

內政部國家公園署台江國家公園管理處委託辦理計畫

鹿耳門鸕鶿科生態保護區及周緣濕地
生態服務評析可行性示範計畫

成果報告書

委託單位：內政部國家公園署台江國家公園管理處

執行單位：國立成功大學

計畫主持人：王筱雯教授

協同主持人：林幸助特聘教授、林巧雯助理教授

中華民國一十二年十二月

中文摘要

為減緩氣候變遷之衝擊，我國已於 2023 年 1 月三讀通過《氣候變遷因應法》，預期透過能源、產業、生活、社會轉型等策略，於 2050 年達到淨零排放的目標。對於難以削減之溫室氣體排放，仍需要以棲地復育、動植物保育、負碳農法、負排放技術等碳吸收與碳匯策略進行封存。

濕地能從大氣中吸收二氧化碳，將其轉換為有機碳儲存於土壤、底泥或植物體中形成碳匯，對於減緩氣候變遷有重大貢獻。此外，濕地具有洪氾調節、土壤形成、營養循環、生物棲地等生態系統功能，並提供淨化水質、製造氧氣、食物來源、遊憩地景等生態系統服務，可作為氣候變遷調適策略。

鹿耳門鸕鶿科生態保護區為台江國家公園四草野生動物保護區之一，是許多野生動植物重要棲息地、覓食區、繁殖場，也是東亞與紐澳候鳥遷移路線中繼站，具有重要生態價值。本計畫首先透過高程地形、水文水質變化、動植物資源等基本調查，將計畫區域細分為淡水草澤、紅樹林植被、泥質灘地、鹽沼水域及潮溝水域等五種微棲地分類。其次，為瞭解計畫區域之碳匯能力，本計畫於每季測量欖李紅樹林樹高與樹徑並代入相應異速生長方程式、水域溶氧量與溫室氣體排放量以及灘地溫室氣體排放等各式數據，並將調查數據進行彙整計算得出計畫區域今年度為碳匯系統。最後，本計畫訪談主管機關、管理單位、NGO 團體、學術單位及一般民眾等利害關係人，並將結果使用 RAWES 方法快速評估計畫區域提供之生態系統服務，再將 RAWES 評估結果中分數最高項目一棲息地品質，使用 InVEST 模式進行模擬且得出計畫區域雖然現況良好，但因鄰近工業區，周遭仍有許多威脅因子，故仍須做好長期經營管理策略。藉由今年度工作經驗，本計畫將現地調查、RAWES 評估方法、InVEST 模式分析建立為初步評估濕

地生態系統服務之方法論通則。

本計畫參考 107 年度「台江國家公園計畫（第一次通盤檢討）」提及之減緩策略與調適策略篩選本計畫可行或建議之項目，以評估計畫區域現況及氣候變遷影響下之長期風險。減緩策略方面，藉由計算整體紅樹林棲地之碳匯量，以評估計畫區域因應氣候變遷減緩能力；調適策略方面，本計畫藉由 RAWES 結果初步確認計畫區域調節服務項目中，具有調節空氣品質、調節當地氣候、調節全球氣候、洪水災害調節、土壤侵蝕調節、淨化水質、授粉、鹽度調節、噪音與視覺緩衝等共 9 項功能。然而，由於氣候變遷調節成效需要投入大量人力與時間，持續進行監測與調查，故本計畫僅根據第一次通盤檢討中之調適策略，擬定計畫區域之減緩與調適因應對策。

本計畫提出針對各濕地之長期經營建議策略。須辨識不同階段之生態系統服務功能優先順序，以作為各階段經營管理工作主軸設定，例如：以氣候變遷減緩功能方面，須著重維持紅樹林生長，以提供碳匯功能；以社會所關心的防洪減災方面，則應維持足夠滯洪面積及可管控的水門設施；以生物多樣性及維持西南沿海濕地生態廊道（特別是黑面琵鷺等候鳥）方面，則除了透過水門調控適宜水質與水深，以及足夠感潮量能之外，同時需要考量不同生物需求，檢討是否適時抑制紅樹林生長以分配不同面積棲地環境。

本計畫亦蒐集國內與計畫區域環境相似的科教、科研活動，利用現地調查資料、RAWES 分析結果，再加上工作坊學員們實際參與工作坊之心得分享，並搭配工作坊前後測問卷回饋進行 SWOT 分析，發現計畫區域雖然還有許多需要調整與改善的部分，但具有成為科研以及科教基地之潛力。

Abstract

To mitigate the impact of climate change, Taiwan had set the goal of reducing 50 % of greenhouse gas emissions by 2050. Furthermore, Legislative Yuan passed the “Climate Change Respond Act” in January 2023 to meet Net-Zero carbon emissions by 2050; there are still parts of greenhouse gas emissions difficult to be reduced, which need to be absorbed by natural carbon sinks, negative emission technologies, etc.

Wetlands not only can absorb CO₂ from the atmosphere but also be able to convert and store it in the soil, sediment, or plants, making a significant contribution to mitigating climate change. In addition, wetlands have various ecosystem functions and services such as flood regulation, soil formation, habitat diversity, and food sources, which might benefit adaptation strategies under climate change.

Sandpiper Ecoogial Protection Area (named as Project Area below) is one of the most important wildlife habitats in southwest Taiwan, meanwhile, it is a site for migratory birds on East Asian–Australasian Flyway as well. This project firstly conducted topographic, hydrological, geomorphological, and ecological field surveys, and categorize Project Area into five microhabitats: freshwater marshes, mangrove vegetation, muddy flats, salt marshes, and tidal channel areas.

Secondly, to understand the carbon sequestration capacity of Project Area, the project measured water oxygen content, greenhouse gas emissions, emissions from flatlands, and the height and diameter of mangroves every season, which then calculated the biomass growth of mangroves through the allometric growth equation. The collected data was computed to determine the carbon sink capacity

of Project Area this year.

Finally, the project interviewed stakeholders and used the Rapid Assessment of Wetland Ecosystem Services (RAWES) method to rapidly assessed the ecosystem services provided by Project Area. The highest-scored aspect in the evaluation, habitat quality, was simulated using the InVEST model. The results indicated that, despite the current favorable conditions in the Project Area, threats persist due to the proximity of industrial zones. Therefore, long-term management strategies are essential. The project establishes a methodology framework for the preliminary assessment of wetland ecosystem services, incorporating on-site investigations, RAWES assessments, and InVEST model analyses.

This project referred to the 107th year "Taijiang National Park Plan (First Overall Review)" and selected feasible or recommended items for mitigation and adaptation strategies to evaluate the current situation of Project Area and long-term risks under the influence of climate change. In terms of mitigation strategies, the project evaluates Protection Area's capacity to mitigate climate change by calculating the overall carbon sequestration of mangrove habitats. Concerning adaptation strategies, the project preliminarily identifies nine ecosystem services within the adaptation services based on RAWES results. However, recognizing that the effectiveness of climate change adaptation requires significant investments in manpower and time, with continuous monitoring and investigation, the project only focuses on formulating mitigation and adaptation strategies for the Project Area based on the adaptation strategies identified in the First Overall Review.

This project proposes long-term management recommendations for various

wetlands. It is essential to identify the priority order of ecosystem services at different stages to set the main focus for each stage of management. For example, in terms of climate change mitigation, the emphasis should be on maintaining mangrove growth to provide carbon sequestration functions.

This project also collected information on domestic scientific and educational activities that are similar to the environmental conditions of the project area. The project conducted a SWOT analysis that utilizing field survey data, RAWES evaluation results, feedback from workshop participants, and pre- and post-workshop surveys. Although there are areas that require adjustments and improvements, Project Area has the potential to become a hub for scientific research and education.

目錄

圖目錄 VIII

表目錄 XI

一、 計畫緣由.....	1
二、 計畫目標.....	2
2.1 計畫區域	2
2.2 工作項目	3
2.3 預期目標	3
三、 前人研究.....	4
3.1 生態系統功能及生態系統服務	4
3.2 濕地碳匯功能	8
3.3 氣候變遷減緩與調適能力	10
3.4 問題初探	16
四、 研究地區.....	18
4.1 相關經營管理計畫	19
4.2 地文資料	25
4.3 氣象資料	27
4.4 水文資料	30
4.5 生態環境	35
五、 現地調查與評估.....	36
5.1 微棲地劃設	36

5.2 水文水質	49
5.3 濕地碳匯功能調查	60
六、生態系統功能及服務評估.....	78
6.1 評估項目	78
6.2 利害關係人辨識及訪談	81
6.3 快速評估生態系統服務方法 (Rapid Assessment of Wetland Ecosystem Services, RAWES).....	82
6.4 濕地生態系統服務評估模型	89
6.5 方法論通則	97
七、氣候變遷減緩及調適能力.....	101
7.1 減緩與調適能力現況描述	102
7.2 減緩與調適能力長期策略	106
7.3 科研基地評估	111
八、結論與建議.....	115
參考文獻.....	118
附錄一 期初審查意見回覆.....	127
附錄二 期中審查意見回覆.....	129
附錄三 工作會議審查意見回覆.....	139
附錄四 紅樹林碳匯調查工作坊.....	143
附錄五 期末審查意見回覆.....	145

圖目錄

圖 1. 計畫區域及範圍.....	2
圖 2. 生態系統功能與服務間的關聯， 修改自謝蕙蓮等人(2012)、邱祈榮 與林俊成(2017).....	5
圖 3. 減緩與調適作為於氣候及永續發展面向之關聯， 修改自 Munasinghe & Swart(2005).....	11
圖 4. 國際與國內氣候變遷調適方法比較， 修改自李欣輯(2020).....	16
圖 5. 計畫區域於四草野生動物保護區之分區	20
圖 6. 計畫區域於四草重要濕地之分區.....	22
圖 7. 計畫區域於台江國家公園計畫之分區.....	23
圖 8. 計畫區域之地質分布.....	25
圖 9. 計畫區域之高程分布.....	26
圖 10. 計畫區域之土地利用分布.....	27
圖 11. 計畫區域鄰近測站、流域及排水系統.....	28
圖 12. 計畫區域鄰近測站之雨量統計.....	29
圖 13. 計畫區域鄰近測站之氣溫統計.....	29
圖 14. 四草潮位站之潮位統計.....	30
圖 15. 計畫區域水門位置分布圖.....	33
圖 16. 計畫區域於 24 小時 500 毫米降雨之淹水潛勢	34
圖 17. 計畫區域於 24 小時 650 毫米降雨之淹水潛勢	34
圖 18. 計畫區域 2018 年之衛星影像判釋 (本計畫產製).....	39

圖 19. 計畫區域 2019 年之衛星影像判釋 (本計畫產製).....	39
圖 20. 計畫區域 2020 年之衛星影像判釋 (本計畫產製).....	40
圖 21. 計畫區域 2021 年之衛星影像判釋 (本計畫產製).....	40
圖 22. 計畫區域 2022 年之衛星影像判釋 (本計畫產製).....	41
圖 23. 2018 年和 2022 年植被面積判釋比較 (本計畫產製).....	42
圖 24. 2018 年和 2022 年水域面積判釋比較 (本計畫產製).....	42
圖 25. 計畫區域地形高程圖 (本計畫產製).....	45
圖 26. 計畫區域不同時期鹽度分布 (本計畫產製).....	46
圖 27. 計畫區域微棲地劃設 (本計畫產製).....	49
圖 28. 壓力式水位計放置點及碳匯採樣點分布圖	50
圖 29. 各點位水位高程圖 (本計畫產製).....	51
圖 30. 2 月至 12 月水深資料 (本計畫產製).....	52
圖 31. 2 月至 12 月鹽度資料 (本計畫產製).....	54
圖 32. 2 月至 12 月水溫資料 (本計畫產製).....	55
圖 33. 2 月至 12 月溶氧資料 (本計畫產製).....	56
圖 34. 2 月至 12 月 pH 值資料 (本計畫產製).....	57
圖 35. 2 月至 12 月導電度資料 (本計畫產製).....	58
圖 36. 2 月至 12 月懸浮固體資料 (本計畫產製).....	59
圖 37. 採樣點實地現況.....	61
圖 38. 紅樹林生物量與生長量.....	64
圖 39. 春、夏及秋季枯落物量.....	65

