than FPV installations. Eutrophication assessments indicated mesotrophic conditions at Shezi Pond No. 1 and Wushantou Reservoir, while others were eutrophic, likely associated with low water replacement rates. PCA confirmed that water quality differences mainly reflected inherent conditions rather than FPV effects. Overall, FPV installations did not adversely impact irrigation water quality. Continued long-term monitoring is recommended to ensure the safety of agricultural water use and to provide a valuable reference for future management and policy decisions.

Keywords: Pond, Agricultural reservoirs, Renewable energy, Water quality monitoring

一、前言

近年來政府為達成「2050 淨零排放」積極推動再生能源，其中光電佔再生能源比例最高，常見的太陽光電板類型包含屋簷型太陽能板、地面型太陽能板及水域型太陽能板，目前已有許多國家建置水域型太陽光電設施，如中國、日本、韓國、法國及西班牙等。臺灣於 2016 年起各政府單位為配合綠能政策推廣，召開相關會議，廣泛納入水庫、埤塘及滯洪池等水域型設施設置太陽光電板，其中包含農業部農田水利署（以下簡稱農水署）各管理處埤塘、農業水庫及圳路、經濟部水利署水庫與滯洪池、及台糖公司滯洪池等。

由於太陽光電板製造過程中包含各種重金屬化合物，當太陽光電板封裝玻璃破損時，會導致重金屬滲出風險上升 (Sharma et al., 2021)，將對水域生態環境及陸域生態系統造成危害。另外有研究指出沉陷池塘 (subsidence pond) 設置太陽光電設施後，水質重金屬無明顯變化 (Wang et al., 2022)，因此推測當太陽光電板未受到損害時，重金屬滲出可能性低。另外，太陽光電板設置後，水體減少直射太陽光機率與降低表面風速等環境因素改變，進而影響水質因子。關於設置水域型太陽光電設施前在優劣勢分別為，潛在優勢包含減少蒸發、降低水溫 (Cagle et al., 2020；林文苑等，2023)、

減少沉積 (Essak and Ghosh, 2022)、降低太陽光電設施設置所需利用土地面積 (Cagle et al., 2020) 及減少藻類生長 (Ferrer-Gisber et al., 2013)，而潛在劣勢包含水體缺氧與影響硝化作用等(Essak and Ghosh, 2022; Yang et al., 2024)。藉由上述瞭解水域環境設置光電設施後水質可能產生變化，故仍需要持續關注各光電案場水質變化。

因此本研究藉由不同地區水域型太陽光電設施案場水質調查，瞭解水域型太陽光電設施設置後對灌溉水質品質項與管制項影響，及水質優養化程度之變化，以確保整體灌溉水質安全無虞。

二、材料與方法

1. 試驗地點概述

本研究選擇水域型光電設施之案場，皆為農水署管理處管轄之案場，共計 5 處，分別為桃園管理處桃園大圳 8-20 號池、石門管理處社子 1 號池、嘉南管理處北勢埤及高雄管理處下社埤等 4 處埤塘；農業水庫則為嘉南管理處烏山頭水庫，各案場分布位置與基本資料如圖 1 與表 1 所示。

