



國立臺灣大學工學院環境工程學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Environmental Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

都市淡水水體碳匯調查

Survey of Urban Freshwater Carbon Sink

呂秉澄

Ping-Cheng Lu

指導教授：童心欣 博士

Advisor : Hsin-hsin Tung, Ph.D.

中華民國 114 年 4 月

April, 2025

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

都市淡水水體碳匯調查

Survey of Urban Freshwater Carbon Sink

本論文係呂秉澄 (姓名) R12541138 (學號) 在國立臺灣大學
環境工程學研究所 (系/所/學位學程) 完成之碩士學位論文，於民國 114 年
4 月 30 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department / Graduate Institute of Environmental Engineering
on 30 (date) April (month) 2025 (year) have examined a Master's Thesis entitled
above presented by PING-CHENG LU (name) R12541138 (student ID)
candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

盧心悅

陳紀國

關蓓蓓

(指導教授 Advisor)

系（所、學位學程）主管 Director:

陳紀國

誌謝



首先，我要感謝我的指導教授童心欣教授。相較於兩年前的懵懂，如今已有些許成長與進步。這段期間，能有童教授作為我的指導老師，是一件非常幸運的事。每當我遇到困難時，老師總能適時地給予提點與引導，幫助我在迷惘中重新找回方向，從容面對挑戰。與老師的每次討論，我都能深刻感受到她清晰的邏輯與縝密的思維，並在她循序漸進的引導下，學會如何分析問題與尋找解方。同時，我也感謝我的口試委員——關蓓德老師與陳起鳳老師給予碩士論文指導與建議，使碩士論文更加完整。

接著，我要感謝實驗室的成員。感謝陳甬安、吳祈賢、張聖典、何羿德、鐘宇騏學長、陳宥竹、張育綺學姊；感謝同屆的夥伴張潔之、張馨予、劉季衍以及曾郁婷；感謝游東霖學弟與洪顥瑜學妹，感謝大家在實驗上的幫助與經驗的分享，也為實驗室帶來許多的歡笑聲，讓這段碩士生活不再那麼孤單與沈重。再來，我要特別感謝我的女朋友蕭云筑。謝謝妳在這段求學旅程中始終陪伴在我身邊，無論是颱風下雨，還是我情緒低落、壓力沉重的時候，妳總是默默支持我、鼓勵我。當我遇到挫折時，是妳讓我重新拾起信心；當我鬱悶煩悶時，是妳願意靜靜聽我說話、陪我走過低潮。妳的溫柔與堅定，成為我最溫暖的依靠，也是我能夠堅持走到最後的重要力量。

最後，我要感謝我的父母。謝謝你們一路以來無條件的支持與付出，給予我讀書所需的一切資源，讓我能夠安心求學、專心研究。你們從不曾要求回報，總是默默在背後支持我，讓我即使面對再多壓力與挑戰，也始終知道自己不是一個人。要完成一本論文絕非易事，有大家的支持與鼓勵，才得以完成，感謝各位的一路相伴，讓我更有信心面對未來的挑戰。

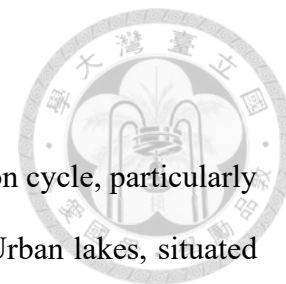
摘要



本研究旨在探討都市湖泊在全球碳循環中的角色，特別是其作為碳源或碳匯的潛力與實際表現。都市湖泊由於位處人口密集的城市環境，經常受到污染物與營養鹽（如氮、磷）的輸入影響，導致水體優養化，進而影響其碳通量。本研究以台灣兩座代表性的都市水體—龍潭大池與大湖公園為研究對象，透過為期一年的實地採樣與氣體通量測量，分析二氧化碳（CO₂）與甲烷（CH₄）之排放情形，並探討其與環境因子間的關聯性。結果顯示，龍潭大池在多數時期呈現低於全球平均值的溫室氣體通量，甚至在某些季節具有碳匯的特徵，顯示其具有吸收 CO₂ 的潛力。反之，大湖公園的甲烷排放通量明顯較高，並在部分時期超過全球平均值的兩倍，是顯著的碳排放源。此現象可能與該湖泊底泥厚度、厭氧環境，以及初級生產力有關。研究也發現甲烷通量在日間普遍高於夜間，推測可能受到光合作用強度與氣體溶解度變化的共同影響。統計分析顯示甲烷通量在季節間變異顯著，特別是在冬夏間的差異，可能與氣溫變化相關；而 CO₂通量則未顯示出明確的時間與季節變化趨勢。透過冗餘分析（RDA），本研究進一步探討水質參數與氣體通量之間的關係。結果指出，葉綠素、總磷、硝酸鹽氮、有機碳、溶氧與光照等因子與甲烷通量密切相關，這些指標與湖泊的優養化程度與初級生產力密切相關；CO₂通量則與葉綠素、顆粒性有機碳、溶解性有機碳、pH 值、溶氧與總磷等變項有明顯關聯，反映出都市湖泊中碳排放或吸收主要受到藻類光合作用與水質條件的雙重影響。研究也發現，相較於其他類型水體（如自然湖泊與水庫），都市湖泊特別是小型湖泊，其甲烷通量普遍較高，並具有顯著的貢獻潛力。此結果與全球研究一致，指出小型湖泊是內陸水域碳排放的重要熱點，尤其在氣候變遷加劇與都市化進程下，其重要性不容忽視。研究結果顯示，都市湖泊雖具有部分碳匯潛力，但在甲烷排放方面仍可能是重要的碳源，應透過改善水質、降低營養鹽輸入及生態系統管理等方式加以控制，提升其在碳中和政策中的貢獻潛力。

關鍵字：都市湖泊、碳通量、甲烷、二氧化碳、碳源、碳匯、溫室氣體

ABSTRACT



This study aims to explore the role of urban lakes in the global carbon cycle, particularly their potential and actual performance as carbon sources or sinks. Urban lakes, situated in densely populated areas, are often affected by inputs of pollutants and nutrients such as nitrogen and phosphorus, leading to eutrophication, which in turn influences their carbon fluxes. This research focuses on two representative urban water bodies in Taiwan—Longtan Large Tourist Pond and Dahu Park—and analyzes carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) emissions through year-round field sampling and flux measurements. The results show that Longtan Large Tourist Pond generally exhibited greenhouse gas fluxes lower than the global average and even demonstrated characteristics of a carbon sink during certain seasons, indicating a potential for CO₂ absorption. In contrast, Dahu Park exhibited significantly higher methane emissions, with some periods reaching more than twice the global average, identifying it as a notable carbon source. This phenomenon is likely related to factors such as sediment thickness, anoxic conditions, and primary productivity. The study also found that methane fluxes were generally higher during the day than at night, possibly due to the combined effects of photosynthetic activity and wind speed variations. Statistical analysis revealed significant seasonal variation in CH₄ flux, particularly between winter and summer, which may be associated with temperature changes, whereas CO₂ fluxes did not show clear temporal or seasonal patterns. Redundancy analysis (RDA) was conducted to examine the relationships between water quality parameters and gas fluxes. The results indicate that chlorophyll-a, total phosphorus, nitrate, organic carbon, dissolved oxygen, and light intensity were closely associated with methane flux, reflecting the influence of eutrophication and primary productivity. CO₂ flux, on the other hand, was significantly correlated with variables such as chlorophyll-a, particulate and dissolved organic carbon,

pH, dissolved oxygen, and total phosphorus, suggesting that both algal photosynthesis and water quality jointly affect carbon emissions or uptake in urban lakes. The study also observed that, compared to other water bodies such as natural lakes and reservoirs, urban lakes—especially small-sized ones—tend to have higher methane fluxes and substantial emission potential. This finding aligns with global research pointing out that small lakes are important hotspots of carbon emissions in inland waters, especially under accelerating climate change and urbanization. While urban lakes may possess some carbon sink potential, they are likely significant methane sources. Thus, measures such as water quality improvement, reduction of nutrient inputs, and ecosystem management are essential to enhance their contribution to carbon neutrality goals.

Keywords: urban lakes, carbon flux, methane, carbon dioxide, carbon source, carbon sink, greenhouse gases

目次



誌謝	i
摘要	ii
ABSTRACT	iii
目次	v
圖次	viii
表次	xi
1 第一章 前言	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究假說	2
1.3 研究目的	2
2 第二章 文獻回顧	3
2.1 溫室效應	3
2.2 自然碳匯	4
2.2.1 森林碳匯	4
2.2.2 土壤碳匯	5
2.2.3 海洋碳匯	5
2.3 淡水水體	5
2.3.1 淡水水體的種類	6
2.3.2 淡水碳排放及其對全球碳排放之貢獻量	6
2.3.3 國內外淡水水體溫室氣體通量相關研究	7
2.4 溫室氣體通量的測量技術與方法	11
2.4.1 渦度協方差 (Eddy covariance measurements)	11
2.4.2 邊界層法 (Boundary layer method)	11
2.4.3 漂浮式氣罩法 (floating chamber)	12

2.5 本論文填補之知識缺口	13
3 第三章 材料與研究方法	14
3.1 研究架構及流程	14
3.2 採樣地點	15
3.2.1 龍潭大池	15
3.2.2 大湖公園	16
3.3 溫室氣體通量	18
3.3.1 採樣箱設計	18
3.3.2 氣體收集與分析	19
3.4 環境因子之量測	21
3.5 水樣採集與分析	21
3.5.1 酸鹼值(pH)、溶氧(Dissolved Oxygen, DO)與水溫	21
3.5.2 氨氮(Ammonium Nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$)與硝酸鹽氮 (Nitrate Nitrogen, $\text{NO}_3^-\text{-N}$)	21
3.5.3 總氮(Total Nitrogen, TN).....	22
3.5.4 葉綠素 a (Chlorophyll-a)	22
3.5.5 總磷(Total Phosphorus, TP)	23
3.5.6 溶解性有機碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)以及溶解性無機碳 (Dissolved Inorganic Carbon, DIC).....	23
3.5.7 顆粒性有機碳(Particle Organic Carbon, POC)	24
3.6 Redundancy Analysis (RDA)	24
3.7 實驗儀器	25
4 第四章 結果	26
4.1 龍潭大池	26
4.1.1 龍潭大池環境與水質參數	26
4.1.2 龍潭大池氣體通量	35

4.2 大湖公園	41
4.2.1 大湖公園環境與水質參數	41
4.2.2 大湖公園氣體通量	50
4.3 多變量分析	56
4.3.1 龍潭大池 RDA 分析	56
4.3.2 大湖公園 RDA 分析	57
4.3.3 日間 RDA 分析	59
4.3.4 夜間 RDA 分析	60
4.4 與不同緯度及氣候區進行比較	62
4.4.1 溫室氣體比較	62
4.4.2 全球暖化潛勢比較	65
5 第五章 討論	66
5.1 龍潭大池與大湖公園之間的差異	66
5.2 水質與氣體通量間的關聯	67
5.3 與不同氣候區及不同淡水水體類型之差異	70
5.4 目前研究方法的限制	72
6 第六章 結論與建議	73
6.1 結論	73
6.2 建議	74
7 參考文獻	75
8 附錄	88

圖次



圖 3.1 研究架構圖	14
圖 3.2 龍潭大池採樣點	16
圖 3.3 大湖公園採樣點	17
圖 3.4 採樣箱設計圖(左)及實體圖(右)	18
圖 4.1 龍潭大池氣溫變化盒鬚圖	26
圖 4.2 龍潭大池濕度變化盒鬚圖	27
圖 4.3 龍潭大池照度變化盒鬚圖	27
圖 4.4 龍潭大池水溫變化盒鬚圖	28
圖 4.5 龍潭大池 pH 變化盒鬚圖	28
圖 4.6 龍潭大池溶氧變化盒鬚圖	28
圖 4.7 龍潭大池氨氮變化盒鬚圖	29
圖 4.8 龍潭大池硝酸氮變化盒鬚圖	29
圖 4.9 龍潭大池總氮變化盒鬚圖	30
圖 4.10 龍潭大池總磷變化盒鬚圖	30
圖 4.11 龍潭大池葉綠素 a 變化盒鬚圖	31
圖 4.12 龍潭大池溶解性無機碳變化盒鬚圖	32
圖 4.13 龍潭大池溶解性有機碳變化盒鬚圖	32
圖 4.14 龍潭大池顆粒性有機碳變化盒鬚圖	33
圖 4.15 龍潭大池總有機碳變化盒鬚圖	33
圖 4.16 龍潭大池總氮、總磷之比值	34
圖 4.17 龍潭大池總磷與葉綠素回歸線分析	34
圖 4.18 龍潭大池甲烷通量盒鬚圖	35
圖 4.19 龍潭大池二氧化碳通量盒鬚圖	36
圖 4.20 龍潭大池以時段區分之甲烷時通量盒鬚圖	36

圖 4.21 龍潭大池以時段區分之二氧化碳時通量盒鬚圖	37
圖 4.22 龍潭大池甲烷總排放量	39
圖 4.23 龍潭大池二氧化碳總排放量	40
圖 4.24 大湖公園氣溫變化盒鬚圖	41
圖 4.25 大湖公園濕度變化盒鬚圖	42
圖 4.26 大湖公園照度變化盒鬚圖	42
圖 4.27 大湖公園水溫變化盒鬚圖	43
圖 4.28 大湖公園 pH 變化盒鬚圖	43
圖 4.29 大湖公園溶氧變化盒鬚圖	43
圖 4.30 大湖公園氨氮變化盒鬚圖	44
圖 4.31 大湖公園硝酸氮變化盒鬚圖	44
圖 4.32 大湖公園總氮變化盒鬚圖	45
圖 4.33 大湖公園總磷變化盒鬚圖	45
圖 4.34 大湖公園葉綠素 a 變化盒鬚圖	46
圖 4.35 大湖公園溶解性無機碳變化盒鬚圖	47
圖 4.36 大湖公園溶解性有機碳變化盒鬚圖	47
圖 4.37 大湖公園顆粒性有機碳變化盒鬚圖	48
圖 4.38 大湖公園總有機碳變化盒鬚圖	48
圖 4.39 大湖公園總氮、總磷之比值	49
圖 4.40 大湖公園總磷與葉綠素回歸線分析	49
圖 4.41 大湖公園甲烷通量盒鬚圖	50
圖 4.42 大湖公園二氧化碳通量盒鬚圖	51
圖 4.43 大湖公園以時段區分之甲烷時通量盒鬚圖	51
圖 4.44 大湖公園以時段區分之二氧化碳時通量盒鬚圖	52
圖 4.45 大湖公園甲烷總排放量	54
圖 4.46 大湖公園二氧化碳總排放量	55

圖 4.47 龍潭大池 RDA 分析	56
圖 4.48 大湖公園 RDA 分析	57
圖 4.49 日間 RDA 分析	59
圖 4.50 夜間 RDA 分析	60
圖 4.51 不同氣候帶與龍潭大池及大湖公園之甲烷通量盒鬚圖	63
圖 4.52 不同水體類型與龍潭大池及大湖公園之甲烷通量盒鬚圖	63
圖 4.53 不同氣候帶與龍潭大池及大湖公園之二氧化碳通量盒鬚圖	64
圖 4.54 不同水體類型與龍潭大池及大湖公園之二氧化碳通量盒鬚圖	64
圖 5.1 相關性熱圖分析(龍潭大池).....	69
圖 5.2 相關性熱圖分析(大湖公園).....	69

表次



表 2.1 國內外湖泊與水庫氣體通量資料	9
表 3.1 GC 分析條件	19
表 3.2 實驗分析儀器	25
表 4.1 龍潭大池氣體通量及環境參數統計分析	38
表 4.2 大湖公園氣體通量及環境參數統計分析	53
表 4.3 龍潭大池中各參數對 CH ₄ 及 CO ₂ 的影響程度(比例%).....	56
表 4.4 大湖公園中各參數對 CH ₄ 及 CO ₂ 的影響程度(比例%).....	58
表 4.5 日間各參數對 CH ₄ 及 CO ₂ 的影響程度(比例%)	59
表 4.6 夜間各參數對 CH ₄ 及 CO ₂ 的影響程度(比例%)	61
表 4.7 不同緯度及氣候區之比較(資料來源如附錄所示).....	63
表 4.8 與全球 GWP 比較.....	65

第一章 前言



1.1 研究動機

自工業發展以來，人類活動排放大量的溫室氣體(Greenhouse Gases, GHGs)，如二氧化碳(Carbon Dioxide, CO₂)、甲烷(Methane, CH₄)和氧化亞氮(Nitrous Oxide, N₂O)等等，這些溫室氣體在大氣中的濃度逐漸增加，加劇溫室效應，導致全球暖化日益嚴重。根據政府間氣候變遷委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)2023 年的第六次綜合報告(Ipcc 2023)指出，自 1850 年代以來，大氣中 CO₂、CH₄及 N₂O 濃度持續上升，至 2019 年為止，濃度分別達到 410ppm、1866ppb 及 332ppb。其中 CO₂和 CH₄被認為是影響溫室效應最主要的兩種溫室氣體 (Raynaud et al. 1993)。因此如何減少這兩種氣體的排放並緩解其對氣候的影響已成為當前的研究目標。

然而地球仍存在著像森林、土壤和海洋等自然碳匯系統，這些系統能吸收溫室氣體，維持碳循環的平衡，從而減緩溫室效應的惡化。但隨著人類活動的擴展，例如森林砍伐、土地利用變化和海洋酸化等，造成自然碳匯的吸收能力逐漸減弱，對溫室氣體的吸收量越來越少。因此，我們迫切的尋找能儲存碳的場所。近年來，內陸水體逐漸受到關注，淡水被認為是全球溫室氣體預算的重要貢獻者，作為地球碳循環的一部分，其儲存、運輸及轉化大量的碳，對大氣碳平衡有著關鍵的調節作用(Thalasso et al. 2022; Grasset et al. 2020; Sun et al. 2022)。然而，淡水的溫室氣體通量並非均勻分佈，而是會受到多種因素影響而產生差異(Li et al. 2018; Li and Xue 2023)，包含環境條件、人類活動和氣候變化等。都市湖泊作為淡水的一部分，因其身處都市環境，承受生活污水、農業施肥及垃圾處理等人類活動的壓力，造成水體中營養鹽類、有機碳的負荷增加(Grund et al. 2022; Lv, Wu, and Chen 2011)，這些結果容易促進水體優養化並影響碳的轉化。目前的研究顯示都市湖泊的水生植物可通過光合作用吸收 CO₂，減少溫室氣體的排放 (Zhou et al. 2017; Moreira and Pires 2016)，而沉積物中的有機物分解則可能釋放大量 CH₄和 CO₂ (Huttunen et al. 2003; Praetzel et al. 2020)。因此，了解都市湖泊在碳循環(Carbon cycle)中扮演的角色，對於完善全球溫室氣體預算、改善水資源管理以及應對氣候變遷具有重要意義。

本研究以台灣的兩座都市湖泊——龍潭大池與大湖公園為研究對象，通過一年的定期採樣，評估都市湖泊在碳循環中是作為碳源 (Carbon emission source) 或碳匯 (Carbon sink) 的角色，再透過 RDA (Redundancy Analysis) 分析溫室氣體與水質參數及環境因子之間的關聯性，為都市湖泊的溫室氣體貢獻量及全球碳平衡提供基礎數據。

1.2 研究假說

都市湖泊坐落於城市當中，容易受人為活動影響，導致水中營養鹽類濃度提升，特別是氮和磷，這兩種物質是藻類生長的限制因子，濃度提升會促進藻類生長。隨著藻類濃度的提高，光合作用將有效吸收二氧化碳。然而，當藻類死亡後，所形成的顆粒性有機碳會沉積在湖泊中，並由微生物分解產生甲烷。這些甲烷將會排放到大氣中，會對大氣中的溫室氣體濃度產生影響。

1.3 研究目的

本研究透過實地採樣，分析兩個都市湖泊 CO_2 、 CH_4 的氣體通量，得知一年之中都市湖泊的溫室氣體排放情況，並通過 RDA 分析溫室氣體與水質參數及環境因子之間的關聯性。研究目標包括：

1. 調查都市水體碳通量季節變化
2. 找出與溫室氣體通量具有關聯的環境參數
3. 比較不同地區與淡水水體間的差異

第二章 文獻回顧



2.1 溫室效應

溫室效應(Greenhouse Effect)是一種自然現象，大氣中的溫室氣體(如 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等)透過吸收來自太陽的輻射及地表所反射的遠紅外線使地球變暖(Change 2020)。然而，隨著人類活動的快速發展，大量的溫室氣體被釋放到大氣中，導致溫室效應的進程加速，進一步加劇了全球暖化及相關氣候問題。根據 Ipcc (2023)的研究顯示，人類活動所排放的溫室氣體已經造成地表溫度不斷攀升，從 2011 至 2020 年全球地表溫度較 1850 至 1900 年上升了 1.1°C ，代表全球溫室氣體排放量仍持續增加。這種升溫趨勢不僅使氣候更不穩定，也對生態系統和人類社會構成威脅，如冰川融化、海平面上升和極端氣候事件頻發。

然而溫室效應本身並非純粹的危害，反而是地球生命系統賴以生存的重要機制，若地球上缺乏溫室效應，全球平均溫度將會降低許多，有文獻指出，由於有溫室效應的存在，地球的平均氣溫大約為 15°C ，反之則為 -18°C (Mikhaylov et al. 2020)，如此低溫將會使地球上大多數的生命滅絕。目前為了避免溫室效應持續增強，如何控制溫室氣體的排放以及減少目前大氣中溫室氣體的濃度便顯得格外重要。

溫室氣體的排放可簡單分為自然排放與人為排放，根據統計，全球每年溫室氣體排放量約為 54.33-75.50 Gt(Gigaton) $\text{CO}_2\text{-eq}$ ，其中自然排放量為 18.13-39.30 Gt $\text{CO}_2\text{-eq}$ ，而人為排放量已從 1990 年的 22 Gt $\text{CO}_2\text{-eq}$ 增加到 2022 年的 36.1 Gt $\text{CO}_2\text{-eq}$ (Yue and Gao 2018; Liu et al. 2023)。雖然自然排放佔全球溫室氣體排放量的一大部分(約 33 - 52%)，但自然排放通常與生態系統的碳吸收處於平衡狀態。然而，人為排放卻是破壞這一平衡的主要原因。特別是自工業革命以來，人類活動增加了大氣中的溫室氣體濃度，從而打破了碳循環的穩定性。

根據 IPCC 的報告，全球人為溫室氣體排放源主要來自化石燃料燃燒、工業、農業、交通和建築等，分別佔全球淨排放的 34%、24%、22%、15%和 6%。其中化石燃料燃燒是人為排放中最大的碳排放源，約 33 - 40%(Yoro and Daramola 2020; Lamb et al. 2021)。內燃機及燃煤發電廠等機器的運作都依賴於煤炭、石油及天然氣等化石燃料，這些燃燒過程會直接將二氧化碳排放到大氣中，提升大氣中的二氧化碳濃度。隨著全球對能源需求的增長，尤其是在發展中國家，化石燃料的燃

燒仍然是未來幾十年內主要的溫室氣體排放來源之一。

然而，儘管人類活動加劇了溫室氣體排放並引發全球暖化，地球依然擁有一些自然機制來調節大氣中的二氧化碳濃度，最重要的便是自然碳匯。這些自然碳匯包括森林、土壤和海洋等生態系統，它們通過吸收和儲存大氣中的二氧化碳，發揮著至關重要的作用，幫助維持地球碳循環的平衡。這些自然碳匯不僅能減緩溫室效應的加劇，還能應對氣候變遷所帶來的影響。

2.2 自然碳匯

自然碳匯是指大氣中的二氧化碳通過自然過程被吸收並儲存於地球各種生態系統中的現象。這些自然碳匯，包括森林、土壤、海洋等，扮演著調節大氣中二氧化碳濃度的重要角色，對維持全球碳循環的平衡至關重要。根據 Friedlingstein et al. (2022)研究顯示 2011-2020 年間陸地碳匯吸收約 $11.36 \pm 2.2 \text{ Gt CO}_2\text{-eq}$ ，海洋碳匯吸收約 $10.26 \pm 1.46 \text{ Gt CO}_2\text{-eq}$ 。

2.2.1 森林碳匯

森林是陸地生態系的主體，其碳匯能力佔陸地生態系碳匯的 80%以上，是地球上最重要的碳匯之一。森林中的植物通過光合作用從大氣中吸收二氧化碳後合成有機物，並將其儲存在樹木或土壤中，對於降低大氣中溫室氣體濃度、減緩全球暖化具有非常重要的作用(Zhu et al. 2024; Chen et al. 2021; Yang Qianmin 2023)。其中，熱帶雨林和溫帶森林被認為具有最高的碳儲存能力，但近年來，由於人類對於森林的砍伐和土地利用的變化使得森林碳吸收的能力正逐漸下降，土地利用以及森林砍伐會直接導致碳排放，因此部分的森林碳匯會因此被抵銷。根據 Pan et al. (2024)對 1990-2019 年間全球森林碳匯與碳源進行統計，得知近 30 年間，全球森林每年平均總匯量為 $12.94 \pm 1.50 \text{ Gt CO}_2\text{-eq}$ 、熱帶森林砍伐總排放量為 $7.81 \pm 2.05 \text{ Gt CO}_2\text{-eq}$ ，在碳匯與碳源一來一往間，使平均全球森林淨碳匯減少為 $5.10 \pm 2.53 \text{ Gt CO}_2\text{-eq}$ 。為了應對全球暖化，森林碳匯是必不可少的，對現有森林的有效保護和管理可以最大限度地提高碳吸收。除此之外，還需要重新造林，以進一步降低大氣中 CO_2 濃度，同時保護生物多樣性、增強其他生態系統服務並支持當地經濟(Waring et al. 2020)。

2.2.2 土壤碳匯

土壤碳匯是指植物吸收大氣中的二氧化碳，將碳固定並儲存為土壤有機質的過程。目的是增加土壤有機碳(Soil Organic Carbon, SOC)的密度，改善 SOC 的深度分佈，並透過穩定化延長碳的儲存時間，從而保護碳免受微生物分解的影響(Lal 2004)。根據 Friedlingstein et al. (2022)的研究顯示，在 2010 年代，平均每年土壤碳匯為 $5.5 \pm 1.83 \text{ Gt CO}_2\text{-eq}$ 。雖然土壤碳匯的吸存量不及森林，但其對減少溫室氣體排放仍具有重要潛力。為了提升土壤碳匯的潛力，可採用再生農業措施，如保護性耕作、覆蓋作物和生物炭添加，來改善土壤結構並提高碳儲存能力。同時針對氣候變化，制定區域適應性策略，選擇耐旱作物和靈活管理方式，確保土壤碳匯的穩定性與持續性(Villat and Nicholas 2024; Wiltshire and Beckage 2023)。

2.2.3 海洋碳匯

海洋在降低全球大氣的二氧化碳中扮演了重要的角色。自從工業革命以來，海洋吸收了人類 25 - 30%的二氧化碳排放量(Terhaar, Frölicher, and Joos 2022; Landschützer et al. 2014; Zhang et al. 2022)。由於二氧化碳在海水中的溶解度高，能解離成碳酸根離子，因此海洋成為了重要二氧化碳碳匯(McKinley et al. 2017)。根據 Gruber et al. (2023)的研究發現，1990-2019 年間，每年海洋平均吸收率為 $9.9 \pm 1.1 \text{ Gt CO}_2\text{-eq}$ 。然而，隨著二氧化碳吸收的增加，海洋酸化的現象愈加明顯，對海洋生態系統和化學平衡產生影響並威脅生態系統的穩定性。此外，隨著全球變暖，海水溫度上升將降低二氧化碳在海水中的溶解度，削弱其作為碳匯的效率(Gruber et al. 2023)。未來，隨著這些因素的交互作用，海洋可能從一個穩定的二氧化碳匯逐漸轉變為潛在的二氧化碳排放源，這將對氣候系統產生影響。

2.3 淡水水體

與海洋相對應，淡水在全球碳循環中也扮演著不可忽視的角色。海洋在吸收大氣中的二氧化碳發揮了巨大的影響力，但淡水則能在更短期內調節碳的儲存與釋放。地球上的淡水僅佔水資源的 2.5%，對地球上的所有生命至關重要(Gleeson et al. 2020)，淡水涵蓋了河流、湖泊、池塘、水庫等多種形態。這些水體不僅支持了生態系統的運行，也在人類生活和經濟活動中發揮了不可替代的作用。本節將探討淡水水體的種類、碳排放特性及其對全球碳循環的影響，以及國內外相關研究的進展情況。

2.3.1 淡水水體的種類

淡水可以按照形態和功能分為河流、湖泊、水庫等，它們在自然環境和人類生活中都扮演著重要角色。河流是地表的動態水體，連接陸地及海洋，負責把水資源輸送到各地，同時運輸有機物和營養物，為生物提供棲息地和食物。此外，河流有稀釋和減少污染的作用，幫助維護生物多樣性，但像水深、水溫、流速這些因素會影響水生生物的生活環境(Wang and He 2022)。

湖泊則是靜態的水體，是一個小型的生態系，包含水、生物、植物等，這些動植物間會相互影響。湖泊不僅能蓄水，還能調節氣候，特別是在乾旱或極端氣候條件下，湖泊對區域水循環具有關鍵作用。但如果水質變差，會對環境和經濟發展帶來很大的影響(Jiang Jia-hu 2004)。

水庫則是人工建造的湖泊，主要用來儲水、灌溉、發電和防洪。雖然水庫對解決水資源短缺和能源供應有很大幫助，但它們也可能帶來生態問題，例如攔截沉積物會改變下游水域的水質和生態環境，影響生物的遷徙和繁殖；而水庫的蓄水過程中，水中有機物的分解也可能釋放溫室氣體，進一步加劇氣候變化(Nilsson 2009)，不同類型的淡水各有其功能和影響，日常的維護及管理，對自然環境和人類都至關重要。

本研究的主要水體是都市水體，與自然湖泊及水庫不同，這類湖泊不僅提供了自然景觀，也是周遭居民重要的休閒場所，閒暇之餘，居民可以在此釣魚、划船、聊天以及運動等等(Bi et al. 2024; Schafft et al. 2024)，讓人們在繁忙的生活中放鬆身心、舒緩壓力。

2.3.2 淡水碳排放及其對全球碳排放之貢獻量

淡水是水循環和生物多樣性所組成，也是全球碳循環的重要參與者(Thalasso et al. 2022; Grasset et al. 2020; Sun et al. 2022)。河流、湖泊及水庫等不同類型的淡水能通過有機碳的分解、沉積及氣體交換等過程，釋放大量二氧化碳和甲烷，對全球碳排放有著舉足輕重的影響(Bhushan, Goyal, and Srivastav 2024; Li et al. 2024)。河流有流速快、水利停留時間較短、紊流和水深淺的特性，促進了氣體交換速率，因此河流通常是二氧化碳排放的主要來源。此外，河流的排放量與其流域的土地利用密切相關，例如，農業活動和城市化會顯著增加水體中的有機物含量，進而加劇二氧化碳的釋放。

在包含亞馬遜流域的情況下，每年的碳排放約 1.1 Pg C，相比之下，湖泊和

水庫因為流速慢且有水生植物及藻類的影響，二氧化碳排放量較低，估計為每年約 0.3 Pg C。這一差異也反映出湖泊和水庫在碳吸存的方面可能具有不同的功能。例如，水庫可能成為碳的長期儲存庫，雖然會釋放一定量的碳，但相對於其他類型的水體，它們在全球碳循環中的作用相對較小。河流每年碳排放量約佔淡水總量的 60 - 70%。而湖泊的碳排放量明顯較低，僅佔淡水碳排放總量的 10 - 20%(Vachon, Sponseller, and Karlsson 2021; Cole et al. 2007; Raymond et al. 2013)。

2.3.3 國內外淡水水體溫室氣體通量相關研究

內陸水域面積為 $3.6 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，主要包括河流、湖泊、水庫和濕地，約佔全球面積的 2.67%，其中 90%以上的內陸水體是湖泊。因此，內陸水系統在全球碳循環中發揮重要作用(Mehner 2009; Raymond et al. 2013; Kazanjian et al. 2018)，隨著全球氣候變遷的加劇，淡水的碳吸存與排放成為研究的熱點。

為國內外湖泊與水庫氣體通量資料，顯示了中國、美國和台灣多個湖泊及水庫的溫室氣體通量的排放數據和以二氧化碳當量為單位的通量($\text{g CO}_2\text{-eq m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)所計算出的全球暖化潛勢(Global Warming Potential, GWP)，說明了不同地點間的通量的差異以及各個湖泊對全球暖化的影響。中國的三峽水庫是二氧化碳通量次高的地點($1230.2 \pm 110.0 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)，同時也有較高的甲烷通量($11.84 \pm 1.28 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)，導致其單位面積下 GWP 範圍來到了 269.63 - 4537.37 $\text{g CO}_2\text{-eq m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，表明單位面積下中國大型水庫對全球暖化的貢獻潛力較高。

相比之下，美國的水庫如 F.D. Roosevelt、Dworshak、Wallula、New Melones 則顯示出平均二氧化碳通量呈現負值，說明這些地方具有二氧化碳吸收的潛力，同時甲烷的通量也較低，顯示雖然同為水庫，但根據地點的不同，對於溫室氣體通量來說仍有很大的差異性。也因為美國的湖泊與水庫有較低的二氧化碳與甲烷通量，因此 GWP 較低，表明單位面積下，美國的淡水水體對全球暖化的潛在影響較為有限。

而台灣目前的研究多集中於濕地、潟湖以及埤塘，大部分二氧化碳與甲烷的通量均為正排放，並且與中、美兩國相比，台灣同時擁有較高的甲烷及二氧化碳通量。在虎頭埤、大潭人工濕地、大同光電埤塘以及高榮 731 號埤塘有觀察到較高的甲烷通量，這表明，即使台灣的水體面積相對較小，其溫室氣體通量仍不可忽視。然而，目前台灣對湖泊的研究相對較少，特別是都市湖泊。在都市周邊的湖泊往往受污染物如氮磷化合物的影響，這可能導致藻華的爆發，進而影響碳的