圖 40. 春、夏及秋季枯落物組成.....	65
圖 41. 土壤溫室氣體測量示意圖.....	66
圖 42. 紅樹林底土日間與夜間溫室氣體通量.....	68
圖 43. 水域棲地水體溶氧代謝四季調查結果.....	71
圖 44. 水域溶氧與溫室氣體測量示意圖.....	72
圖 45. 水域棲地四季水中溫室氣體通量.....	73
圖 46. 灘地底土日間與夜間溫室氣體通量.....	76
圖 47. RAWES 方法三階段方法執行流程.....	83
圖 48. 110-112 年鷓鴣科保護區鳥類總數	89
圖 49. InVEST 結構示意圖(本計畫產置).....	93
圖 50. 計畫區域半徑十公里土地使用分區(本計畫產置).....	95
圖 51. 計畫區域半徑十公里棲息地品質好壞(本計畫產置).....	97
圖 52. 方法論順序流程圖(本計畫產置).....	99
圖 53. 台南市安南區年均溫趨勢圖.....	103
圖 54. 台南市安南區年均雨量趨勢圖.....	103
圖 55. 台南市颱風事件淹水發生機率.....	103
圖 56. 台南市世紀中最大 24 小時累積雨量.....	104
圖 57. 七股區域假想溢淹範圍與深度圖(資料來源：成功大學永續水環境研究室)	105
圖 58 計畫區域 SWOT 分析	113

表目錄

表 1. 布袋鹽田濕地生態系統服務及其狀態指標	7
表 2. 國內外紅樹林生態系碳吸存量比較，修改自林幸助等人(2018).....	9
表 3. 國內外紅樹林生態系碳存量比較，修改自林幸助等人(2018).....	9
表 4. 四草野生動物保護區管理計畫.....	19
表 5. 四草重要濕地保育利用計畫管理目標與允許明智利用項目	21
表 6. 計畫區域於台江國家公園計畫之使用分區	23
表 7. 水路整修後鳥數量比較表.....	25
表 8. 鄰近計畫區域之氣象測站.....	27
表 9. 2018 至 2022 年衛星影像拍攝日期及判釋面積	38
表 10. 計畫區域微棲地種類面積及百分比.....	47
表 11 計畫區域 2 月至 12 月水深資料.....	52
表 12 計畫區域 2 月至 12 月鹽度資料.....	53
表 13 計畫區域 2 月至 12 月水溫資料.....	54
表 14 計畫區域 2 月至 12 月溶氧資料.....	55
表 15 計畫區域 2 月至 12 月 pH 資料.....	56
表 16 計畫區域 2 月至 12 月導電度資料.....	57
表 17 計畫區域 2 月至 12 月懸浮固體資料.....	58
表 18. 採樣點 GPS 座標	60
表 19. 紅樹林四季胸高直徑測量結果.....	64
表 20. 紅樹林棲地數據及碳匯整理表.....	69

表 21. 水域棲地數據及碳匯整理表.....	74
表 22. 灘地棲地數據及碳匯整理表.....	77
表 23. 生態系統功能及服務項目 修改自 TEEB (2010)、Maynard et al. (2010)、McInnes & Everard (2017)	79
表 24. 利害關係人訪談名單.....	82
表 25. 計畫區域 RAWES 生態系統服務項目	83
表 26. RAWES α 相關係數評估結果.....	86
表 27. RAWES 生態系統服務情形評估結果.....	88
表 28. 威脅因子與權重比例.....	96
表 29. 本年度計畫區域棲地調查之碳匯量.....	108
表 30. 氣候變遷因應對策.....	109
表 31. 國內濕地科研教育活動.....	112
表 32. 計畫區域初步課程規劃.....	114

一、計畫緣由

聯合國政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於第六次評估報告(AR6)指出，全球暖化幅度將在 21 世紀超過攝氏 1.5 至 2.0 度，引起諸多氣候危害如高溫、暴雨、乾旱、海平面上升等，嚴重衝擊能源、水資源、糧食、生物棲地安全。聯合國氣候變化綱要公約第 26 次締約方大會(UNFCCC COP26)呼籲應在 2050 年達到淨零排放，以將全球暖化幅度控制在 1.5°C 以內。全球目前已有逾 130 個國家宣布推動淨零排放，我國於 2022 年 3 月公布「2050 淨零排放政策路徑藍圖」，於 2023 年 1 月三讀通過《氣候變遷因應法》，預期透過能源、產業、生活、社會轉型等策略，於 2050 年達到淨零排放的目標。對於難以削減之溫室氣體排放，仍需要以棲地復育、動植物保育、負碳農法、負排放技術等碳吸收與碳匯策略進行封存。

根據《濕地保育法》定義，濕地為「天然或人為、永久或暫時、靜止或流動、淡水或鹹水或半鹹水之沼澤、潟湖、泥煤地、潮間帶、水域等區域」。濕地能從大氣中吸收二氧化碳，將其轉換為有機碳儲存於土壤、底泥或植物體中形成碳匯，對於減緩氣候變遷有重大貢獻。此外，濕地具有洪氾調節、土壤形成、營養循環、生物棲地等生態系統功能，並提供淨化水質、製造氧氣、食物來源、遊憩地景等生態系統服務。

目前已有許多濕地的相關研究，包含生態資源、水文水質、生態系統服務、經濟效益等，但串聯生態系統功能、生態系統服務、碳匯功能，乃至氣候變遷減緩與調適的研究仍相當少見。有鑑於此，需要藉由現地調查了解濕地生態系所提供的生態系統功能、生態系統服務及各棲地類型的單位面積碳匯功能，建構其因果關係及交互作用，進一步評估計畫區域於現況條件及氣候變遷情境下所具備的氣候變遷減緩與調適能力，作為台江國家公園管理處擬訂國家公園計畫及濕地保育利用計畫的依據。

二、計畫目標

2.1 計畫區域

本計畫以位於台南市安南區之台江國家公園鹿耳門鸕鶿科生態保護區及鹿耳門濕地特別景觀區為工作地點，同時亦為四草重要濕地 A1 區，其範圍如圖 1 所示。



圖 1. 計畫區域及範圍

2.2 工作項目

(一) 透過文獻資料收集彙整、現地調查及權益相關者問卷調查，盤點及評析計畫區域現況之生態系統服務，具體執行以下工作：

1. 依計畫區域內環境現況特性，劃分各類型微棲地。
2. 盤點及評析計畫區域所提供之生態系統服務。
3. 評估計畫區域之氣候變遷調適能力。

(二) 實地調查計畫區域之碳匯功能，評估其氣候變遷減緩能力，具體執行以下工作：

1. 依據前述微棲地，擇至少 3 種潛在具碳匯功能者，並至少劃設各 2 處樣點。
2. 調查所劃設樣點碳匯功能及評估計畫區域氣候變遷減緩能力。

(三) 綜整前述資料，執行以下工作：

1. 評估本區域濕地科研基地發展可行性，並提供本處辦理濕地科研基地相關座談會等之必要協助。
2. 盤點既有資料缺乏不足處，並綜整提出維護計畫區域生態系統服務、碳匯功能、氣候變遷減緩及調適能力之長期策略。
3. 建立台江地區濕地生態系統服務評估方法論通則。

2.3 預期目標

(一) 可評析篩選鹿耳門濕地生態保護區濕地生態系功能、各生態服務之間的強弱對應關聯性，以了解保護區現況，詳實串聯當前保護區生態系所能提供的服務。

(二) 預計可運用本示範計畫執行成果，據以建立方法論，可擴大應用於評析台江國家公園管理處園區各重要濕地生態服務功能。

三、前人研究

3.1 生態系統功能及生態系統服務

過去許多研究常把生態系統功能(Ecosystem Function)、生態系統服務(Ecosystem Service)或生態系服務功能混用(邱祈榮與林俊成, 2017)。根據Daily (1997)定義, 生態系統服務為自然生態系統及其組成物種得以維持和滿足人類生活所需要的環境條件和過程, 可維持生物多樣性和提供各種生態系統產品的生產。Costanza et al. (1997)認為生態系統功能是指生物、棲地及生態系統的特性及過程, 生態系統服務是指人類直接或間接地從生態系統中獲得各種利益。謝蕙蓮等人(2012)指出生態系統功能為生態系中運作產生的生物地理及物理現象及過程, 尤其強調對於支持整體生態系及生物多樣性的功用, 生態系統服務則定義為人類在生態系統中獲得的益處, 故生態系統功能是生態系統能提供服務的根本基礎, 而生態系統服務為生態系對人類提供的利益或福祉。邱祈榮與林俊成(2017)將生態系統功能定義為生態系特有的運作或過程所產生的功能, 生態系統服務則是生態系統功能對人類所帶來的效益。2005 年, 聯合國千禧年生態系統評估報告(Millennium Ecosystem Assessment, 2005)建立生態系統服務與人類福祉的關聯性, 並將生態系服務區分為支持、供給、調節、文化四大類別。

濕地為生物多樣性最豐富的生態系統之一, 提供多項生態系統功能及服務, 包括食物供應、水質淨化、防洪減災、氣候調節及生物多樣性等(Gardner et al., 2015; Montanarella et al., 2018)。據統計, 全球約有 40%的生態系統服務由濕地所提供(Zedler, 2003)。過去數十年人類活動對生態系統及其周遭環境造成長期影響(Millennium Ecosystem Assessment, 2005), 1970 到 2015 年間全球濕地面積已減少將近 35% (Barbier et al., 2011; Gardner et al., 2015), 因此營造、恢復和改善濕地對於全球生態系統十分重要。

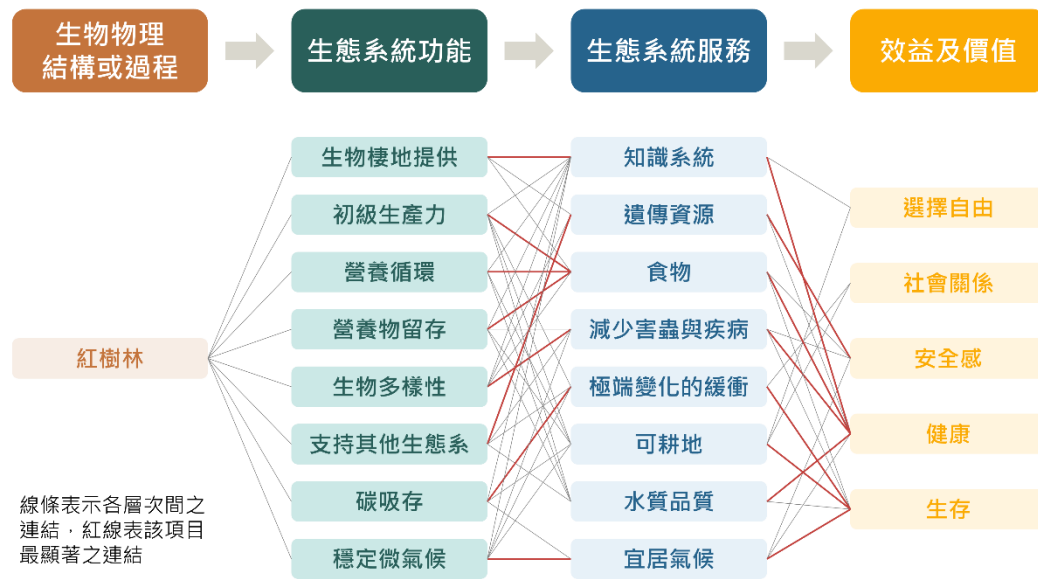


圖 2. 生態系統功能與服務間的關聯，
修改自謝蕙蓮等人(2012)、邱祈榮與林俊成(2017)