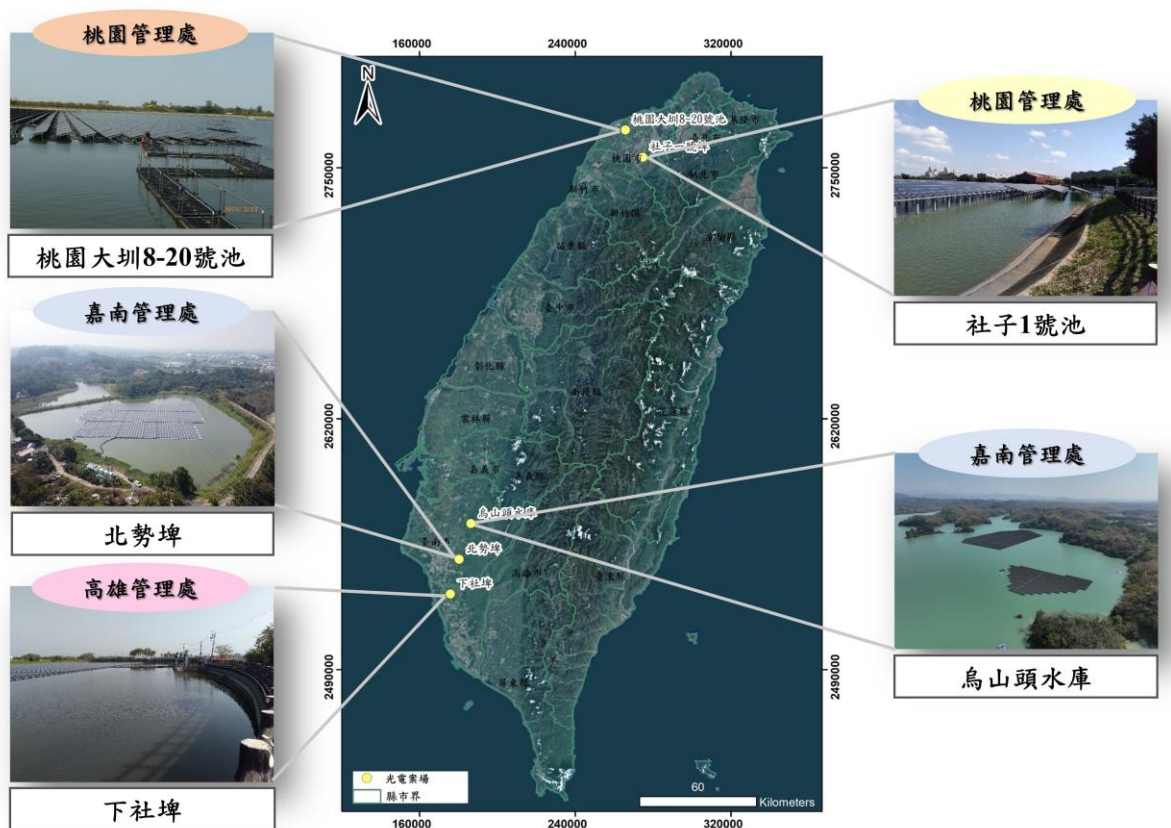


圖 1. 本研究試驗地點位置分布圖。

表 1.5 處光電案場基本資料彙整表

| 基本資料 | 案場名稱 | | | | |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|--------------------|------------|
| | 桃園大圳 8-20 號池 | 社子 1 號池 | 北勢埤 | 下社埤 | 烏山頭水庫 |
| 水域面積(m ²) | 112,716 | 49,380 | 93,439 | 51,000 | 327,800 |
| 上游水源類別 | 水庫 (100%) | 水庫 (100%) | 水庫 (100%) | 雨水 70% 社區排水 30% | 水庫(100%) |
| 設施覆蓋率(%) | 41.5 | 44.0 | 25.0 | 36.0 | 1.13 |
| 太陽光電設施種類 | 浮臺式 | 立柱式 | 浮臺式 | 浮臺式 | 浮臺式 |
| 裝置容量(MW) | 4.98 | 2.00 | 1.99 | 1.60 | 1.37 |
| 完工時間 | 2017 年 11 月(第一期) 2019 年 5 月(第二期) | 2017 年 12 月 | 2018 年 12 月 | 2018 年 11 月 | 2022 年 5 月 |

2. 水質調查時間與方法

水質調查時間為 2020 年、2022 年、2023 年及 2024 年各年度 5–6 月或 8–9 月間進行各案場 1 次調查，每次調查皆選擇各案場鄰近太陽光電設施水體進行 1 點次採樣作業。

水質檢測項目包含灌溉水質基準值之品質項水溫、導電度、溶氧量、懸浮固體、氯鹽、硫酸鹽、氨氮、鈣、鎂、鈉、鈉吸著率 (計算值)；管制項 pH 值、銅、鉛、鎳、鋅、鎘、總鉻、砷、汞；優養化指標透明度、總磷、葉綠素 a；常見塑化劑鄰苯二甲酸二甲酯、鄰苯二甲酸二乙酯、鄰苯二甲酸二丁酯、鄰苯二甲酸丁苯酯、磷苯二甲酸乙己酯及磷苯二甲酸二辛酯等；特殊重金屬銻、鎘、鉍及鋁。