沉積和吸收。因此希望透過本研究收集都市湖泊的碳排放與吸收的實際數據，將有助於填補當前研究的空白，並為制定有效的碳管理策略提供科學依據。



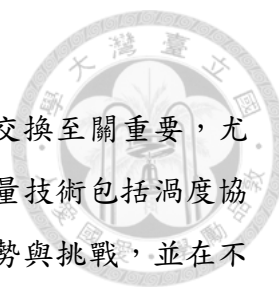


表 2.1 國內外湖泊與水庫氣體通量資料

國家	名稱	平均深度 (m)	年均溫 (°C)	時間	年平均氣體通量		GWP (g CO ₂ -eq m ⁻² yr ⁻¹)	來源
					CO ₂ (g CO ₂ m ⁻² yr ⁻¹)	CH ₄ (g CH ₄ m ⁻² yr ⁻¹)		
中國	湯遜湖	1.85	16.3	2022.11-2023.3	123.3 ± 166.1(日)			(Wang et al. 2024)
					155.5 ± 147.6(夜)			
中國	東湖	2.5	16.7	2003.4-2004.3	121.3 ± 58.4	8.51 ± 6.79	-499.32 - 2704.32	(Xing et al. 2005)
中國	烏梁素海	1.7	7.5	2020.1-2021.1	99.0 ± 24.9	15.59 ± 4.41	519.84	(Li et al. 2022)
中國	三峽水庫		19.6	2011.3-2012.8	1230.2 ± 110.0	11.84 ± 1.28	269.63 - 4537.37	(Li et al. 2021)
美國	St. Augustin (聖奧古斯丁湖)	6	19.3	2010.6-2010.10	-541.2-303.6	0.53-22.13	-526.43 - 901.20	(Bartosiewicz et al. 2021)
			18.6	2011.6-2011.10	-364.5-979.7	0.47-13.47	-351.87 - 1343.33	
			19.7	2012.6-2012.10	-483.3-1331.4	0.87-43.80	-459.87 - 2512.17	
美國	F.D Roosevelt	44	21.7	2001.9	-168.6 ± 94.9	1.17 ± 0.59	-295.2 - 172.43	(Soumis et al. 2004)
美國	Dworshak	65	21.9	2001.9	-436.2 ± 166.1	1.60 ± 1.17	-825.6 - -116.9	
美國	Wallula	18	20.4	2001.9	-138.4 ± 206.6	3.28 ± 1.28	-560.1 - 554.4	
美國	Shasta	36	23.6	2001.9	455.1 ± 152.2	3.47 ± 3.13	113.33 - 1072.5	
美國	Oroville	107	23.9	2001.9	374.5 ± 238.0	1.53 ± 0.99	107.93 - 990.43	
美國	New Melones	44	24.5	2001.9	-432.9 ± 242.7	2.59 ± 1.57	-1219.9 - 100.7	

台灣	七股潟湖	1.0 - 1.6	29.2	2010.9-2011.5	147.8 ± 96.3	2.09 ± 0.63	104.2 - 603.22	國家重要濕地 碳匯功能調查 計畫(100.10)
台灣	七股紅樹林	0.3	33.7	2010.9-2011.5	387.2 ± 362.7	4.16 ± 7.52	-577.25 - 2379.01	
台灣	虎頭埤	2.0 - 6.0	30.5	2010.9-2011.7	304.2 ± 264.9	14.67 ± 12.85	-141.24 - 3657.9	
台灣	雙連埤濕地	1.28		2019.1.3- 2019.1.6	606.1 ± 119.2 -1043.9 ± 281.6	-4.99 ± 8.80 -3.95 ± 1.20	471.5 - 1150.5	(宋明儒 and 林幸助 2019)
台灣	大潭人工濕地		24.1	2017.3-2018.3	635.1 ± 389.8	11.21 ± 10.25	335.5 - 1666.2	註 1
台灣	夢幻湖	0.4	20.2	2019.2-2019.10	282.7 ± 214.5	1.16 ± 0.27	-247.62 - 828.57	(宋明儒 2021) (周郁閔 2021)
台灣	大同光電埤塘	1.68	25.7		819.5 ± 191.4	9.60 ± 1.67	624.0 - 1714.67	
台灣	高榮 731 號埤 塘	0.59	25.2		2202.2 ± 532.0	16.41 ± 3.24	1099.1 - 4432.43	
台灣	南投草坵濕地	0.48	14.7		560.3 ± 129.4	3.48 ± 0.52	270.93 - 965.52	
台灣	雙連埤濕地	1.28	23.6	2018.1-2018.11	91.7 ± 133.1	2.97 ± 0.35	-41.18 - 635.29	

註 1：國家科學及技術委員會(2018)，海岸溼地與鹹水型人工溼地減緩溫室氣體排放以增強藍碳碳匯能力之研究
(計畫編號：MOST 107-2621-M-110-001)。



2.4 溫室氣體通量的測量技術與方法

溫室氣體通量的測量對於評估生態系統與大氣之間的氣體交換至關重要，尤其是在碳循環、溫室氣體排放和氣候變遷的研究中。常見的測量技術包括渦度協方差法、邊界層法和漂浮式氣罩法，每種方法都有其獨特的優勢與挑戰，並在不同環境條件下具有不同的適用性。

2.4.1 渦度協方差 (Eddy covariance measurements)

渦度協方差法是一種直接測量生態與大氣之間氣體通量的技術，廣泛應用於陸地和水域環境。其原理是通過測量空氣中垂直風速和氣體濃度的瞬時協方差來計算氣體交換的通量密度。這種方法可以提供生態系統與大氣之間連續、高頻率的通量測量，涵蓋較大的空間尺度。該技術的操作包括對數據進行異常值的去除、風向校正、時間滯後計算以及溫濕度校正。此方法的優點在於能夠提供長期且穩定的通量數據，並且無需假設參數化，並可自動化連續測量，能夠覆蓋大範圍，且提供從日到年尺度的詳細數據。然而，渦度協方差法也有其局限性。首先，它需要高頻率和高精度的儀器，並且必須假設測量區域的水平均一性和穩態條件。這限制了其此方法在變動較大的環境中的有效性，特別是對於小範圍的測量，可能受到地形、風速變化等因素的影響。此外，在數據處理中，這種方法會過濾掉部分低頻通量變化，可能會低估或忽略一些重要的變化趨勢。(Baldocchi 2014; Podgrajsek et al. 2016; Mauder et al. 2021)。

2.4.2 邊界層法 (Boundary layer method)

邊界層法是一種基於半經驗方程式的通量測量技術，通過測量水中溶解的氣體濃度、風速及水溫等參數來計算水氣界面的氣體交換通量，主要是利用濃度梯度和氣體交換係數(k)進行估算。

此方法最初應用於海洋環境研究，後來拓展至淡水溫室氣體排放的監測。邊界層法的優點在於操作簡單、成本低，且可搭配自動化裝置進行高頻測量，能快速完成大量測點的數據採集，每個測點只需不到 5 分鐘，特別適合觀測溫室氣體排放的短時間變化。然而，此方法存在比較多的缺點。首先，在低風速(<5 m/s)和高風速(>10 m/s)條件下準確性並不高，氣體交換係數(k)的估算精度大約為 $\pm 30\%$ 。其次，與漂浮式氣罩法(floating chamber)相比，邊界層法通常低估二氧化碳和甲烷

的實際排放通量，特別是在風平浪靜或淺水區域。實驗中也觀察到，低風速下水氣界面的氣體交換與風速的關係可能是非線性的，這進一步增加了誤差。此外，偏遠地區的水樣難以即時送至實驗室進行分析，導致實驗室測得的濃度偏低，可能影響結果準確性。這些問題導致邊界層法在小範圍和變化較大的環境中較為不適用，且難以估算大範圍水體的溫室氣體排放(Duchemin, Lucotte, and Canuel 1999; Lambert and Fréchette 2005)。

2.4.3 漂浮式氣罩法 (floating chamber)

漂浮式氣罩法是一種高效且靈活的方法，用於測量水體與大氣之間的氣體交換。其原理是將採樣箱漂浮於水面上，箱內的氣體濃度會隨著時間累積變化，通過分析這一變化可以推算氣體的通量。此方法結構設計簡單，但能有效捕捉水-氣界面的氣體交換過程，因而被廣泛應用在水體碳循環和溫室氣體排放的研究中。

漂浮式氣罩法的一大優勢是操作簡單且適用範圍廣。採樣箱的結構輕巧以便於攜帶與放置於水面上，適合各種現場條件，尤其是偏遠地區或短期調查。此外，此方法成本低廉，能夠快速完成局部區域的氣體收集，並在結合實驗室儀器檢測後，提供可靠且精確的氣體通量數據。儘管如此，漂浮式氣罩法也面臨一些挑戰。採樣箱可能遭受水流的干擾，從而影響測量的準確性，因此會出現數據高估或低估的現象。此外，由於其主要針對小範圍作量測，需結合其他大範圍方法才能全面反映整體系統的氣體交換狀況(Baldocchi et al. 2020; Mannich, Fernandes, and Bleninger 2019; Lambert and Fréchette 2005)。

渦度協方差法能提供長期穩定的數據，適合研究大範圍環境中生態系統與大氣的相互作用，但在小範圍與不穩定環境中受限於儀器精度和數據處理，未來可結合其他方法優化應用。邊界層法操作簡便、經濟，適合短期高頻測量，但易受風速影響低估通量，且樣品運送限制削弱數據準確性，需與其他技術結合以提升精度。漂浮式氣罩法成本低、操作簡單，適合小範圍與短期測量，能快速提供可靠數據，雖可能遭受水流干擾，但特別適用於台灣湖泊的小規模碳循環與溫室氣體研究。因此，漂浮式氣罩法成為我研究水體碳循環與溫室氣體排放的最佳選擇。

2.5 本論文填補之知識缺口

目前，亞熱帶地區淡水生態系統的溫室氣體通量研究相對稀少，現有數據因樣本數量不足及實地量測的限制，往往不夠完整。而在台灣，相關研究主要集中於濕地、潟湖及埤塘等水體，對都市水體的研究相對較少。尤其是都市湖泊中氮、磷等營養鹽濃度及其他水質參數對溫室氣體通量的影響，尚缺乏明確的科學驗證。

為了解決上述問題，本研究針對台灣都市湖泊進行深入探討，透過數據蒐集與分析，觀察其二氧化碳與甲烷的排放特性。本研究將調查不同季節、時段及環境條件下的溫室氣體通量，並分析水質參數與溫室氣體排放的相關性。此外，藉由與不同緯度及其他水體的比較，探討都市湖泊是否存在顯著差異。

第三章 材料與研究方法



3.1 研究架構及流程

本研究之研究架構圖如圖 3.1 所示。首先，設計採樣箱的尺寸、材質、採樣口位置，並架設好浮力棒，接著進行採樣箱的測試，以確保箱子能夠平穩的飄浮在水面上，並檢測是否會有漏氣的情形發生。確認採樣方法無誤後，選定在實場的採樣點，並進行氣體分析、水質檢測以及環境因子的測量。

本研究透過實地調查，分析都市湖泊二氧化碳和甲烷的氣體通量，評估其溫室氣體排放情況，並探討溫室氣體與水質參數及環境因子間的關聯性。

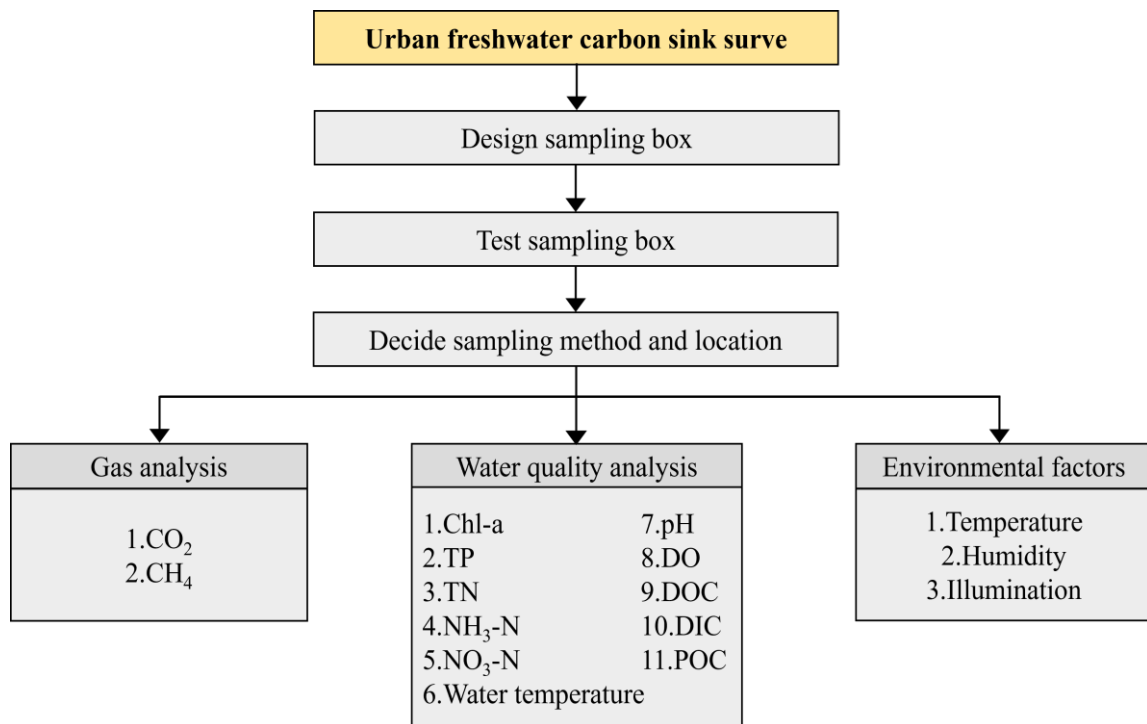


圖 3.1 研究架構圖

3.2 採樣地點

3.2.1 龍潭大池

龍潭大池原名「靈潭陂」，於清乾隆 13 年（1748 年）開闢，最初用於灌溉周邊村落。因閩南語與客語中「靈」與「龍」同音，「靈潭陂」逐漸演變為「龍潭陂」，並於民國 9 年簡化為「龍潭」。龍潭大池因區域內擁有一處大型水池而得名，對龍潭地區的開墾與農業發展具有關鍵貢獻，是當地重要的水資源與農業基礎。

龍潭大池位於老街溪最上游，民國 60 年為推動觀光發展而整建，成為兼具教育、休閒與滯洪功能的多用途水域。每年端午節更舉辦龍舟比賽，吸引觀光人潮，活絡地方經濟。據統計，龍潭區現有人口約 12.7 萬人，龍潭大池即位於其市中心，地理座標為 $24^{\circ}51'42.1''\text{N}$, $121^{\circ}12'36.1''\text{E}$ ，海拔約 230 公尺，水深介於 0.5 至 2 公尺之間(羅銀環 2017)，地處高密度人口區，具重要的水文、生態與觀光價值。然而，近年來因居住人口增長與觀光活動頻繁，導致農業排水與生活污水匯入，加上餐廳、公廁與攤販產生的廢水直接排入湖中，使得水體優養化問題日益嚴重。

如圖 3.2 所示，在龍潭大池周圍設置 3 個採樣點，分別為 L1、L2、L3，並將一天分為 3 個時段進行採樣，分別為 6:00-10:00、10:00-14:00、18:00-22:00(無日照)，比較各時段每個採樣點間的氣體通量差異。並利用 ArcGIS 繪製湖面之面積，得到總面積為 101690 m^2 ，並切割各樣點所代表的區域(EX：L1 為 23305 m^2 ...)，以利後續將通量乘上面積可得到此湖泊之碳的變化量。

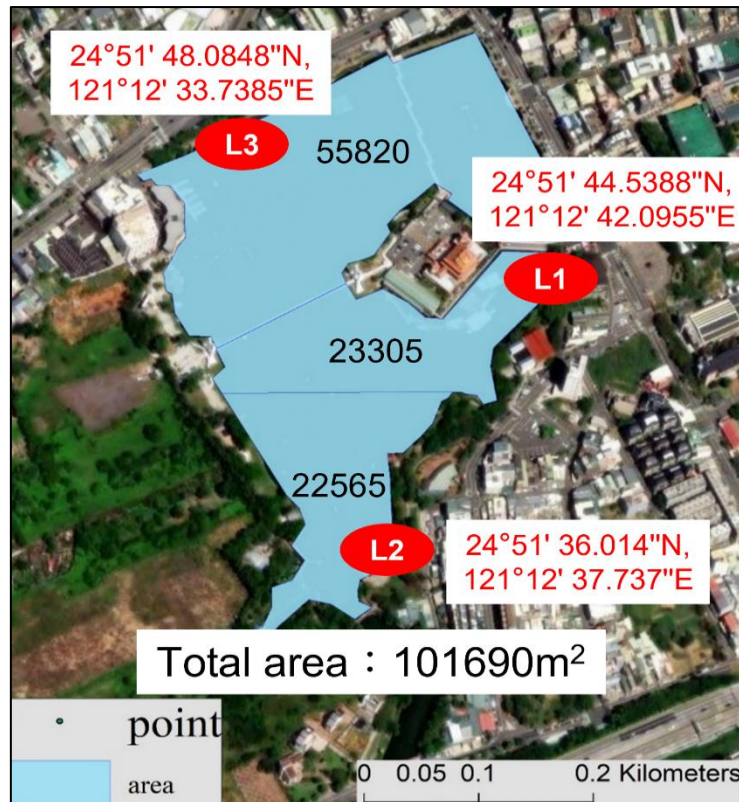


圖 3.2 龍潭大池採樣點

3.2.2 大湖公園

大湖公園，舊稱「十四分陂」，位於台北市內湖區（25°5'1"N 121°36'9"E），曾為內湖八景之一。自民國 68 年正式闢建以來，成為都市化背景下的重要綠地與休閒場所，兼具防災滯洪與生態景觀功能。園區設施完善，包括游泳池、歌臺、水榭、九曲橋、健康步道與涼亭等，除提供市民日常散步與運動空間外，也常作為假日活動的舉辦場地，促進社區凝聚與互動交流。

然而，隨著人為活動頻繁，大湖湖域近年出現水質惡化問題。因不當釣魚行為撒餌、民眾放養鴨鵝、放生外來魚種等因素，導致魚類大量繁殖、水體營養鹽濃度上升，進一步促進藻類生長，特別在夏季高溫與水流緩慢條件下，易產生藻華現象，影響水質與湖泊生態平衡。為改善湖域環境，台北市政府已採取多項綜合性措施，包括限縮釣魚區、設置生態浮島、定期移除外來魚種、推動民眾參與志工移除行動，並加強巡邏與宣導，期望透過跨局處合作逐步改善水質與維護都市湖泊功能。

如圖 3.3 所示，在大湖公園西邊設置 3 個採樣點，分別為 D1、D2、D3，並將一天分為 3 個時段進行採樣，分別為 6:00-10:00、10:00-14:00、18:00-22:00(無日照)，比較各時段每個採樣點間的氣體通量差異。並利用 ArcGIS 繪製湖面之面積，得到總面積為 105671 m²，並切割各樣點所代表的區域(EX：D1 為 45926 m²...)，以利後續將通量乘上面積可得到此湖泊之碳的變化量。

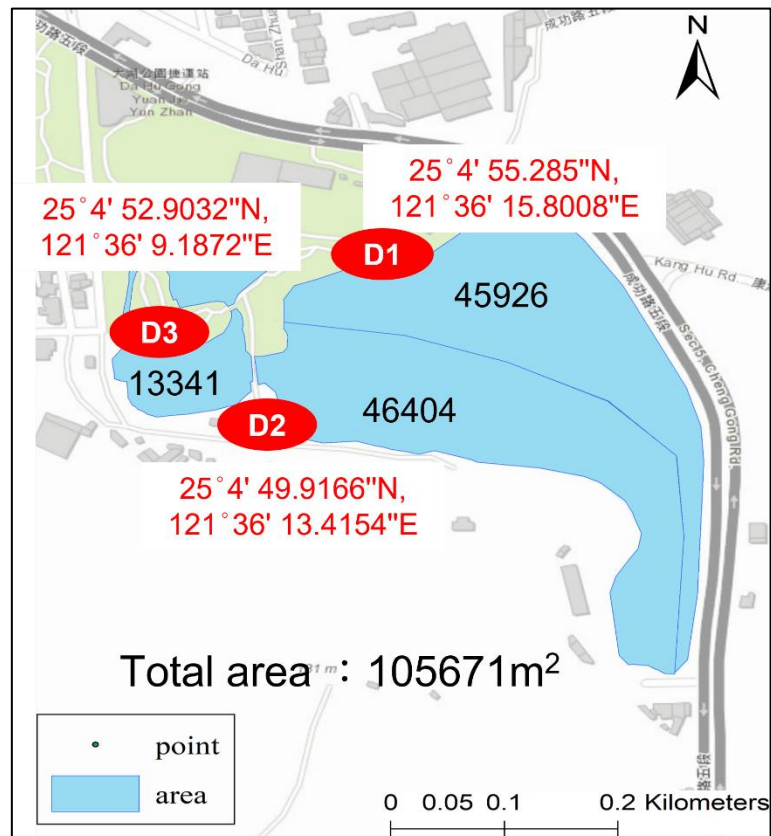


圖 3.3 大湖公園採樣點

3.3 溫室氣體通量

3.3.1 採樣箱設計

漂浮式氣罩法常被用於量測湖泊、水庫等水體中氣體通量的變化，特別是針對二氧化碳及甲烷(Deemer et al. 2016; Martinsen, Kragh, and Sand-Jensen 2018)，採氣箱使用透明壓克力作為材料，目的是使日光能照入箱內，使箱內條件接近於自然環境，同時，透明的材質也減少了對藻類行光合作用的抑制。

採樣箱為正立方體，尺寸為每邊長 30 公分，箱子四周的底部均挖出 10 個直徑 1.5 公分的小孔，目的為減少水體所帶來的擾動，將採氣孔設置在採氣箱的正上方，周圍使用浮力棒固定，以提供採氣箱浮力，並設計沉水深度為 3.5 公分，以防止氣體洩漏。採樣時，將採樣箱放置於水面上，待採樣箱平穩後，使用矽利康將橡膠塞封住上方的採氣口，然後開始計時。採樣箱的設計圖與實體圖如圖 3.4 所示。

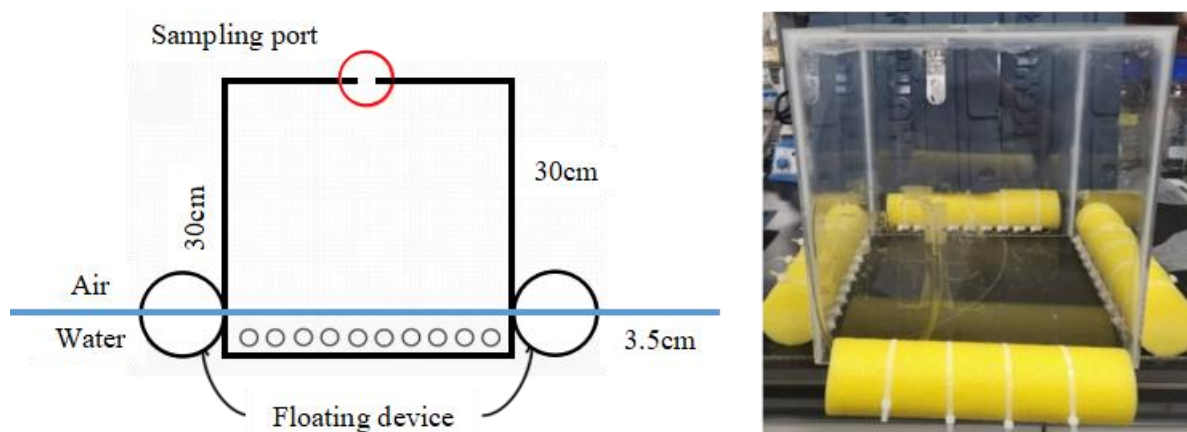


圖 3.4 採樣箱設計圖(左)及實體圖(右)

3.3.2 氣體收集與分析

在湖泊中設置 3 個採樣點，每個採樣點放置 1 個採樣箱，並在一天當中採集 3 個時段，分別為清晨(6：00-10：00)、中午(10：00-14：00)及晚上(18：00-22：00)，晚上會在光照度衰減至 0(LUX=0)才會開時進行採樣。

每個時段收集氣體的時間間隔為 60、150、240 分鐘，採樣頻率為一個月一次。氣體採集時先用氣密針筒從 14mL 的氣密採樣瓶中抽取 5mL 的氣體，再採集 5mL 的樣品注入氣密採樣瓶中，以維持氣壓的穩定，再將樣品利用氣相層析儀(Gas Chromatography Agilent 7890A, GC)進行分析，分析的氣體包含二氧化碳以及甲烷。分析條件如表 3.1 所示。

表 3.1 GC 分析條件

氣體 儀器條件	CH ₄	CO ₂
偵測器(Detector)	火焰離子檢測器(FID) (Flame Ionization Detector)	熱導檢測器(TCD) (Thermal Conductivity Detector)
管柱(Column) (長度×內徑×膜厚)	TG-BOND Msieve 5A (30m × 0.53mm × 50.0μm)	TG-BOND Q column (30m × 0.32mm × 10μm)
載流氣體	N ₂	He
管柱	60°C	60°C
注射(Inlet)	250°C	200°C
偵測器	300°C	200°C

3.3.2.1 溫室氣體通量計算

經由 GC-FID/TCD 所測得的二氧化碳以及甲烷濃度單位均為 mg/L。分析每一個採樣時段在第 60、150、240 分鐘所獲得的濃度(C)，經統計回歸分析可計算出 $\Delta C/\Delta t$ ，並將獲得的 $\Delta C/\Delta t$ 帶入公式(1)中，即可得到二氧化碳和甲烷的氣體通量($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)，若數值為正，為碳排；若數值為負，則為碳匯。

$$F_{gas} = H \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{M}{V} \times \frac{273}{273+T} \quad (1)$$



其中：

F_{gas} ：氣體(CO_2 或 CH_4)通量 ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)

H ：氣罩的高度(m)

$\Delta C/\Delta t$ ：氣體濃度隨時間的變化斜率($\text{mg L}^{-1} \text{h}^{-1}$)

M ：氣體分子量(g mol^{-1})(CO_2 為 44 與 CH_4 為 16)

V ：每摩氣體在標準狀態下(在 0°C , 1atm)所佔體積為 22.4 L mol^{-1}

T ：實際溫度($^\circ\text{C}$)

3.3.2.2 全球暖化潛勢計算

同時將溫室氣體通量做全球暖化潛勢的計算，根據 IPCC 第六次綜合報告中 (Ipcc 2023)指出，甲烷在 100 年間對全球暖化的影響力(GWP-100)根據來源的不同而有所差異，化石燃料產生的甲烷為 29.8，非化石燃料則為 27，因為湖泊為非化石燃料，因此本研究所採用甲烷的全球暖化潛勢值為 27，並利用公式(2)(Liikanen, Flöjt, and Martikainen 2002)即可得到以二氧化碳當量為單位的通量公式。

$$GWP_{ul} = CO_2 \text{ flux} + 27 CH_4 \text{ flux} \quad (2)$$

其中：

GWP_{ul} ：以二氧化碳當量之氣體通量所表示之全球暖化潛勢值($\text{mg CO}_2\text{-eq m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

3.3.2.3 總排放量計算

另外將得到的甲烷和二氧化碳氣體通量($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)分別乘上各採樣點所劃分出的區域面積後相加，即可得到兩個採樣地單位時間地的總排放量。

$$E = \sum_{i=1}^3 (F_i \times A_i) \quad (3)$$

其中：

E ：總排放量(mg h^{-1})

F_i ：氣體(CO_2 或 CH_4)通量； $i = 1, 2, 3$ ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)

A_i ：各點劃分之面積； $i = 1, 2, 3$ (m^2)

3.4 環境因子之量測

現場溫溼度使用溫濕度計(Thermo-Hygrometer, Anymetre TH-108)進行量測，照度則使用照度計(Light meter, Lutron LX-105)進行量測，每個採樣時段均量測三次，量測時會再採氣箱旁放置 5 分鐘後，待數據穩定後再進行記錄。

3.5 水樣採集與分析

在現地，使用採水器採集 0.5m 深的表層水，將水樣裝入容量為 1L 的廣口瓶中。為減少干擾，每次採樣前均以待採集的水樣對廣口瓶進行潤洗。採樣後，立即將水樣置於冰桶中保存，以維持水樣的穩定。

在進行水質分析前，除了葉綠素及顆粒性有機碳外，其餘樣品會先經過 0.45 μm 針頭過濾，隨後進行水質檢測。

3.5.1 酸鹼值(pH)、溶氧(Dissolved Oxygen, DO)與水溫

本研究記錄樣品 pH、DO 以及水溫的狀態。pH 分析使用 Orion Star™ A329 便攜式多參數測量儀(Thermo Scientific, USA)，並參照環檢署提供的 pH 值之檢測標準方法(NIEA W424.53A)測定；DO 同樣以 Orion Star™ A329 便攜式多參數測量儀(Thermo Scientific, USA)，依照環檢署水中溶氧檢測方法-電極法(NIEA W455.52C)之標準方法測定；水溫則以 K-TYPE TM-905 數位溫度計(HILA, Taiwan)，依照環檢署水溫檢測方法(NIEA W203.52C)。

3.5.2 氨氮(Ammonium Nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$)與硝酸鹽氮(Nitrate Nitrogen, $\text{NO}_3^-\text{-N}$)

本研究氨氮與硝酸鹽氮透過離子層析儀(Ion Chromatography, Dionex, Thermo Fisher Scientific)進行分析。參照環檢所提供的水中陰／陽離子檢測方法-離子層析法(NIEA W415.54B 、NIEA W461.50B)測定。樣品經過前處理後，使用 Dionex IonPac AS4A-SC 管柱進行陰離子分析；陽離子使用 Dionex IonPac CS12 管柱進行分析。最後，由訊號值對應的標準溶液濃度所得出的檢量線來獲得水中氨氮與硝酸鹽氮的確切濃度。

3.5.3 總氮(Total Nitrogen, TN)

總氮分析參照 Hagedorn and Schleppi (2000)的過硫酸鹽氧化法，樣品經前處理後，取 10mL 的水樣並加入 15mL 過硫酸鹽溶液(將 15g $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_7$ 溶於 250mL 0.5M NaOH 中並用超純水定量至 500mL)，之後將水樣置於高壓滅菌釜(1.2hPa，121°C)加熱 45 分鐘，冷卻後加入硫酸使其 pH 小於 1，最後用分光光譜儀(UV-VIS Spectrophotometer, UV-1280, Shimadzu)於波長 210 nm 處測得吸光值。

3.5.4 葉綠素 a (Chlorophyll-a)

葉綠素分析參照環檢所提供的水中葉綠素葉綠素 a 檢測方法-丙酮萃取法／分光光度計分析法(NIEA E507.04B)，樣品經玻璃纖維濾紙(Whatman GF/F, 直徑 47mm，平均孔徑約 $0.7 \mu\text{m}$)過濾後，加入 90%丙酮溶液 5mL 至濾紙中並搗碎，搗碎後再加入 90%丙酮溶液 5mL (共 10mL)，再利用振盪器進行混合後，放入暗處冷藏($4^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$)至少 2 小時，最後利用離心機(4000 rpm)離心 10 分鐘，取上澄液並以分光光譜儀(UV-VIS Spectrophotometer, UV-1280, Shimadzu)分別測得波長 750nm、664 nm、647 nm、630 nm 之吸光值(先用 90%丙酮溶液在波長 750nm 處進行歸零)，再利用公式(3)、(4)計算葉綠素 a 的濃度。

$$C = 11.85X - 1.54Y - 0.08Z \quad (4)$$

其中：

C：萃取液中葉綠素 a 之濃度(mg/L)

X：波長 664 nm 吸光值-波長 750 nm 吸光值

Y：波長 647 nm 吸光值-波長 750 nm 吸光值

Z：波長 630 nm 吸光值-波長 750 nm 吸光值

樣品中葉綠素 a 濃度($\mu\text{g/L}$)

$$= \frac{\text{萃取液濃度}(C) \times \text{萃取液體積}(\text{mL})}{\text{樣品過濾體積}(\text{L}) \times \text{樣品槽光徑}(\text{cm}) / 1(\text{cm})} \quad (5)$$

3.5.5 總磷(Total Phosphorus, TP)

總磷分析參照環檢所提供的水中磷檢測方法—分光光度計／維生素丙法(NIEA W427.53B)，採集水樣後先加入硫酸(H_2SO_4)使 pH 小於 2 酸化，並保存於 $4 \pm 2^\circ\text{C}$ 暗處冷藏，保存之玻璃瓶需先以 1+1 熱鹽酸洗淨。

分析時，水樣經前處理後，取 25ml 水樣加入一滴酚酞指示劑及 0.2g 過硫酸鈉，再置於高壓滅菌釜以 120°C ， $1.0\text{-}1.4\text{ Kg/cm}^2$ 加熱 30 分鐘，室溫冷卻後再加入一滴酚酞指示劑，並以 1N 氫氧化鈉溶液滴定，調整樣品至粉紅色，取消化後的樣品定量至 50 ml 並加入混合試劑(由硫酸溶液、酒石酸、鉬酸銨及維生素 C 配製)，混合均勻後，在 10-30 分鐘內以分光光譜儀(UV-VIS Spectrophotometer, UV-1280, Shimadzu)於波長 880 nm 處測得吸光值。最後，由於是經由高壓滅菌釜消化，樣品濃度已稀釋二倍，因此最後由檢量線所得出之濃度需乘 2 倍，即為正確之濃度。