野生生物棲地為濕地提供的重要生態系統功能之一，每年有超過六成的黑面琵鷺會到臺灣度冬，其中又以臺南市七股與安南地區數量最多，數量達 2,158 隻(中華民國野鳥學會，2022)。營造及維持水鳥喜好的濕地環境相當重要，Ma et al. (2010)歸納出水深、植被、鹽度、地貌、水位波動、食物供應、濕地連接性、濕地面積等 9 項會影響水鳥利用的因子：營造不同的水深環境能吸引不同群種之鳥類使用、季節或潮汐造成的水位不同能提升棲地多樣性、豐富的食物供應能吸引大量水鳥，而棲息地若鹽度太高則會降低鳥類使用意願。蓄洪空間也是濕地所提供的重要生態系統服務之一(Kuo & Wang, 2018)，濕地是水與土之間的緩衝，能儲存洪水、降低洪水的高度，就算洪水量超過濕地的可容納量，濕地中的草叢、樹木也能減緩水流，紅樹林也能減少海洋或河流的洪水、甚至預防颱風來臨時所造成的洪水倒灌與經濟損失。可見濕地的土壤、水體、植物、動物及其複雜的交互關係皆共同支撐著生態系統功能及生態系統服務的供應。

為了解決量化不易之問題，De Groot (2010)根據項生態系統服務之定義，擬定可用以量化生態系統服務之狀態指標(State indicators)。McInnes and

Everard 延續狀態指標之應用，於 2017 年提出快速評估生態系統服務之方法(Rapid Assessment of Wetland Ecosystem Services, RAWES)，並結合利益關係人參與進行生態系統服務評估。此外，生態系統服務也發展出許多基於土地利用之評估工具，如人工智慧生態系統服務模式(Artificial Intelligence for Ecosystem Services, ARIES)、生態系統服務之社會價值模式(Social Values for Ecosystem Services, SolVES)、生態系統服務與權衡之整合型量化模式(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST)等模式，可藉由輸入不同參數及土地利用條件，模擬各情境之生態系統服務變化。

謝蕙蓮等人(2012)利用專家問卷評估 11 個淡水河生態次系統之功能及服務的強弱對應關聯性，結果顯示紅樹林、潮間帶草澤、河口河道及內陸淡水河道等生態次系統有較高的生態地位。以紅樹林為例，其具有初級生產力、營養循環、碳吸存等 9 項生態系統功能及遺傳資源、知識系統、宜居氣候等 12 項生態系統服務。邱祈榮與林俊成(2017)以生態系暨生物多樣性經濟倡議(The Economics of Ecosystems and Biodiversity, TEEB)提出的使用價值進行估算，台灣每公頃林地其林木供給服務價值約為 205 元、碳吸存調節服務效益約為 1,197 元、森林遊樂服務價值約 4,549 元。

Kuo & Wang(2018)根據生態系統服務之定義，利用狀態指標(De Groot, 2010)來量化布袋鹽田濕地在進行水管理前後生態系統服務功能變化，用以量化 11 種生態系統服務之指標如下表所示。評估結果顯示，布袋鹽田濕地可藉由水門操作提升多數生態系統服務供應能力，如食物供應、基因材料、氣候調節、自然災害調節、休閒娛樂、教育等。

表 1. 布袋鹽田濕地生態系統服務及其狀態指標

生態系統服務		狀態指標
供給服務	食物供應	海草、魚蟹等
	基因材料	生物量
調節服務	氣候調節	含水量
	水淨化與廢物處理	生物過濾器、水生植物、有機質等
	自然災害調節	儲水空間
	授粉	植被及昆蟲
文化服務	精神及鼓舞	人類活動資源
	休閒娛樂	人類活動資源
	美學	人類活動資源
	教育	人類活動資源
支持服務	養分循環	土壤厭氧與好氧之呼吸作用

王筱雯(2019)於以 RAWES 方法為基礎，於臺南市七股區中寮社區、頂山社區、鹽埕社區實際走訪在地聚落、漁塭、廟宇其他在地團體，與居民面對面的互動與訪談，引導在地民眾對於生活空間、特色景點及環境議題之空間區位的指認，進一步彙整七股鹽田濕地提供的生態系統服務。屬供應服務的項目包含：魚類養殖、蛤蠣養殖、蝦子養殖；屬調節服務的項目包含：滯洪功能；屬文化服務的項目包含：釣魚、風箏衝浪、遙控飛機、鳥類觀賞；屬支持服務的項目包含：生物棲息地。再透過地形高程圖、天然滯洪池滯洪量估算、水質調查、生態環境資源與土地利用等之資料蒐集，配合現勘瞭解目前鄰近各個社區的扇形鹽田、青鯤鯓鹽田、南鹽鹽田及台區鹽田之生態資源及產業活動，進而探討區域內之產業結構、管理機制及發展潛力，以嘗試建構濕地內可能之經營與管理模式。

石心柔(2020)以採用 RAWES 方法及定性或定量狀態指標，盤點及評估光電開發下對於布袋鹽田濕地生態系統服務之影響。其中淡水供應、淨化水質、養份循環、土壤形成與棲息地服務透過 InVEST 進行模擬，探討模式於濕地的適用性，以及光電開發下生態系統服務之衝擊。評估結果顯示布袋鹽田濕地具備 13 項生態系統服務，包含淡水供應、食物供應、廢物

處理 3 項供給服務；空氣品質調節、當地氣候調節、洪水災害調節、淨化水質等 4 項調節服務；娛樂與旅遊、教育與研究 2 項文化服務；土壤形成、養分循環、水循環、棲息地供應等 4 項支持服務。狀態指標評估與 InVEST 模擬成果均顯示，光電開發衝擊以八區鹽田基樁式光電開發區域影響最大，使淡水供應、淨化水質、養份循環、棲息地服務提供能力明顯降低。

3.2 濕地碳匯功能

目前全球濕地面積約 700 萬平方公里，僅占全球陸地面積的 5-8% (Mitsch and Gosselink, 2007)，卻能儲存約 2.5 千兆(10^{15})公噸二氧化碳當量，佔全球總碳存量的 20-30% (Lal, 2008; Roulet, 2000; Bridgham et al., 2006)。全球濕地生態系統每年約能貢獻 830 百萬公噸二氧化碳當量的淨碳匯收益，平均可提供 118 克二氧化碳當量/平方公尺的儲存能力(Mitsch et al., 2012)。林幸助等人(2018)指出，濕地的碳儲存量以及碳吸存能力會受地形、植被、地質條件、緯度、鹽度、溫度、光照強度、營養鹽、降水量與水體濁度等因素影響。

目前全球有許多濕地碳吸存的相關研究，但仍以泥炭地及紅樹林的研究為主。臺灣相關研究則集中在紅樹林、海草床及無植被之泥沙灘等濕地類型(林幸助等人, 2018)。紅樹林主要分布於熱帶及亞熱帶地區的潮間帶，總面積約為 16 萬平方公里(FAO, 2003)，平均每年的碳吸存量約 174 克二氧化碳當量/平方公尺(Alongi, 2014)。在不同地區的紅樹林因其樹種(Li et al., 2018)及環境，如潮汐或極端降雨事件(Goldsmith et al., 2008)沖刷之影響，吸存量有明顯差異。Suratman (2008)指出亞洲紅樹林在不同年間碳吸存量從 90 到 230 克二氧化碳當量/平方公尺不等，Li et al. (2018)的研究顯示臺灣紅樹林的碳吸存能力也在 57 至 127 克二氧化碳當量/平方公尺之間不等，推論台灣紅樹林的碳吸存量較國際水準低，可能與台灣的樹種較為矮小以及分解速率較高有關。整體而言，相較其他濕地生態系統，紅樹林

的生產力及碳吸存能力是相對較高。然而在部分環境良好，生產力極高的濕地，其能貢獻的碳吸存量可能超越紅樹林，如美國的佛羅里達大沼澤每年約能儲存 86-387 克二氧化碳當量/平方公尺(Reddy et al., 1993)，或是烏干達的高生產力莎草草澤，每年的碳吸存量高達 480 克二氧化碳當量/平方公尺(Saunders et al., 2007)。

表 2. 國內外紅樹林生態系碳吸存量比較，修改自林幸助等人(2018)

地區	緯度	經度	碳吸存(克二氧化碳當量/平方公尺/年)	參考文獻
全球			174	Alongi, 2012
北美地區	25-26°N	80-81°E	180	Chmura et al., 2003
亞洲			90-230	Suratman, 2008
臺灣臺南	23°07'N	120°05'E	101	Li et al., 2018
臺灣臺中	23°80'	120°27'E	127	Li et al., 2018
臺灣彰化	23°56'	120°18'E	84	Li et al., 2018
臺灣彰化	23°56'	120°18'E	57	Li et al., 2018

表 3. 國內外紅樹林生態系碳存量比較，修改自林幸助等人(2018)

地區	緯度	經度	碳存量(公噸二氧化碳當量/公頃)	參考文獻
熱帶紅樹林 (全球)			1,023±88	Donato et al., 2011
熱帶紅樹林 (墨西哥)	14°43'N	92°26'W	784.5±73.5	Adame et al., 2015
熱帶人工紅樹林(越南)	10°2'N	106°52'E	889±111	Nam et al., 2016
熱帶紅樹林 (越南)	8°38'N	105°05'E	844±58	Nam et al., 2016

熱帶紅樹林 (印尼)	5°N-10°S	105°-147°E	950.5±29.9	Alongi et al., 2016
熱帶與亞熱帶 紅樹林(中國)	19°-30°N	108°-122°E	355.25±82.19	Liu et al., 2014
副熱帶紅樹林 (臺灣)	23°55'N	120°18'E	524.67±50.11	黃，2016
副熱帶紅樹林 (臺灣)	24°18'N	120°32'E	1,138.8	童，2013
熱帶紅樹林 (臺灣)	23°7'N	120°5'E	2,186.62	李，2015
副熱帶紅樹林 (臺灣)	25°9'N	121°25'E	1,055.8	陳，2014
副熱帶紅樹林 (臺灣)	25°3'N	121°30'E	612.7	陳，2014

雖然濕地能吸收大氣中 CO₂，將其轉換為有機碳儲存於濕地中，但濕地亦是溫室氣體 CH₄ 排放源之一(Mitsch et al., 2013)。每年排放量約 115-227 百萬公噸(Whalen 2005, Bergamaschi et al., 2007, Bloom et al., 2010)，約佔全球 CH₄ 排放量的 20-25%，其中又以熱帶地區的稻田佔最大宗(60-80 百萬公噸)。若以整體碳收支狀況來看，全球濕地每年能從大氣中吸存 1,280 百萬公噸二氧化碳當量，約有 448 百萬公噸二氧化碳當量經由 CH₄ 再釋放回大氣中，因此濕地仍是良好的碳匯場所(Mitsch et al., 2012)。

3.3 氣候變遷減緩與調適能力

「減緩」和「調適」為聯合國提出因應氣候變遷兩大策略(IPCC, 2007)，「減緩」指減少人造溫室氣體排放至氣候循環中，包括溫室氣體的源頭減量與加強溫室氣體的吸存，「調適」指調整人類與自然系統透過量測或預測氣候變遷對生態環境的衝擊，及早做出因應以減少損害或開發有益的機會，培養各領域的調適能力以因應氣候變遷的影響。行政院《溫室氣體減量及管理法》修正草案第五條即明訂「政府應秉持減緩與調適並重之原則，確保國土資源永續利用及能源供需穩定，妥適減緩及因應氣候變遷之影響，