3. 水質資料評估

(1) 灌溉水質基準值

根據農田灌溉排水管理辦法規定，將灌溉水質各檢測項目分為管制項目與品質項目，並根據灌溉水質基準值評估水質優劣，相關水質基準值如表 2 所示。

(2) 水質優養化

藉由卡爾森優養化指標 (Carlson trophic state index, CTSI) 計算水體優養化等級如式(1)，所需要各項水質參數包含葉綠素 a、透明度及總磷，當 CTSI<40 時水體為貧養狀態、40≤CTSI≤50 水體為普養狀態、及 CTSI>50 水體為優養狀態。然而當埤塘水深不足 3 公尺時，透明度觀測上較不具代表性等因素，因此另外使用修正後 CTSI (CTSI_R) 以葉綠素 a 與總磷進行計算，並輔以葉綠素 a 評估水體優養化情形。

$$CTSI = \frac{TSI(Chl-a) + TSI(SD) + TSI(TP)}{3} \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

表 2. 灌溉水質基準值彙整表

| 項目 | 限值 | 單位 | |
|------|------|---------|----------------------|
| 品質項目 | 導電度 | 750 | μS/cm |
| | 溶氧 | 3.0 以上 | mg/L |
| | 懸浮固體 | 100 | mg/L |
| | 氨氮 | 3.0 | mg/L |
| | 鈉吸著率 | 6.0 | (meq/L) ² |
| | 氯鹽 | 175 | mg/L |
| | 硫酸鹽 | 200 | mg/L |
| 管制項目 | pH 值 | 6.0-9.0 | - |
| | 總鉻 | 0.1 | mg/L |
| | 鎳 | 0.2 | mg/L |
| | 銅 | 0.2 | mg/L |
| | 鋅 | 2.0 | mg/L |
| | 鎘 | 0.01 | mg/L |
| | 鉛 | 0.1 | mg/L |
| | 砷 | 0.05 | mg/L |
| | 汞 | 0.002 | mg/L |

4. 水質資料分析

(1) 無母數分析

針對各案場水質資料以 SPSS (IBM SPSS Statistics 20) 進行 Kruskal-Wallis 檢定分析，顯著水準為 $p < 0.05$ ，瞭解不同案場間水質監測項目是否有顯著差異。

(2) 主成分分析 (principal components analysis, PCA)

針對各案場不同年份水質監測項目以 Python 3.12 進行 PCA 分析，並藉由 K-means 進行分群 (Cluster)，進一步瞭解太陽光電設施設置下，是否會造成水質分群差異。

三、結果與討論

1. 各光電案場水質調查結果

本研究水質調查結果 (表 3) 發現，各案場水質監測項目 pH 值、溶氧、導電度、懸浮固體、氨氮、鈉吸著率、氯鹽及硫酸鹽皆符合灌溉水質基準值，且太陽光電板設置後水質並未有明顯變化。另外，灌溉水質管制項目重金屬銅、鉛、鎳、鋅、鎘、總鉻、砷及汞等調查結果皆發現，多低於方法偵測極限且均符合灌溉水質基準值；與 Wang 等人 (2022) 試驗結果相似，顯示沉陷池塘 (subsidence pond) 有無設置太陽光電設施下水質重金屬鉛、鉻、鎳、銅、砷、錳及鋅等重金屬濃度未明顯上升。而本研究結果亦發現特殊重金屬銻、鎘、鉬、鋁等與塑化劑 (鄰苯二甲酸二甲酯、鄰苯二甲酸二乙酯、鄰苯二甲酸二丁酯、鄰苯二甲酸丁苯酯、磷苯二甲酸乙己酯、磷苯二甲酸