3.5.6 溶解性有機碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)以及溶解性無機碳(Dissolved Inorganic Carbon, DIC)

溶解性有機碳與溶解性無機碳參照環檢所提供的水中總有機碳檢測方法——過氧焦硫酸鹽加熱氧化/紅外線測定法(NIEA W532.53C)。欲分析之水樣，須使用蓋內附有鐵氟龍墊片，體積 40mL 的透明樣品瓶盛裝。樣品瓶在使用前須添加中性清潔劑並放置於超音波震盪槽內清洗一次，隨後使用 Milli-Q 水(Millipore, USA)放入超音波震盪槽內清洗兩次並自然風乾。隨後使用高溫馬弗爐(ChiHow, Taiwan)以 550°C 灼燒 90 分鐘，以確保沒有有機質殘留。

水樣經前處理後，分析溶解性有機碳之水樣須加入 0.15mL 的磷酸進行酸化，使水樣中的無機碳完全轉化為 CO_2 來減少檢測時所受到的干擾，而溶解性無機碳則無需添加磷酸。最後再經由對應標準溶液所得出的檢量線來獲得樣品中的實際濃度。

3.5.7 顆粒性有機碳(Particle Organic Carbon, POC)

樣品經玻璃纖維濾紙(Whatman GF/F, 直徑 47mm, 平均孔徑約 $0.7\ \mu\text{m}$)過濾後, 紀錄過濾之水樣體積。過濾完後加入 1N HCl 至濾紙上酸洗, 再使用 Milli-Q 水將殘留之 HCl 沖洗, 爾後放入烘箱內以 65°C 烘乾濾紙至恆重。最後參照環檢所提供的碳、氫、硫、氧、氮元素含量檢測方法—元素分析儀法(NIEA M403.02B), 使用元素分析儀(elementar Vario EL cube for NCSH, German)分析濾紙上的碳所佔的重量百分比, 最後透過計算即可得知濾紙上顆粒性有機碳的含量。

3.6 Redundancy Analysis (RDA)

RDA 是 PCA (Principal Component Analysis) 的延伸, 並提供一個視覺化的雙變量圖(triplot), 可以同時顯示響應變量以及解釋變量之間的關係, 使變量之間的相關性更淺顯易懂。RDA 可以量化解釋變量對響應變量的解釋能力, 提供了更多的統計指標, 如解釋變異的百分比, 有助於更全面的理解資料結構。RDA 相較於 PCA 提供了更豐富的分析功能 and 解釋能力, 是一種更適合分析響應變量與解釋變量關係的多變量分析方法('Principal component analysis and redundancy analysis' 2007)

3.7 實驗儀器

本研究所使用實驗儀器及型號如表 3.2 所列：

表 3.2 實驗分析儀器

Parameters	Instrument	Brand	Model
CH ₄ 、CO ₂	Gas Chromatography	Agilent	7890A
Temperature、Humidity	Thermo-Hygrometer	Anymetre	TH-108
Illumination	Light meter	Lutron	LX-105
pH、DO	pH/DO meter	Thermo Fisher Scientific	Orion Star™ A329
Water temperature	Water thermometer	HILA	K-TYPE TM-905
NO ₃ ⁻ -N	Ion Chromatography(anion)	Thermo Fisher Scientific	Dionex ICS-5000+ DC, Dionex ICS-5000+ SP, ULtiMate 3000, Dionex IonPac AS4A-SC column
NH ₃ -N	Ion Chromatography(cation)	Thermo Fisher Scientific	Dionex A QUION, ULtiMate 3000, Dionex IonPac CS12 column
TN、Chl-a、TP	UV-VIS Spectrophotometer	Shimadzu	UV-1280
DOC、DIC	TOC Analyzer	OI Analytical	Aurora 1030
POC	Elemental Analyzer	Elementar	Vario EL cube

第四章 結果



4.1 龍潭大池

本研究針對龍潭大池進行為期一年的監測，採樣時間自 2024 年 1 月至 2025 年 1 月。此期間涵蓋春、夏、秋、冬，能夠反映氣候的不同所帶來的影響。

4.1.1 龍潭大池環境與水質參數

如圖 4.3 所示，氣溫呈現夏季高、冬季低的季節性變化。特別是在 2024 年 1 月，受寒流影響，當日氣溫降至約 5 - 10°C；其餘較冷月份的氣溫則大致維持在 15 - 20°C，夏季平均氣溫則達到約 30 °C。相比之下，濕度全年變化趨勢不明顯，平均範圍介於 40 - 80%之間，如圖 4.2 所示。照度方面，由於 2024 年 1 月和 5 月的量測當天為陰雨天，照度低於 10000 LUX；而夏季因太陽直射北半球，且天氣多為晴朗，平均照度較高，約在 20000 - 30000 LUX 之間，如圖 4.3 所示。根據表 4.1 的統計顯示，氣溫隨時段及季節變化有顯著差異，而濕度與照度則是隨著時段有顯著差異，而隨著季節變化則無顯著差異。

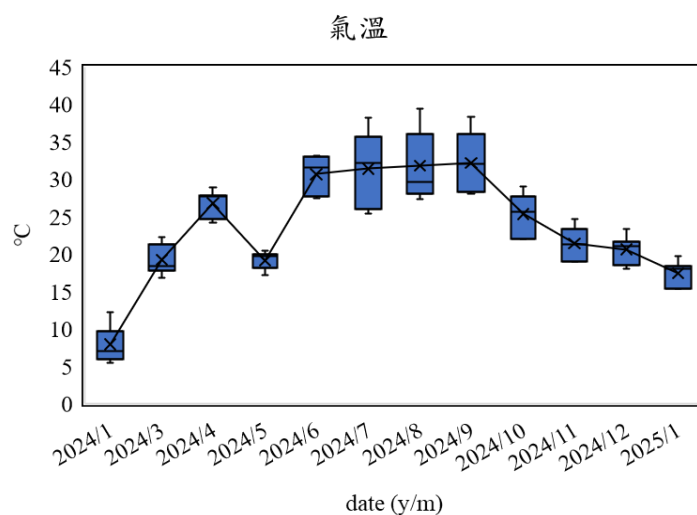


圖 4.1 龍潭大池氣溫變化盒鬚圖

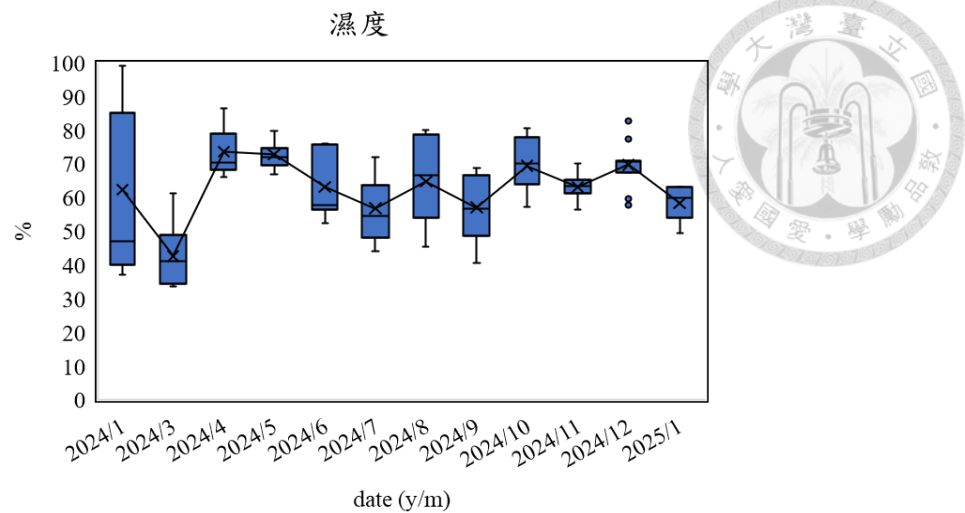


圖 4.2 龍潭大池濕度變化盒鬚圖

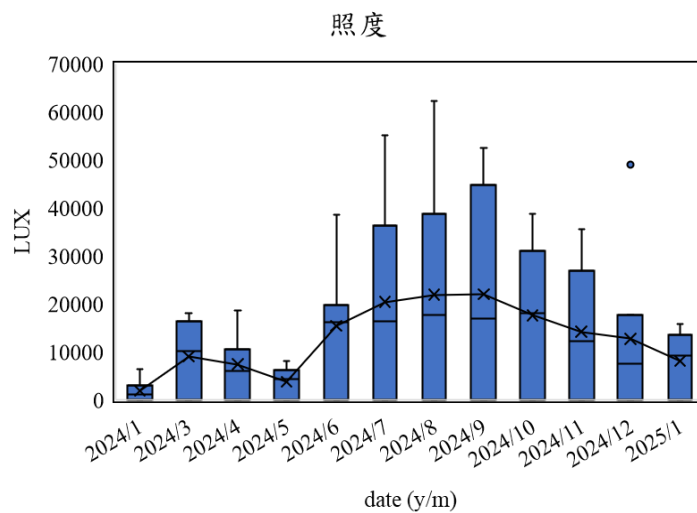


圖 4.3 龍潭大池照度變化盒鬚圖

如圖 4.4 所示，水溫與氣溫變化趨勢相似，均呈現夏季高、冬季低的特徵，最低溫同樣出現在 2024 年 1 月，約 5 - 10℃，而最高溫同樣出現在夏季，約 25 - 30℃，此外，在 6、7 月時也觀察到盒鬚圖的數據分布較大，可能是日夜溫差大所導致。如圖 4.5 所示，pH 在 2024 年 6-8 月期間略有下降，平均約為 7，但全年變化幅度不大，pH 主要落在 7 - 10 之間，也說明龍潭大池水質偏鹼性。如圖 4.6 所示，溶氧濃度的變化趨勢則與溫度相反，冬季平均溶氧濃度約為 10 mg/L，而夏季降低至 8 mg/L，呈現冬季高、夏季低，整年度溶氧範圍落在 6 - 14 mg/L 之間。這一現象主要是因為溶氧在低溫下的溶解度較高，而夏季高溫則會減少氧氣的溶解能力。根據表 4.1 的統計顯示水溫 pH、DO 隨時段及季節的不同均呈顯顯著差異。

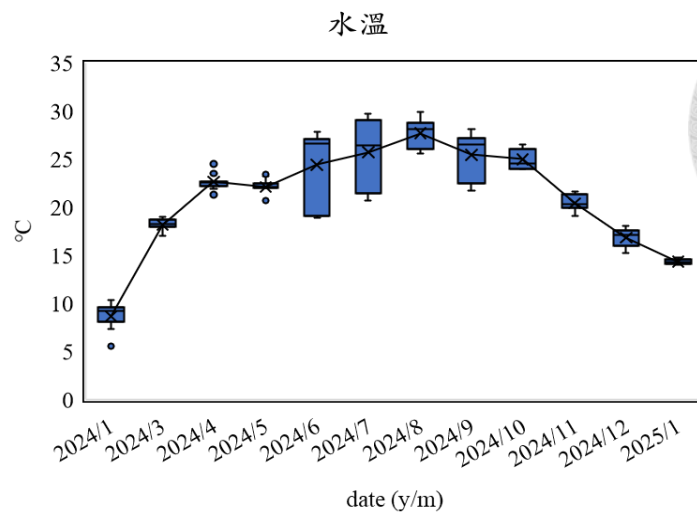


圖 4.4 龍潭大池水溫變化盒鬚圖

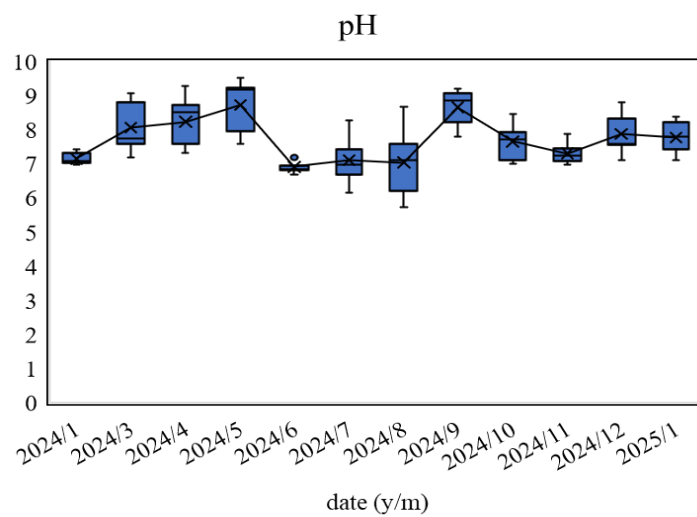


圖 4.5 龍潭大池 pH 變化盒鬚圖

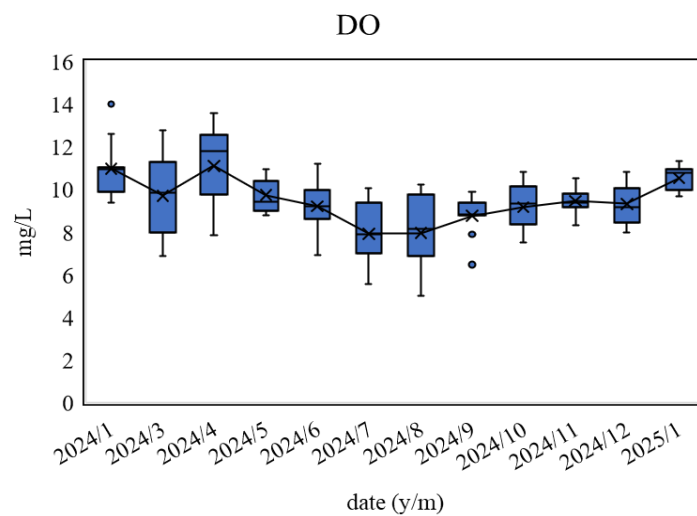


圖 4.6 龍潭大池溶氧變化盒鬚圖

如圖 4.7 所示，龍潭大池中全年氨氮平均濃度大約在 0 - 0.5 mg-N/L 之間，顯示大部分時間水體中的氨氮濃度較低。僅在 2024 年 3 月及 4 月觀察到較高濃度的氨氮，平均濃度分別為 1.94 mg-N/L 及 0.78 mg-N/L。如圖 4.8 所示，龍潭大池中全年硝酸氮濃度呈現夏季低、冬季高的趨勢，在 2024 年 5 - 9 月硝酸氮平均濃度在 0 - 1.0 mg-N/L 之間，而 2024 年 1、11、12 及 2025 年 1 月硝酸氮平均濃度在 2.5 - 4.0 mg-N/L 之間。如圖 4.9 所示，龍潭大池中全年總氮與硝酸氮趨勢一樣呈現夏季低、冬季高，在 2024 年 5 - 9 月總氮平均濃度在 1.0 - 2.0 mg-N/L 之間，而 2024 年 1、3、11、12 及 2025 年 1 月硝酸氮平均濃度在 3.0 - 5.0 mg-N/L 之間。此外，數據顯示總氮濃度中有相當大比例來自硝酸氮。根據表 4.1 的統計顯示，總氮、氨氮、硝酸氮隨著季節變化有顯著差異，但隨著時段變化則無顯著差異。

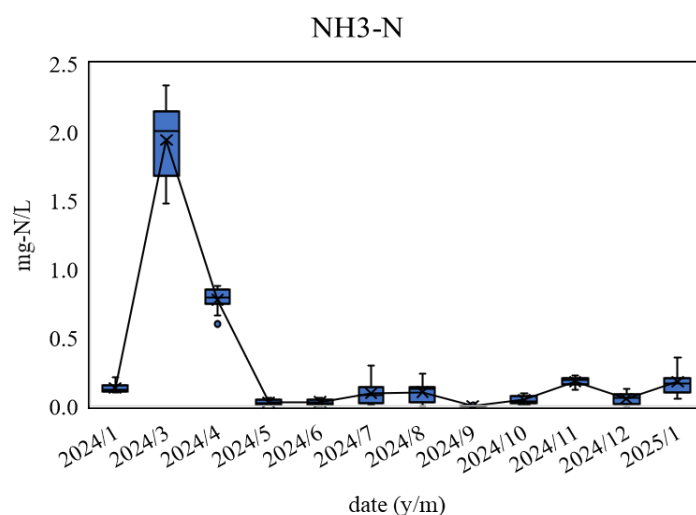


圖 4.7 龍潭大池氨氮變化盒鬚圖

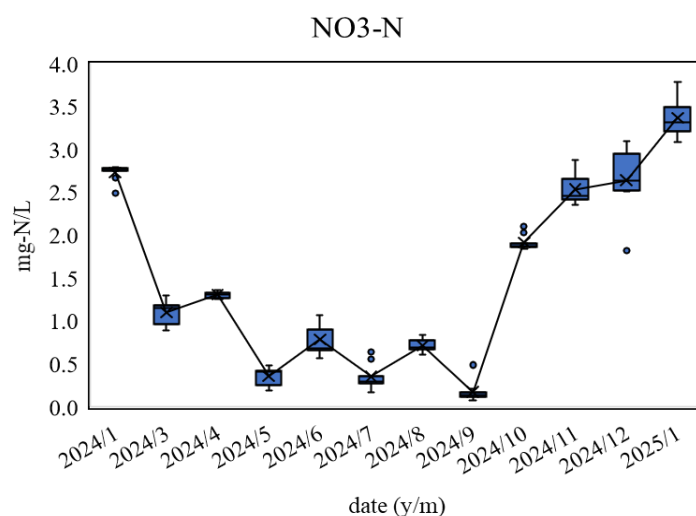


圖 4.8 龍潭大池硝酸氮變化盒鬚圖

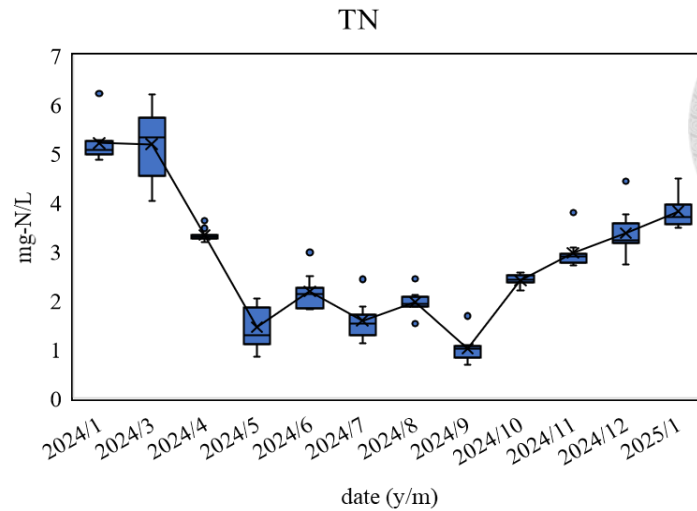


圖 4.9 龍潭大池總氮變化盒鬚圖

如圖 4.10 所示，龍潭大池中全年總磷並無隨著季節變化而有明顯的趨勢，但根據表 4.1 的統計顯示總磷在季節的變化上是有顯著差異。在 2024 年 4 月觀察到盒鬚圖內的數據分布較大，顯示採樣當天總磷濃度變化較大，整年平均總磷濃度在 0.05 - 0.20 mg-P/L 之間，根據環檢所提供之卡爾森 (Carlson) 單一參數指數判定優養化之標準，其中總磷濃度超過 0.024 mg/L 即為優養化，也說明龍潭大池整年都處於優養化的狀態中。

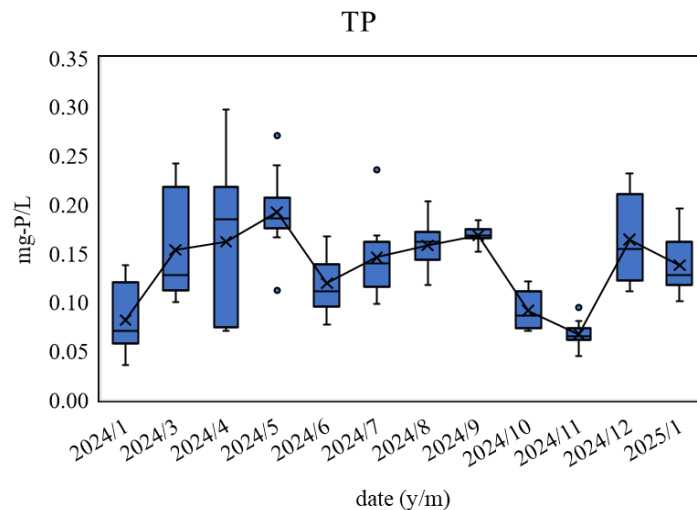


圖 4.10 龍潭大池總磷變化盒鬚圖

如圖 4.11 所示，龍潭大池中全年葉綠素 a 並無隨著季節變化而有明顯的趨勢，根據表 4.1 的統計顯示葉綠素不論隨時段或季節變化，均無顯著差異。整年葉綠素 a 平均濃度在 50 - 200 $\mu\text{g/L}$ 之間，但在 2024 年 9 月有觀察到高濃度的葉綠素 a，濃度為 296.0 $\mu\text{g/L}$ 。根據環檢所提供之卡爾森 (Carlson) 單一參數指數判定優養化之標準，其中葉綠素 a 濃度超過 7.2 $\mu\text{g/L}$ 即為優養化，也再次說明龍潭大池整年都處於優養化的狀態中。

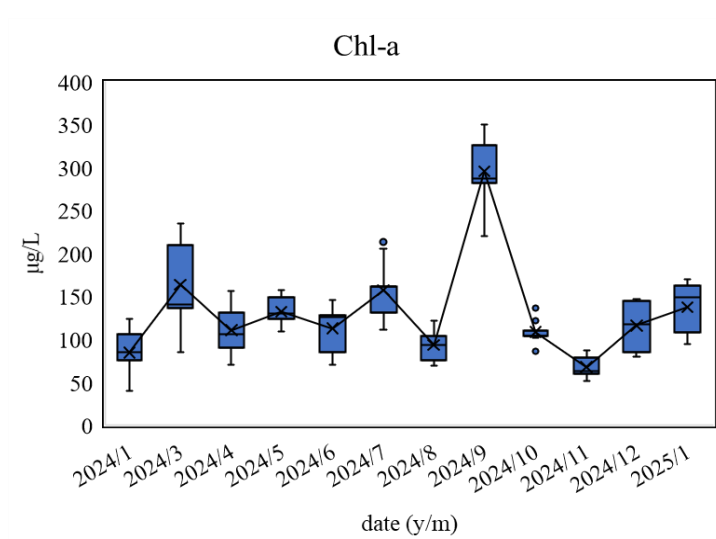


圖 4.11 龍潭大池葉綠素 a 變化盒鬚圖

如圖 4.12 所示，龍潭大池中溶解性無機碳在 2024 年 1 月到 7 月呈現下降的趨勢，平均從 9 ppm 下降至 6 - 7 ppm 之間，但在 7 月之後較無明顯的變動，平均濃度維持在 6 - 7 ppm。溶解性無機碳可能受呼吸作用、光合作用、降水或地表徑流等因素影響而改變(Zhao et al. 2015)。如圖 4.13 所示，龍潭大池中溶解性有機碳濃度在 2024 年 3 月至 9 月維持在 5 - 7 ppm，略高於 2024 年 1、10、11、12 及 2025 年 1 月的 4 ppm。根據表 4.1 的統計顯示溶解性無機碳以及溶解性有機碳會隨著季節的變化而有顯著差異，而以時段來分析則無顯著差異。

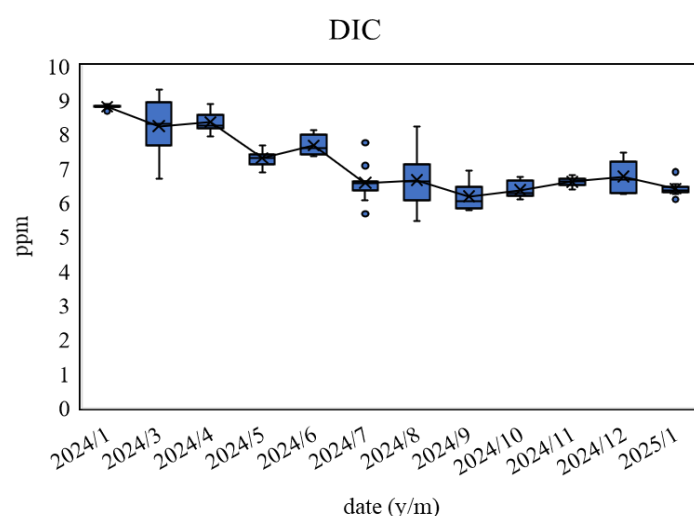


圖 4.12 龍潭大池溶解性無機碳變化盒鬚圖

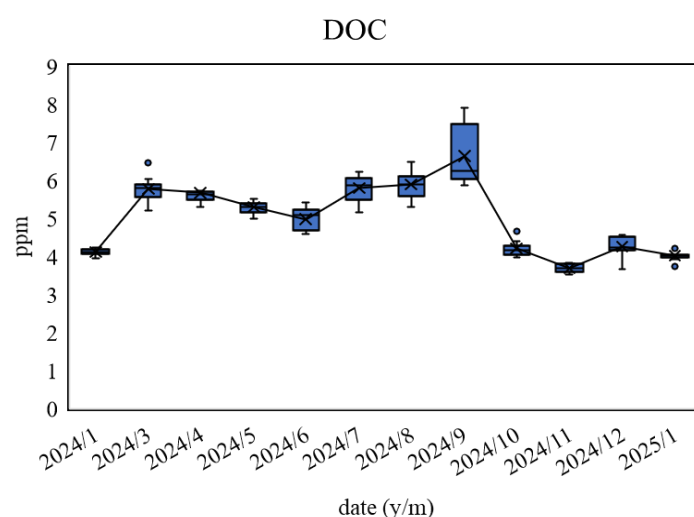


圖 4.13 龍潭大池溶解性有機碳變化盒鬚圖

如圖 4.14 所示，龍潭大池顆粒性有機碳全年濃度範圍在 2 - 10 ppm，並無隨著季節變化而有明顯的趨勢。圖 4.15 則為總有機碳，是溶解性有機碳與顆粒性有機碳相加的結果，可以反映有機碳對水體的影響，全年的濃度落在 6 - 16 ppm 之間，同樣在 2024 年 9 月觀察到高濃度的總有機碳，此現象通常是由藻類過度生長所引發的。根據表 4.1 的統計顯示顆粒性有機碳以及總有機碳會隨著季節的變化而有顯著差異，而以時段來分析則無顯著差異。

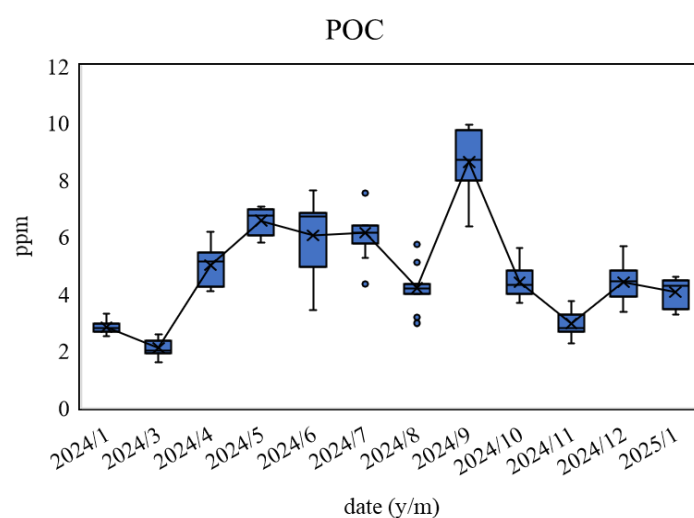


圖 4.14 龍潭大池顆粒性有機碳變化盒鬚圖

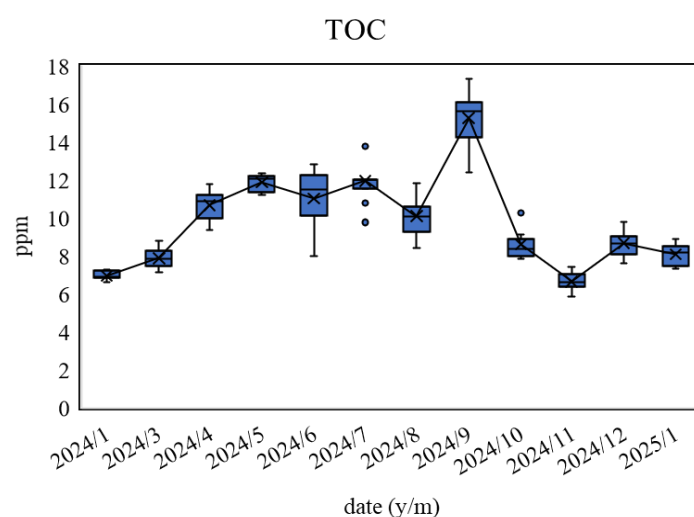


圖 4.15 龍潭大池總有機碳變化盒鬚圖

根據(Redfield 1958; Klausmeier et al. 2004)的研究中觀察到藻類平均以 106 : 16 : 1 的莫耳比吸收 C、N 和 P (質量 N:P 比約為 7)，當氮磷莫耳比高於 16 : 1 時，磷為藻類的限制因子；反之則由氮作為限制因子。由圖 4.16 可知，在龍潭大池的氮磷比(質量比)大部分都高於 7，也說明龍潭大池中大部分時間都是以磷作為藻類的限制因子，而在 2024 年 7 至 9 月份時有觀察到氮磷的質量比接近於 7，說明這時期的氮及磷同時為藻類生長的限制因子，而圖 4.17 也顯示總磷與葉綠素有正相關性。

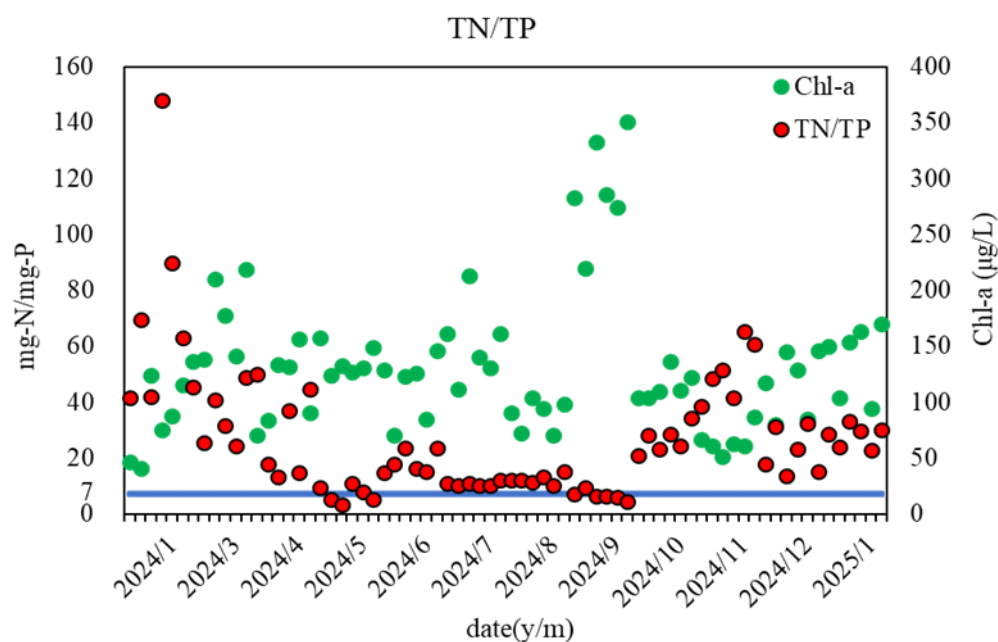


圖 4.16 龍潭大池總氮、總磷之比值

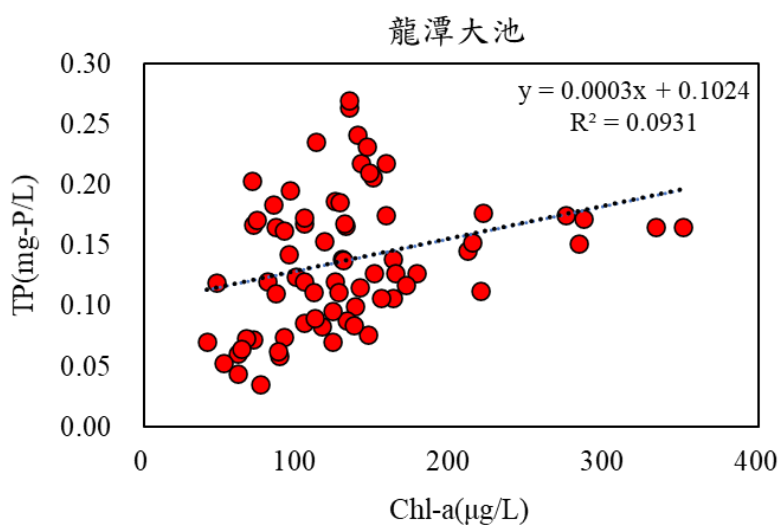


圖 4.17 龍潭大池總磷與葉綠素回歸線分析

4.1.2 龍潭大池氣體通量

4.1.2.1 龍潭大池當日氣體通量

如圖 4.18 所示，可以觀察到龍潭大池每月甲烷的碳通量大約落在 0 - 100 mg-CH₄-C/m²/d，只有在 3、5、7、9 月有較高的通量出現，分別為 135.63、138.60、154.28、575.75 mg-CH₄-C/m²/d，在 2024 年 5 月至 9 月平均通量在 26.47 - 93.76 mg-CH₄-C/m²/d 之間，比 2024 年 1、10、11、12 月及 2025 年 1 月的平均通量 3.64 - 19.65 mg-CH₄-C/m²/d 來的更高，顯示夏季通量高於冬季，也說明氣溫對甲烷的排放是有影響的，也顯示龍潭大池在 2024 年至 2025 年為甲烷的排放源。根據表 4.1 的統計顯示甲烷通量會隨著季節的變化而有顯著差異，其中又以冬天與春、夏、秋天之間有顯著差異。