兼顧環境保護、經濟發展、社會正義、跨世代衡平及脆弱族群扶助。」

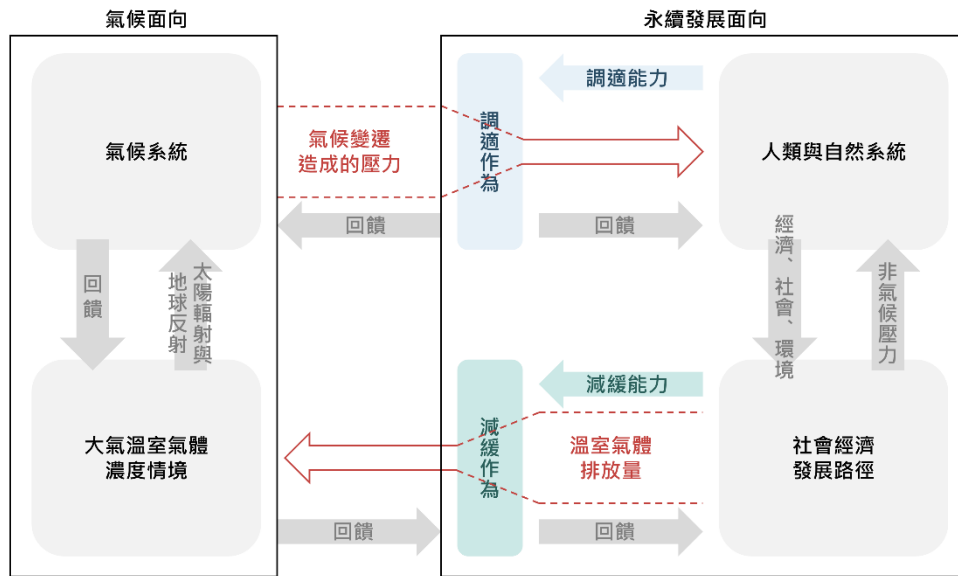


圖 3. 減緩與調適作為於氣候及永續發展面向之關聯，
修改自 Munasinghe & Swart(2005)

(一) 溫室氣體減量及管理法

為回應 1992 年聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)、1997 年《京都議定書》、2015 年《巴黎協定》及聯合國永續發展目標，我國於 2015 年正式施行《溫室氣體減量及管理法》，規範我國長期減量目標、政府機關權責、溫室氣體減量對策及教育宣導。

因應氣候變遷可能引發的衝擊及損失，行政院環境保護署於 2017 年依《溫室氣體減量及管理法》擬訂《國家因應氣候變遷行動綱領》，秉持減緩與調適兼籌並顧的精神明列我國因應氣候變遷的 10 大基本原則，提出能源、製造、運輸、住商、農業、環境 6 大減量部門，以及災害、維生基礎設施、水資源、土地使用、海岸、能源供給及產業、農業及生物多樣性、健康 8 大調適領域的行動方案，分別由各機關共同推動因應國家氣候變遷調適行動(環境保

護署，2017)。

為強化氣候變遷減緩及調適作為以降低氣候變遷衝擊，行政院於 2022 年提出《溫室氣體減量及管理法》修正草案並將名稱修正為《氣候變遷因應法》。修正草案內容包括：納入 2050 年淨零排放目標、提升層級強化氣候治理、精進減量計畫及方案執行、調適能力建構及科研接軌、強化排放管理、徵收碳費專款專用、推動中央地方政府合作及公私協力、提升資訊透明並強化公眾參與機制等(行政院，2022)。

(二) 減緩

行政院以 2005 年排放量 266 百萬公噸二氧化碳當量為基準，於 2018 年及 2021 年核定我國第一期(2016-2020 年)及第二期(2021-2025 年)溫室氣體階段管制目標為減量 2%(即降至 260 百萬公噸二氧化碳當量)及 10%(即降至 241 百萬公噸二氧化碳當量)，並以 2030 年減量 20%、2050 年減量 50%為長期目標(環境保護署，2018)。為進一步減緩氣候變遷之衝擊，立法院於 2023 年 1 月三讀通過《氣候變遷因應法》，預期透過能源、產業、生活、社會轉型等策略，於 2050 年達到淨零排放的目標。對於難以削減之溫室氣體排放，仍需要以棲地復育、動植物保育、負碳農法、負排放技術等碳吸收與碳匯策略進行封存(國家發展委員會等，2022)。

IPCC 於 2006 及 2019 年發布的 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 指出，林地、農地、牧草地、濕地、聚居地、其他土地、收穫林產品皆是重要的碳吸存源。但我國目前僅就農業委員會林務局的國有林地以《第四次森林資源調查成果》及年度林業統計資料為基礎，依據 IPCC 指南及可量測、可報告與可查證(Measurable, Reportable, Verifiable, MRV)原則進行估算，每

年約可提供 22 百萬公噸二氧化碳當量的吸存量(環境保護署，2021)，尚未納入其他六種土地利用類型及移除源。

IPCC 於 2022 年 3 月發布的 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change 指出，全球農業、林業與其他土地使用方案的碳吸存潛力達每年 80-140 億公噸二氧化碳當量，每公噸成本低於 100 美元，其中 30-50%的碳吸存可以以每公噸二氧化碳當量低於 20 美元的價格取得，且可以快速地在大多數地區得到成效。主要是因為森林及其他生態系統(沿海濕地、泥炭地、稀樹草原與草原)的保育、改善管理及復育、熱帶地區的森林濫伐減少可以有效維持且提升碳吸存量。

然而農業、林業與其他土地使用的利用，需要克服體制、經濟及政策限制，並管理潛在的權衡取捨，其他阻礙包括制度與財政支持不足、長期外加性與權衡取捨的不確定性、治理薄弱、土地所有權不安全、低收入與無法取得替代收入來源，以及碳匯變為排放源之逆轉風險。IPCC(2022)建議可以由法規、政策、獎勵、租賃、徵收著手，並從原住民知識、在地智慧及科學知識等各種知識形式中汲取經驗。為使以土地為基礎的減緩方案發揮作用，有賴以永續發展目標為框架的綜合土地利用規劃、管理與治理，才能擴大推廣成功的政策及措施。

(三) 調適

雖然減少溫室氣體排放才是解決氣候變遷的根本之道，但是氣候變遷已對人類生活造成衝擊(行政院經濟建設委員會，2012)。相較於減緩策略，各國也開始重視及推動調適策略(Davoudi, Crawford & Mehmood, 2009)。

英國在 1997 年成立了氣候變遷衝擊計畫(Climate Impact Programme, UKCIP)，提出氣候變遷風險不確定性決策框架(Climate Change Risk-Uncertainty-Decision-Making Framework)，包含界定問題、分析問題、決策推動後續行動 4 個面向及辨識問題與目標、設立規範並界定範疇、評估風險、辨識選項、評估選項、進行決策執行推動、監測與評估 8 個階段，可協助決策者判斷何處應實際考量氣候變遷，並提出包容不確定性的調適選項。

聯合國開發計畫署(United Nations Development Programme, UNDP)於 2004 年提出調適政策架構(Adaptation Policy Framework, APF)，包含界定範疇提出計畫、評估現行脆弱度、評估未來氣候風險、研擬調適策略及持續推動調適作為的評估流程，並特別強調納入利害關係人及強化調適能力，作為指引國家設計與執行各項降低脆弱度方案之依據，輔助各國積極投入推動氣候變遷調適策略的制定與落實。

國家科學委員會於 2009 年推動氣候變遷調適科技整合研究計畫(Taiwan integrated research program on Climate Change Adaptation Technology, TaiCCAT)，參考英國氣候變遷衝擊計畫(UKCIP)、聯合國開發計畫署(UNDP)調適政策框架等，發展支援決策系統六步驟(包括界定問題與設定目標、分析現況、評估未來風險、檢視調適選項、規劃執行調適路徑、監測與修正)，希望能以相對應之工具幫助使用者制定合宜的調適策略或政策，並透過循環式進程持續滾動修正。

臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP)以 TaiCCAT 為基礎，於 2020 年提出將步驟轉換為構面的

構想，雖強調依序推動的重要性，仍可因應情況與障礙彈性調整(如跳過或以不同順序推動構面)。此方式雖然犧牲了調適的整體與統一性，但或許可有效促進行動的落實，後續仍可以調適循環檢討的基本原則逐步彌補缺口，達到推動調適實際作為的統一參考框架。

TCCIP 與農業委員會農業試驗所合作，以新竹縣新豐鄉在氣候變遷下的水稻生產作為氣候變遷調適構面的示範案例(界定範疇)。新竹縣新豐鄉是新竹縣稻米的最大產區，每年產量約 1 萬公噸，1 月到 4 月底第一期作的淹田工作恰為臺灣的枯水期(檢視現況)。利用 RCP 8.5 情境進行統計降尺度，發現臺灣北端降雨量呈現減少趨勢，乾旱強度將增加約 15%(評估危害與衝擊)。與利害關係人討論後，提出旱田直播、作物品種改良、轉作/輪作、強化用水系統等可執行選項(綜整決策)，預期可較慣行農法減少 89%的用水，並於 2018 年進行現地試驗，紀錄氣象觀測資料、田區用水量、水稻性狀、生長與產量調查、米質檢測等(推動執行)。試驗結果顯示仍有整地不均影響種子發芽、鳥害影響、雜草管理等課題(檢討修正)。

2003 英國UKCIP 風險框架	2004 UN調適 風險框架	2016 歐盟 調適策略	2016 科技部 TaiCCAT	2019 國際標準 ISO14090	2019 UN國家 調適計畫	2020 TCCIP 調適構面
辨識問題 與目標	界定與設計 調適計畫	準備與設定	界定問題與 設定目標	辨識受衝擊議 題	問題與落差	界定範疇
評估現有 脆弱度	評估現有 脆弱度	評估風險 與脆弱度	評估現況暴露 度與脆弱度	指認關鍵參數、 評估氣候風險、 檢視調適能力 與不確定性	分析氣候風險 及脆弱度、檢 視各層級調適 選項	檢視現況
評估未來 脆弱度	推估未來 氣候風險	辨識 調適選項	分析未來暴露 度與脆弱度			評估風險
規劃/執行 調適措施	規劃 調適策略	評估 調適選項	界定評估 調適選項	檢視相關政策 與法規、檢視 調適選項、研 擬計畫並執行	策略執行	綜整決策
監測與檢討	持續推動 調適策略	執行	規劃/執行 調適措施	監測與修正 報告與溝通		推動執行
		監測與評估	監測與修正		監測與檢核	檢討修正

圖 4. 國際與國內氣候變遷調適方法比較，修改自李欣輯(2020)

3.4 問題初探

面對氣候變遷的威脅，需要以減緩手段與調適策略並進。濕地所提供的碳匯功能可抵銷溫室氣體排放，減緩氣候變遷造成的極端氣候。濕地提供的生態系統功能及服務如氣候調節、滯洪減災等則可以作為氣候變遷下的調適策略。如何恢復及提升計畫區域的生態系統功能、生態系統服務和碳匯功能，及其氣候變遷減緩和調適能力，為現今的重要課題之一。

水文條件為濕地提供生態系統功能及服務的關鍵因子(Mitsch & Gosselink, 2007; Kuo & Wang, 2018)，然而臺灣時間、空間降雨不均，情況以南部尤為顯著。水域面積、水深分布、滯洪空間等又受地形高程變化影響，雖內政部持續提升國土測繪的頻率及品質，但受限於 LiDAR 技術原理，無法取得計畫區域之確切地形高程(詳見 4.2 節)。為妥善進行生態系統功能及生態系統服務評估，需要透過完整的地形高程、水文水質、環境地貌、動植物生態、碳吸收與碳排放量等現地基礎調查建立基線資料，以確實反應計畫區域之生態系統功能、生態系統服務及碳匯功能於月間、季間、年間之變化及空間分布。