二辛酯) 等水體濃度皆低於方法偵測極限。由上述結果推測 5 處水域案場設置太陽光電設施後，並未對灌溉水質產生明顯影響。

表 3. 各光電案場各水質監測項目彙整表

| 水質監測項目 | | 案場名稱 | | | | |
|------------------------------|-----|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | | 桃園大圳 8-20 號池 | 社子 1 號池 | 北勢埤 | 下社埤 | 烏山頭水庫 |
| 水溫 °C | 平均值 | 29.2 (1.8) | 28.0 (0.9) | 31.9 (2.9) | 30.4 (3.6) | 32.6 (1.3) |
| | 中位數 | 28.8 ^a | 28.2 ^a | 33.1 ^a | 31.7 ^a | 32.3 ^a |
| pH 值 | 平均值 | 8.5 (0.3) | 8.3 (0.5) | 7.7 (0.9) | 7.9 (0.9) | 8.8 (0.1) |
| | 中位數 | 8.4 ^a | 8.3 ^a | 7.4 ^a | 8.1 ^a | 8.8 ^a |
| 溶氧量 mg/L | 平均值 | 8.7 (1.2) | 8.4 (0.8) | 6.6 (2.4) | 10.2 (3.9) | 8.6 (0.6) |
| | 中位數 | 8.6 ^a | 8.4 ^a | 6.1 ^a | 9.9 ^a | 8.4 ^a |
| 導電度 µS/cm | 平均值 | 203 (11) | 192 (24) | 156 (46) | 268 (117) | 332 (18) |
| | 中位數 | 201 ^a | 183 ^a | 156 ^a | 316 ^a | 326 ^a |
| 懸浮固體 mg/L | 平均值 | 10.6 (2.5) | 2.4 (1.4) | 29.0 (22.0) | 23.5 (19.2) | 2.5 (1.2) |
| | 中位數 | 9.9 ^{ab} | 2.4 ^b | 21.2 ^a | 14.3 ^{ab} | 2.0 ^b |
| 氨氮 mg/L | 平均值 | 0.10 (0.04) | 0.08 (0.02) | 0.17 (0.21) | 0.12 (0.07) | 0.09 (0.04) |
| | 中位數 | 0.11 ^a | 0.08 ^a | 0.09 ^a | 0.14 ^a | 0.09 ^a |
| 鈉吸著率 (meq/L) ² | 平均值 | 0.44 (0.07) | 0.24 (0.03) | 0.37 (0.03) | 0.62 (0.21) | 0.54 (0.08) |
| | 中位數 | 0.44 ^{ab} | 0.24 ^b | 0.38 ^{ab} | 0.66 ^a | 0.50 ^a |
| 氯鹽 mg/L | 平均值 | 8.7 (1.4) | 1.4 (1.0) | 3.2 (0.6) | 16.1 (7.3) | 5.0 (1.5) |
| | 中位數 | 8.8 ^a | 1.8 ^b | 3.2 ^{ab} | 17.7 ^a | 4.5 ^{ab} |
| 硫酸鹽 mg/L | 平均值 | 23.2 (2.1) | 30.5 (2.5) | 15.8 (4.4) | 21.8 (7.5) | 47.6 (11.5) |
| | 中位數 | 23.4 ^{ab} | 29.7 ^{ab} | 15.4 ^b | 25.2 ^{ab} | 42.0 ^a |
| 總磷 mg/L | 平均值 | 0.077 (0.039) | 0.014 (0.008) | 0.102 (0.077) | 0.473 (0.231) | 0.022 (0.002) |
| | 中位數 | 0.078 ^{ab} | 0.014 ^b | 0.087 ^{ab} | 0.476 ^a | 0.021 ^{ab} |
| 透明度 m | 平均值 | 0.7 (0.1) | 1.8 (0.5) | 0.5 (0.2) | 0.5 (0.2) | 1.9 (0.8) |
| | 中位數 | 0.7 ^a | 1.9 ^a | 0.5 ^a | 0.5 ^a | 2.2 ^a |
| 葉綠素 a µg/L | 平均值 | 53.2 (13.6) | 3.3 (2.3) | 14.6 (7.1) | 80.3 (55.2) | 3.4 (1.8) |
| | 中位數 | 50.6 ^{ab} | 2.6 ^b | 11.6 ^{ab} | 87.3 ^a | 3.0 ^{ab} |