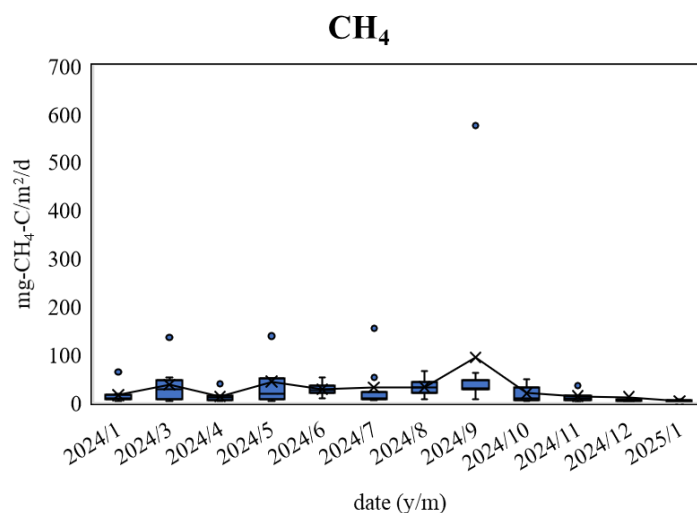


圖 4.18 龍潭大池甲烷通量盒鬚圖

如圖 4.19 所示，二氧化碳的碳通量大約在 -1000 - 1000 mg-CO₂-C/m²/d 之間，在 4 月與 8 月觀察到較高的負通量及正通量，分別為 -2684.76 及 2560.46 mg-CO₂-C/m²/d，觀察二氧化碳的平均通量，發現在 2024 年 1、3、6、7、8、10、11 月以及 2025 年 1 月龍潭大池為二氧化碳的排放源，而 2024 年 4、5、9、12 月則是吸存地，說明二氧化碳通量並未隨著季節變化而有明顯的趨勢，也顯示龍潭大池同時有二氧化碳排放以及吸存的潛力。根據表 4.1 的統計顯示二氧化碳通量並無隨著季節的變化而有顯著差異。

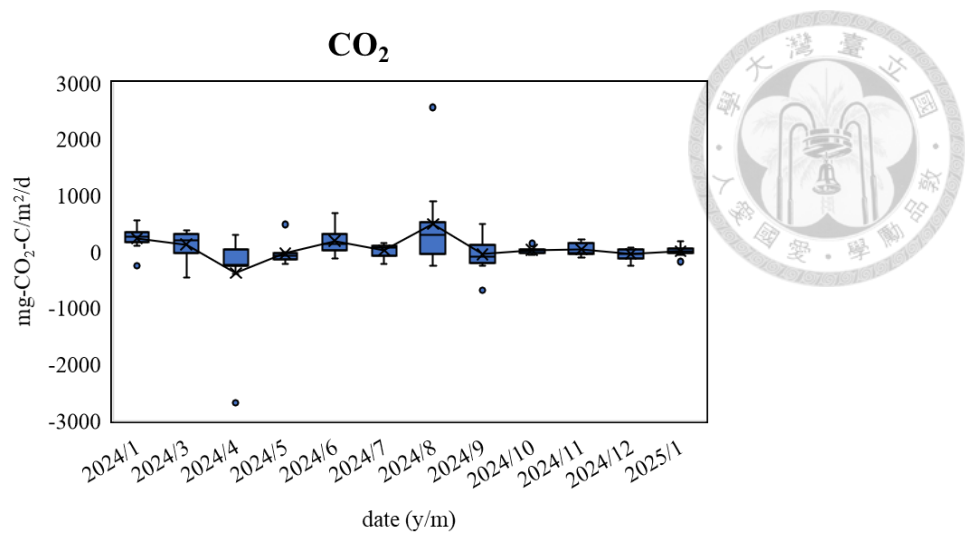


圖 4.19 龍潭大池二氧化碳通量盒鬚圖

4.1.2.2 龍潭大池以時段區分之氣體通量

如圖 4.20 所示，依照採樣的三個時段作為區分，分別觀察早、中、晚三個時段對於甲烷通量的變化。早、中、晚平均時通量分別為 1.87、1.03、0.69 $\text{mg-CH}_4\text{-C/m}^2\text{/hr}$ ，整體甲烷的時通量落在 0 - 5 $\text{mg-CH}_4\text{-C/m}^2\text{/hr}$ 之間。但在早上及中午總共量測到 4 個較高的通量，分別為早上的 23.99、6.43、5.65 $\text{mg-CH}_4\text{-C/m}^2\text{/hr}$ 以及中午 5.78 $\text{mg-CH}_4\text{-C/m}^2\text{/hr}$ 。根據表 4.1 的統計顯示甲烷通量並無隨著時段的變化而有顯著差異。

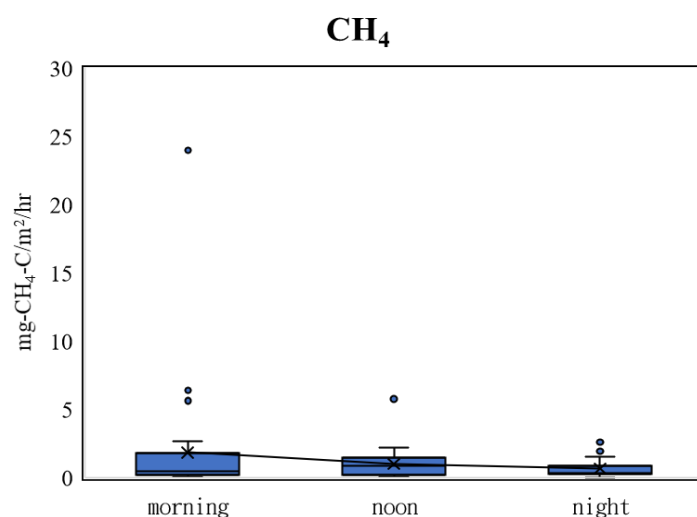


圖 4.20 龍潭大池以時段區分之甲烷時通量盒鬚圖

如圖 4.21 所示，依照採樣的三個時段作為區分，分別觀察早、中、晚三個時段對於二氧化碳通量的變化。早、中、晚平均時通量分別為 7.90、1.34、-2.70 $\text{mg-CO}_2\text{-C/m}^2\text{/hr}$ ，整體二氧化碳的時通量落在-50 - 50 $\text{mg-CO}_2\text{-C/m}^2\text{/hr}$ 之間。然而，在早上及晚上分別量測到 1 次異常的通量，分別為 106.69 以及-111.86 $\text{mg-CO}_2\text{-C/m}^2\text{/hr}$ 。根據表 4.1 的統計顯示二氧化碳通量並無隨著時段的變化而有顯著差異。

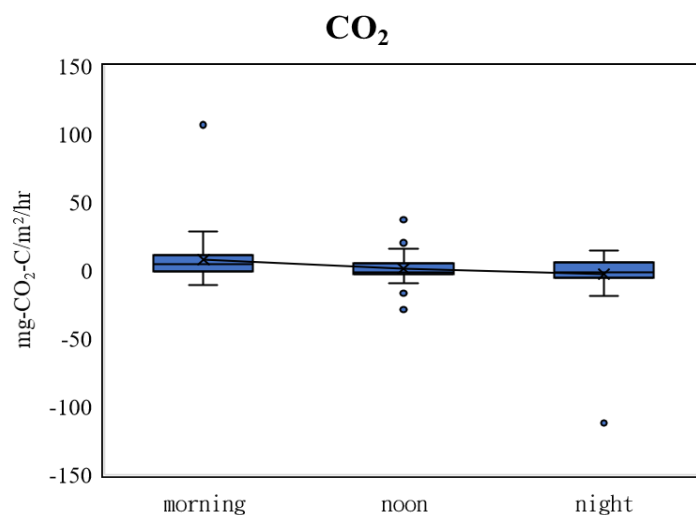


圖 4.21 龍潭大池以時段區分之二氧化碳時通量盒鬚圖

4.1.2.3 龍潭大池隨時間及季節統計分析

表 4.1 龍潭大池氣體通量及環境參數統計分析

Variable	Factor	Test	P value	Tukey/Dunn's test
CH ₄	time	Kruskal-Wallis	0.572	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^a Sum ^a Win ^b
CO ₂	time	Kruskal-Wallis	<0.05	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	0.093	N.S.
Ta	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^{ab} Noon ^a Night ^b
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^b Sum ^a Win ^b
humidity	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^b Night ^a
	season	Kruskal-Wallis	0.800	N.S.
illumination	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^a Night ^b
	season	Kruskal-Wallis	0.054	N.S.
pH	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^b Night ^b
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^{ac} Spr ^a Sum ^b Win ^c
DO	time	ANOVA	<0.05	Mor ^a Noon ^{bc} Night ^{ac}
	season	ANOVA	<0.05	Aut ^{ab} Spr ^{ac} Sum ^b Win ^c
Tw	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^{bc} Night ^{ac}
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^{ab} Spr ^a Sum ^b Win ^c
Chla	time	Kruskal-Wallis	0.558	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	0.314	N.S.
TN	time	Kruskal-Wallis	0.955	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^b Sum ^a Win ^b
TP	time	ANOVA	0.332	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^b Sum ^{ab} Win ^{ab}
DIC	time	Kruskal-Wallis	0.056	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^b Sum ^{ac} Win ^c
DOC	time	Kruskal-Wallis	0.269	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^b Sum ^b Win ^a
POC	time	Kruskal-Wallis	0.587	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^{ab} Spr ^a Sum ^a Win ^b
TOC	time	Kruskal-Wallis	0.534	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^{ac} Spr ^{ab} Sum ^b Win ^c
NH ₃ -N	time	Kruskal-Wallis	0.208	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^b Sum ^a Win ^{ab}
NO ₃ -N	time	Kruskal-Wallis	0.983	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^a Sum ^a Win ^b

N.S. : No Significant

Aut : Autumn (Sep. ~ Nov.) ; Spr : Spring (Mar. ~ May)

Sum : Summer (Jun. ~ Aug.) ; Win : Winter (Dec. ~ Feb.)

表 4.1 龍潭大池氣體通量及環境參數統計分析表 4.1 為將龍潭大池所有參數進行統計分析的結果，分兩個組別進行分析，分別以早、中、晚為一組的時間組與以春、夏、秋、冬為一組的季節組。首先將所有參數先進行常態分佈的檢測，若符合常態分佈則使用 ANOVA 進行數據的分析，並利用 Tuket test 進行事後檢定；若不符合常態分佈則使用 Kruskal-Wallis 進行數據的分析，並利用 Dunn test 進行事後檢定，以觀察各時段與各季節間有無顯著差異($P < 0.05$)。並以 N.S.表示各時段或各季節間無顯著差異，若小標中的代號(a、b、c)相同則表示兩者間無顯著差異，若不相同則代表存在顯著差異($P < 0.05$)。結果顯示，除了氣溫、水溫、濕度、照度、pH、DO 之外，其餘參數在時段不同時均未有顯著差異；而除了 CO_2 、humidity、illumination、Chla 之外，其餘參數隨著季節變化有顯著差異。

4.1.2.4 龍潭大池總排放量

如圖 4.22 所示，龍潭大池的整年度甲烷總排放量是透過公式 (3) 計算得出。其範圍介於 0.346 - 13.575 $\text{kg-CH}_4\text{-C/d}$ 之間，並在 2024 年 9 月的甲烷排放量達到全年最高值，顯示龍潭大池是甲烷的排放源。在 2024 年 5 月至 9 月間，甲烷總排放量在 2.575 - 13.575 $\text{kg-CH}_4\text{-C/d}$ 之間，比 2024 年 1、10、11、12 月及 2025 年 1 月的總排放量 0.364 - 2.609 $\text{kg-CH}_4\text{-C/d}$ 來的更高。這一現象可能與夏季氣溫升高有關，因為較高的溫度會促進甲烷菌的活性，從而增加甲烷的產生與排放。

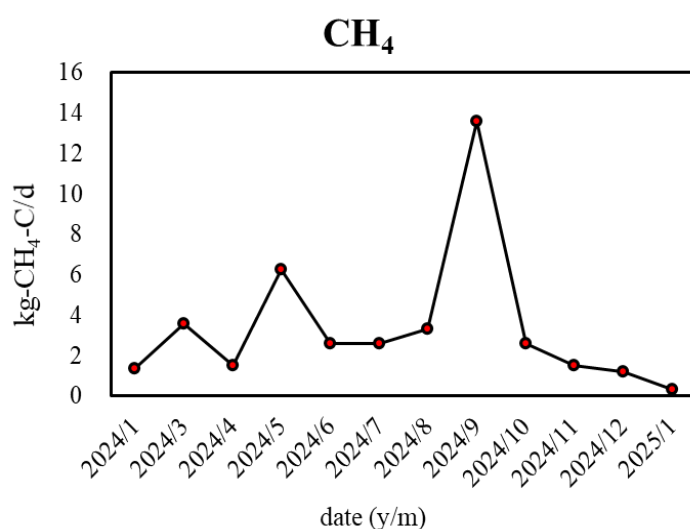


圖 4.22 龍潭大池甲烷總排放量

如圖 4.23 所示，龍潭大池的整年度二氧化碳總排放量是透過公式 (3) 計算得出。其範圍介於 $-33.877 - 41.603 \text{ kg-CO}_2\text{-C/d}$ 之間。從 2024 年 1 月至 4 月期間，二氧化碳總排放量呈現下降趨勢，從 26.529 下降至 $-33.877 \text{ kg-CO}_2\text{-C/d}$ ，表明這段時間龍潭大池對於二氧化碳的吸收能力逐漸增強，但從 2024 年 4 月至 8 月二氧化碳排放量從低點迅速回升，從 -33.877 提高至 $41.603 \text{ kg-CO}_2\text{-C/d}$ ，並在 2024 年 9 月開始，二氧化碳總排放量變動趨於穩定，平均排放量介於 $-2.089 - 2.185 \text{ kg-CO}_2\text{-C/d}$ 之間。整體而言，龍潭大池中二氧化碳總排放量並未隨著季節變化而有明顯的趨勢，在 2024 年 4、5、7、12 月以及 2025 年 1 月中，二氧化碳總排放量為負值，但除了 4 月份以外，其餘月份二氧化碳的負排放被同一時間的甲烷排放所抵銷，因此龍潭大池中碳排放仍以正排放為主。

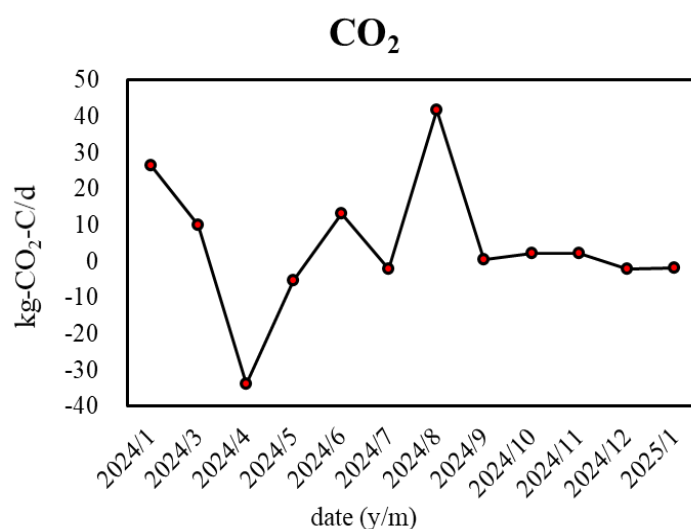


圖 4.23 龍潭大池二氧化碳總排放量

4.2 大湖公園

本研究原訂對大湖公園進行為期一年的監測，但自 2024 年 10 月起，大湖公園內開始進行荷花池整建工程，包括清淤、湖岸修復及錦帶橋修復，期間需放流池水，導致無法進行採樣。因此大湖公園的採樣時間自 2024 年 2 月至 9 月止。

4.2.1 大湖公園環境與水質參數

如圖 4.24 所示，氣溫呈現夏季高、冬季低的季節性變化。2024 年 2 月至 9 月平均氣溫介於 20 - 40°C。如圖 4.25 所示，在 1 月觀察到最低的濕度，當天濕度範圍介於 35 - 60 % 之間，而其餘月分則介於 50 - 90 % 之間。照度方面，如圖 4.26 所示，呈現夏季高、冬季低的變化，在 2、3、4 月平均照度低於 10000 LUX；從 5 月份開始，平均照度較高，約在 10000 - 30000 LUX 之間。根據表 4.2 的統計顯示氣溫、濕度隨著時段及季節的變化有顯著差異，而照度則是隨時段變化有顯著差異。

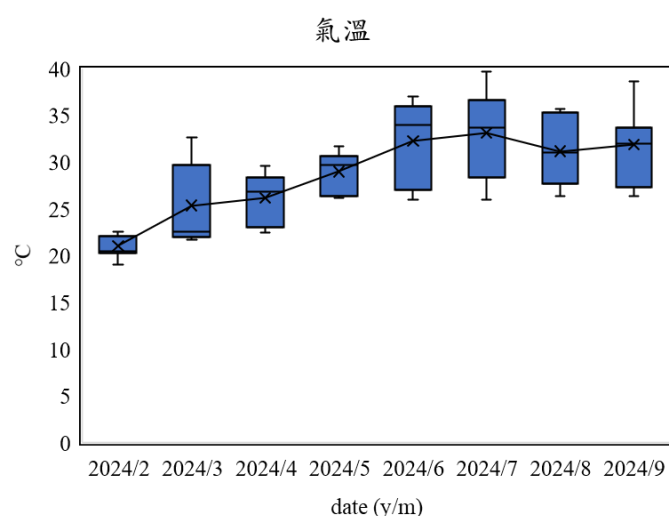


圖 4.24 大湖公園氣溫變化盒鬚圖

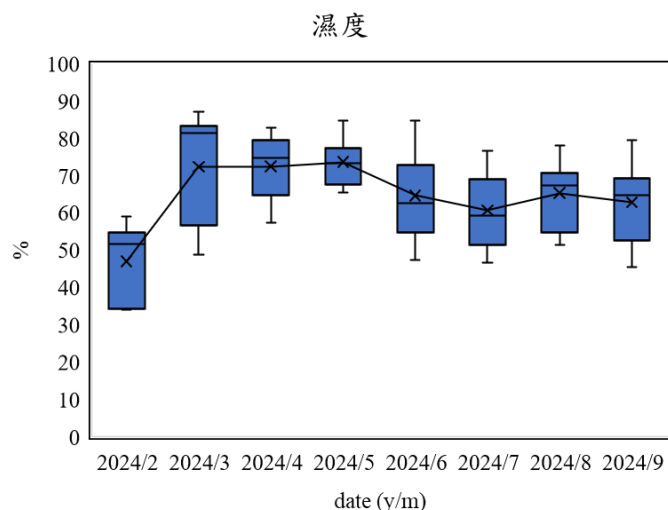


圖 4.25 大湖公園濕度變化盒鬚圖

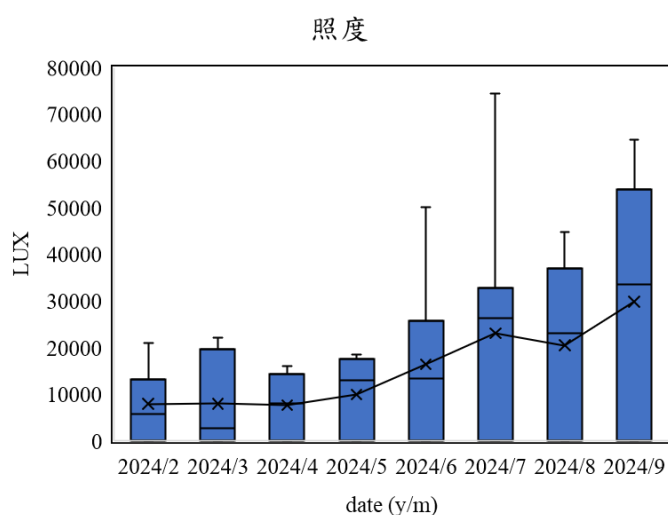


圖 4.26 大湖公園照度變化盒鬚圖

如圖 4.27 所示，水溫與氣溫變化趨勢相似，均呈現夏季高、冬季低的特徵，最低溫同樣出現在 2024 年 2 月，約 15 - 20℃，而最高溫同樣出現在夏季，約 25 - 30℃。但在 8 月時觀察到盒鬚圖的數據分布較大，可能是日夜溫差大所導致。如圖 4.28 所示，pH 在 3 月至 5 月期間持續下降，平均從 9.04 下降至 7.09，從 5 月至 9 月則持續上升，平均從 7.09 上升至 8.57，pH 範圍主要介於 7 - 9 之間，也說明大湖公園水質偏鹼性。如圖 4.29 所示，溶氧濃度的變化趨勢則與溫度相反，從 2 月至 5 月持續下降，平均溶氧濃度從 12.1 下降至 8.1 mg/L，而到了 9 月才有明顯的上升，濃度約 9.7 mg/L，呈現冬季高、夏季低。這一現象主要是因為溶氧在低溫下的溶解度較高，而夏季高溫則會減少氧氣的溶解能力。根據表 4.2 的統計顯示水溫、pH、DO 均隨著時段及季節的變化有顯著差異。

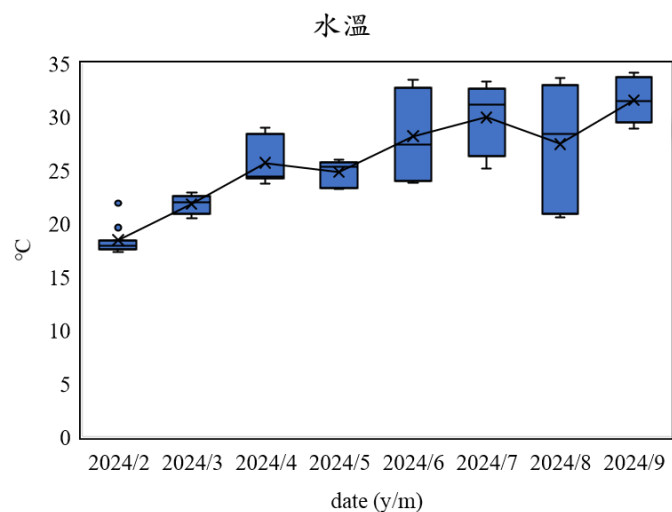


圖 4.27 大湖公園水溫變化盒鬚圖

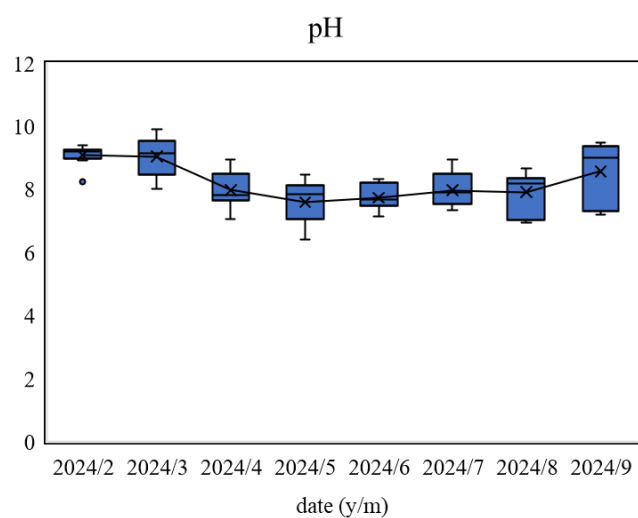


圖 4.28 大湖公園 pH 變化盒鬚圖

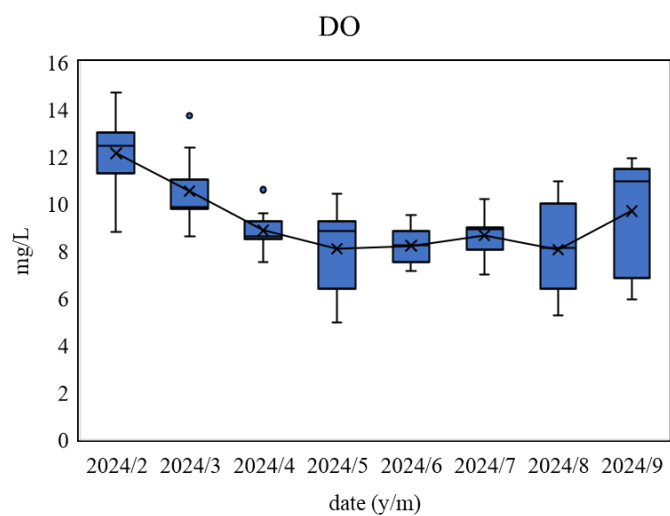


圖 4.29 大湖公園溶氧變化盒鬚圖

如圖 4.30 所示，大湖公園中氨氮從 2 月開始急速下降到 4 月，平均濃度從 0.92 下降至 0.22 mg-N/L，從 4 月開始開始緩慢下降至 7 月，平均濃度從 0.22 下降至 0.05 mg-N/L，而 8、9 月的變化不大，濃度分別為 0.08 及 0.07 mg-N/L，呈現冬季高、夏季低的趨勢。如圖 4.31 所示，大湖公園硝酸氮濃度呈現夏季低、冬季高，這一現象與龍潭大池相同，從 2 月至 5 月有下降的趨勢，濃度從 0.72 下降至 0.20 mg-N/L，5 月至 9 月則是先上升後下降，在此期間，平均濃度為 0.17 - 0.38 mg-N/L。如圖 4.32 所示，大湖公園總氮一樣呈現夏季低、冬季高，從 2 月至 6 月有下降的趨勢，濃度從 3.24 下降至 1.06 mg-N/L，6 月至 9 月則是先上升後下降，在此期間，平均濃度為 1.06 - 1.47 mg-N/L。根據表 4.2 的統計顯示氨氮隨著時段及季節的變化有顯著差異，而總氮及硝酸氮則是隨季節變化有顯著差異。

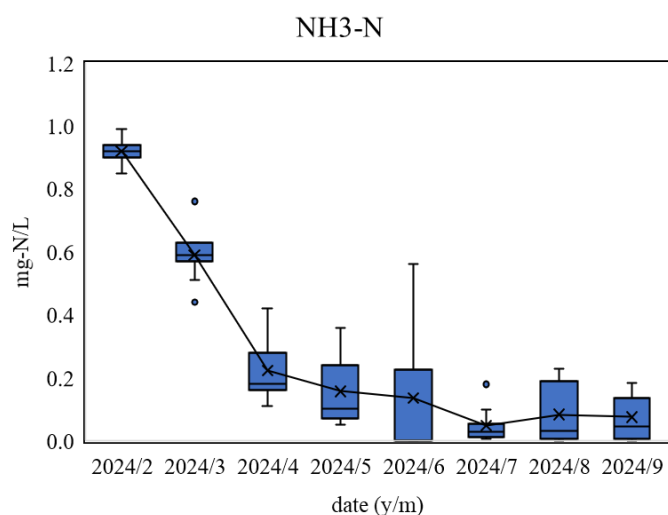


圖 4.30 大湖公園氨氮變化盒鬚圖

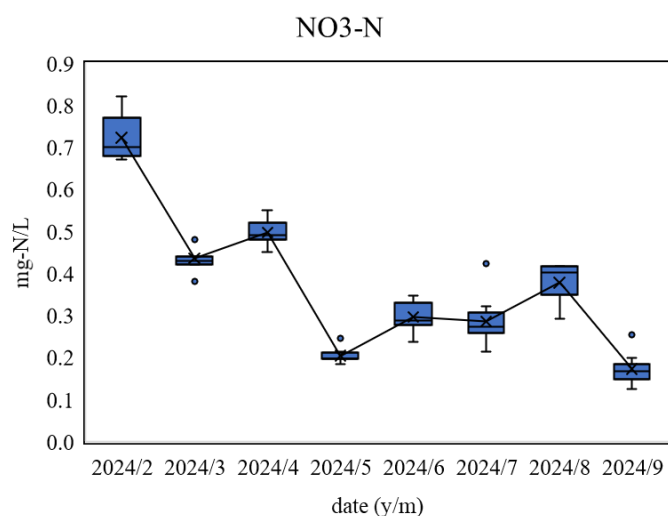


圖 4.31 大湖公園硝酸氮變化盒鬚圖

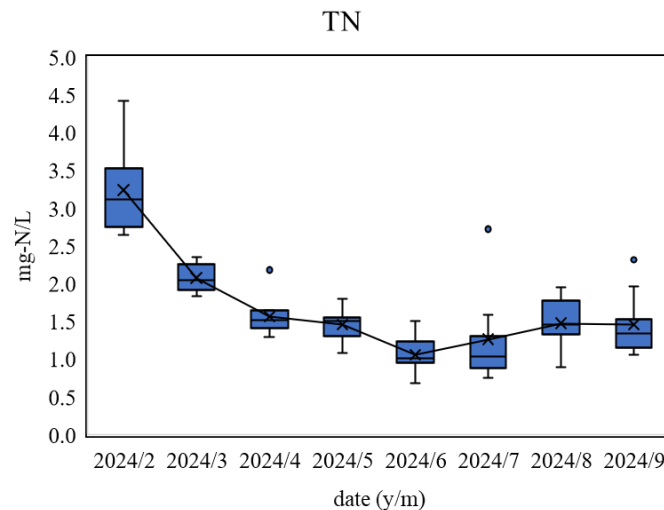


圖 4.32 大湖公園總氮變化盒鬚圖

如圖 4.33 所示，龍潭大池中全年總磷並無隨著季節變化而有明顯的趨勢，從 2 月至 7 月有先上後下降的趨勢，並在 5 月達到最高值，濃度從 0.035 mg-P/L 上升至 0.156 mg-P/L，爾後下降至 0.079 mg-P/L，而在 8、9 月的變化不大，平均濃度均為 0.105 mg-P/L，整年平均總磷濃度在 0.035 mg-P/L 以上，根據環檢所提供之卡爾森 (Carlson) 單一參數指數判定優養化之標準，其中總磷濃度超過 0.024 mg/L 即為優養化，也說明大湖公園整年都處於優養化的狀態中。根據表 4.2 的統計顯示總磷隨時段變化有顯著差異。

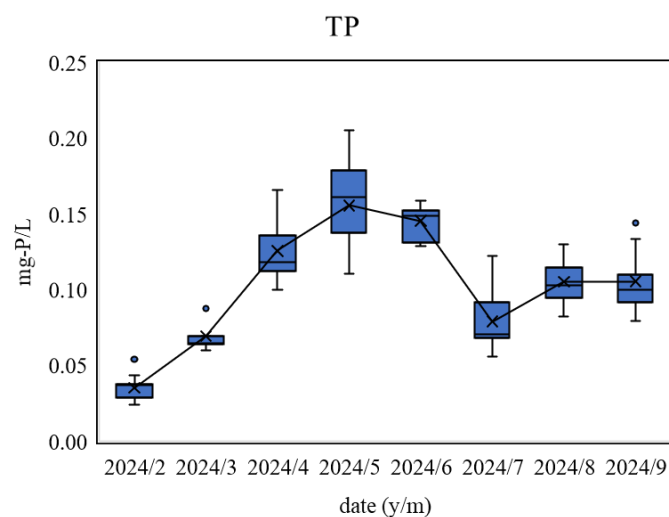


圖 4.33 大湖公園總磷變化盒鬚圖

如圖 4.34 所示，大湖公園全年葉綠素 a 並無隨著季節變化而有明顯的趨勢，整年葉綠素 a 平均濃度在 75.2 - 139.5 $\mu\text{g/L}$ 之間，根據表 4.2 的統計顯示葉綠素隨著季節的變化有顯著差異。根據環檢所提供之卡爾森 (Carlson) 單一參數指數判定優養化之標準，其中葉綠素 a 濃度超過 7.2 $\mu\text{g/L}$ 即為優養化，也再次說明大湖公園整年都處於優養化的狀態中。

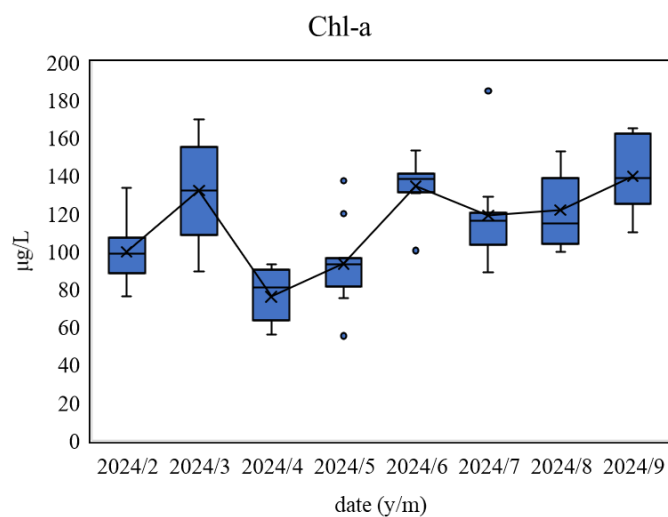


圖 4.34 大湖公園葉綠素 a 變化盒鬚圖

如圖 4.35 所示，大湖公園內溶解性無機碳在 3 月觀察到最高值，隨後開始緩慢下降，至 7 月達到最低點，平均濃度從 17.582 下降至 8.624 ppm。從 7 月開始，濃度逐漸回升，並在 9 月達到 11.429 ppm，整體而言，溶解性無機碳並沒有隨著季節變化而有明顯的趨勢改變。如圖 4.36 所示，大湖公園中溶解性有機碳濃度在 2 月至 4 月呈現先上升後下降的趨勢，濃度從 3.468 ppm 增加至 4.781 ppm，之後下降至 3.679 ppm。在 5 月至 9 月溶解性有機碳則趨於穩定，平均濃度介於 4.6 - 5.0 ppm 之間。根據表 4.2 的統計顯示溶解性無機碳隨著季節的變化有顯著差異，而溶解性有機碳則是隨時段及季節變化均有顯著差異。