生態系統功能及服務評估方法相當成熟且多元，內政部營建署近年也積極建立濕地碳匯功能評估架構。惟串聯生態系統功能、生態系統服務、碳匯功能，乃至氣候變遷減緩與調適的研究仍相當少見。有鑑於此，本計畫將藉由現地調查進行計畫區域之生態系統功能、生態系統服務及碳匯功能評估，建構其因果關係及交互作用，以及對應的氣候變遷減緩與調適能力。藉由了解濕地生態系所提供的生態系統功能及服務，可以評估其所提供的氣候變遷調適能力；而了解各棲地類型的單位面積碳匯功能，可以評估濕地碳匯及氣候變遷減緩能力，進一步作為台江國家公園管理處擬訂國家公園計畫及濕地保育利用計畫的依據。

四、研究地區

四草重要濕地位於臺南市安南區，坐落於曾文溪、鹿耳門溪、鹽水溪與鹽水溪排水(嘉南大圳排水線)匯流處之間，面積共 550.56 公頃。紅樹林、淺水灘、深水池、鹽田、漁塭等不同樣貌之棲地，提供黑面琵鷺、遊隼、諾氏鶉、東方白鸛、黃鸛、草鴉等瀕臨絕種鳥種利用。內政部於 2005 年公告四草重要濕地範圍，2007 年將其評定為國際級國家重要濕地，並於 2018 年公告《四草重要濕地保育利用計畫》，將其定位為「臺灣西南海岸濕地保育軸之核心濕地」、「黑面琵鷺來臺度冬最重要棲地」及「高蹺鵲重要繁殖區」，並研擬「保護生物多樣性」、「參與式經營管理」及「尊重當地居民傳統使用，加強環境教育」三大計畫目標(內政部，2018)。

計畫區域位於四草重要濕地 A1 區，亦屬台江國家公園之鹿耳門鸛鵂科生態保護區及鹿耳門濕地特別景觀區，面積約 53.72 公頃。計畫區域內的紅樹林、淺水灘與深水池為高蹺鵲、黑面琵鷺、反嘴鵲、雁鴨科等水鳥棲息覓食區，更是臺灣首次發現高蹺鵲集體營巢的棲地。1994 年停止曬鹽後因缺乏管理與維護，生態及棲地品質劣化，2002 年由台灣濕地保護聯盟協助臺南市政府規劃挖深溝渠、增設水閘門、改變土地高程、增加保護區綠籬等棲地改善工程，並於 2006 年正式認養。台江國家公園成立後，遂將經營管理工作交還臺南市政府農業局與台江國家公園。2018 年共記錄到鳥類 9 科 26 種 3,042 隻次，5 種優勢種鳥類數量分別為，琵嘴鴨(906 隻次)、高蹺鵲(382 隻次)、蒼鷺(333 隻次)、大白鷺(251 隻次)與小白鷺(220 隻次)(台江國家公園，2019)。調查期間共記錄到黑面琵鷺 82 隻次，主要利用西南隅與東北隅。除了道路兩側及堤岸外，淹水的鹽灘地內亦有紅樹林生長。此區域之真紅樹林植物有海茄冬、欖李、紅海欖，無半紅樹林植物，紅樹林伴生植物僅記錄到鯽魚膽(謝宗欣，2019)。

4.1 相關經營管理計畫

(一) 四草野生動物保護區

台南科技工業區成立之際，保育團體與專家學者爭取劃設水鳥保護區，經農業委員會野生動物諮詢委員審議後，臺南市政府於 1994 年依《野生動物保育法》將計畫區域公告為四草野生動物保護區，包含 A1 高蹺鵠繁殖區、A2 北汕尾水鳥保護區及 A3 竹筏港水鳥保護區。計畫區域即為四草野生動物保護區 A1 高蹺鵠繁殖區，其中西南隅約 4 公頃劃設為永續利用區、周邊 20 公尺寬劃作緩衝區，其餘部分劃設為核心區，分區管理計畫彙整如表 4。

表 4. 四草野生動物保護區管理計畫

分區	管理計畫
核心區	1. 長期進行區內各項生物資源調查及棲地環境監測。 2. 進行棲地改善、復育，提供更多樣的野生動物棲息環境。 3. 禁止任何開發利用，管制人員、動力機械及交通運輸工具進入，以避免核心區內環境遭到破壞。
緩衝區	1. 審核相關生態研究及教學參觀計畫。 2. 在不破壞野生動物主要棲地及影響野生動物棲息情況下，主管機關得設置必要之保育維護設施、解說設施或自然教室等。加強巡查避免人為破壞並進行棲地改善、復育，提供更多樣的野生動物棲息環境。
永續利用區	1. 本區域養殖漁塭依法承租，並以既有方式進行漁業養殖行為。 2. 依據當地生態調查結果，限制進行教學參觀、生態旅遊者數量與頻度。 3. 建立具生態教育功能的自然公園、自然教室等，提供民眾近距離觀賞親近的機會，落實環境教育及保育觀念之宣導。 4. 配合辦理生態解說及研習營等活動，推廣保育常識及保護區功能。並積極培訓解說員，以利解說活動的進行。 5. 得設置多功能自然中心、遊客服務中心、鯨豚展示館、野生動物救護站等自然保育相關硬體設備及興建停車場、廁所等，以利生態旅遊活動的進行。

註：分區管理計畫尚包含四草野生動物保護區 A2 及 A3 區，部分內容不適用於計畫區域(A1 區)

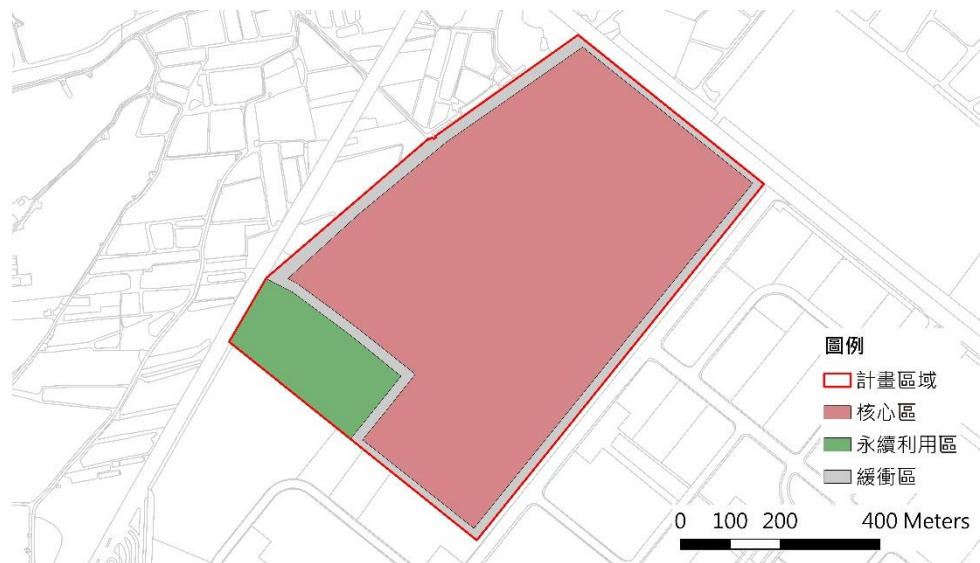


圖 5. 計畫區域於四草野生動物保護區之分區

(二) 四草重要濕地

內政部於 2005 年公告四草重要濕地範圍，2007 年將其評定為國際級國家重要濕地，並於 2018 年依《濕地保育法》公告《四草重要濕地保育利用計畫》，範圍與四草野生動物保護區相同，亦分做 A1 區、A2 區及 A3 區。《四草重要濕地保育利用計畫》將計畫區域之東北側的賞鳥亭(編號環教一)與西南隅之工作站(編號環教二)劃設為環境教育區，周邊潮溝劃作其他分區(編號其他一)，其餘則劃設為核心保育區(編號核心一)，功能分區、面積、管理目標及允許明智利用項目彙整如表 5。

表 5. 四草重要濕地保育利用計畫管理目標與允許明智利用項目

編號	面積 (公頃)	管理目標	允許明智利用項目
核心一	44.00	1. 為本濕地核心保育區。 2. 為保護濕地重要生態，以容許生態保護及研究使用為限。 3. 持續監測本濕地各種生態資料。	1. 生態保護、棲地保護、生態監測及科學研究。 2. 由解說亭、棧道以望遠鏡觀察鳥類生態。
環教一	0.06	提供環境展示、解說、體驗使用之重要基地，並設置必要設施。	1. 提供環境展示解說使用之基地，並設置相關必要服務設施。 2. 在未違反國家公園法、漁業法、水利法、海岸管理法及相關法令規定的前提下，得進行釣魚、採集、捕撈鰻苗、撿拾貝類等漁業使用之行為，惟不得使用動力機具。
環教二	5.14		3. 經申請許可後，得進行娛樂漁筏、帆船、獨木舟等水上活動，可同時搭配生態解說及導覽。
其他一	4.51	潮溝生態為緩衝區性質，從原來之現況使用。維持 A1 核心保育區生態穩定，避免人們直接進入干擾。	在未違反國家公園法、漁業法、水利法、海岸管理法及相關法令規定的前提下，得進行釣魚、採集、捕撈鰻苗、撿拾貝類等漁業使用之行為，惟不得使用動力機具。



圖 6. 計畫區域於四草重要濕地之分區

(三) 台江國家公園

台江地區因其自然地景、人文歷史、產業文化及生態資源，於 2009 年依《國家公園法》劃設為台江國家公園，並依《台江國家公園計畫》進行經營管理，陸域面積共 4,913.45 公頃、海域面積共 34,268.34 公頃。計畫區域位於台江國家公園所轄範圍，西南隅工作站約 6 公頃劃設為特別景觀區(編號六)，其餘劃設為生態保護區(編號三)。因周圍水路清淤與堤岸維修、進入工作站進行學術研究與解說教育皆須提前申請，不利環境維護及學術教育，於第一次通盤檢討將生態保護區內水路及道路改為特別景觀區，並重新命名為鹿耳門鸕鶿科生態保護區(編號生二)及鹿耳門濕地特別景觀區(編號特二)，使用分區、面積及資源特性整理如表 6。

表 6. 計畫區域於台江國家公園計畫之使用分區

使用分區	面積 (公頃)	資源特性
鹿耳門鸕鶿科生態保護區	43.89	1. 本區係於臺南科技工業區開發時，劃設作鸕鶿科繁殖區，且為國際級四草濕地之一部分，部分由舊鹽田改善為自然感潮的鹽沼濕地，棲息地已浚深達 2 公尺。 2. 本區擁有的鳥類資源，如長腳鸕鶿（高蹺鸕鶿）、反嘴長腳鸕鶿（反嘴鸕鶿）、小白鷺、大白鷺、蒼鷺、夜鷺、及度冬的黑面琵鷺等鳥種，除應持續加強保育及復育之工作外，應長期監測臺南科技工業區對鳥類繁殖的影響。 3. 本區植物在水陸交會處，以木本植物紅樹林為主，如海茄苳、欖李、紅海欖（原稱五梨跤）與土沉香等，土堤處則以濱水菜、鹽地鼠尾粟及海雀稗為主。
鹿耳門濕地特別景觀區	9.83	作為鸕鶿科繁殖區的研究工作站。未來應依據當地生態調查結果，限制進行教學參觀、生態旅遊者之數量與頻度，輔以具生態教育功能的自然公園、自然教室等，落實環境教育及保育觀念之宣導。