註：括號內數字為標準差；不同字母代表各案場水質監測項目以 Kruskal-Wallis 檢定分析具顯著差異 ($p < 0.05$)。

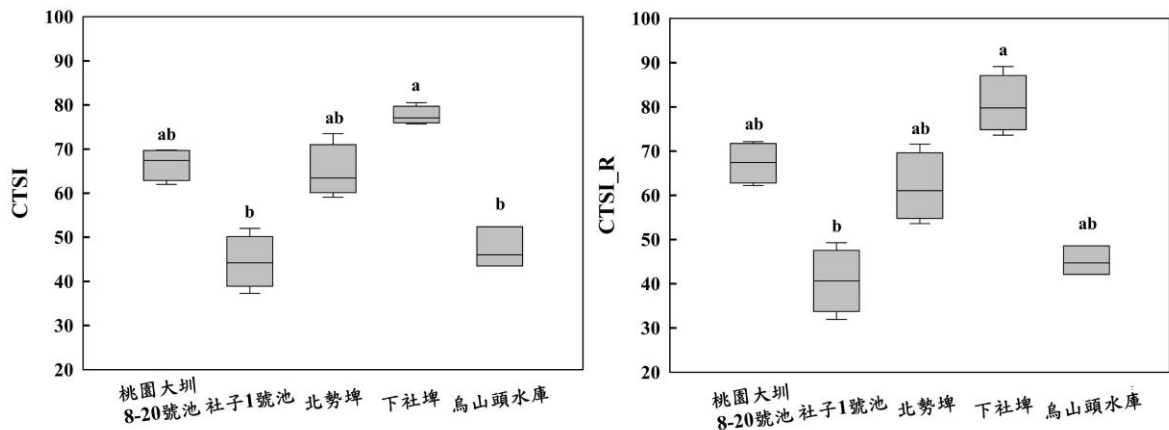


圖 2. 各光電案場水體 CTSI 與 CTSI_R 盒鬚圖。註：CTSI 為卡爾森優養化指標、CTSI_R 為修正後卡爾森優養化指標；不同字母代表各案場水質監測項目以 Kruskal-Wallis 檢定分析具顯著差異 ($p < 0.05$)。

另外，比較各案場水質調查結果 (表 3) 顯示，水體水溫、pH 值、溶氧、導電度及氮氮等各案場並未顯著變化，水溫、pH 值、溶氧及導電度等水質監測項目，而懸浮固體濃度則以北勢埤顯著高於社子 1 號池與烏山頭水庫、鈉吸著率以下社埤與烏山頭水庫顯著高於社子 1 號池、氣鹽濃度以下社埤顯著高於社子 1 號池、硫酸鹽濃度以烏山頭水庫顯著高於社子 1 號池、及總磷與葉綠素 a 以下社埤顯著高於社子 1 號池。由上述結果發現下社埤鈉吸著率、氣鹽、總磷及葉綠素 a 濃度高於其他案場，推測並非為太陽光電設施設置所造成，主要可能與引水源有關，下社埤引水源為雨水與社區排水之生活污水，因此部分時期水體含有較高的總磷與氮氮，而當水體中氮、磷等植物營養鹽偏高時，該水體應用在灌溉上能作為作物補充之養分，同時減少肥料之施用 (Tadesse and Dinka, 2023)。

2. 各光電案場水質優養化調查結果

埤塘架設太陽光電設施有助於降低太陽光直接照射水體，進而降低藻類的增生 (Ferrer-Gisbert et al., 2013)。而本研究結果 (圖 2) 發現，桃園大圳 8-20 號池、北勢埤及下社埤水體 CTSI_R 中位數分別為 67.5、61.0 及 79.8 皆屬於優養等級，而社子 1 號池水體 CTSI_R 中位數為 40.7 與烏山頭水庫 CTSI 中位數為 44.7，皆屬於普養等級，且以下社埤 CTSI_R 數值顯著高於社子 1 號池，顯示部分水域設置太陽光電設施後，水體仍處於優養狀態。其中社子 1 號池與烏山頭水庫水體處於普養等級，推測與 2 處光電案場位置處於水源之上游，水質條件較為良好。而桃園大圳 8-20 號池、北勢埤及下社埤水體優養程度較高，除與引水源有關外，埤塘屬於靜態水域，水體流動緩慢且置換性較差，容易造成水體營養鹽濃縮效應，並且在氣候條件適合藻類生長下，導致水體偏向優養等級。