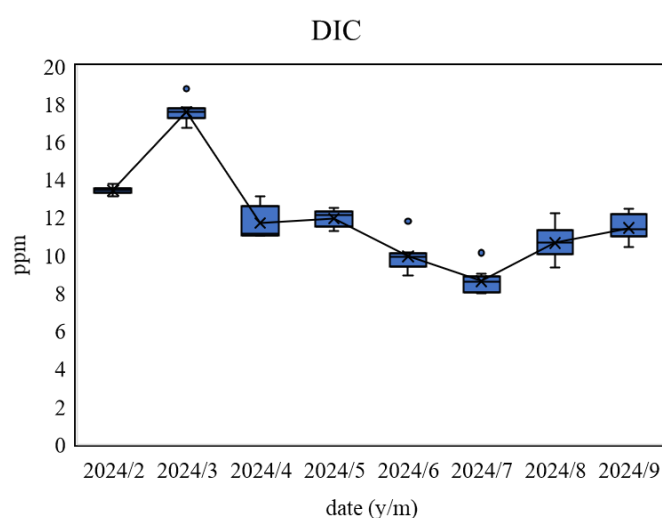


圖 4.35 大湖公園溶解性無機碳變化盒鬚圖

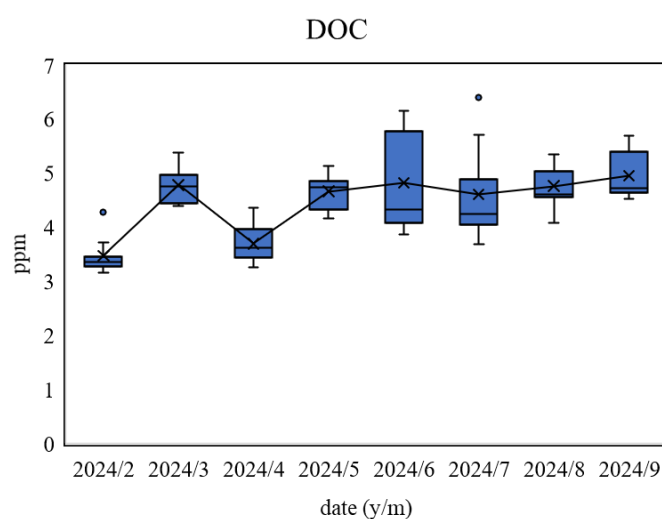


圖 4.36 大湖公園溶解性有機碳變化盒鬚圖

如圖 4.37 所示，大湖公園顆粒性有機碳在 2 月至 4 月濃度較低，平均濃度介於 3.398 - 3.899 ppm 之間，至 5 月時濃度快速上升，並趨於穩定至 9 月，平均濃度介於 5.194 - 6.108 ppm 之間，可見在溫度較高的 5 - 9 月，顆粒性有機碳濃度是高於溫度較低的 2 - 4 月。而圖 4.38 則為總有機碳，是溶解性有機碳與顆粒性有機碳相加的結果，可以反映有機碳對水體的影響，全年的濃度落在 7 - 11 ppm 之間，由於溶解性有機碳與顆粒性有機碳兩種參數的趨勢相近，均為 5 - 9 月濃度高於 2 - 4 月，因此總有機碳也有相同的結果。根據表 4.2 的統計顯示顆粒性有機碳與總有機碳隨時段及季節變化均有顯著差異。

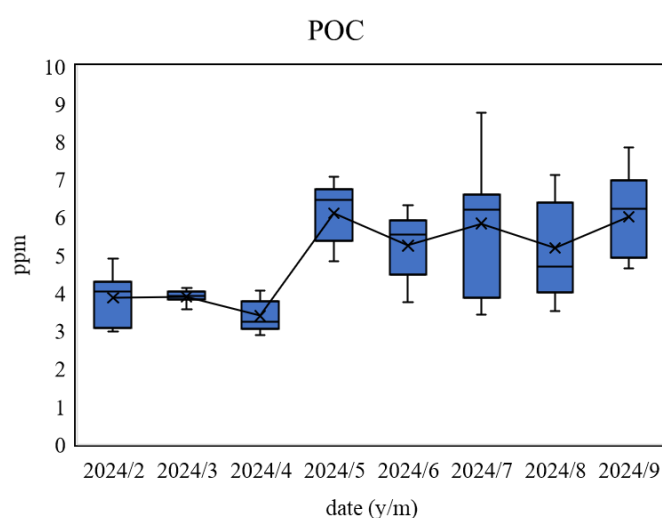


圖 4.37 大湖公園顆粒性有機碳變化盒鬚圖

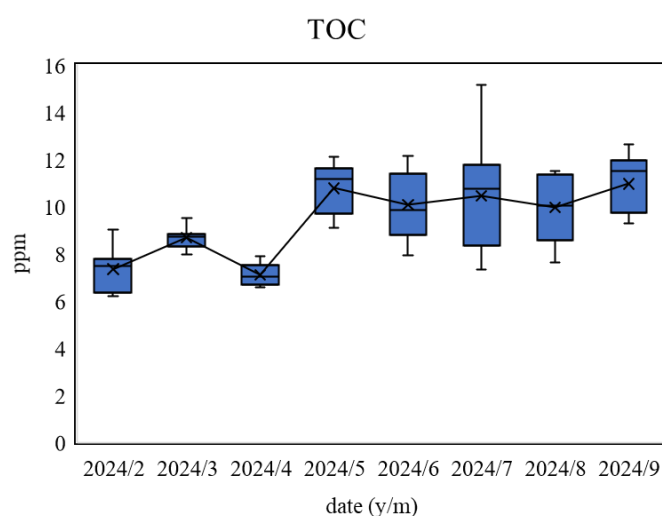


圖 4.38 大湖公園總有機碳變化盒鬚圖

與 4.1.1 節相同，以 Redfield (1958)所提出之氮磷莫耳比在 16：1 時作為判斷藻類營養限制因子的標準（質量 N：P 比約為 7），當氮磷莫耳比高於 16：1 時，磷為藻類的限制因子；反之則由氮作為限制因子。由圖 4.39 可知，在大湖公園氮磷比(質量比)大部分都高於 7，也說明大湖公園中大部分時間都是以磷作為藻類的限制因子，而在 2024 年 5 至 6 月份時有觀察到氮磷的質量比接近於 7，說明這時期的氮及磷同時為藻類生長的限制因子，而圖 4.40 也顯示總磷與葉綠素有正相關性。

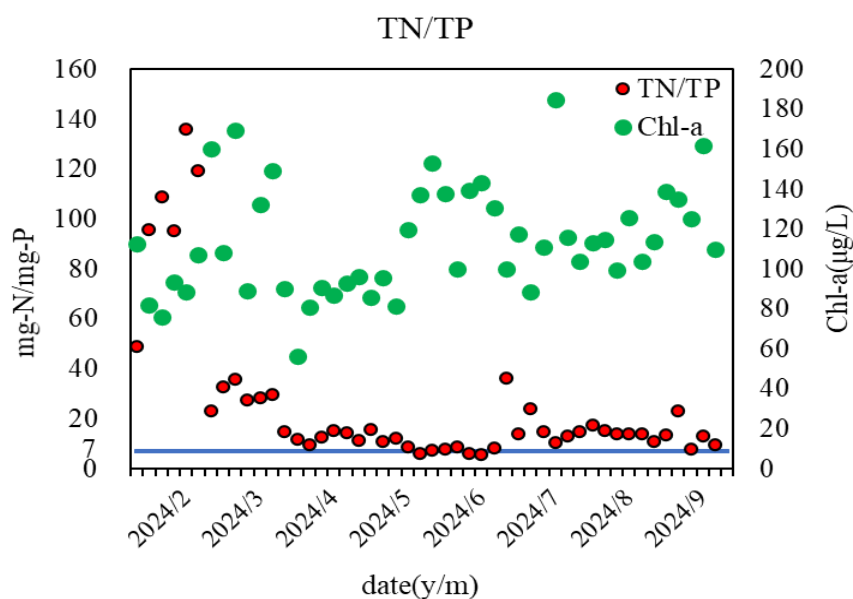


圖 4.39 大湖公園總氮、總磷之比值

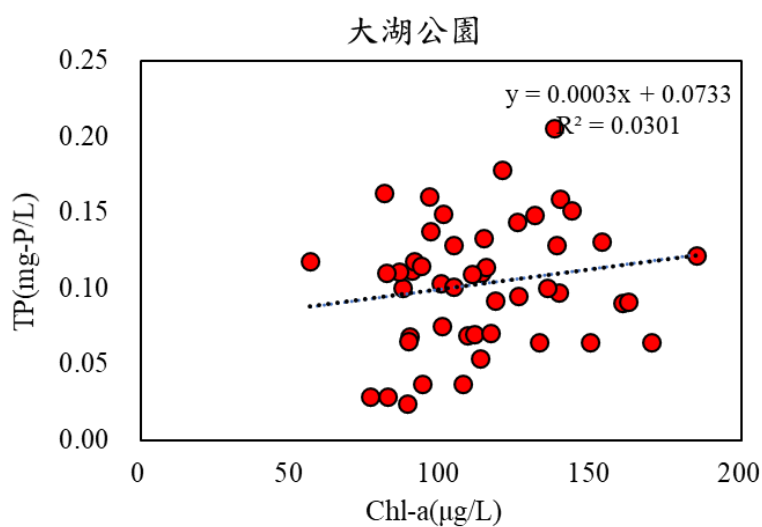


圖 4.40 大湖公園總磷與葉綠素回歸線分析

4.2.2 大湖公園氣體通量

4.2.2.1 大湖公園當日氣體通量

如圖 4.41 所示，可以觀察到大湖公園每月的甲烷碳通量大致介於 0 - 2500 mg-CH₄-C/m²/d 之間，相較於龍潭大池每月僅 0 - 100 mg-CH₄-C/m²/d 的甲烷通量高出許多，主要是因為在大湖公園 D3 的採樣點擁有較高的甲烷通量所導致，這可能是因為在此採樣點的底泥較多所造成。甲烷平均通量自 2 月 179.05 mg-CH₄-C/m²/d 開始逐漸上升，在 4 月達到高峰 612.43 mg-CH₄-C/m²/d，之後下降至 6 月的 330.74 mg-CH₄-C/m²/d，隨後在 7 月略有回升至 583.98 mg-CH₄-C/m²/d，最終於 9 月再次下降至 260.51 mg-CH₄-C/m²/d，也顯示大湖公園在 2024 年 2 月至 9 月為甲烷的排放源。根據表 4.2 的統計顯示甲烷通量隨季節變化有顯著差異，其中冬季與夏季之間有顯著差異。

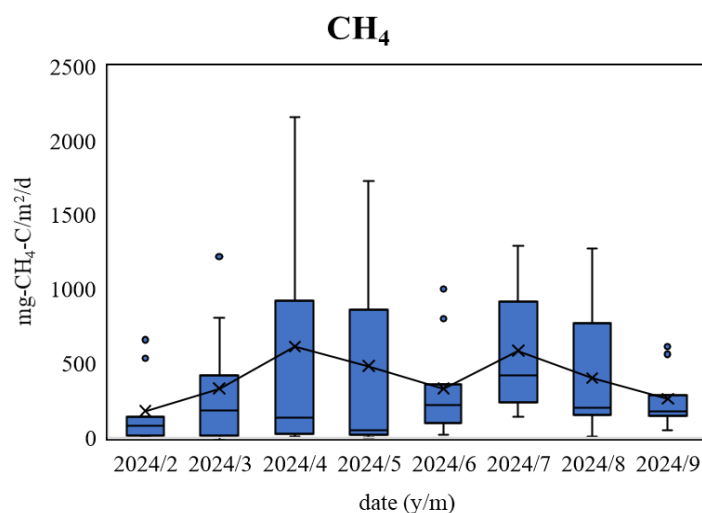


圖 4.41 大湖公園甲烷通量盒鬚圖

如圖 4.42 所示，大湖公園每月的二氧化碳通量介於 -1000 - 1000 mg-CO₂-C/m²/d 之間。在 7 月有觀察 2 次異常高的正通量，分別為 2052.51 及 1953.32 mg-CO₂-C/m²/d，而 8 月則出現 1 次異常高的正通量 (2027.98 mg-CO₂-C/m²/d) 及 1 次異常高的負通量 (-1874.61 mg-CO₂-C/m²/d)。從二氧化碳的平均通量來看，發現大湖公園在 2024 年 2、5、6、8、9 為二氧化碳的吸存地，而 2024 年 3、4、7 月則為二氧化碳的排放源，圖中顯示，二氧化碳通量並未隨著季節變化呈現明顯趨勢，但說明了大湖公園同時有二氧化碳排放以及吸存的潛力。根據表 4.2 的統計顯示二氧化碳通量並未隨季節變化而有顯著差異。

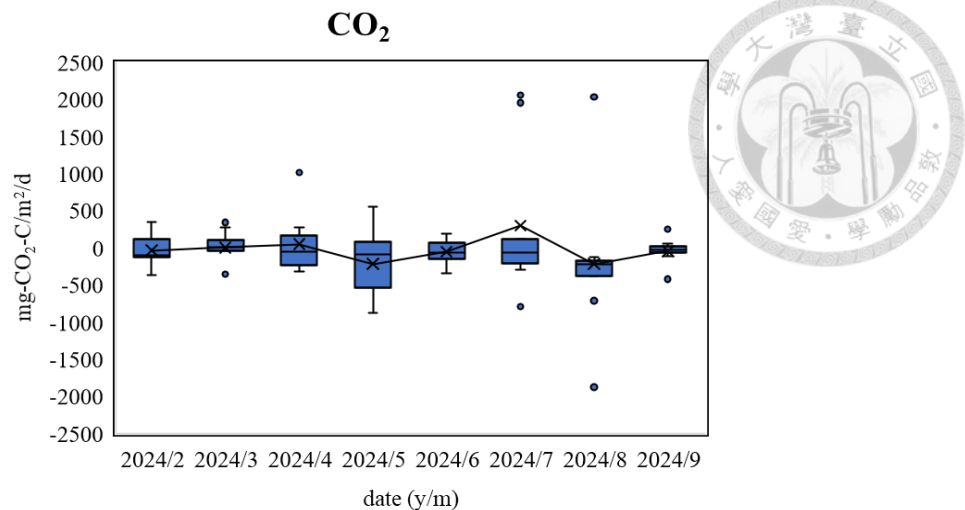


圖 4.42 大湖公園二氧化碳通量盒鬚圖

4.2.2.2 大湖公園以時段區分之氣體通量

如圖 4.43 所示，依照採樣的三個時段作為區分，分別觀察早、中、晚三個時段對於甲烷通量的變化。早、中、晚平均時通量分別為 17.15、16.22、16.30 mg-CH₄-C/m²/hr，整體甲烷的時通量介於 0 - 50 mg-CH₄-C/m²/hr 之間。並在三個時段均觀察到 1 次異常高的通量，分別為早上的 71.83 mg-CH₄-C/m²/hr、中午的 89.76 mg-CH₄-C/m²/hr 以及晚上的 84.51 mg-CH₄-C/m²/hr。根據表 4.2 的統計顯示甲烷通量並未隨時段變化而有顯著差異。

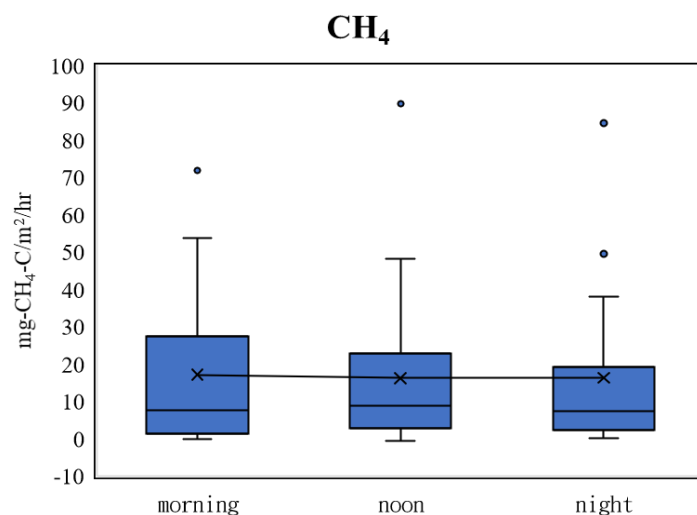


圖 4.43 大湖公園以時段區分之甲烷時通量盒鬚圖

如圖 4.44 所示，依照採樣的三個時段作為區分，分別觀察早、中、晚三個時段對於二氧化碳通量的變化。早、中、晚平均時通量分別為 -1.10 、 0.88 、 -3.23 $\text{mg-CO}_2\text{-C/m}^2\text{/hr}$ ，整體二氧化碳的時通量介於 -40 - 40 $\text{mg-CO}_2\text{-C/m}^2\text{/hr}$ 之間。然而，在早上及中午分別量測到 3 次異常的通量，分別為 81.39 、 84.50 以及 -78.11 $\text{mg-CO}_2\text{-C/m}^2\text{/hr}$ 。根據表 4.2 的統計顯示二氧化碳通量並未隨時段變化而有顯著差異。

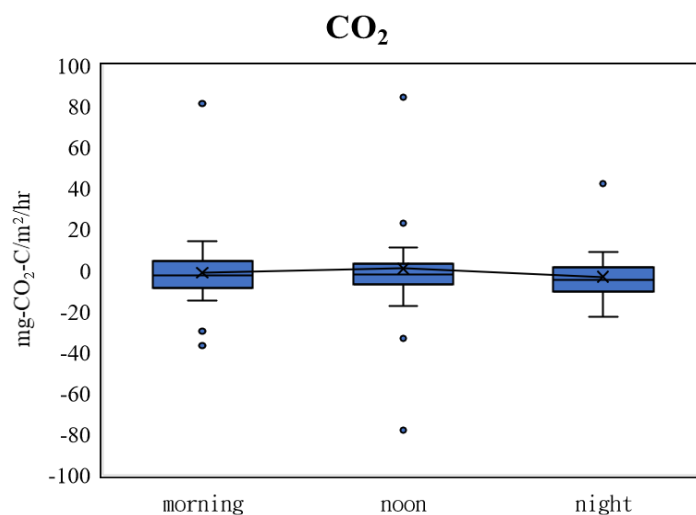


圖 4.44 大湖公園以時段區分之二氧化碳時通量盒鬚圖

4.2.2.3 大湖公園隨時間及季節統計分析

表 4.2 大湖公園氣體通量及環境參數統計分析

Variable	Factor	Test	P value	Tukey/Dunn's test
CH ₄	time	Kruskal-Wallis	0.891	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^{ab} Spr ^{ab} Sum ^a Win ^b
CO ₂	time	Kruskal-Wallis	0.492	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	0.662	N.S.
Ta	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^a Night ^b
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^b Sum ^a Win ^c
humidity	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^b Night ^a
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^a Sum ^a Win ^b
illumination	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^a Night ^b
	season	Kruskal-Wallis	0.069	N.S.
pH	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^b Night ^b
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^{ac} Spr ^{ab} Sum ^b Win ^c
DO	time	ANOVA	<0.05	Mor ^a Noon ^b Night ^b
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^a Sum ^a Win ^b
Tw	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^b Night ^{ab}
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^b Sum ^a Win ^c
Chla	time	Kruskal-Wallis	0.299	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^b Sum ^a Win ^b
TN	time	Kruskal-Wallis	0.119	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^{ab} Spr ^a Sum ^b Win ^c
TP	time	ANOVA	0.945	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^a Sum ^a Win ^b
DIC	time	Kruskal-Wallis	0.144	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^{ac} Sum ^b Win ^c
DOC	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^b Night ^a
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^a Sum ^a Win ^b
POC	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^b Night ^b
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^{bc} Sum ^{ab} Win ^c
TOC	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^b Night ^b
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^b Sum ^{ab} Win ^c
NH ₃ -N	time	Kruskal-Wallis	<0.05	Mor ^a Noon ^{ab} Night ^b
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^b Sum ^a Win ^c
NO ₃ -N	time	Kruskal-Wallis	0.478	N.S.
	season	Kruskal-Wallis	<0.05	Aut ^a Spr ^b Sum ^b Win ^c

N.S. : No Significant

Aut : Autumn (Sep. ~ Nov.) ; Spr : Spring (Mar. ~ May)

Sum : Summer (Jun. ~ Aug.) ; Win : Winter (Dec. ~ Feb.)

表 4.2 為將大湖公園所有參數進行統計分析的結果，分兩個組別進行分析，分別以早、中、晚為一組的時間組與以春、夏、秋、冬為一組的季節組。首先將所有參數先進行常態分佈的檢測，若符合常態分佈則使用 ANOVA 進行數據的分析，並利用 Tuket test 進行事後檢定；若不符合常態分佈則使用 Kruskal-Wallis 進行數據的分析，並利用 Dunn test 進行事後檢定，以觀察各時段與各季節間有無顯著差異($P < 0.05$)。並以 N.S.表示個時段或各季節間無顯著差異，若小標中的代號(a、b、c)相同則表示兩者間無顯著差異，若不相同則代表存在顯著差異($P < 0.05$)。結果顯示，除了氣溫、水溫、濕度、照度、pH、DO、DOC、POC、TOC、NH₃-N 之外，其餘參數在時段不同時均未有顯著差異；而除了 CO₂ 之外，其餘參數隨著季節變化有顯著差異。

4.2.2.4 大湖公園總排放量

如圖 4.45 所示，大湖公園的整年度甲烷總排放量是透過公式 (3) 計算得出。其範圍介於 10.536 – 47.710 kg-CH₄-C/d 之間。由圖中可以看出，甲烷總排放量自 2024 年 2 月開始逐漸上升，從 10.536 kg-CH₄-C/d 上升至 5 月的 39.266 kg-CH₄-C/d。雖然在 6 月甲烷總排放量有稍稍下降，但到了 7 月來到了最高值，甲烷總排放量為 47.710 kg-CH₄-C/d，隨後又逐漸下降到 9 月，降至 21.355 kg-CH₄-C/d。雖然採樣點 D3 的甲烷通量比其他採樣點來的更高，但由於其劃分的面積較小，對總排放量的貢獻有限。然而，大湖公園的甲烷總排放量仍遠高於龍潭大池，也說明大湖公園相較於龍潭大池是一個更重要的甲烷排放源。

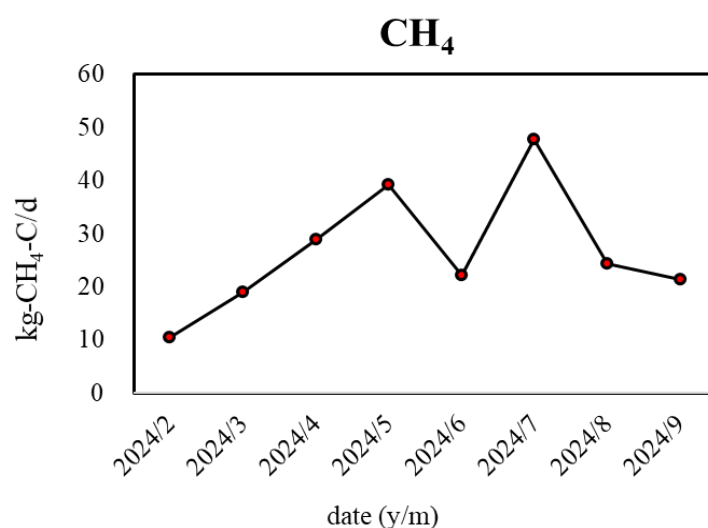


圖 4.45 大湖公園甲烷總排放量

如圖 4.46 所示，大湖公園的全年二氧化碳總排放量是透過公式 (3) 計算得出。其範圍介於 $-31.088 - 1.746 \text{ kg-CO}_2\text{-C/d}$ 之間。從 2024 年 2 月至 5 月，二氧化碳總排放量呈現先上升後下降趨勢，從 $-7.635 \text{ kg-CO}_2\text{-C/d}$ 上升至 3 月的 $1.463 \text{ kg-CO}_2\text{-C/d}$ ，隨後下降至 5 月的最低值 $-31.088 \text{ kg-CO}_2\text{-C/d}$ ，但從 6 月開始，二氧化碳總排放量逐漸回升，於 8 月達到全年最高值 $1.746 \text{ kg-CO}_2\text{-C/d}$ ，但在 9 月時又再次下降，降至 $-6.799 \text{ kg-CO}_2\text{-C/d}$ 。在 2 月至 9 月期間，有 2、4、5、6 及 9 月等 5 個月的二氧化碳總排放量為負值，顯示大湖公園在這些月份中具有較強的二氧化碳吸存潛力。

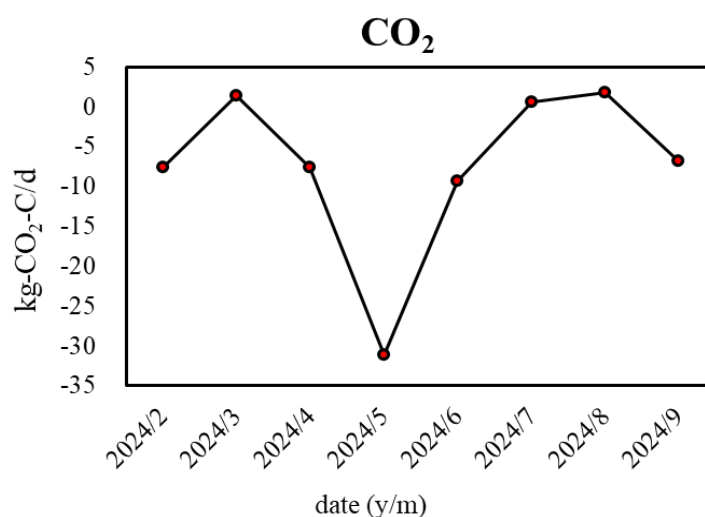


圖 4.46 大湖公園二氧化碳總排放量

4.3 多變量分析

4.3.1 龍潭大池 RDA 分析

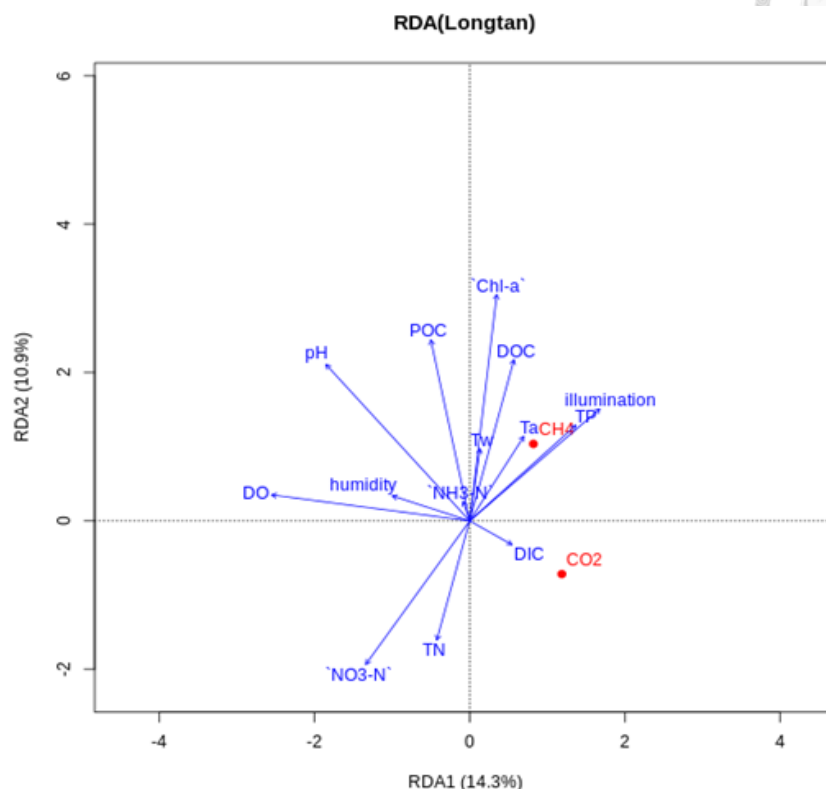


圖 4.47 龍潭大池 RDA 分析

(藍色向量代表解釋變量，紅色點代表響應變量)

表 4.3 龍潭大池中各參數對 CH₄ 及 CO₂ 的影響程度(比例%)

Variable	CH ₄	CO ₂
Chla	0.828 (13.87)	-0.425 (-10.06)
TN	-0.483 (-8.09)	0.155 (3.68)
TP	0.591 (9.90)	0.169 (4.00)
DIC	0.028 (0.46)	0.211 (4.99)
DOC	0.653 (10.94)	-0.211 (-4.99)
POC	0.508 (8.50)	-0.563 (-13.31)
NH ₃ -N	0.049 (0.81)	-0.069 (-1.63)
NO ₃ -N	-0.746 (-12.49)	-0.049 (-1.17)
pH	0.159 (2.66)	-0.892 (-21.10)
DO	-0.417 (-6.99)	-0.789 (-18.66)
Tw	0.268 (4.49)	-0.129 (-3.06)
Ta	0.421 (7.06)	0.004 (0.08)
Humidity	-0.113 (-1.89)	-0.342 (-8.10)
illumination	0.707 (11.83)	0.219 (5.18)

根據 RDA 分析結果顯示(圖 4.47 及表 4.3)，在龍潭大池的環境參數中，葉綠素、總磷、溶解性有機碳、顆粒性有機碳、pH、溫度、照度與甲烷的夾角為銳角，說明這些參數與甲烷呈現正相關；溶解性無機碳、氨氮與甲烷的夾角接近直角，說明這些參數與甲烷較無相關；總氮、硝酸氮、溶氧、濕度與甲烷的夾角為鈍角，說明這些參數與甲烷呈現負相關。總氮、總磷、溶解性無機碳、照度與二氧化碳的夾角為銳角，說明這些參數與二氧化碳呈現正相關；氣溫與二氧化碳的夾角接近直角，說明此參數與二氧化碳較無相關；葉綠素、溶解性有機碳、顆粒性有機碳、氨氮、硝酸氮、pH、溶氧、水溫、濕度與二氧化碳的夾角為鈍角，說明這些參數與二氧化碳呈現負相關。其中甲烷受 葉綠素、溶解性有機碳、顆粒性有機碳、硝酸氮、照度的影響程度比較高，而二氧化碳則受葉綠素、顆粒性有機碳、pH、溶氧的影響程度比較高。

4.3.2 大湖公園 RDA 分析

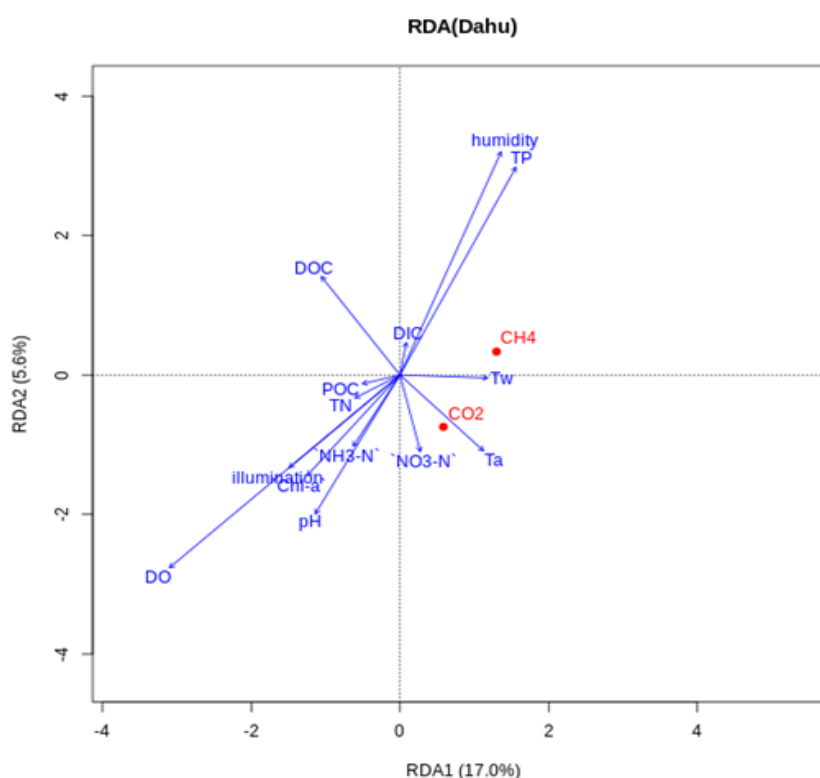


圖 4.48 大湖公園 RDA 分析

(藍色向量代表解釋變量，紅色點代表響應變量)

表 4.4 大湖公園中各參數對 CH₄ 及 CO₂ 的影響程度(比例%)

Variable	CH ₄	CO ₂
Chla	-0.296 (-8.77)	0.048 (3.36)
TN	-0.126 (-3.73)	-0.015 (-1.05)
TP	0.425 (12.61)	-0.184 (-12.76)
DIC	0.037 (1.11)	-0.041 (-2.88)
DOC	-0.126 (-3.75)	-0.234 (-16.27)
POC	-0.098 (-2.91)	-0.028 (-1.97)
NH ₃ -N	-0.163 (-4.83)	0.055 (3.83)
NO ₃ -N	-0.002 (-0.05)	0.137 (9.53)
pH	-0.302 (-8.95)	0.115 (7.97)
DO	-0.696 (-20.65)	0.035 (2.41)
Tw	0.213 (6.32)	0.101 (7.02)
Ta	0.154 (4.56)	0.206 (14.29)
Humidity	0.399 (11.84)	-0.223 (-15.50)
illumination	-0.334 (-9.92)	0.017 (1.17)