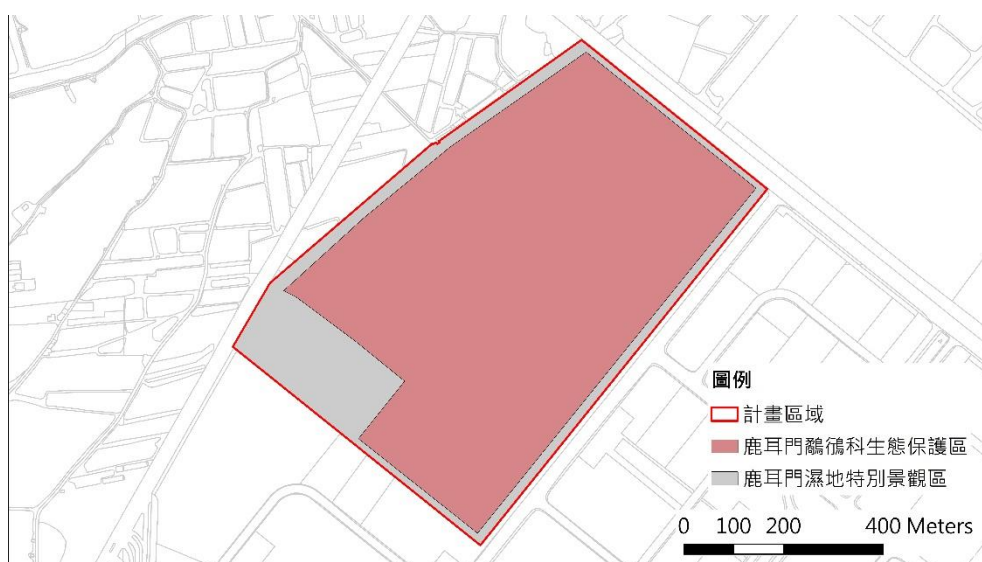


圖 7. 計畫區域於台江國家公園計畫之分區

(四) 其他

北汕尾水鳥保護區為四草重要濕地 A2 分區，亦是黑面琵鷺等冬候鳥重要棲息使用區域之一。北汕尾水鳥保護區原為安順鹽場，於鹽場廢曬後因缺乏管理及維護，造成水路崩塌淤積及水門破損漏水；又水門及水路多以引水曬鹽設計，保護區內若水深過深難以靠重力進行排水，需藉抽水機進行抽排。2019 年「台江國家公園及其周緣緩衝區多樣性棲地營造與評估計畫」調查發現許多樣區都有鹽度過高現象，對於水域生物帶來高度壓力，亟需藉由水位調控措施逐步營造各樣區友善生物利用棲地之水土環境及水鳥宜居場域，同時確保鹽田文化村、曬鹽基地設施營運安全，以及保護區內各樣區水域水體免受洪氾期間外水侵襲與污染。

台江國家公園管理處遂委託國立成功大學水工試驗所朱木壽博士於 2020 年就 A2 北汕尾水鳥保護區進行棲地環境營造、水位調控操作，包含於深水區間土堤整修培厚形成獨立水域、設置閘板調控涵管做為控制水體進出通道、浚深縱橫連絡水道土體堆置土丘，形塑不同水深的水域環境。2021 年更進一步於樣區東側設置防潮閘智慧雲端系統與抽水站聯合調控水位提升操作即時性與靈活度，形塑多元的水深環境提供不同體型水鳥活動(台江國家公園，2020；台江國家公園，2021)。

根據朱木壽博士說明，台江國家公園曾於 2021 年時亦委託其於 A1 高蹺鵠繁殖區的 Y02 及 Y03 進行水路渠道挖深以及土堤整修工程，並於當年度 8 月底前完工。完工後整個水域水體變得活絡，從表 7 可看出，來到計畫區域的鳥數量可發現較同期增加許多，來到 Y02 與 Y03 覓食的鳥總數自 2021 年疏通後，較 2020 年多大約 2 倍，表示水體的改變會影響來到計畫區域的鳥數量多寡。

表 7. 水路整修後鳥數量比較表

	2020 年				2021 年			
	Y02		Y03		Y02		Y03	
	覓食	停棲	覓食	停棲	覓食	停棲	覓食	停棲
九月	27	46	37	49	45	133	39	100
十月	19	33	39	57	31	70	42	202
十一月	32	96	91	83	93	98	274	588
十二月	44	73	108	132	86	93	170	370
總計	122	248	275	321	255	394	525	1260

4.2 地文資料

(一) 地質

計畫區域於 17-19 世紀時為台江內海及離岸沙洲，1823 年 7 月豪雨造成漚汪溪(現稱將軍溪)決堤改道注入台江內海，大量泥沙使得台江內海淤積形成海埔新生地。故地質皆屬由海岸風積沙、海岸漂沙、潟湖淤泥及河道沖積物等所構成的全新世沖積層，其厚度可能超過 200 公尺(經濟部中央地質調查所，2015；內政部營建署，2018)。

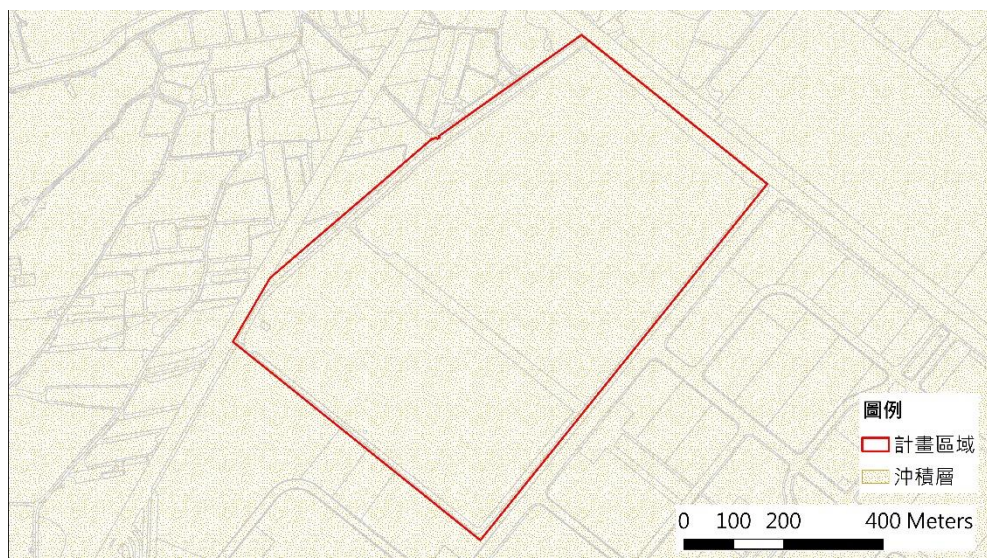


圖 8. 計畫區域之地質分布

(二) 高程

台南市安南區高程分布介於-1 至 12 公尺，地勢由東北向西南傾斜，坡度介於 0 至 0.2207 間。計畫區域高程分布多為 1 公尺，周邊土堤、道路高程為 1-3 公尺，坡度平緩無明顯起伏(內政部，2018)。內政部數值地形模型係採用 LiDAR 搭配航拍攝影進行掃描，因水域之回波為水面反射訊號而非實際底床，且易受水位變化影響，故水域高程資料採用周邊地面點進行內插填滿，無法正確反映計畫區域實際高程變化。

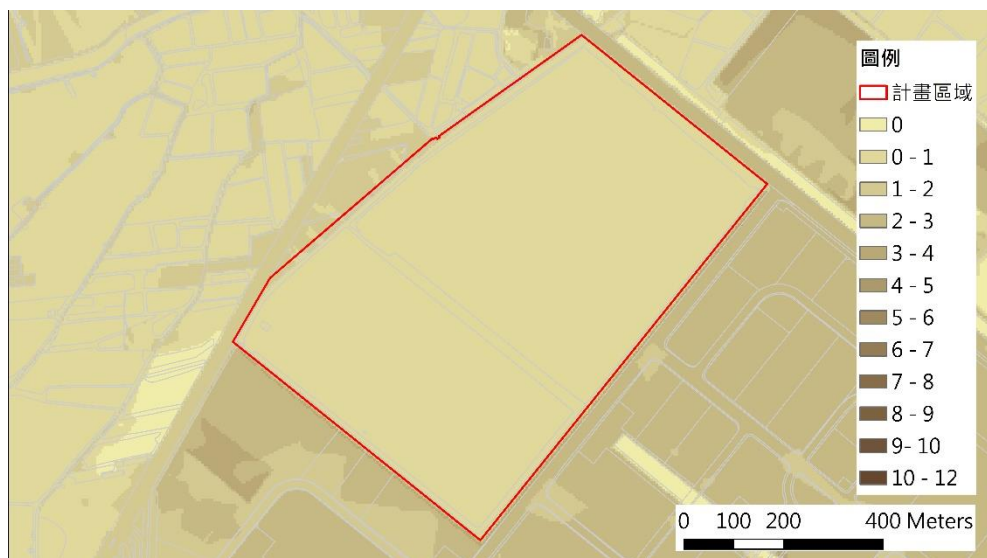


圖 9. 計畫區域之高程分布

(三) 土地利用

根據內政部國土測繪中心 2016 年之調查成果，本計畫區內之第二級土地利用以濕地為主，其中有少許溝渠分布，西側有其他建築(工作站)，東側有公園綠地廣場(賞鳥亭)。東南側台南科技工業區之第二級土地利用多為製造業、其他建築、公園綠地廣場、一般道路、道路相關設施。計畫區域周邊第二級土地利用則多為水產養殖、河道、蓄水池、學校、省道、一般道路等。

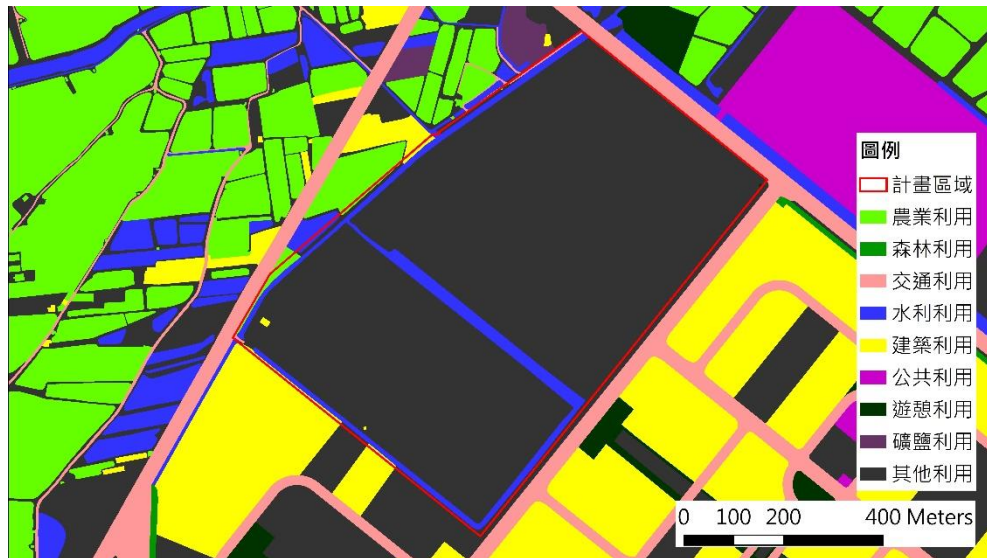


圖 10. 計畫區域之土地利用分布

4.3 氣象資料

鄰近計畫區域共有三座交通部中央氣象局氣象測站(圖 11)。和順(C1O950)站位於安南區學東國民小學內，自 1992 年起進行雨量觀測，2013 年於原址擴充為安南(C0O950)自動氣象站，和順站已停止觀測。安平自動氣象站位於台江國家公園管理處內，自 2013 年開始進行觀測。經濟部水利署於四草漁港出口堤岸設置四草潮位站，自 2011 年起進行潮位、風速、風向、氣壓觀測。