3. 各光電案場水質 PCA 分析結果

由 PCA 分析結果顯示整體解釋率為 71.1%，具有相當高之解釋率。PC1 解釋率為 37.1%，PC1 之主要貢獻變數為水溫、溶氧、導電度及鈣離子，顯示這些水質因子具有共同變動，可能與夏季水溫升高有關；PC2 解釋率為 34.0%，PC2 之主要貢獻變

數為總磷、CTSI 及 CTSI_R，與水體優養化程度相關。而 K-means 分群 (Cluster) 結果發現將各光電案場共分為 3 群，Cluster 1 為社子 1 號池與烏山頭水庫，顯示二案場水質透明度較高；Cluster 2 為下社埤，落於高營養鹽與優養化方向，顯示優養化程度較高；Cluster 3 為桃園大圳 8-20 號池與北勢埤，顯示二案場分布較接近中心，水質狀態相較為穩定 (圖 3)。整體而言，各光電案場水體差異主要反映原有水質條件，並未因設置太陽光電板而趨向一致變化。

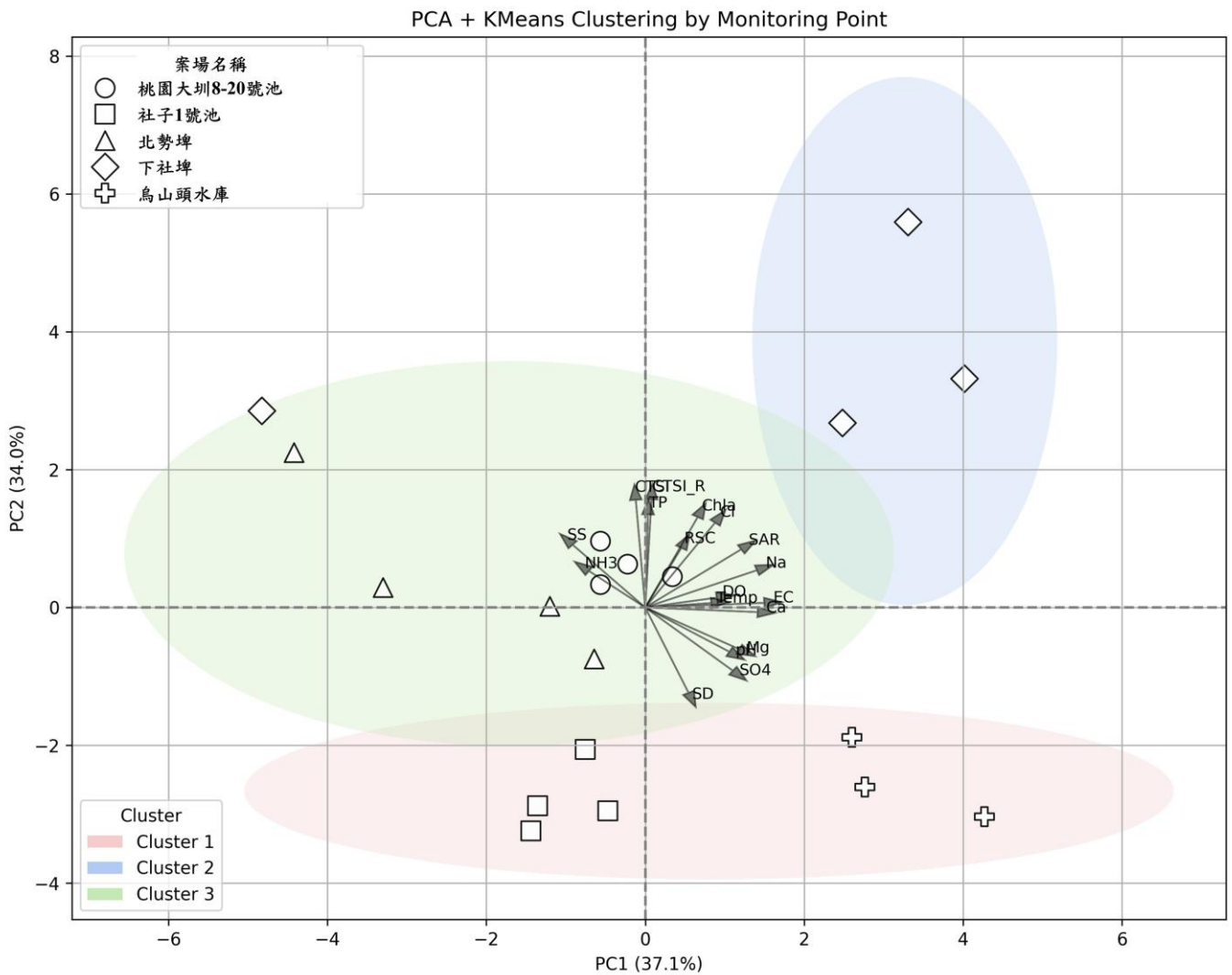


圖 3. 各光電案場水質監測項目主成分分析結果圖。註：圓圈代表桃園大圳 8-20 號池、正方形代表社子 1 號池、三角形代表北勢埤、菱形代表下社埤及十字形代表烏山頭水庫。Temp 為水溫、pH 為 pH 值、EC 為導電度、DO 為溶氧量、SS 為懸浮固體、Cl 為氯鹽、SO4 為硫酸鹽、NH3 為氨氮、Ca 為鈣離子、Mg 為鎂離子、Na 為鈉離子、SAR 為鈉吸著率、RSC 為殘餘碳酸鈉、TP 為總磷、SD 為透明度、Chla 為葉綠素 a、CTSI 為卡爾森優養化指標及 CTSI_R 為修正後卡爾森優養化指標。

四、結語

1. 由於 5 處光電案場每年度僅進行 1 次水質調查，調查頻率較低，建議後續能增加調查頻率，並藉由長期累積相關水質資料，以瞭解太陽光電設施長期覆蓋水面對水質影響。
2. 多數光電埤塘水體呈現優養情形，水質優養化對於灌溉水質而言，反而能提供豐富之營養鹽，在營養鹽未超過灌溉水質基準值下，可做為作物灌溉時補充之養分，但需要留意整體肥料施用量。

五、參考文獻

1. Cagle, A. E., A. Armstrong, G. Exley, S. M. Grodsky, J. Macknick, J. Sherwin, and R. R. Hernandez. 2020. The land sparing, water surface use efficiency, and water surface transformation of floating photovoltaic solar energy installations. *Sustainability*, 12: 8154.
2. Essak, L., and A. Ghosh. 2022. Floating Photovoltaics: A Review. *Clean Technologies*, 4: 752–769.