根據 RDA 分析結果顯示(圖 4.48 及表 4.4)，在大湖公園的環境參數中，總磷、溫度、濕度與甲烷的夾角為銳角，說明這些參數與甲烷呈現正相關；溶解性無機碳、硝酸氮與甲烷的夾角接近直角，說明這些參數與甲烷較無相關；葉綠素、總氮、溶解性有機碳、顆粒性有機碳、氨氮、pH、溶氧、照度與甲烷的夾角為鈍角，說明這些參數與甲烷呈現負相關。葉綠素、氨氮、硝酸氮、pH、溶氧、溫度、照度與二氧化碳的夾角為銳角，說明這些參數與二氧化碳呈現正相關；總氮、總磷、溶解性無機碳、溶解性有機碳、顆粒性有機碳、濕度與二氧化碳的夾角為鈍角，說明這些參數與二氧化碳呈現負相關。其中甲烷受總磷、濕度、DO 的影響程度比較高，而二氧化碳則受總磷、溶解性有機碳、硝酸氮、氣溫、濕度的影響程度比較高。

4.3.3 日間 RDA 分析

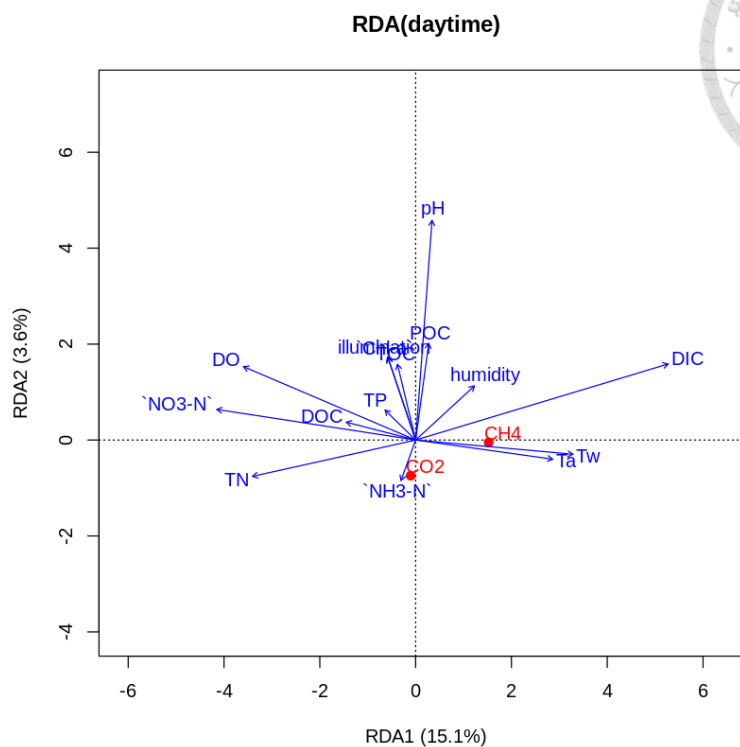


圖 4.49 日間 RDA 分析

(藍色向量代表解釋變量，紅色點代表響應變量)

表 4.5 日間各參數對 CH₄ 及 CO₂ 的影響程度(比例%)

Variable	CH ₄	CO ₂
Chla	-0.133 (-2.24)	-0.168 (-8.52)
TN	-0.712 (-11.95)	0.127 (6.43)
TP	-0.139 (-2.33)	-0.055 (-2.78)
DIC	1.100 (18.46)	-0.239 (-12.12)
DOC	-0.307 (-5.16)	-0.017 (-0.88)
POC	0.043 (0.73)	-0.211 (-10.7)
NH ₃ -N	-0.058 (-0.98)	0.091 (4.61)
NO ₃ -N	-0.878 (-14.75)	-0.006 (-0.29)
pH	0.040 (0.67)	-0.475 (-24.11)
DO	-0.768 (-12.89)	-0.105 (-5.34)
Tw	0.694 (11.65)	-0.017 (-0.86)
Ta	0.605 (10.17)	-0.0001 (-0.01)
Humidity	0.251 (4.21)	-0.134 (-6.77)
illumination	-0.135 (-2.27)	-0.170 (-8.62)

利用日間數據進行 RDA 分析 (圖 4.49 及表 4.5)，結果顯示溶解性無機碳、溫度、濕度與甲烷的夾角為銳角，說明這些參數與甲烷呈現正相關；顆粒性有機碳、pH、氨氮與甲烷的夾角接近直角，說明這些參數與甲烷較無相關；葉綠素、總氮、總磷、溶解性有機碳、硝酸氮、溶氧、照度與甲烷的夾角為鈍角，說明這些參數與甲烷呈現負相關。總氮、氨氮與二氧化碳的夾角為銳角，說明這些參數與二氧化碳呈現正相關；溶解性有機碳、硝酸氮、溫度與二氧化碳的夾角接近直角，說明這些參數與二氧化碳較無相關；葉綠素、總磷、溶解性無機碳、顆粒性有機碳、pH、溶氧、濕度、照度與二氧化碳的夾角為鈍角，說明這些參數與二氧化碳呈現負相關。其中甲烷受總氮、溶解性無機碳、硝酸氮、溶氧、溫度的影響程度比較高，而二氧化碳則受葉綠素、溶解性無機碳、顆粒性有機碳、pH 的影響程度比較高。

4.3.4 夜間 RDA 分析

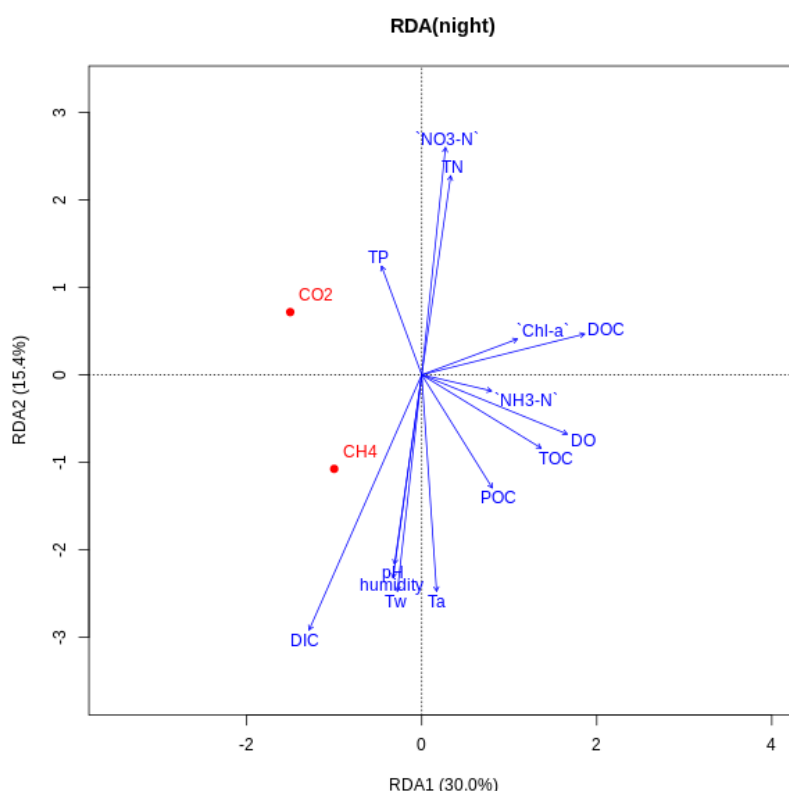


圖 4.50 夜間 RDA 分析

(藍色向量代表解釋變量，紅色點代表響應變量)

表 4.6 夜間各參數對 CH₄ 及 CO₂ 的影響程度(比例%)

Variable	CH ₄	CO ₂
Chla	-0.335 (-5.38)	-0.295 (-5.90)
TN	-0.608 (-9.74)	0.247 (4.95)
TP	-0.192 (-3.07)	0.345 (6.90)
DIC	0.968 (15.52)	-0.034 (-0.67)
DOC	-0.517 (-8.29)	-0.539 (-10.77)
POC	0.128 (2.05)	-0.468 (-9.35)
NH ₃ -N	-0.517 (-2.10)	-0.291 (-5.82)
NO ₃ -N	-0.670 (-10.75)	0.318 (6.35)
pH	0.577 (9.25)	-0.237 (-4.73)
DO	-0.204 (-3.28)	-0.653 (-13.06)
Tw	0.643 (10.31)	-0.296 (-5.92)
Ta	0.545 (8.74)	-0.443 (-8.87)
Humidity	0.618 (9.90)	-0.256 (-5.11)

利用夜間數據進行 RDA 分析 (圖 4.50 及表 4.6)，結果顯示溶解性無機碳、顆粒性有機碳、pH、溫度、濕度與甲烷的夾角為銳角，說明這些參數與甲烷呈現正相關；葉綠素、總氮、總磷、溶解性有機碳、氨氮、硝酸氮、溶氧與甲烷的夾角為鈍角，說明這些參數與甲烷呈現負相關。總氮、總磷、硝酸氮與二氧化碳的夾角為銳角，說明這些參數與二氧化碳呈現正相關；溶解性無機碳與二氧化碳的夾角接近直角，說明溶解性無機碳與二氧化碳較無相關；葉綠素、溶解性有機碳、顆粒性有機碳、氨氮、pH、溶氧、濕度、照度與二氧化碳的夾角為鈍角，說明這些參數與二氧化碳呈現負相關。其中甲烷受總氮、溶解性無機碳、硝酸氮、溫度的影響程度比較高，而二氧化碳則受溶解性有機碳、顆粒性有機碳、溶氧的影響程度比較高。

4.4 與不同緯度及氣候區進行比較

4.4.1 溫室氣體比較

本研究彙整了各國家的溫室氣體通量資料(見附錄)進行分析，結果如表 4.7 的所示，將不同氣候區（熱帶 0–23.5°、亞熱帶 23.5–35°、溫帶 35–66.5°）進行比較。由於數據並未呈現常態分布，因此採用 Kruskal-Wallis 檢定進行統計分析，並透過 Dunn's test 進行事後檢定，以評估各氣候區與不同水體之間的差異。小標中的字母標記（a、b、c）用於表示顯著性差異，標記相同則表示無顯著差異，不同則表示存在顯著差異（ $P < 0.05$ ）。

結果顯示，不同氣候區及水體類型的甲烷和二氧化碳通量皆存在顯著差異。在甲烷通量方面，龍潭大池及大湖公園與熱帶氣候區之間無顯著差異，但與亞熱帶及溫帶區域則有顯著差異。由圖 4.51 可見，龍潭大池及大湖公園的甲烷通量中位數為 2.25 mg CH₄/m²/hr，與熱帶氣候區的 2.1 mg CH₄/m²/hr 相近，但明顯高於亞熱帶的 0.95 mg CH₄/m²/hr 和溫帶的 0.272 mg CH₄/m²/hr。從水體類型來看，自然湖泊與都市湖泊及水庫之間存在顯著差異，而都市湖泊與水庫之間則無顯著差異。根據圖 4.52 顯示，自然湖泊的甲烷通量中位數為 0.502 mg CH₄/m²/hr，顯著低於都市湖泊的 2.04 mg CH₄/m²/hr 和水庫的 1.16 mg CH₄/m²/hr，這顯示都市湖泊及水庫在甲烷排放上比自然湖泊更具影響力，也是更重要的甲烷排放源。

在二氧化碳通量方面，龍潭大池及大湖公園與其他氣候區均有顯著的差異，由圖 4.53 顯示，熱帶氣候區的二氧化碳通量範圍最大，從 -54.39 - 402.79 mg CO₂/m²/hr，各氣候區的二氧化碳通量中位數分別為熱帶 74.12 mg CO₂/m²/hr、亞熱帶 39.27 mg CO₂/m²/hr 以及溫帶 45.59mg CO₂/m²/hr，均顯著高於龍潭大池及大湖公園的 0.65 mg CO₂/m²/hr，顯示龍潭大池及大湖公園在二氧化碳排放上顯著低於其他氣候區，可能具有較強的光合作用。從水體類型來看，都市湖泊與自然湖泊及水庫之間存在顯著差異，從圖 4.54 可知，都市湖泊的二氧化碳通量中位數為 2.38 mg CO₂/m²/hr，顯著低於水庫 72.58 mg CO₂/m²/hr 及自然湖泊 28.6 mg CO₂/m²/hr，顯示都市湖泊比水庫及自然湖泊有更低的二氧化碳排放，再次說明都市湖泊可能擁有較強的光合作用，能夠有效地吸存二氧化碳。

表 4.7 不同緯度及氣候區之比較(資料來源如附錄所示)

Variable	Factor	Test	P value	Dunn's test			
CH ₄	Climate	Kruskal-Wallis	<0.05	LD ^a	Tro ^{ab}	Sub ^{bc}	Tem ^c
	Water type	Kruskal-Wallis	<0.05	LD ^a	N ^b	U ^a	R ^a
CO ₂	Climate	Kruskal-Wallis	<0.05	LD ^a	Tro ^b	Sub ^{ab}	Tem ^b
	Water type	Kruskal-Wallis	<0.05	LD ^a	N ^b	U ^{ab}	R ^b

LD : Longtan & Dahu ; Tro : Tropical ; Sub : Subtropical ; Tem : Temperate

N : Natural lake ; U : Urban lake ; R : Reservoir

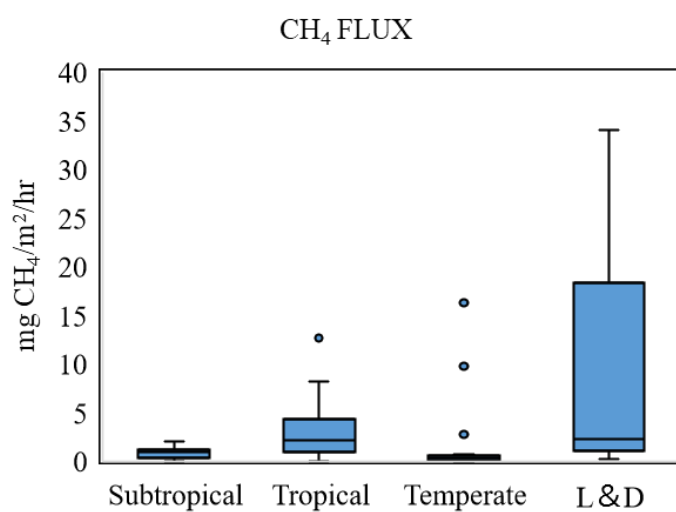


圖 4.51 不同氣候帶與龍潭大池及大湖公園之甲烷通量盒鬚圖

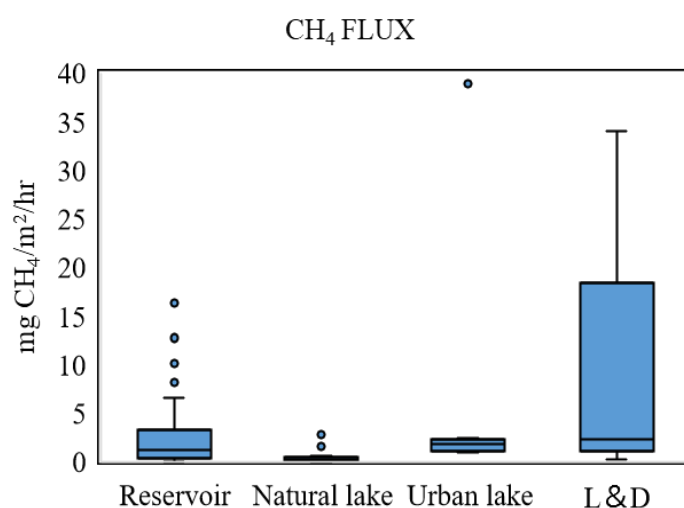


圖 4.52 不同水體類型與龍潭大池及大湖公園之甲烷通量盒鬚圖

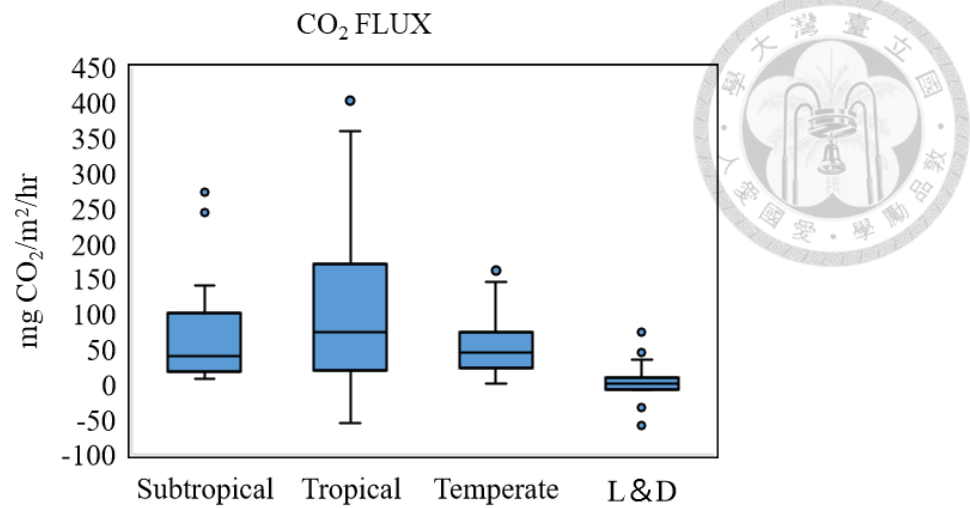


圖 4.53 不同氣候帶與龍潭大池及大湖公園之二氧化碳通量盒鬚圖

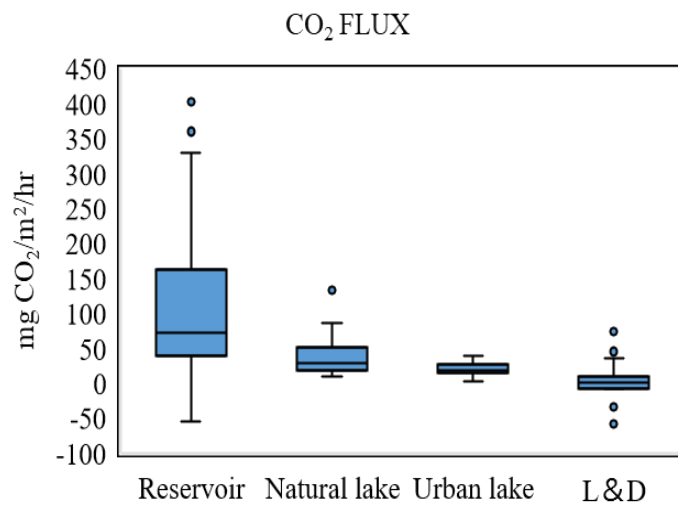


圖 4.54 不同水體類型與龍潭大池及大湖公園之二氧化碳通量盒鬚圖

4.4.2 全球暖化潛勢比較

表 4.8 與全球 GWP 比較

	Total Emissions (t CO ₂ -eq yr ⁻¹)	Proportion (%)	GWP _{flux} (g CO ₂ eq m ⁻² yr ⁻¹)	Source
Global				(Zheng et al. 2022;
inland	10,636,530,000	100	2950	Lauerwald et al.
waters				2023; Raymond et al.
				2013)
		-		
Longtan	-25.5 - 179.2	0.000000239	-250.5 -	
		-	1762.0	
		0.00000168		This study
		0.00000121	1213.4 -	
Dahu	128.2 - 627.8	- 0.0000059	5940.9	

全球內陸水體總表面面積約為 3.6×10^6 平方公里。內陸水域包括河流、水庫、湖泊和溪流等水體，每年向大氣釋放 95.18 Tg CH₄ 以及二氧化碳約 2.2 Pg C yr⁻¹ (0.7-4.2 Pg C yr⁻¹) (Zheng et al. 2022; Lauerwald et al. 2023; Raymond et al. 2013)，透過公式(2)的計算，全球內陸水域每年排放的溫室氣體總量約為 10636.53 Tg CO₂-eq。相比之下，龍潭大池與大湖公園的年溫室氣體排放量分別介於 -25.5 - 179.2 t CO₂-eq 及 128.2 - 627.8 t CO₂-eq，分別僅占全球總排放量的 -0.000000239 - 0.00000168% 及 0.00000121 - 0.0000059% (如表 4.8 所示)。這主要是由於兩個水體的面積較小，導致總排放量在全球範疇內比例微小。

若是以通量來看，平均單位面積下的全球暖化潛勢通量大約為 2950 g CO₂-eq m⁻² yr⁻¹，而龍潭大池與大湖公園的全球暖化潛勢通量分別介於-250.5 - 1762.0 及 1213.4 - 5940.9 g CO₂-eq m⁻² yr⁻¹，分別佔全球平均值的 -8.49 - 59.73% 及 41.13 - 201.38%。說明龍潭大池的溫室氣體排放在全球平均值以下，有時甚至出現碳匯的情形，相較於龍潭大池，大湖公園則是溫室氣體排放源，其最大值甚至超過全球平均值兩倍之多，這也歸因於大湖公園擁有較高的甲烷排放所導致。

第五章 討論



5.1 龍潭大池與大湖公園之間的差異

根據圖 4.18 及圖 4.41 的結果顯示，在本研究中大湖公園的平均甲烷通量高於龍潭大池，主要是因為在大湖公園 D3 的採樣點擁有較高的甲烷通量所導致，推測其原因可能是該採樣點的沉積物較為豐富，提供了有機質與厭氧環境，這些條件為甲烷菌提供了更好的棲息地與活性，從而促進了甲烷的釋放。在圖 4.16、圖 4.39 可觀察到兩個研究地點的氮磷質量比在絕大多數時間都高於 7，說明這兩個地點長期的藻類生長限制因子為磷，圖 4.17、圖 4.40 也證實了磷與葉綠素濃度呈現正相關，進一步佐證磷對藻類具有影響。從圖 4.49 的日間 RDA 分析也能看出，葉綠素及總磷確實對二氧化碳的排放有負向貢獻。此結果與圖 4.19 及圖 4.42 所示之二氧化碳通量數據得到呼應，兩個研究地點均有觀察到二氧化碳通量呈現負通量的情況，說明兩個研究地點確實有因為葉綠素的關係，擁有吸存二氧化碳的能力。

根據圖 4.20、圖 4.21、圖 4.43、圖 4.44 進一步分析龍潭大池與大湖公園的甲烷及二氧化碳通量的時段變化，結果顯示白天的通量均高於晚上，在 Siczko et al. (2020)的研究中也發現一樣的情形，推測原因為氣溫對氣體溶解度的影響。夜間溫度較低時，水的氣體溶解度較高，能將更多氣體溶解進水中；而白天水溫升高時，氣體溶解度降低，促使氣體釋放到大氣中。然而，二氧化碳通量的日夜變化與預期相反，一般認為白天藻類進行光合作用應吸收二氧化碳，而夜間進行呼吸作用則會釋放二氧化碳。但根據 Sø et al. (2024)的研究中發現，二氧化碳通量最高值出現在夜間呼吸作用後的清晨，最低值出現在白天光合作用延長後的夜間。說明二氧化碳通量的日夜變化的確會受到光合作用與呼吸作用的交互影響，但具體排放及吸存二氧化碳的時段與預測會有所差異。

透過表 4.1 與表 4.2 的統計可以觀察到兩地在一天中的變化僅少數參數具有顯著差異，龍潭大池以溫度、濕度、照度、pH 與 DO 為主，而大湖公園除上述參數外，亦包括 DOC、POC、TOC 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ ，顯示有機碳與氮氮濃度在一天中的變化較為敏感。相較之下，季節變化所引起的差異更為顯著，龍潭大池除 CO_2 、濕度、照度與 Chl-a 外，其餘參數皆隨季節呈現顯著差異；而大湖公園則僅 CO_2 與照度未隨季節變動，其餘參數皆有顯著季節性差異。結果顯示，兩地環境參數與氣體

通量主要受到季節變化的影響，但大湖公園中有機碳與氮的日變化也說明水體內部的碳氮循環仍受到當地環境條件與生態組成的影響。進一步觀察氣體通量的變化，得知甲烷只在季節間存在顯著差異，其中又以冬、夏季間最為明顯，這也許與台灣的氣候變遷所造成四季溫度差異縮小有關，而二氧化碳隨著時段及季節變化均未有顯著差異。

綜上所述，大湖公園的甲烷通量高於龍潭大池，可能是因為底泥較厚、有機質的累積，有助於甲烷菌活性；兩地均部分呈現二氧化碳碳匯現象，顯示具有吸存二氧化碳的潛力。甲烷和二氧化碳通量白天高於夜間，推測可能與氣體溶解度有關，而二氧化碳的變化受光合作用與呼吸作用交互影響，導致結果與預期不同。最後，兩湖的環境參數季節性變化大於日變化，甲烷通量在冬夏季間有顯著差異，而二氧化碳通量則未受時段與季節影響而有顯著變化。

5.2 水質與氣體通量間的關聯

由圖 4.47 及表 4.3 可知，龍潭大池中甲烷通量受葉綠素、總磷、溶解性有機碳、顆粒性有機碳、硝酸氮及照度的影響程度較高；二氧化碳通量則是受葉綠素、顆粒性有機碳、pH、溶氧的影響程度較高。根據圖 4.11、圖 4.13、圖 4.14、圖 4.18 所示，在 2024 年 9 月份時，在龍潭大池中葉綠素、溶解性有機碳、顆粒性有機碳濃度以及甲烷通量均呈現較高的數值。其中，有機碳濃度與甲烷通量的上升多半與葉綠素濃度的增加有關。因為藻類大量繁殖後，其細胞碎屑和代謝產物會釋放至水體中，增加溶解性有機碳的濃度(Myklestad 2000)。而顆粒性有機碳主要受水體中懸浮顆粒的影響，這些顆粒來自水中的藻類、植物碎屑及動植物遺骸等物質(Dzierzbicka-Głowacka et al. 2010; Szymczycha et al. 2017)。由於這些顆粒物多與藻類生物量密切相關，因此可以觀察到整年顆粒性有機碳的變化與葉綠素的變化相近。當藻類死亡後會形成顆粒性有機碳，部分會沉降在湖泊底部(Hanson et al. 2004; Han et al. 2018)，當微生物分解這些沉積物時就會造成甲烷的排放(Bastviken et al. 2008; Yan et al. 2019)，從圖 5.1、圖 5.2 對兩地進行相關性熱圖分析，也可以得知兩地的顆粒性有機碳的確與甲烷排放呈現正相關。

初級生產力指的是光合作用的速率，也就是光合生物每單位時間內固定碳的速率(Goldman 1968)。在水庫與湖泊中，初級生產力通常受到光照、葉綠素、總磷以及溶解有機碳影響。其中，光照會促進藻類行光合作用，提高初級生產力，

間接促進甲烷的排放。Morana et al. (2020)的研究指出，隨著光強度的增加，甲烷氧化的速率會急遽下降，可能近一步提高水體中的甲烷通量。此外，總磷亦是影響湖泊初級生產力的重要養分來源，其濃度的升高能顯著促進藻類生長，進而增加甲烷的排放(Zhang et al. 2021; Palma-Silva et al. 2013)。根據 Bastviken et al. (2004)的研究中進一步指出，湖泊面積、總磷以及溶解有機碳濃度是解釋甲烷排放最有用的變數，甚至可以用於預測不同大小湖泊間甲烷通量的差異。最後，硝酸氮硝酸氮可以促進脫硝細菌的生長，與甲烷菌競爭氮和乙酸，減少甲烷的排放(Zhu et al. 2022)。

而從葉綠素及顆粒性有機碳對二氧化碳呈現負影響也可以發現光合作用對減少二氧化碳的排放有一定的影響，在藻類行光合作用時，不僅會吸收二氧化碳並釋放氧氣，也間接影響了 pH。當 pH 下降時，游離二氧化碳會相對增加，這是因為碳酸氫根和碳酸根在酸性環境下更容易轉化為游離二氧化碳，從而增加二氧化碳的排放(Trolle et al. 2012; Zhang et al. 2024)，此外，光合作用所產生的氧氣則會留在水體中，進一步提高溶氧濃度，對水體中的碳循環過程產生影響。

相較於龍潭大池，大湖公園的甲烷通量主要受總磷、濕度及溶氧影響（圖 4.48 及表 4.4），其中溶氧的影響最大。當溶氧降低時，厭氧環境有利於產甲烷菌活性增加，甲烷氧化菌活性下降，導致甲烷產量上升(Ivanov et al. 2002; Hu et al. 2018)。不同於龍潭大池，甲烷通量與葉綠素、顆粒性有機碳並無顯著正相關，可能是由於大湖公園底泥有機物含量較高，底泥環境本身處於厭氧狀態，因此甲烷主要來自底泥分解，而非水體優養化驅動。大湖公園中的二氧化碳通量則受到總磷、溶解性有機碳、硝酸氮及溫度的影響。總磷濃度上升能刺激初級生產力，促進有機碳同化和二氧化碳吸收(Xu et al. 2022)，但同時高營養水平也會加強呼吸作用，促使藻類有機物分解，增加二氧化碳產生(Morales-Williams et al. 2021; Yan et al. 2017; Kortelainen et al. 2006)。

綜上所述，龍潭大池中的甲烷通量受葉綠素、總磷、溶解性有機碳、顆粒性有機碳、硝酸氮及光照影響較高，而二氧化碳通量則主要受葉綠素、顆粒性有機碳、pH 及溶氧影響。大湖公園中，甲烷通量主要受總磷、濕度及溶氧的影響，二氧化碳通量則受總磷、溶解性有機碳、硝酸氮及溫度的影響。

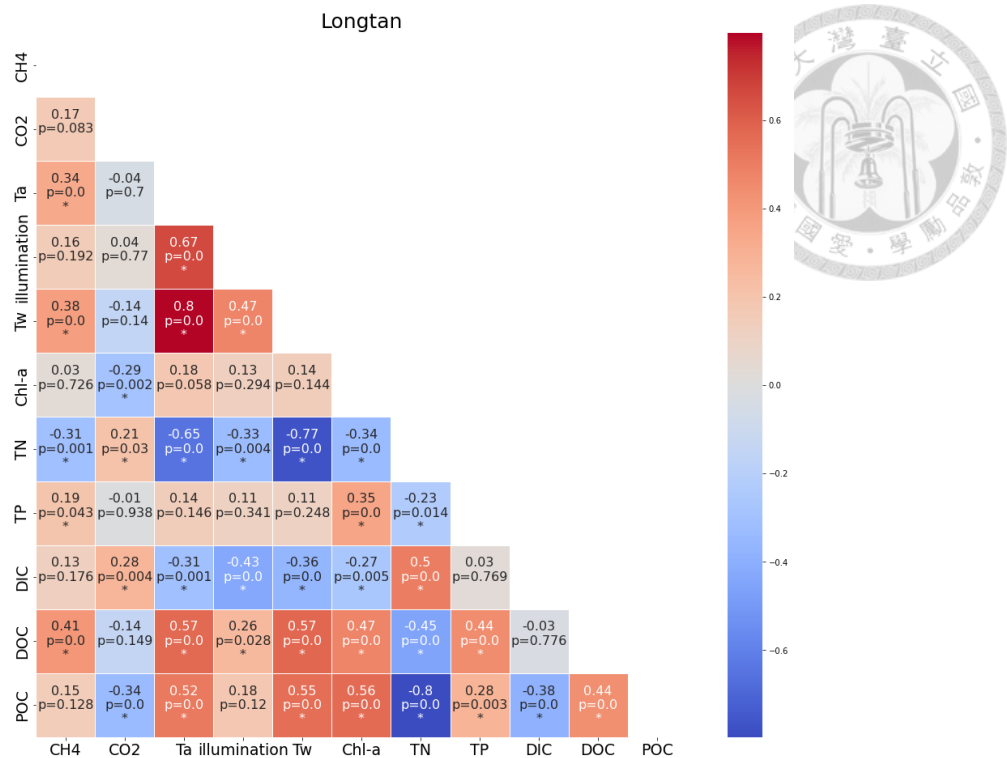


圖 5.1 相關性熱圖分析(龍潭大池)

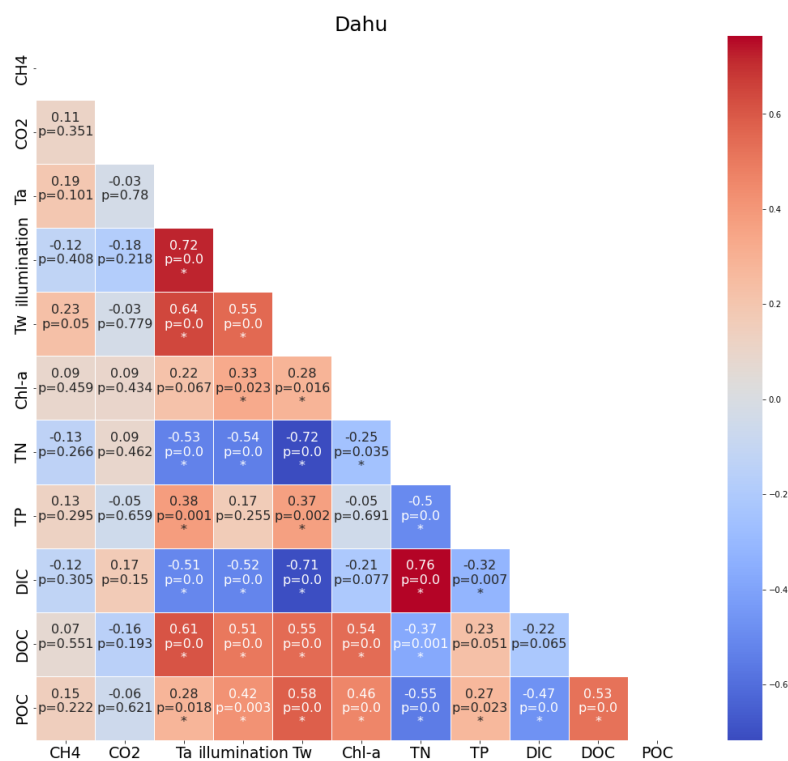


圖 5.2 相關性熱圖分析(大湖公園)