表 8. 鄰近計畫區域之氣象測站

站號	C1O950	C0O950	C0X190	-
站名	和順	安南	安平	四草
站別	自動雨量站	自動氣象站	自動氣象站	潮位站
經度	120.14	120.14	120.15	120.10
緯度	23.08	23.08	22.99	23.03
所屬單位	交通部 中央氣象局	交通部 中央氣象局	交通部 中央氣象局	經濟部 水利署
觀測項目	雨量	雨量、氣溫、 風向、風速、 氣壓、濕度	雨量、氣溫、 風向、風速、 氣壓、濕度	潮位、風速、 風向、氣壓

觀測起 始日期	1992/5/1	2013/8/1	2013/4/18	2011/9
觀測結 束日期	2013/7/31	迄今	迄今	迄今

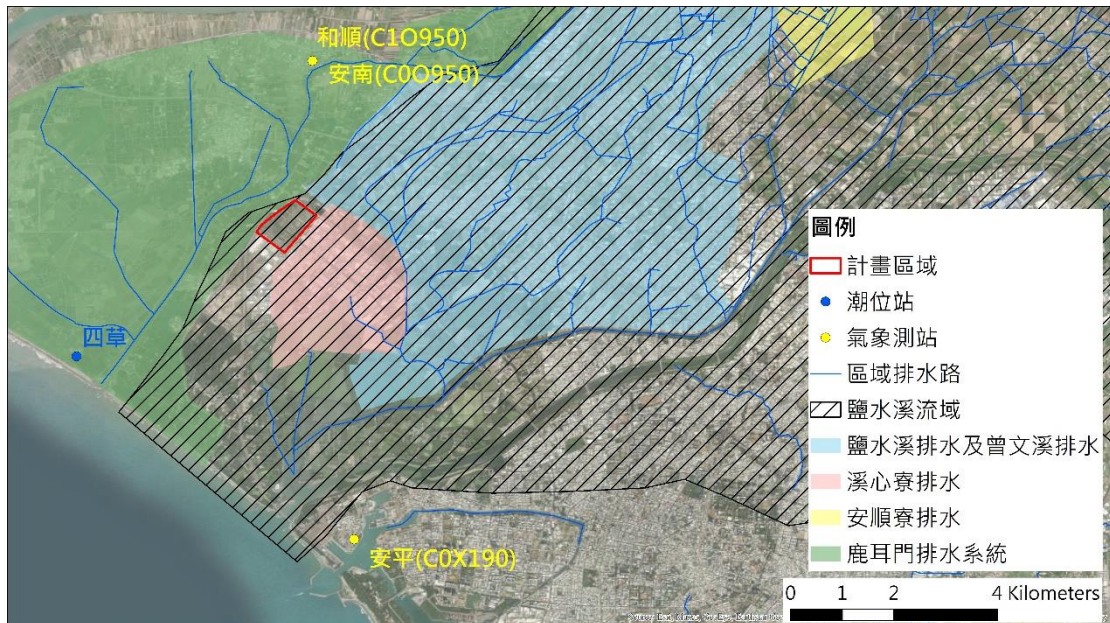


圖 11. 計畫區域鄰近測站、流域及排水系統

(一) 雨量

根據中央氣象局紀錄，和順(1995-2012 年)、安南(2014-2021 年)、安平(2014-2021 年)測站年平均雨量約 1529.39、1761.56、1884.44 毫米，降雨主要集中於 5 至 9 月(圖 12)，約佔全年的九成。和順測站月平均月降雨量以 6 月份 384.11 毫米最高，1 月份 17.14 毫米最低；安南及安平測站月平均月降雨量則以 8 月份 538.81 及 617.44 毫米最高，12 月份 23.50 及 13.88 毫米最低。

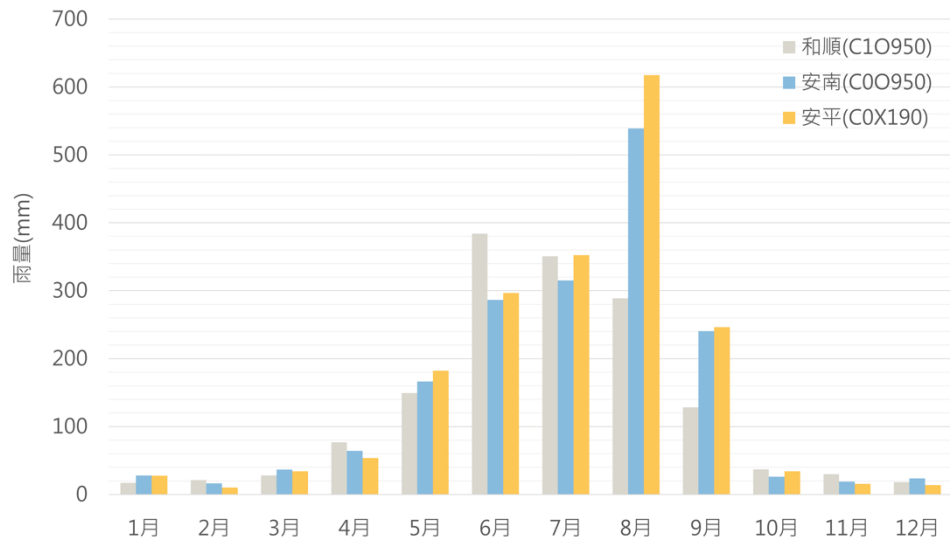


圖 12. 計畫區域鄰近測站之雨量統計

(二) 氣溫

根據中央氣象局紀錄，安南(2014-2021 年)、安平(2014-2021 年)測站年均溫約攝氏 24.58 及 24.82 度(圖 13)，5 至 10 月月均溫皆高於 25 度，以 7 月份 29.44 及 29.63 度最高；12 月至隔年 2 月月均溫皆低於 20 度，以 1 月份 17.65 及 17.98 度最低。和順測站為自動雨量站，無溫度紀錄。

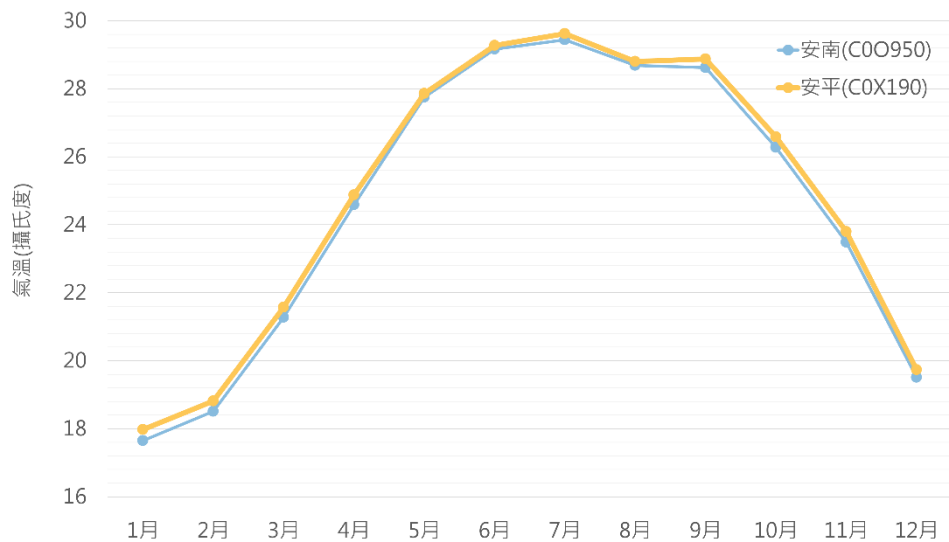


圖 13. 計畫區域鄰近測站之氣溫統計

(三) 潮位

根據水利署紀錄，四草潮位站(2011-2021 年)月平均潮位介於 0.21 至 0.54 公尺(以基隆平均海水面為基準)，月平均高潮位介於 0.49 至 0.83 公尺，月平均低潮位則介於-0.07 至 0.25 公尺之間。受地球公轉軌道及月球公轉軌道影響，8 月份有較高的潮位，平均高潮位、平均潮位、平均低潮位分別為 0.83、0.54、0.25 公尺；而 1 月份潮位普遍較低，平均高潮位、平均潮位、平均低潮位分別為 0.49、0.21、-0.07 公尺(圖 14)。

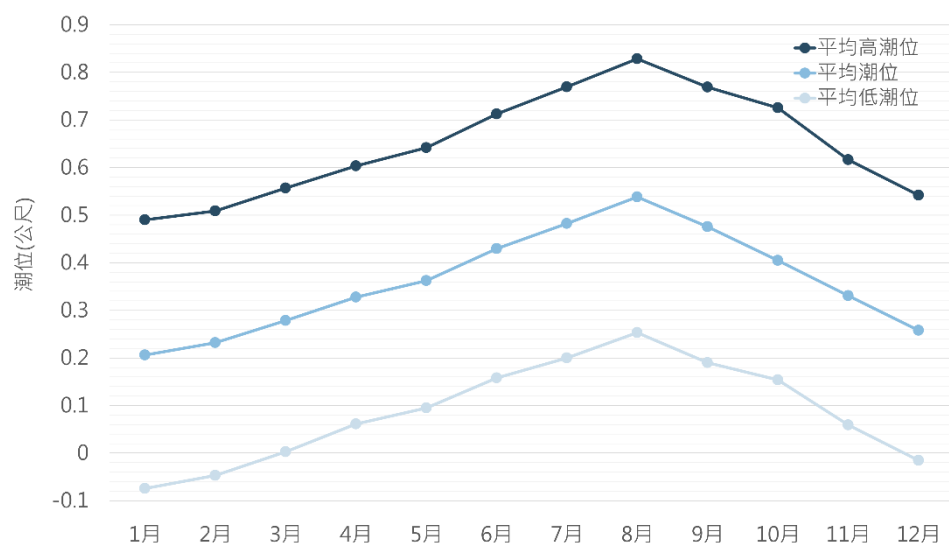


圖 14. 四草潮位站之潮位統計

4.4 水文資料

計畫區域位於鹽水溪(中央管河川)流域內(圖 11)，周邊有曾文溪排水(屬鹽水溪排水系統)、溪心寮排水(屬鹽水溪排水系統)、鹿耳門排水(屬鹿耳門排水系統)，以下茲就鹽水溪治理計畫、鹽水溪排水系統排水治理計畫、鹿耳門排水系統治理計畫，以及本計畫訪問計畫區域巡查員後得到之水源情況進行簡要說明。

(一) 鹽水溪(含支流荖拔林溪)治理計畫(經濟部水利署，2015)

鹽水溪為中央管河川，以 100 年重現期距洪水設計為治理目標。

主流發源於台南市龍崎區，向西流經關廟區、歸仁區、新市區、永康區，於安南區與鹽水溪排水匯合後注入臺灣海峽。幹流全長約 41.3 公里，流域面積約 343 平方公里，平均坡降約為 0.0003，權責終點之 100 年重現期流量為 2,730 立方公尺/秒，鹽水溪排水匯流前之 100 年重現期流量為 2,240 立方公尺/秒。

經濟部水利署(2015)於《鹽水溪(含支流荖拔林溪)治理計畫》指出鹽水溪主要有河川水道暢通洪流、水道沖淤變化及泥沙處理、市鎮聚落及重要產業保護、生態維護、河道環境與維護五大課題。治理基本方針以洪氾區及河川管理為主，維護河川自然之植生被覆環境，儘量減少人為工程破壞，以達河道貯蓄及滯洪功效；人口密集及土地利用度高之河段，才以防洪構造物、儘量放寬流路及疏濬做為防洪減災之主要措施。

(二) 鹽水溪排水及安順寮排水治理計畫(經濟部水利署，2010)