3. Ferrer-Gisbert, C., J. J. Ferrán-Gozálvez, M. Redón-Santafé, P. Ferrer-Gisbert, F. J. Sánchez-Romero, and J. B. Torregrosa-Soler. 2013. A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs. *Renewable Energy*. 60: 63–70.
4. Sharma, H. B., K. R. Vanapalli, V. K. Barnwal, B. Dubey, and J. Bhattacharya. 2021. Evaluation of heavy metal leaching under simulated disposal conditions and formulation of strategies for handling solar panel waste. *Science of the Total Environment*. 780: 146645.
5. Tadesse, K. B., and M. O. Dinka. 2023. Eutrophic reservoir water suitability for irrigation in semi-arid region. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03162-8>
6. Wang, X., Y. Zhao, Z. Chu, X. Yu, T. Fan, G. Li, J. Zhang, X. Xu, Q. Zhen, X. Cheng, and Z. Dong. 2022. Influence of solar photovoltaic system on the concentration and environmental risks of heavy metals in subsidence pond water from coal mining area: A case study from Huainan Subsidence Pond. *Water*. 14: 2257.
7. Yang, S., Y. Zhang, D. Tian, Z. Liu, and Z. Ma. 2024. Water-surface photovoltaic systems have affected water physical and chemical properties and biodiversity. *Communications Earth & Environment*, 5: 632.
8. 林文苑、馬國宸、陳首騎，2023，運用熱顯像無人機分析埤塘重電前後蒸發量變化之研究。中國土木水利工程學刊，35(6): 587 – 593。