錯誤! 找不到參照來源。及圖 5.2 為相關性熱圖分析，由於參數不具常態分佈，故使用 spearman 進行相關性分析，其中星號代表兩參數之間具有顯著差異($P < 0.05$)，可以觀差到兩地的 CH_4 通量皆與溫度、Chl-a、TP、有機碳以及 TN 相關；而 CO_2 則與 TN、DIC 以及有機碳相關。說明在高溫、優養化以及有機物充足的條件下， CH_4 排放傾向增加，在 Meng et al. (2023) 的研究中指出，氮可以促進有機質降解成並形成 DIC，影響 CO_2 的排放。但兩地的 Chl-a 與照度對 CO_2 的影響有所不同，這可能與當天的氣象條件或現場條件相異而有所差別。整體而言，溫度、優養化以及有機碳的分解在兩個湖泊中皆對甲烷與二氧化碳通量的變化起到作用，但不同環境特性使主要影響溫室氣體通量的因子有所差異。

5.3 與不同氣候區及不同淡水水體類型之差異

根據表 4.7、圖 4.51、圖 4.52 的結果顯示，龍潭大池與大湖公園的甲烷通量顯著高於亞熱帶及溫帶氣候區的水體。可能是由於台灣位於熱帶與亞熱帶的交界處，加上受到氣候變遷的影響，導致這兩個都市湖泊的甲烷排放量更接近熱帶地區的水體。Sanches et al. (2019) 的研究同樣指出，不同氣候區的甲烷排放量有顯著差異，最低值出現在北半球和北溫帶，而較高值出現在熱帶和南溫帶。

另外，都市湖泊與水庫間甲烷通量並無顯著差異，但兩者均顯著高於自然湖泊，都市湖泊中的甲烷排放量可能會因優養化、有機碳、沉積物以及初級生產力的上升而增加(見 5.2 節)；而水庫隨著時間老化，營養物質將逐步累積並刺激生產力，進而導致爆發藻華(Shi et al. 2017; DelSontro, Beaulieu, and Downing 2018)。在較老的水庫中，淤積現象嚴重，可能導致藍藻等有害藻類繁殖，從而導致水質惡化、魚類死亡和缺氧狀況(Garnier and Billen 2007; de Faria et al. 2015; Gao et al. 2025)，這些因素最終可能導致更高的甲烷排放。

從表 4.7、圖 4.53、圖 4.54 的結果顯示，龍潭大池與大湖公園的二氧化碳通量顯著低於三個氣候區，且依照水體類型來看，都市湖泊的二氧化碳通量也顯著低於自然湖泊及水庫。現有的研究顯示，亞熱帶地區都市湖泊的二氧化碳源與匯仍充滿著複雜及不確定性，具有相當大的變化。一方面，亞熱帶地區擁有較高的溫度和較高的有機生產力，同時優養化也會加強呼吸作用，促使藻類有機物分解，這會加劇湖泊向大氣排放二氧化碳(Morales-Williams et al. 2021; Yan et al. 2017; Kortelainen et al. 2006)；另一方面，都市湖泊容易因優養化而提升初級生產力，藻

類的生長會通過光合作用消耗大量的二氧化碳(Zagarese et al. 2021; Xiao et al. 2022; Bartosiewicz et al. 2021)。本研究的結果可能更偏向於後者，顯示龍潭大池與大湖公園的二氧化碳排放量可能因葉綠素、顆粒性有機碳、溶解性有機碳、pH、溶氧、總磷等環境因子而下降(見 5.2 節)。

從表 4.8 的結果顯示，龍潭大池的溫室氣體通量低於全球平均值，部分時期甚至呈現碳匯，而大湖公園則為溫室氣體排放源，其最高通量超過全球平均值兩倍，顯示出高甲烷通量的影響。在全球範圍內，面積小於 0.1 km² 的湖泊被定義為小型湖泊，龍潭大池與大湖公園的面積皆接近此範圍。研究顯示，這些小型湖泊是湖泊碳排放量增加的主要來源，對內陸水域的甲烷通量有巨大貢獻，尤其是都市水體更是甲烷和溫室氣體排放的熱點，相比之下，二氧化碳雖然貢獻較小，也有一定的重要性(Wang et al. 2021; Holgerson and Raymond 2016; Pi et al. 2022)。根據 Wang et al. (2025)透過機器學習模型的研究發現，中國容量大於 0.01 km³ 的水庫約佔全國 CH₄ 總排放量的 90%。主要原因為擴散通量率高與表面積大，並受到熱分層與有機物累積的共同作用。此外，大型水庫更容易受到氣候變暖的影響，進一步加速甲烷的排放速率。儘管小型水庫的總排放量較低，但由於水深較淺，甲烷更容易透過脫氣(degassing)的形式排放，也顯示小型水體亦具潛在的高甲烷排放風險。

首先，本研究證實都市湖泊的甲烷排放較高，二氧化碳通量則因優養化與初級生產力影響而具較大變異性。再者，本研究所調查的湖泊，其溫室氣體排放特徵更趨近熱帶地區，反映氣候變遷對都市內陸水體碳循環的潛在影響。最後，都市內陸水體在全球碳排放中扮演重要角色，特別是小型湖泊的甲烷貢獻顯著，需進一步量化長期影響。未來應加強監測與管理，並減少營養物輸入，以降低溫室氣體排放風險。

5.4 目前研究方法的限制

漂浮式氣罩法可能會改變測量點的邊界層環境條件，氣罩會阻擋風的流動、改變測量點的氣壓等，進而影響氣體傳輸速率(Matthews, St.Louis, and Hesslein 2003; Musenze et al. 2014)。例如，在低風速條件下，氣罩四周的壁可能會引起紊流，增強氣體交換效率，導致氣體通量的增加(Matthews, St.Louis, and Hesslein 2003; Xiao et al. 2016)。此外，由於氣罩屬於封閉系統，其結構會隔絕與外界的气体與物質交換，可能影響溫室氣體通量的準確性。而封閉氣罩的覆蓋範圍較小，使得通量推估至更大區域時存在不確定性(Bastviken et al. 2022)。

另一方面，湖泊中水體分層對溫室氣體排放具有影響。在分層期間，湖泊底層的甲烷濃度大幅升高，遠高於水面濃度，這主要是因為分層抑制了水體上下層的混合，使得來自沉積物的甲烷逐漸累積。到了分層末期，當湖水發生混合時，大量累積的甲烷和二氧化碳逸出，形成短暫的排放高峰(Zhu et al. 2018; Holgerson et al. 2022; Davidson et al. 2024)，因此，在水樣採集時，除了表層水之外，應額外考慮中層與底層水的採集，以更準確評估分層對溫室氣體濃度與排放的影響。然而，本研究所量測的兩個湖泊水深可能都太淺，不一定會產生分層現象，因此水體分層對氣體排放的影響，仍有待進一步資料佐證。

第六章 結論與建議



6.1 結論

本研究為探討都市湖泊對全球暖化的影響，因此對龍潭大池與大湖公園兩座都市湖泊進行實地調查，分別量測兩地的溫室氣體通量與環境參數，分析兩者之間的關聯性，並比較不同時間、季節、氣候區及水體類型之間的差異。

研究結果顯示，龍潭大池的 CO_2 平均通量為 $-382.7 \sim 487.3 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ， CH_4 通量為 $3.64 \sim 97.36 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ；大湖公園的 CO_2 平均通量為 $-218.1 \sim 297.2 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ， CH_4 通量為 $179.1 \sim 612.4 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。兩個湖泊皆為甲烷排放源，部分呈現二氧化碳碳匯現象，顯示其吸存二氧化碳的潛力，但這些湖泊仍是湖泊碳排放量增加的主要來源。甲烷與二氧化碳通量在白天普遍高於夜間，推測與氣體溶解度影響甲烷釋放及光合作用與呼吸作用的交互影響有關。統計結果顯示，甲烷通量於冬夏季節間有顯著差異，可能與台灣氣候變遷造成的溫度變化有關，而二氧化碳通量則未受時段與季節顯著影響。進一步分析水質參數與氣體通量的關聯，發現甲烷通量受葉綠素、總磷、硝酸氮、有機碳、溶氧及光照影響較大，而二氧化碳通量則與葉綠素、總磷、硝酸氮、有機碳、pH、溶氧及溫度密切相關。

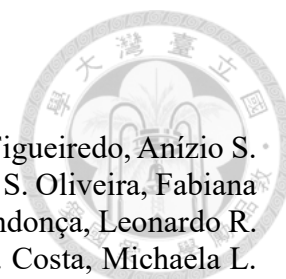
此外，與不同氣候區及淡水水體類型相比，龍潭大池與大湖公園的甲烷通量顯著高於亞熱帶與溫帶地區，接近熱帶水體的排放特性，並且都市湖泊也擁有顯著較高的甲烷排放，這可能與湖泊優養化及沉積物的累積有關；二氧化碳通量方面，龍潭大池與大湖公園顯著低於其他氣候區與水體類型，推測都市湖泊可能受優養化的影響，進而減少二氧化碳排放。本研究證實都市湖泊對全球暖化有重要的影響，未來建議持續監測，以評估湖泊對溫室氣體通量的影響。

6.2 建議

都市湖泊對全球暖化的主要貢獻來自於甲烷排放。甲烷主要來自於有機物的沉積與厭氧分解，有機物來源除了水體中的藻類外，亦包括來自都市地表的沖刷。為了有效降低甲烷排放，應優先管理水體中的營養鹽濃度，以減少初級生產力，進而降低有機物沉積與厭氧分解過程所產生的甲烷。儘管此過程可能會導致二氧化碳排放增加，但考量全球暖化潛勢，甲烷的影響遠高於二氧化碳，因此減少甲烷排放仍應作為優先目標。再者，可透過種植適當的水生植物來吸收水中營養鹽，以降低優養化風險，並選擇有助於碳固定且不促進甲烷逸散的植物，以減少水體碳排放。最後，透過定期清淤作業，去除底泥中的有機質，減少甲烷產生所需的有機碳，並搭配曝氣系統或水體循環裝置，提高溶氧濃度，進一步抑制厭氧環境下的甲烷生成，並促進甲烷氧化作用，以減少整體甲烷排放。

在研究方面，未來可擴大監測範圍，涵蓋更多都市湖泊及不同氣候區，以建立更完整的都市水體資料。此外，可考慮引入大範圍的連續監測技術，如渦度協方差、邊界層法，並結合漂浮式氣罩法，以提高氣體通量估算的準確性。最後，應進一步探討都市湖泊內部碳循環過程，包括沉積物中碳的儲存與釋放機制，以更精確的評估碳通量。

參考文獻



- Almeida, Rafael M., Gabriel N. Nóbrega, Pedro C. Junger, Aline V. Figueiredo, Anízio S. Andrade, Caroline G. B. de Moura, Denise Tonetta, Ernandes S. Oliveira, Fabiana Araújo, Felipe Rust, Juan M. Piñeiro-Guerra, Jurandir R. Mendonça, Leonardo R. Medeiros, Lorena Pinheiro, Marcela Miranda, Mariana R. A. Costa, Michaela L. Melo, Regina L. G. Nobre, Thiago Benevides, Fábio Roland, Jeroen de Klein, Nathan O. Barros, Raquel Mendonça, Vanessa Becker, Vera L. M. Huszar, and Sarian Kosten. 2016. 'High Primary Production Contrasts with Intense Carbon Emission in a Eutrophic Tropical Reservoir', *Frontiers in Microbiology*, 7.
- Baldocchi, Angela K., David E. Reed, Luke C. Loken, Emily H. Stanley, Hayley Huerd, and Ankur R. Desai. 2020. 'Comparing Spatial and Temporal Variation of Lake-Atmosphere Carbon Dioxide Fluxes Using Multiple Methods', *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125: e2019JG005623.
- Baldocchi, Dennis. 2014. 'Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere – the state and future of the eddy covariance method', *Global Change Biology*, 20: 3600-09.
- Bartosiewicz, M., I. Laurion, and S. MacIntyre. 2015. 'Greenhouse gas emission and storage in a small shallow lake', *Hydrobiologia*, 757: 101-15.
- Bartosiewicz, Maciej, Roxane Maranger, Anna Przytulska, and Isabelle Laurion. 2021. 'Effects of phytoplankton blooms on fluxes and emissions of greenhouse gases in a eutrophic lake', *Water Research*, 196: 116985.
- Bastien, Julie, Maud Demarty, and Alain Tremblay. 2011. 'CO₂ and CH₄ diffusive and degassing emissions from 2003 to 2009 at Eastmain 1 hydroelectric reservoir, Québec, Canada', *Inland Waters*, 1: 113-23.
- Bastviken, David, Jonathan J. Cole, Michael L. Pace, and Matthew C. Van de Bogert. 2008. 'Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions', *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113.
- Bastviken, David, Jonathan Cole, Michael Pace, and Lars Tranvik. 2004. 'Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate', *Global Biogeochemical Cycles*, 18.
- Bastviken, David, Julie Wilk, Nguyen Thanh Duc, Magnus Gålfalk, Martin Karlson, Tina-Simone Neset, Tomasz Opach, Alex Enrich-Prast, and Ingrid Sundgren. 2022. 'Critical method needs in measuring greenhouse gas fluxes', *Environmental Research Letters*, 17: 104009.
- Bergier, Ivan, Evlyn MLM Novo, Fernando M Ramos, Edmar A Mazzi, and Maria FFL Rasera. 2011. 'Carbon dioxide and methane fluxes in the littoral zone of a tropical Savanna Reservoir (Corumba, Brazil)', *Oecologia Australis*, 15: 666-81.
- Bevelhimer, Mark S., Arthur J. Stewart, Allison M. Fortner, Jana R. Phillips, and Jennifer J. Mosher. 2016. "CO₂ is Dominant Greenhouse Gas Emitted from Six Hydropower Reservoirs in Southeastern United States during Peak Summer Emissions." In *Water*.
- Bhushan, Amrendra, Vikas Chandra Goyal, and Arun Lal Srivastav. 2024. 'Greenhouse

- gas emissions from inland water bodies and their rejuvenation: a review', *Journal of Water and Climate Change*, 15: 5626-44.
- Bi, Xinyuan, Xiaoyu Gan, Zhuoting Jiang, Zishan Li, and Jiajing Li. 2024. 'How do landscape patterns in urban parks affect multiple cultural ecosystem services perceived by residents?', *Science of The Total Environment*, 946: 174255.
- Borges, A. V., G. Abril, B. Delille, J. P. Descy, and F. Darchambeau. 2011. 'Diffusive methane emissions to the atmosphere from Lake Kivu (Eastern Africa)', *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116.
- Borges, Alberto V., Steven Bouillon, Gwenaël Abril, Bruno Delille, Dominique Poirier, Marc-Vincent Commarieu, Gilles Lepoint, Cédric Morana, Willy Champenois, Pierre Servais, Jean-Pierre Descy, and François Darchambeau. 2012. 'Variability of Carbon Dioxide and Methane in the Epilimnion of Lake Kivu.' in Jean-Pierre Descy, François Darchambeau and Martin Schmid (eds.), *Lake Kivu: Limnology and biogeochemistry of a tropical great lake* (Springer Netherlands: Dordrecht).
- Change, Climate. 2020. 'The Greenhouse Effect', *Department of Meteorology Malaysia*.
- Chanudet, Vincent, Stéphane Descloux, Atle Harby, Håkon Sundt, Bjørn Henrik Hansen, Odd Brakstad, Dominique Serça, and Frédéric Guerin. 2011. 'Gross CO₂ and CH₄ emissions from the Nam Ngum and Nam Leuk sub-tropical reservoirs in Lao PDR', *Science of The Total Environment*, 409: 5382-91.
- Chen, Keren, Qiyuan Cai, Nan Zheng, Yinan Li, Changyong Lin, and Yuanfei Li. 2021. 'Forest Carbon Sink Evaluation – An Important Contribution for Carbon Neutrality', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 811: 012009.
- Cole, J. J., Y. T. Prairie, N. F. Caraco, W. H. McDowell, L. J. Tranvik, R. G. Striegl, C. M. Duarte, P. Kortelainen, J. A. Downing, J. J. Middelburg, and J. Melack. 2007. 'Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget', *Ecosystems*, 10: 172-85.
- Davidson, T. A., M. Søndergaard, J. Audet, E. Levi, C. Esposito, T. Bucak, and A. Nielsen. 2024. 'Temporary stratification promotes large greenhouse gas emissions in a shallow eutrophic lake', *Biogeosciences*, 21: 93-107.
- de Faria, Felipe A. M., Paulina Jaramillo, Henrique O. Sawakuchi, Jeffrey E. Richey, and Nathan Barros. 2015. 'Estimating greenhouse gas emissions from future Amazonian hydroelectric reservoirs', *Environmental Research Letters*, 10: 124019.
- Deemer, Bridget R., John A. Harrison, Siyue Li, Jake J. Beaulieu, Tonya DelSontro, Nathan Barros, José F. Bezerra-Neto, Stephen M. Powers, Marco A. dos Santos, and J. Arie Vonk. 2016. 'Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis', *BioScience*, 66: 949-64.
- Delmas, Robert, Sandrine Richard, Frédéric Guérin, Gwénaél Abril, Corinne Galy-Lacaux, Claire Delon, and Alain Grégoire. 2005. 'Long Term Greenhouse Gas Emissions from the Hydroelectric Reservoir of Petit Saut (French Guiana) and Potential Impacts.' in Alain Tremblay, Louis Varfalvy, Charlotte Roehm and Michelle Garneau (eds.), *Greenhouse Gas Emissions — Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments* (Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg).

- DelSontro, Tonya, Jake J. Beaulieu, and John A. Downing. 2018. 'Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change', *Limnology and Oceanography Letters*, 3: 64-75.
- dos Santos, Marco Aurelio, Luiz Pinguelli Rosa, Bohdan Sikar, Elizabeth Sikar, and Ednaldo Oliveira dos Santos. 2006. 'Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants', *Energy Policy*, 34: 481-88.
- Duchemin, E., M. Lucotte, and R. Canuel. 1999. 'Comparison of Static Chamber and Thin Boundary Layer Equation Methods for Measuring Greenhouse Gas Emissions from Large Water Bodies', *Environmental Science & Technology*, 33: 350-57.
- Dzierzbicka-Glowacka, Lidia, Karol Kulinski, Anna Maciejewska, Jaromir Jakacki, and Janusz Pempkowiak. 2010. 'Particulate organic carbon in the southern Baltic Sea: numerical simulations and experimental data', *Oceanologia*, 52.
- Eugster, W., T. DelSontro, and S. Sobek. 2011. 'Eddy covariance flux measurements confirm extreme CH_4 emissions from a Swiss hydropower reservoir and resolve their short-term variability', *Biogeosciences*, 8: 2815-31.
- Fedorov, M. P., V. V. Elistratov, V. I. Maslikov, G. I. Sidorenko, A. N. Chusov, V. P. Atrashenok, D. V. Molodtsov, A. S. Savvichev, and A. V. Zinchenko. 2015. 'Reservoir Greenhouse Gas Emissions at Russian HPP', *Power Technology and Engineering*, 49: 33-39.
- Friedlingstein, P., M. W. Jones, M. O'Sullivan, R. M. Andrew, D. C. E. Bakker, J. Hauck, C. Le Quéré, G. P. Peters, W. Peters, J. Pongratz, S. Sitch, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. R. Alin, P. Anthoni, N. R. Bates, M. Becker, N. Bellouin, L. Bopp, T. T. T. Chau, F. Chevallier, L. P. Chini, M. Cronin, K. I. Currie, B. Decharme, L. M. Djeutchouang, X. Dou, W. Evans, R. A. Feely, L. Feng, T. Gasser, D. Gilfillan, T. Gkritzalis, G. Grassi, L. Gregor, N. Gruber, Ö Gürses, I. Harris, R. A. Houghton, G. C. Hurtt, Y. Iida, T. Ilyina, I. T. Lujckx, A. Jain, S. D. Jones, E. Kato, D. Kennedy, K. Klein Goldewijk, J. Knauer, J. I. Korsbakken, A. Körtzinger, P. Landschützer, S. K. Lauvset, N. Lefèvre, S. Lienert, J. Liu, G. Marland, P. C. McGuire, J. R. Melton, D. R. Munro, J. E. M. S. Nabel, S. I. Nakaoka, Y. Niwa, T. Ono, D. Pierrot, B. Poulter, G. Rehder, L. Resplandy, E. Robertson, C. Rödenbeck, T. M. Rosan, J. Schwinger, C. Schwingshackl, R. Séférian, A. J. Sutton, C. Sweeney, T. Tanhua, P. P. Tans, H. Tian, B. Tilbrook, F. Tubiello, G. R. van der Werf, N. Vuichard, C. Wada, R. Wanninkhof, A. J. Watson, D. Willis, A. J. Wiltshire, W. Yuan, C. Yue, X. Yue, S. Zaehle, and J. Zeng. 2022. 'Global Carbon Budget 2021', *Earth Syst. Sci. Data*, 14: 1917-2005.
- Gao, Yang, Jiajia Li, Shuoyue Wang, Junjie Jia, Fan Wu, and Guirui Yu. 2025. 'Global inland water greenhouse gas (GHG) geographical patterns and escape mechanisms under different water level', *Water Research*, 269: 122808.
- Garnier, Josette, and Gilles Billen. 2007. 'Production vs. Respiration in river systems: An indicator of an "ecological status"', *Science of The Total Environment*, 375: 110-24.
- Gleeson, Tom, Lan Wang-Erlandsson, Miina Porkka, Samuel C. Zipper, Fernando Jaramillo, Dieter Gerten, Ingo Fetzer, Sarah E. Cornell, Luigi Piemontese, Line J. Gordon, Johan Rockström, Taikan Oki, Murugesu Sivapalan, Yoshihide Wada, Kate A. Brauman, Martina Flörke, Marc F. P. Bierkens, Bernhard Lehner, Patrick Keys, Matti Kummu, Thorsten Wagener, Simon Dadson, Tara J. Troy, Will Steffen,

- Malin Falkenmark, and James S. Famiglietti. 2020. 'Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene', *Water Resources Research*, 56: e2019WR024957.
- Goldman, Charles R. 1968. 'Aquatic Primary Production', *American Zoologist*, 8: 31-42.
- Gonzalez-Valencia, Rodrigo, Armando Sepulveda-Jauregui, Karla Martinez-Cruz, Jorge Hoyos-Santillan, Luc Dendooven, and Frederic Thalasso. 2014. 'Methane emissions from Mexican freshwater bodies: correlations with water pollution', *Hydrobiologia*, 721: 9-22.
- Grasset, Charlotte, Sebastian Sobek, Kristin Scharnweber, Simone Moras, Holger Villwock, Sara Andersson, Carolin Hiller, Anna C. Nydahl, Fernando Chaguaceda, William Colom, and Lars J. Tranvik. 2020. 'The CO₂-equivalent balance of freshwater ecosystems is non-linearly related to productivity', *Global Change Biology*, 26: 5705-15.
- Gruber, Nicolas, Dorothee C. E. Bakker, Tim DeVries, Luke Gregor, Judith Hauck, Peter Landschützer, Galen A. McKinley, and Jens Daniel Müller. 2023. 'Trends and variability in the ocean carbon sink', *Nature Reviews Earth & Environment*, 4: 119-34.
- Gruca-Rokosz, Renata, Janusz A. Tomaszek, Piotr Koszelnik, and Ewa Czerwieniec. 2010. "Methane and Carbon Dioxide Emission from Some Reservoirs in SE Poland." In *Limnological Review*, 15-21.
- Grund, Yuan, Yangdong Pan, Mark Rosenkranz, and Eugene Foster. 2022. 'Long-term phosphorus reduction and phytoplankton responses in an urban lake (USA)', *Water Biology and Security*, 1: 100010.
- Hagedorn, Frank, and Patrick Schleppi. 2000. 'Determination of total dissolved nitrogen by persulfate oxidation', *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163: 81-82.
- Han, Qiong, Baoli Wang, Cong-Qiang Liu, Fushun Wang, Xi Peng, and Xiao-Long Liu. 2018. 'Carbon biogeochemical cycle is enhanced by damming in a karst river', *Science of The Total Environment*, 616-617: 1181-89.
- Hanson, Paul C., Amina I. Pollard, Darren L. Bade, Katie Predick, Stephen R. Carpenter, and Jonathan A. Foley. 2004. 'A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes', *Global Change Biology*, 10: 1285-98.
- Holgerson, Meredith A., and Peter A. Raymond. 2016. 'Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds', *Nature Geoscience*, 9: 222-26.
- Holgerson, Meredith A., David C. Richardson, Joseph Roith, Lauren E. Bortolotti, Kerri Finlay, Daniel J. Hornbach, Kshitij Gurung, Andrew Ness, Mikkel R. Andersen, Sheel Bansal, Jacques C. Finlay, Jacob A. Cianci-Gaskill, Shannon Hahn, Benjamin D. Janke, Cory McDonald, Jorrit P. Mesman, Rebecca L. North, Cassandra O. Roberts, Jon N. Sweetman, and Jackie R. Webb. 2022. 'Classifying Mixing Regimes in Ponds and Shallow Lakes', *Water Resources Research*, 58: e2022WR032522.
- Hu, Beibei, Dongqi Wang, Jun Zhou, Weiqing Meng, Chongwei Li, Zongbin Sun, Xin Guo, and Zhongliang Wang. 2018. 'Greenhouse gases emission from the sewage draining rivers', *Science of The Total Environment*, 612: 1454-62.
- Huttunen, Jari T., Jukka Alm, Anu Liikanen, Sari Juutinen, Tuula Larmola, Taina Hammar,

- Jouko Silvola, and Pertti J. Martikainen. 2003. 'Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions', *Chemosphere*, 52: 609-21.
- Ipcc. 2023. "Climate Change 2023: Synthesis Report." In *Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 35-115. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Ivanov, M. V., N. V. Pimenov, I. I. Rusanov, and A. Yu Lein. 2002. 'Microbial Processes of the Methane Cycle at the North-western Shelf of the Black Sea', *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54: 589-99.
- Jiang Jia-hu, D. O. U. Hong-shen Huang Qun. 2004. 'Relational analysis of the features of resources and functions of lakes', *JOURNAL OF NATURAL RESOURCES*, 19: 386-91.
- Kazanjian, Garabet, Sabine Flury, Katrin Attermeyer, Thomas Kalettka, Andreas Kleeberg, Katrin Premke, Jan Köhler, and Sabine Hilt. 2018. 'Primary production in nutrient-rich kettle holes and consequences for nutrient and carbon cycling', *Hydrobiologia*, 806: 77-93.
- Kelly, C. A., J. W. M. Rudd, R. A. Bodaly, N. P. Roulet, V. L. St.Louis, A. Heyes, T. R. Moore, S. Schiff, R. Aravena, K. J. Scott, B. Dyck, R. Harris, B. Warner, and G. Edwards. 1997. 'Increases in Fluxes of Greenhouse Gases and Methyl Mercury following Flooding of an Experimental Reservoir', *Environmental Science & Technology*, 31: 1334-44.
- Kemenes, Alexandre, Bruce R. Forsberg, and John M. Melack. 2011. 'CO₂ emissions from a tropical hydroelectric reservoir (Balbina, Brazil)', *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116.
- Klausmeier, Christopher A., Elena Litchman, Tanguy Daufresne, and Simon A. Levin. 2004. 'Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton', *Nature*, 429: 171-74.
- Kortelainen, Pirkko, Miitta Rantakari, Jari T. Huttunen, Tuija Mattsson, Jukka Alm, Sari Juutinen, Tuula Larmola, Jouko Silvola, and Pertti J. Martikainen. 2006. 'Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO₂ evasion from small boreal lakes', *Global Change Biology*, 12: 1554-67.
- Kumar, Amit, and M. P. Sharma. 2016. 'Assessment of risk of GHG emissions from Tehri hydropower reservoir, India', *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22: 71-85.
- Lal, R. 2004. 'Soil carbon sequestration to mitigate climate change', *Geoderma*, 123: 1-22.
- Lamb, William F., Thomas Wiedmann, Julia Pongratz, Robbie Andrew, Monica Crippa, Jos G. J. Olivier, Dominik Wiedenhofer, Giulio Mattioli, Alaa Al Khourdajie, Jo House, Shonali Pachauri, Maria Figueroa, Yamina Saheb, Raphael Slade, Klaus Hubacek, Laixiang Sun, Suzana Kahn Ribeiro, Smail Khennas, Stephane de la Rue du Can, Lazarus Chapungu, Steven J. Davis, Igor Bashmakov, Hancheng Dai, Shobhakar Dhakal, Xianchun Tan, Yong Geng, Baihe Gu, and Jan Minx. 2021. 'A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018', *Environmental Research Letters*, 16: 073005.
- Lambert, Maryse, and Jean-Louis Fréchette. 2005. 'Analytical Techniques for Measuring

Fluxes of CO₂ and CH₄ from Hydroelectric Reservoirs and Natural Water Bodies.' in Alain Tremblay, Louis Varfalvy, Charlotte Roehm and Michelle Garneau (eds.), *Greenhouse Gas Emissions — Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments* (Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg).

- Landschützer, P., N. Gruber, D. C. E. Bakker, and U. Schuster. 2014. 'Recent variability of the global ocean carbon sink', *Global Biogeochemical Cycles*, 28: 927-49.
- Lauerwald, Ronny, George H. Allen, Bridget R. Deemer, Shaoda Liu, Taylor Maavara, Peter Raymond, Lewis Alcott, David Bastviken, Adam Hastie, Meredith A. Holgerson, Matthew S. Johnson, Bernhard Lehner, Peirong Lin, Alessandra Marzadri, Lishan Ran, Hanqin Tian, Xiao Yang, Yuanzhi Yao, and Pierre Regnier. 2023. 'Inland Water Greenhouse Gas Budgets for RECCAP2: 1. State-Of-The-Art of Global Scale Assessments', *Global Biogeochemical Cycles*, 37: e2022GB007657.
- Li, Chunhui, Yihan Wang, Yujun Yi, Xuan Wang, Celso Augusto Guimarães Santos, and Qiang Liu. 2024. 'A review of reservoir carbon Cycling: Key Processes, influencing factors and research methods', *Ecological Indicators*, 166: 112511.
- Li, Guohua, Sheng Zhang, Xiaohong Shi, Liyang Zhan, Shengnan Zhao, Biao Sun, Yu Liu, Zhiqiang Tian, Zhijun Li, Lauri Arvola, Sari Uusheimo, Tiina Tulonen, and Jussi Huotari. 2022. 'Spatiotemporal variability and diffusive emissions of greenhouse gas in a shallow eutrophic lake in Inner Mongolia, China', *Ecological Indicators*, 145: 109578.
- Li, Lingling, and Bin Xue. 2023. 'Spatial-temporal variability of methane fluxes in lakes varying in latitude, area, and depth', *Heliyon*, 9: e18411.
- Li, Siyue, Richard T. Bush, Isaac R. Santos, Quanfa Zhang, Kaishan Song, Rong Mao, Zhidan Wen, and Xi Xi Lu. 2018. 'Large greenhouse gases emissions from China's lakes and reservoirs', *Water Research*, 147: 13-24.
- Li, Xiaoxi, Changsheng Jiang, Xue Ni, Shijie Chen, and Qingju Hao. 2021. 'Diffusive greenhouse gases fluxes from the surface of the Three Gorges Reservoir: Study at a site in Fuling', *Acta Ecologica Sinica*, 41: 79-87.
- Liikanen, Anu, Laura Flöjt, and Pertti Martikainen. 2002. 'Gas Dynamics in Eutrophic Lake Sediments Affected by Oxygen, Nitrate, and Sulfate', *Journal of Environmental Quality*, 31: 338-49.
- Liu, Lixiang, Ming Xu, Mao Lin, and Xin Zhang. 2013. 'Spatial Variability of Greenhouse Gas Effluxes and Their Controlling Factors in the Poyang Lake in China', *Polish Journal of Environmental Studies*, 22.
- Liu, Zhu, Zhu Deng, Steve Davis, and Philippe Ciais. 2023. 'Monitoring global carbon emissions in 2022', *Nature Reviews Earth & Environment*, 4: 205-06.
- Loken, Luke C., John T. Crawford, Paul J. Schramm, Philipp Stadler, Ankur R. Desai, and Emily H. Stanley. 2019. 'Large Spatial and Temporal Variability of Carbon Dioxide and Methane in a Eutrophic Lake', *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124: 2248-66.
- Lv, Jin, Hongjuan Wu, and Mengqiu Chen. 2011. 'Effects of nitrogen and phosphorus on phytoplankton composition and biomass in 15 subtropical, urban shallow lakes in Wuhan, China', *Limnologia*, 41: 48-56.

- Mannich, Michael, Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes, and Tobias Bernward Bleninger. 2019. 'Uncertainty analysis of gas flux measurements at air–water interface using floating chambers', *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19: 475-86.
- Martinsen, K. T., T. Kragh, and K. Sand-Jensen. 2018. 'Technical note: A simple and cost-efficient automated floating chamber for continuous measurements of carbon dioxide gas flux on lakes', *Biogeosciences*, 15: 5565-73.
- Matthews, Cory J. D., Vincent L. St.Louis, and Raymond H. Hesslein. 2003. 'Comparison of Three Techniques Used To Measure Diffusive Gas Exchange from Sheltered Aquatic Surfaces', *Environmental Science & Technology*, 37: 772-80.
- Mauder, Matthias, Thomas Foken, Marc Aubinet, and Andreas Ibrom. 2021. 'Eddy-Covariance Measurements.' in Thomas Foken (ed.), *Springer Handbook of Atmospheric Measurements* (Springer International Publishing: Cham).
- McKinley, Galen A., Amanda R. Fay, Nicole S. Lovenduski, and Darren J. Pilcher. 2017. 'Natural Variability and Anthropogenic Trends in the Ocean Carbon Sink', *Annual Review of Marine Science*, 9: 125-50.
- Mehner, Thomas. 2009. *Encyclopedia of inland waters* (Academic Press).
- Meng, Lize, Jingya Xue, Chu Zhao, Tao Huang, Hao Yang, Kan Zhao, Zhaoyuan Yu, Linwang Yuan, Qichao Zhou, Anne M. Kellerman, Amy M. McKenna, Robert G. M. Spencer, and Changchun Huang. 2023. 'N-containing dissolved organic matter promotes dissolved inorganic carbon supersaturation in the Yangtze River, China', *Water Research*, 247: 120808.
- Miao, Yuqing, Henan Meng, Wenlei Luo, Biao Li, Hao Luo, Qi Deng, Youru Yao, Yinggui Shi, and Qinglong L. Wu. 2022. 'Large alpine deep lake as a source of greenhouse gases: A case study on Lake Fuxian in Southwestern China', *Science of The Total Environment*, 838: 156059.
- Mikhaylov, Alexey, Nikita Moiseev, Kirill Aleshin, and Thomas Burkhardt. 2020. 'Global climate change and greenhouse effect', *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7: 2897.
- Morales-Williams, Ana M., Alan D. Wanamaker, Clayton J. Williams, and John A. Downing. 2021. 'Eutrophication Drives Extreme Seasonal CO₂ Flux in Lake Ecosystems', *Ecosystems*, 24: 434-50.
- Morana, C., S. Bouillon, V. Nolla-Ardèvol, F. A. E. Roland, W. Okello, J. P. Descy, A. Nankabirwa, E. Nabafu, D. Springael, and A. V. Borges. 2020. 'Methane paradox in tropical lakes? Sedimentary fluxes rather than pelagic production in oxic conditions sustain methanotrophy and emissions to the atmosphere', *Biogeosciences*, 17: 5209-21.
- Moreira, Diana, and José C. M. Pires. 2016. 'Atmospheric CO₂ capture by algae: Negative carbon dioxide emission path', *Bioresource Technology*, 215: 371-79.
- Musenze, Ronald S., Alistair Grinham, Ursula Werner, Deborah Gale, Katrin Sturm, James Udy, and Zhiguo Yuan. 2014. 'Assessing the Spatial and Temporal Variability of Diffusive Methane and Nitrous Oxide Emissions from Subtropical Freshwater Reservoirs', *Environmental Science & Technology*, 48: 14499-507.
- Mykilestad, Sverre M. 2000. 'Dissolved Organic Carbon from Phytoplankton.' in P. J. Wangersky (ed.), *Marine Chemistry* (Springer Berlin Heidelberg: Berlin,

Heidelberg).

- Natchimuthu, Sivakiruthika, Ingrid Sundgren, Magnus Gålfalk, Leif Klemetsson, and David Bastviken. 2017. 'Spatiotemporal variability of lake pCO₂ and CO₂ fluxes in a hemiboreal catchment', *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122: 30-49.
- Natchimuthu, Sivakiruthika, Ingrid Sundgren, Magnus Gålfalk, Leif Klemetsson, Patrick Crill, Åsa Danielsson, and David Bastviken. 2016. 'Spatio-temporal variability of lake CH₄ fluxes and its influence on annual whole lake emission estimates', *Limnology and Oceanography*, 61: S13-S26.
- Nilsson, Christer. 2009. 'Reservoirs.' in E. Likens Gene (ed.), *Encyclopedia of inland waters* (Elsevier).
- Ojala, Anne, Jessica López Bellido, Tiina Tulonen, Paula Kankaala, and Jussi Huotari. 2011. 'Carbon gas fluxes from a brown-water and a clear-water lake in the boreal zone during a summer with extreme rain events', *Limnology and Oceanography*, 56: 61-76.
- Ometto, Jean P., André C. P. Cimpleris, Marco A. dos Santos, Luiz P. Rosa, Donato Abe, José G. Tundisi, José L. Stech, Nathan Barros, and Fábio Roland. 2013. 'Carbon emission as a function of energy generation in hydroelectric reservoirs in Brazilian dry tropical biome', *Energy Policy*, 58: 109-16.
- Pacheco, F. S., M. C. S. Soares, A. T. Assireu, M. P. Curtarelli, F. Roland, G. Abril, J. L. Stech, P. C. Alvalá, and J. P. Ometto. 2015. 'The effects of river inflow and retention time on the spatial heterogeneity of chlorophyll and water-air CO₂ fluxes in a tropical hydropower reservoir', *Biogeosciences*, 12: 147-62.
- Palma-Silva, Cleber, Cláudio Cardoso Marinho, Edélti Faria Albertoni, Iara Bueno Giacomini, Marcos Paulo Figueiredo Barros, Leonardo Marques Furlanetto, Claudio Rossano Trindade Trindade, and Francisco de Assis Esteves. 2013. 'Methane emissions in two small shallow neotropical lakes: The role of temperature and trophic level', *Atmospheric Environment*, 81: 373-79.
- Pan, Yude, Richard A. Birdsey, Oliver L. Phillips, Richard A. Houghton, Jingyun Fang, Pekka E. Kauppi, Heather Keith, Werner A. Kurz, Akihiko Ito, Simon L. Lewis, Gert-Jan Nabuurs, Anatoly Shvidenko, Shoji Hashimoto, Bas Lerink, Dmitry Schepaschenko, Andrea Castanho, and Daniel Murdiyarso. 2024. 'The enduring world forest carbon sink', *Nature*, 631: 563-69.
- Panneer Selvam, Balathandayuthabani, Sivakiruthika Natchimuthu, Lakshmanan Arunachalam, and David Bastviken. 2014. 'Methane and carbon dioxide emissions from inland waters in India – implications for large scale greenhouse gas balances', *Global Change Biology*, 20: 3397-407.
- Pi, Xuehui, Qiuqi Luo, Lian Feng, Yang Xu, Jing Tang, Xiuyu Liang, Enze Ma, Ran Cheng, Rasmus Fensholt, Martin Brandt, Xiaobin Cai, Luke Gibson, Junguo Liu, Chunmiao Zheng, Weifeng Li, and Brett A. Bryan. 2022. 'Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes', *Nature Communications*, 13: 5777.
- Podgrajsek, E., E. Sahlée, D. Bastviken, S. Natchimuthu, N. Kljun, H. E. Chmiel, L. Klemetsson, and A. Rutgersson. 2016. 'Methane fluxes from a small boreal lake

- measured with the eddy covariance method', *Limnology and Oceanography*, 61: S41-S50.
- Praetzel, L. S. E., N. Plenter, S. Schilling, M. Schmiedeskamp, G. Broll, and K. H. Knorr. 2020. 'Organic matter and sediment properties determine in-lake variability of sediment CO₂ and CH₄ production and emissions of a small and shallow lake', *Biogeosciences*, 17: 5057-78.
- 'Principal component analysis and redundancy analysis.' in. 2007. Alain F. Zuur, Elena N. Ieno and Graham M. Smith (eds.), *Analysing Ecological Data* (Springer New York: New York, NY).
- Raymond, Peter A., Jens Hartmann, Ronny Lauerwald, Sebastian Sobek, Cory McDonald, Mark Hoover, David Butman, Robert Striegl, Emilio Mayorga, Christoph Humborg, Pirkko Kortelainen, Hans Dürr, Michel Meybeck, Philippe Ciais, and Peter Guth. 2013. 'Global carbon dioxide emissions from inland waters', *Nature*, 503: 355-59.
- Raynaud, D., J. Jouzel, J. M. Barnola, J. Chappellaz, R. J. Delmas, and C. Lorius. 1993. 'The Ice Record of Greenhouse Gases', *Science*, 259: 926-34.
- Redfield, Alfred C. 1958. 'THE BIOLOGICAL CONTROL OF CHEMICAL FACTORS IN THE ENVIRONMENT', *American scientist*, 46: 230A-21.
- Riera, Joan L., John E. Schindler, and Tim K. Kratz. 1999. 'Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane in two clear-water lakes and two bog lakes in northern Wisconsin, U.S.A', *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56: 265-74.
- Roland, Fábio, Luciana O. Vidal, Felipe S. Pacheco, Nathan O. Barros, Arcilan Assireu, Jean P. H. B. Ometto, André C. P. Cimbleris, and Jonathan J. Cole. 2010. 'Variability of carbon dioxide flux from tropical (Cerrado) hydroelectric reservoirs', *Aquatic Sciences*, 72: 283-93.
- Sanches, Lúcia Fernandes, Bertrand Guenet, Claudio Cardoso Marinho, Nathan Barros, and Francisco de Assis Esteves. 2019. 'Global regulation of methane emission from natural lakes', *Scientific Reports*, 9: 255.
- Schafft, Malwina, Robert Nikolaus, Sven Matern, Johannes Radinger, Andreas Maday, Thomas Klefoth, Christian Wolter, and Robert Arlinghaus. 2024. 'Impact of water-based recreation on aquatic and riparian biodiversity of small lakes', *Journal for Nature Conservation*, 78: 126545.
- Shi, Wenqing, Qiuwen Chen, Qitao Yi, Juhua Yu, Yuyu Ji, Liuming Hu, and Yuchen Chen. 2017. 'Carbon Emission from Cascade Reservoirs: Spatial Heterogeneity and Mechanisms', *Environmental Science & Technology*, 51: 12175-81.
- Sieczko, Anna K., Nguyen Thanh Duc, Jonathan Schenk, Gustav Pajala, David Rudberg, Henrique O. Sawakuchi, and David Bastviken. 2020. 'Diel variability of methane emissions from lakes', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117: 21488-94.
- Sø, Jonas Stage, Kenneth Thorø Martinsen, Theis Kragh, and Kaj Sand-Jensen. 2024. 'Hourly methane and carbon dioxide fluxes from temperate ponds', *Biogeochemistry*, 167: 177-95.
- Soumis, Nicolas, Éric Duchemin, René Canuel, and Marc Lucotte. 2004. 'Greenhouse gas

- emissions from reservoirs of the western United States', *Global Biogeochemical Cycles*, 18.
- Sun, Heyang, Ruihong Yu, Xinyu Liu, Zhengxu Cao, Xiangwei Li, Zhuangzhuang Zhang, Jun Wang, Shuai Zhuang, Zheng Ge, Linxiang Zhang, Liangqi Sun, Andreas Lorke, Jie Yang, Changwei Lu, and Xixi Lu. 2022. 'Drivers of spatial and seasonal variations of CO₂ and CH₄ fluxes at the sediment water interface in a shallow eutrophic lake', *Water Research*, 222: 118916.
- Sun, Heyang, Ruihong Yu, Xinyu Liu, Zhuangzhuang Zhang, Xiaohui Ren, Xiangwei Li, Zhen Qi, Jun Wang, Zhiwei Guo, Penghang Zhu, Xixi Lu, and Baoshan Cui. 2024. 'Large greenhouse gases emissions from lakes in Inner Mongolia, China', *Journal of Hydrology*, 637: 131432.
- Szymczycha, Beata, Aleksandra Winogradow, Karol Kuliński, Katarzyna Kozirowska, and Janusz Pempkowiak. 2017. 'Diurnal and seasonal DOC and POC variability in the land-locked sea', *Oceanologia*, 59: 379-88.
- Teodoru, C. R., F. C. Nyoni, A. V. Borges, F. Darchambeau, I. Nyambe, and S. Bouillon. 2015. 'Dynamics of greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O) along the Zambezi River and major tributaries, and their importance in the riverine carbon budget', *Biogeosciences*, 12: 2431-53.
- Terhaar, J., T. L. Frölicher, and F. Joos. 2022. 'Observation-constrained estimates of the global ocean carbon sink from Earth system models', *Biogeosciences*, 19: 4431-57.
- Thalasso, Frederic, Armando Sepulveda-Jauregui, Léa Cabrol, Céline Lavergne, Nazli Olgun, Karla Martinez-Cruz, Polette Aguilar-Muñoz, Natalia Calle, Andrés Mansilla, and María Soledad Astorga-España. 2022. 'Methane and carbon dioxide cycles in lakes of the King George Island, maritime Antarctica', *Science of The Total Environment*, 848: 157485.
- Tremblay, Alain. 2005. *Greenhouse gas emissions-fluxes and processes: hydroelectric reservoirs and natural environments* (Springer Science & Business Media).
- Trolle, Dennis, Peter A. Staehr, Thomas A. Davidson, Rikke Bjerring, Torben L. Lauridsen, Martin Søndergaard, and Erik Jeppesen. 2012. 'Seasonal Dynamics of CO₂ Flux Across the Surface of Shallow Temperate Lakes', *Ecosystems*, 15: 336-47.
- Vachon, Dominic, Ryan A. Sponseller, and Jan Karlsson. 2021. 'Integrating carbon emission, accumulation and transport in inland waters to understand their role in the global carbon cycle', *Global Change Biology*, 27: 719-27.
- Villat, Jessica, and Kimberly A. Nicholas. 2024. 'Quantifying soil carbon sequestration from regenerative agricultural practices in crops and vineyards', *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7.
- Wan, Xiang, Shuai Chen, Wanfa Wang, Mutan Dai, Wenhong Shi, Lishan Ran, Xiaoxu Wu, and Wenfeng Tan. 2024. 'Anthropogenic Perturbations Complicated the Downstream Greenhouse Gas Dynamics of a Large Subtropical Reservoir', *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 129: e2024JG008408.
- Wang, Gongqin, Xinghui Xia, Shaoda Liu, Ling Zhang, Sibao Zhang, Junfeng Wang, Nannan Xi, and Qianru Zhang. 2021. 'Intense methane ebullition from urban inland waters and its significant contribution to greenhouse gas emissions', *Water*

Research, 189: 116654.

- Wang, Hao, and Guohua He. 2022. 'Rivers: Linking nature, life, and civilization', *River*, 1: 25-36.
- Wang, Xiaofeng, Yixin He, Xingzhong Yuan, Huai Chen, Changhui Peng, Junsheng Yue, Qiaoyong Zhang, Yuanbin Diao, and Shuangshuang Liu. 2017. 'Greenhouse gases concentrations and fluxes from subtropical small reservoirs in relation with watershed urbanization', *Atmospheric Environment*, 154: 225-35.
- Wang, Yang, Bingjie Ma, Shuai Shen, Yifei Zhang, Chen Ye, Hao Jiang, and Siyue Li. 2024. 'Diel variability of carbon dioxide concentrations and emissions in a largest urban lake, Central China: Insights from continuous measurements', *Science of The Total Environment*, 912: 168987.
- Wang, Zilin, Meili Feng, Matthew F. Johnson, Aldo Lipani, and Faith Chan. 2025. 'The role of reservoir size in driving methane emissions in China', *Water Research*, 279: 123441.
- Waring, Bonnie, Mathias Neumann, Iain Colin Prentice, Mark Adams, Pete Smith, and Martin Siegert. 2020. 'Forests and Decarbonization – Roles of Natural and Planted Forests', *Frontiers in Forests and Global Change*, 3.
- Wiltshire, S., and B. Beckage. 2023. 'Integrating climate change into projections of soil carbon sequestration from regenerative agriculture', *PLOS Climate*, 2: e0000130.
- Xiao, Qitao, Hongtao Duan, Boqiang Qin, Zhenghua Hu, Mi Zhang, Tianci Qi, and Xuhui Lee. 2022. 'Eutrophication and temperature drive large variability in carbon dioxide from China's Lake Taihu', *Limnology and Oceanography*, 67: 379-91.
- Xiao, Qitao, Wei Xiao, Juhua Luo, Yinguo Qiu, Cheng Hu, Mi Zhang, Tianci Qi, and Hongtao Duan. 2023. 'Management actions mitigate the risk of carbon dioxide emissions from urban lakes', *Journal of Environmental Management*, 344: 118626.
- Xiao, Qitao, Xiaofeng Xu, Hongtao Duan, Tianci Qi, Boqiang Qin, Xuhui Lee, Zhenghua Hu, Wei Wang, Wei Xiao, and Mi Zhang. 2020. 'Eutrophic Lake Taihu as a significant CO₂ source during 2000–2015', *Water Research*, 170: 115331.
- Xiao, Qitao, Mi Zhang, Zhenghua Hu, Yunqiu Gao, Cheng Hu, Cheng Liu, Shoudong Liu, Zhen Zhang, Jiayu Zhao, Wei Xiao, and X. Lee. 2017. 'Spatial variations of methane emission in a large shallow eutrophic lake in subtropical climate', *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122: 1597-614.
- Xiao, Shangbin, Chenghao Wang, Richard Jeremy Wilkinson, Defu Liu, Cheng Zhang, Wennian Xu, Zhengjian Yang, Yuchun Wang, and Dan Lei. 2016. 'Theoretical model for diffusive greenhouse gas fluxes estimation across water-air interfaces measured with the static floating chamber method', *Atmospheric Environment*, 137: 45-52.
- Xing, Yangping, Ping Xie, Hong Yang, Leyi Ni, Yuesi Wang, and Kewen Rong. 2005. 'Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China', *Atmospheric Environment*, 39: 5532-40.
- Xu, Jie, Zheng Zhou, Jie Chen, Haihua Zhuo, Jie Ma, and Yunbing Liu. 2022. 'Spatiotemporal Patterns in pCO₂ and Nutrient Concentration: Implications for the CO₂ Variations in a Eutrophic Lake', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19: 12150.

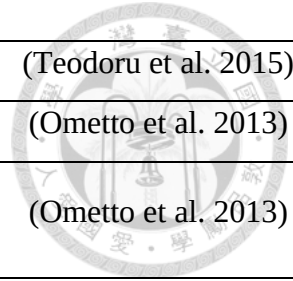
- Yan, Xingcheng, Xiaoguang Xu, Ming Ji, Zhongqian Zhang, Mingyue Wang, Songjun Wu, Guoxiang Wang, Chi Zhang, and Huichao Liu. 2019. 'Cyanobacteria blooms: A neglected facilitator of CH₄ production in eutrophic lakes', *Science of The Total Environment*, 651: 466-74.
- Yan, Xingcheng, Xiaoguang Xu, Mingyue Wang, Guoxiang Wang, Songjun Wu, Zhichun Li, Hao Sun, Ao Shi, and Yunhao Yang. 2017. 'Climate warming and cyanobacteria blooms: Looks at their relationships from a new perspective', *Water Research*, 125: 449-57.
- Yang Qianmin, Yuan Danping Deng Cunbao Wang Yansheng Qiao Ling. 2023. 'Research progress on net carbon sequestration capacity of plants under the background of carbon neutralization', *Chinese Journal of Ecology*, 42: 1484-96.
- Yin, Jie, Xiaobing Chen, Lizhen Wen, Xiaoli Tu, Wenting Xie, and Ran Xv. 2025. 'Spatial and seasonal variations of carbon emissions in an urban lake: Flux sensitivity and sampling optimization based on high-resolution measurements', *Journal of Hydrology*, 648: 132472.
- Yoro, Kelvin O., and Michael O. Daramola. 2020. 'Chapter 1 - CO₂ emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect.' in Mohammad Reza Rahimpour, Mohammad Farsi and Mohammad Amin Makarem (eds.), *Advances in Carbon Capture* (Woodhead Publishing).
- Yue, Xi-Liu, and Qing-Xian Gao. 2018. 'Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions', *Advances in Climate Change Research*, 9: 243-52.
- Zagarese, Horacio E., María de los Ángeles González Sagrario, Dieter Wolf-Gladrow, Peeter Nõges, Tiina Nõges, Külli Kangur, Shin-Ichiro S. Matsuzaki, Ayato Kohzu, Michael J. Vanni, Deniz Özkundakci, Santiago A. Echaniz, Alicia Vignatti, Fabián Grosman, Pablo Sanzano, Bryce Van Dam, and Lesley B. Knoll. 2021. 'Patterns of CO₂ concentration and inorganic carbon limitation of phytoplankton biomass in agriculturally eutrophic lakes', *Water Research*, 190: 116715.
- Zhang, Lei, Cheng Liu, Kai He, Qiushi Shen, and Jicheng Zhong. 2021. 'Dramatic temporal variations in methane levels in black bloom prone areas of a shallow eutrophic lake', *Science of The Total Environment*, 767: 144868.
- Zhang, Min, Yangyan Cheng, Ying Bao, Chang Zhao, Gang Wang, Yuanling Zhang, Zhenya Song, Zhaohua Wu, and Fangli Qiao. 2022. 'Seasonal to decadal spatiotemporal variations of the global ocean carbon sink', *Global Change Biology*, 28: 1786-97.
- Zhang, Ting, Lei Zhou, Yongqiang Zhou, Yunlin Zhang, Jinxin Guo, Yicai Han, Yayan Zhang, Liang Hu, Kyoung-Soon Jang, Robert G. M. Spencer, Justin D. Brookes, Jan Dolfing, and Erik Jeppesen. 2024. 'Terrestrial dissolved organic matter inputs accompanied by dissolved oxygen depletion and declining pH exacerbate CO₂ emissions from a major Chinese reservoir', *Water Research*, 251: 121155.
- Zhao, Min, Zaihua Liu, Hong-Chun Li, Cheng Zeng, Rui Yang, Bo Chen, and Hao Yan. 2015. 'Response of dissolved inorganic carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ to changes in climate and land cover in SW China karst catchments', *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 165: 123-36.
- Zheng, Yajing, Shuang Wu, Shuqi Xiao, Kai Yu, Xiantao Fang, Longlong Xia, Jinyang

- Wang, Shuwei Liu, Chris Freeman, and Jianwen Zou. 2022. 'Global methane and nitrous oxide emissions from inland waters and estuaries', *Global Change Biology*, 28: 4713-25.
- Zhou, Shangbo, Yixin He, Xingzhong Yuan, Shuchan Peng, and Junsheng Yue. 2017. 'Greenhouse gas emissions from different land-use areas in the Littoral Zone of the Three Gorges Reservoir, China', *Ecological Engineering*, 100: 316-24.
- Zhu, Jiao-Jun, Tian Gao, Li-Zhong Yu, Kai Yang, Tao Sun, De-Liang Lu, Zhi-Hua Liu, Ying-Dong Chu, Jin-Xin Zhang, De-Xiong Teng, Yuan Zhu, Yi-Rong Sun, Xu-Gao Wang, and Gao-Feng Wang. 2024. 'Carbon sink of forest ecosystems: Concept, time effect and improvement approaches', *Ying yong sheng tai xue bao* = *The journal of applied ecology*, 35: 2313-21.
- Zhu, Lin, Boqiang Qin, Jian Zhou, Bryce Van Dam, and Wenqing Shi. 2018. 'Effects of turbulence on carbon emission in shallow lakes', *Journal of Environmental Sciences*, 69: 166-72.
- Zhu, Ying, Xiuli Chen, Yuyin Yang, and Shuguang Xie. 2022. 'Impacts of cyanobacterial biomass and nitrate nitrogen on methanogens in eutrophic lakes', *Science of The Total Environment*, 848: 157570.
- 宋明儒. 2021. '小尺度大貢獻-內陸小型湖泊及池塘二氧化碳排放對全球碳通量的影響', 國立中興大學.
- 宋明儒, and 林幸助. 2019. '雙連埤溫室氣體排放日夜變化', *濕地學刊*, 8: 15-23.
- 周郁閔. 2021. '亞熱帶內陸小型湖泊及池塘的甲烷排放量', 國立中興大學.
- 羅銀環. 2017. '桃園陂塘與客家發展之研究-以龍潭大池為例', 國立中央大學.

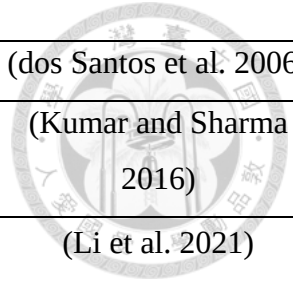
附錄



Country	Climate	Type	Name	Latitude	Longitude	CO ₂ Flux (mg CO ₂ m ⁻² hr ⁻¹)	CH ₄ Flux (mg CH ₄ m ⁻² hr ⁻¹)	Source
USA	Subtropical	Reservoir	Allatoona	34°08'N	84°38'W	68.20	0.58	(Bevelhimer et al. 2016)
Brazil	Tropical	Reservoir	Balbina	01°55'S	59°28'W	359.94	2.01	(Kemenes, Forsberg, and Melack 2011)
Brazil	Tropical	Reservoir	Barra Bonita	22°31'S	48°35'W	162.20	0.87	(dos Santos et al. 2006)
Mozambique	Tropical	Reservoir	Cahora Bassa	15°35'S	32°42'E	-54.39	0.08	(Teodoru et al. 2015)
Brazil	Tropical	Reservoir	Corumbá	17°59'S	48°31'W	72.58	12.70	(Bergier et al. 2011)
USA	Temperate	Reservoir	Douglas	35°57'N	83°32'W	161.37	0.32	(Bevelhimer et al. 2016)
Canada	Temperate	Reservoir	Eastmain 1	51°30'N	74°0'W	145.11	0.34	(Bastien, Demarty, and Tremblay 2011)
USA	Subtropical	Reservoir	Guntersville	34°25'N	86°23'W	47.18	0.22	(Bevelhimer et al. 2016)
USA	Subtropical	Reservoir	Hartwell	34°28'N	82°50'W	39.27	0.95	(Bevelhimer et al. 2016)
USA	Temperate	Reservoir	Fontana	35°26'N	83°48'W	27.32	0.24	(Bevelhimer et al. 2016)
Brazil	Tropical	Reservoir	Funil	22°31'S	44°33'W	-50.16	3.20	(Pacheco et al. 2015)
Brazil	Tropical	Reservoir	Furnas	20°40'S	46°15'W	18.43	1.21	(Bergier et al. 2011)
Paraguay	Subtropical	Reservoir	Itaipu	25°23'S	54°33'W	7.11	0.35	(dos Santos et al. 2006)



Zambia	Tropical	Reservoir	Itezhi Tezhi	15°46'S	26°01'E	112.60	1.43	(Teodoru et al. 2015)
Brazil	Tropical	Reservoir	Itumbiara	18°24'S	49°03'W	26.30	2.19	(Ometto et al. 2013)
Brazil	Tropical	Reservoir	L.C.B. de Carvalho	20°09'S	47°15'W	68.42	0.37	(Ometto et al. 2013)
Canada	Temperate	Reservoir	Laforge-1	54°12'N	72°35'W	72.98	0.72	(Tremblay 2005)
Russia	Temperate	Reservoir	Mainskaya	52°58'N	91°30'E	77.00	0.02	(Fedorov et al. 2015)
Brazil	Tropical	Reservoir	Manso	14°52'S	55°48'W	75.66	5.25	(Roland et al. 2010)
Brazil	Tropical	Reservoir	M. de Moraes	20°16'S	47°03'W	45.75	0.81	(Roland et al. 2010)
Brazil	Tropical	Reservoir	Miranda	18°55'S	48°02'W	174.76	6.59	(dos Santos et al. 2006)
Laos	Tropical	Reservoir	Nam Leuk	18°27'N	102°57'E	-29.36	3.27	(Chanudet et al. 2011)
Laos	Tropical	Reservoir	Nam Ngum	18°32'N	103°33'E	5.69	0.20	(Chanudet et al. 2011)
French Guiana	Tropical	Reservoir	Petit Saut	5°03'N	53°02'W	192.55	5.93	(Delmas et al. 2005)
Canada	Temperate	Reservoir	Robert-Bourassa (LG-2)	53°40'N	77°00'W	51.34	0.28	(Tremblay 2005)
Brazil	Tropical	Reservoir	Samuel	08°48'S	63°25'W	300.42	3.32	(dos Santos et al. 2006)
Russia	Temperate	Reservoir	Sayano Shushenkaya	52°49'N	91°22'E	66.14	0.03	(Fedorov et al. 2015)
Brazil	Subtropical	Reservoir	Segredo	25°47'S	52°06'W	101.98	0.37	(dos Santos et al. 2006)



Brazil	Tropical	Reservoir	Serra da Mesa	13°51'S	48°20'W	102.63	4.65	(dos Santos et al. 2006)
India	Subtropical	Reservoir	Tehri	30°22'N	78°28'E	17.75	1.16	(Kumar and Sharma 2016)
China	Subtropical	Reservoir	三峡大壩	31°2'N	109°33'E	140.35	1.35	(Li et al. 2021)
Brazil	Tropical	Reservoir	Três Marias	18°14'S	45°15'W	39.07	8.18	(dos Santos et al. 2006)
Brazil	Tropical	Reservoir	Tucuruí	3°55'S	49°36'W	402.79	3.06	(dos Santos et al. 2006)
USA	Temperate	Reservoir	Watts Bar	35°37'N	84°46'W	40.82	0.27	(Bevelhimer et al. 2016)
Poland	Temperate	Reservoir	Wilcza Wola	50°21'N	21°54'E	167.81	10.09	(Gruca-Rokosz et al. 2010)
Switzerland	Temperate	Reservoir	Wohlen	49°58'N	7°19'E	43.88	16.31	(Eugster, DelSontro, and Sobek 2011)
Brazil	Tropical	Reservoir	Xingó	9°37'S	37°47'W	329.94	1.67	(dos Santos et al. 2006)
Finland	Temperate	Natural lake	Pääjärvi	61°04'N	25°08'E	61.25	0.06	(Ojala et al. 2011)
Brazil	Tropical	Natural lake	Ecological Station of Seridó	6°34'S	37°15'W	77.92	1.56	(Almeida et al. 2016)
Canada	Temperate	Natural lake	ELA Lake 979	49°46'N	93°48'W	133.33	2.73	(Kelly et al. 1997)
China	Subtropical	Natural lake	鄱陽湖	28°22'N	115°47'E	36.43	0.17	(Liu et al. 2013)
China	Temperate	Natural lake	Daihai	40°33'N	112°37'E	47.30	0.60	(Sun et al. 2024)

China	Temperate	Natural lake	Hongjiannao	39°04'N	109°50'E	19.07	0.27	(Sun et al. 2024)
China	Subtropical	Natural lake	撫仙湖	24°17'N	102°49'E	16.17	0.02	(Miao et al. 2022)
East Africa	Tropical	Natural lake	Kivu	2°0'S	29°0'E	11.00	0.021	(Borges et al. 2011; Borges et al. 2012)
China	Temperate	Natural lake	Taihu	39°1'N	117°43'E	33.37	0.054	(Xiao et al. 2017; Xiao et al. 2020)
USA	Temperate	Natural lake	Sparkling	46°00'N	89°41'E	9.17	0.105	(Riera, Schindler, and Kratz 1999)
Finland	Temperate	Natural lake	Heinälampi	62°48'N	27°31'E	23.83	0.216	(Huttunen et al. 2003)
Finland	Temperate	Natural lake	Jänkäläisenlampi	67°09'N	27°09'E	22.00	0.274	(Huttunen et al. 2003)
Canada	Temperate	Natural lake	Jacques	52°55'N	117°45'W	34.28	0.379	(Bartosiewicz, Laurion, and MacIntyre 2015)
Sweden	Temperate	Natural lake	Erssjön	58°22'N	12°9'E	85.80	0.058	(Natchimuthu et al. 2017; Natchimuthu et al. 2016)
USA	Temperate	Natural lake	Mendota	43°1'N	89°4'W	14.67	0.543	(Loken et al. 2019)
China	Subtropical	Urban lake	玄武湖	32°04'N	118°47'E	20.9	2.0	(Yin et al. 2025)
China	Subtropical	Urban lake	東湖	30.55°N,	114.37°E	13.8	0.97	(Xing et al. 2005)

China	Subtropical	Reservoir	武漢水庫	28°10'N	105°11'E	273.17	1.83	(Wang et al. 2017)
China	Subtropical	Reservoir	漳河水庫	31°04'N	111°55'E	243.83	1.01	(Wan et al. 2024)
India	Tropical	Urban lake	Kolavai	12°42'N	79°59'E	16.19	0.934	(Panneer Selvam et al. 2014)
India	Tropical	Urban lake	Madhurandhagam	12°31'N	79°52'E	3.34	1.53	(Panneer Selvam et al. 2014)
Mexico	Tropical	Urban lake	Lago de Guadalupe	21°48'N	101°20'W		38.89	(Gonzalez-Valencia et al. 2014)
Mexico	Tropical	Urban lake	Lago Umequaro	19°31'N	101°15'W		2.40	(Gonzalez-Valencia et al. 2014)
China	Subtropical	Urban lake	東湖	30°55'N	114°37'E	30.1		(Xiao et al. 2023)
China	Subtropical	Urban lake	五里湖	31°28'N	120°13'E	38.71		(Xiao et al. 2023)
Taiwan	L & D	Urban lake	Longtan	24°51'N	121°12'E	35.318	0.901	本研究
Taiwan	L & D	Urban lake	Longtan	24°51'N	121°12'E	18.916	2.080	
Taiwan	L & D	Urban lake	Longtan	24°51'N	121°12'E	-58.474	0.714	
Taiwan	L & D	Urban lake	Longtan	24°51'N	121°12'E	-4.911	2.431	
Taiwan	L & D	Urban lake	Longtan	24°51'N	121°12'E	29.118	1.577	

Taiwan	L & D	Urban lake	Longtan	24°51'N	121°12'E	4.100	1.744	 本研究
Taiwan	L & D	Urban lake	Longtan	24°51'N	121°12'E	74.453	1.812	
Taiwan	L & D	Urban lake	Longtan	24°51'N	121°12'E	-7.379	5.210	
Taiwan	L & D	Urban lake	Longtan	24°51'N	121°12'E	4.636	1.090	
Taiwan	L & D	Urban lake	Longtan	24°51'N	121°12'E	5.642	0.766	
Taiwan	L & D	Urban lake	Longtan	24°51'N	121°12'E	-6.092	0.640	
Taiwan	L & D	Urban lake	Longtan	24°51'N	121°12'E	0.628	0.198	
Taiwan	L & D	Urban lake	Dahu	25°5'N	121°36'E	-5.690	9.949	
Taiwan	L & D	Urban lake	Dahu	25°5'N	121°36'E	0.671	18.349	
Taiwan	L & D	Urban lake	Dahu	25°5'N	121°36'E	7.299	34.022	
Taiwan	L & D	Urban lake	Dahu	25°5'N	121°36'E	-33.119	26.772	
Taiwan	L & D	Urban lake	Dahu	25°5'N	121°36'E	-8.010	18.373	
Taiwan	L & D	Urban lake	Dahu	25°5'N	121°36'E	45.407	32.442	
Taiwan	L & D	Urban lake	Dahu	25°5'N	121°36'E	-33.322	22.222	
Taiwan	L & D	Urban lake	Dahu	25°5'N	121°36'E	-7.009	14.473	