鹽水溪排水為中央管區域排水，以 10 年重現期距洪水設計，25 年重現期距洪水不溢堤為治理目標。主流發源自臺南市善化區，向西流經新市區、安定區、安南區後，與鹽水溪主流匯流注入臺灣海峽。主流長度約公里，集水區面積約 109 平方公里，平均坡降約為 0.0005，權責終點之 10 年重現期流量為 404 立方公尺/秒。鹽水溪排水系統包含鹽水溪排水、曾文溪排水、六塊寮排水、安順寮排水、看西排水、海尾寮排水、本淵寮排水、新吉排水及溪心寮排水等排水系統。其中鹽水溪排水、曾文溪排水及安順寮排水屬中央管排水，其餘皆為台南市管排水。

經濟部水利署(2010)於《鹽水溪排水系統-鹽水溪排水及安順寮排水治理計畫》指出鹽水溪排水主要問題為地勢平坦低窪、排水路渠底淤積嚴重、部分橋梁及排水路堤岸高度不足、受外水位頂托排水不易。

故提出堤岸加高加強、疏濬、增設滯洪池、設置抽水機等治水策略，並以護坡工法、綠帶休閒景觀等方式進行水岸營造。

(三) 鹿耳門排水系統治理計畫(臺南市政府，2011)

鹿耳門排水系統為台南市管區域排水，以 10 年重現期距洪水設計，25 年重現期距洪水不溢堤為治理目標。主流發源自臺南市西港區，向西南流經七股區與安南區後注入臺灣海峽。主流長度約 13 公里，集水區面積約 42.2 平方公里，平均坡降約 0.0002 至 0.0005，權責終點之 10 年重現期流量為 286 立方公尺/秒。鹿耳門排水系統包含鹿耳門排水、竹筏港之一排水、竹筏港之二排水、土城仔排水、土城子一之二排水、學甲寮排水及溪南寮排水，皆屬台南市管區域排水。

臺南市政府(2011)於《鹿耳門排水系統治理計畫》指出鹿耳門排水系統有通水斷面及堤岸高程不足、地勢平坦且低窪兩大問題，提出渠道拓寬、新建堤防、村落防護(設置圍堤、閘門、抽水機等)、加強區域滯洪及保水功能等治理策略。

計畫區域水源除了雨水以及感潮現象帶來的水之外，根據保護區巡查員指出，計畫區域共五處水門(如圖 15 箭頭處)，水門本身僅用於攔截外來垃圾，並無調節水位高低的功能，且其中紅色箭頭處的兩處水門已經淤積、綠色箭頭處水門雖有水流入，但水的來源尚無法得知、黃色箭頭水門為目前正在運作的兩處水門，主要水源來自於鹿耳門溪。研究人員亦到現場觀察水流方向與情形，發現水流的動向近趨於靜止，推測水進入計畫區域後即呈現靜止水域，以致各區間水體流動較少。



圖 15. 計畫區域水門位置分布圖

(四) 其他

根據經濟部水利署公告之第三代淹水潛勢圖，於 24 小時 500 毫米降雨條件下，計畫區域即可能出現少部分約 0.3 至 0.5 公尺的淹水(圖 16)；當降雨量達 24 小時 650 毫米降雨條件，已有部分區域淹水達 0.3 至 0.5 公尺，少部份區域淹水深度可達 0.5 至 1 公尺(圖 17)。如 4.2 節所述，作為淹水模擬輸入資料的數值地形模型無法正確反映計畫區域實際高程變化，且計畫區域平時已有水體覆蓋，實際淹水深度可能會較淹水潛勢圖更為嚴峻。

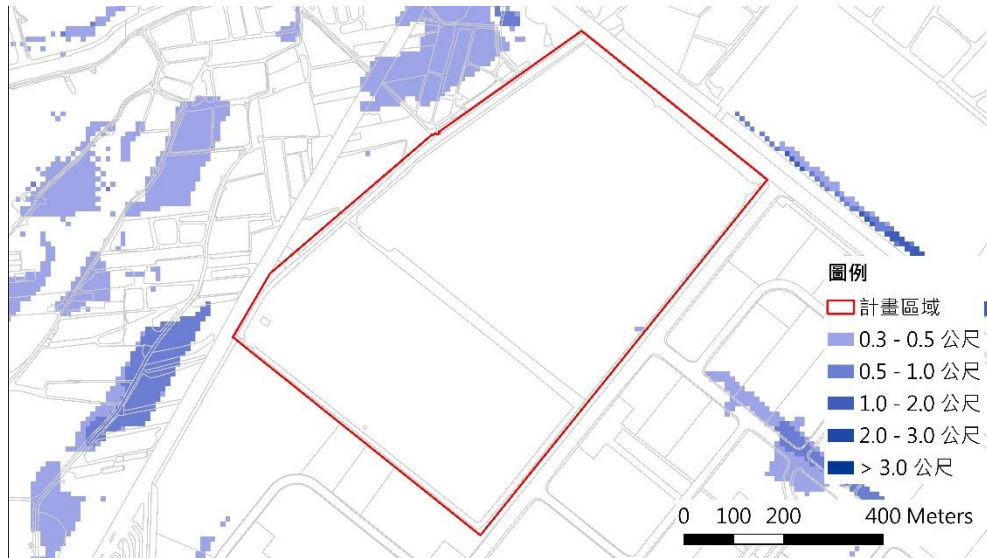


圖 16. 計畫區域於 24 小時 500 毫米降雨之淹水潛勢

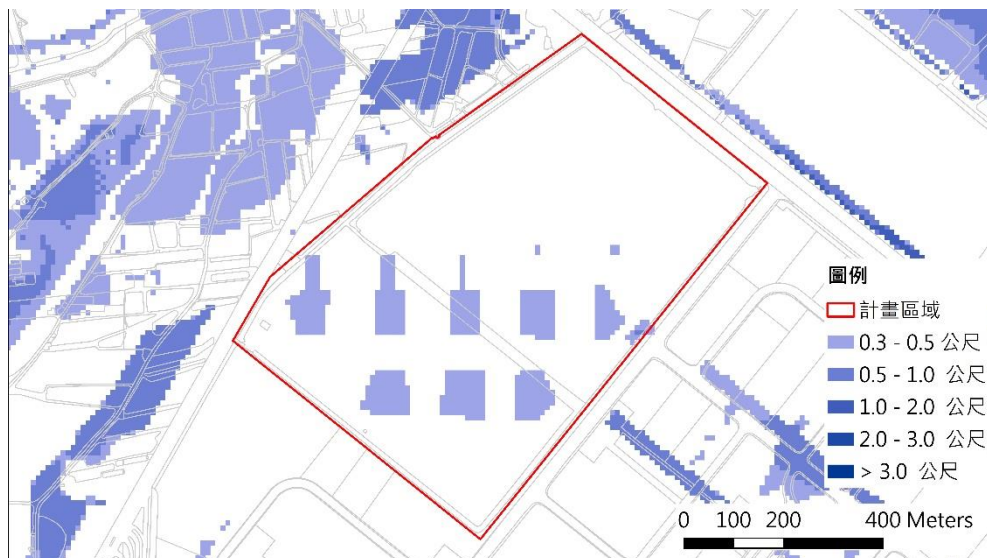


圖 17. 計畫區域於 24 小時 650 毫米降雨之淹水潛勢

根據臺南市一級海岸防護計畫(經濟部水利署, 2020), 計畫區域於 50 年暴潮溢淹潛勢下, 有 0 到 0.5 公尺的淹水深度; 鹿耳門溪出海口北至曾文溪、南至鹽水溪海岸侵蝕速度達 2.18 至 2.99 公尺/年; 地層下陷速率小於 0.02 公尺/年。因暴潮溢淹潛勢淹水深度未達 0.5 公尺、未緊鄰海岸線、地層下陷速率低於劃設標準, 計畫區域未被劃入災害防治區或陸域緩衝區。

4.5 生態環境

(一) 植物

四草重要濕地共記錄到逾 200 種維管束植物(臺南市政府，2020)，因土壤鹽分過高，多為耐鹽草本植物。計畫區域依其環境特性可區分為鹽田及漁塭田埂的鹽地類型，主要植物包含鹽地鼠尾粟、濱水菜、鹽荳、海雀稗、蘆葦等；鹽田及漁塭堤岸的灌叢類型，主要植物包含銀合歡、苦楝、苦林盤、鯽魚膽、馬櫻丹、土沉香、臺灣海桐等；以及水路和鹽田的紅樹林類型，主要為海茄苳及欖李(內政部營建署，2018；臺南市政府，2020)。

(二) 動物

四草重要濕地具有豐富的營養來源，提供魚蝦貝類、底棲生物、水鳥、岸鳥覓食棲息，共紀錄到鳥類 18 目 52 科逾 200 種、哺乳類 3 目 3 科 6 種、兩棲類 1 目 3 科 4 種、爬蟲類 1 目 6 科 8 種、蜻蛉目 2 科 5 種、鱗翅目 7 科 9 種、魚類 27 種、蟹類 12 科 53 種、底棲生物 22 科 28 種。其中，鳥類包含瀕臨絕種之保育類鳥種，如黑面琵鷺、遊隼、諾氏鵲、東方白鸛、黃鸛、草鴉等；珍貴稀有之保育類鳥種，如唐白鷺、白琵鷺、魚鷹、日本松雀鷹、赤腹鷹、鳳頭蒼鷹、松雀鷹、灰面鵟鷹、鵟、灰澤鵟、澤鵟、黑鵟、蜂鷹、紅隼、小燕鷗、黑尾鷗、蒼燕鷗、鳳頭燕鷗、綬帶鳥、八哥、黑鸛、畫眉、短耳鴉、水雉、彩鸛等；其他應予保育之鳥種，如大杓鸛、琵嘴鸛、燕鸛、紅尾伯勞等(臺南市政府，2020)。

五、現地調查與評估

為評估計畫區域之生態系統功能、生態系統服務，碳匯功能、氣候變遷減緩與調適能力，本研究除蒐集國內外研究文章、評析回顧、研究案例外，也針對計畫區域現地環境以及碳匯功能進行調查。有關現地環境調查，本計畫已利用人力以及攝影測量完成現地地形高程測量，以及搭配衛星影像、航拍影像及無人機空拍影像進行棲地類型判釋，且每個月定期到現地執行人工水文水質監測；碳匯功能調查則是挑選 3 種微棲地類型進行碳匯功能調查，與保護區內每季碳匯量估算，本計畫完成 3 種微棲地類型春夏秋冬四季碳匯功能調查，並計算計畫區域碳匯功能能力。

5.1 微棲地劃設

微棲地(microhabitat)是生物生存直接接觸且緊鄰的生長環境，不同的微棲地類型亦展現不同底棲生物量，並間接提供了保育水鳥、候鳥的生物充足的食物資源與棲息空間亦提供紅樹林物種良好的生長環境。因計畫區域位於鹿耳門、溪心寮、鹽水溪排水系統交界，易受潮汐影響具有感潮現象。而計畫區域降雨集中在 5-9 月，乾濕分明的降雨特性及相對平坦的地形可能使計畫區域的水域面積變化更為明顯。因此，本計畫透過現地高程測量、衛星影像判釋，以及實際訪問利害關係人對於計畫區域棲地分類等方式進行微棲地劃設，並每月定期執行水文水質監測，用以了解水文條件對於計畫區域棲地類型之季節差異(如長年保持一定水深、豐水期有水體覆蓋但枯水期乾涸、長年無水等)，以利後續碳匯功能及氣候變遷減緩及調適能力評估。

(一) 影像分析

衛星影像、航拍影像有多種類型，其中多光譜遙測影像包含多個波段組合，可以用來解釋和分析影像，藉由轉換多光譜影像中的不同

波段，能使影像中的某些特徵更加明顯，常見的做法通過從兩個或多個圖像波段生成新影像，這種方法生成的影像能夠加強對目標物特性的表示(Xue and Su, 2017)。

植物中的葉綠素可吸收大部分可見紅光，而細胞結構反射大部分近紅外光，這表示茂密植被對於紅光波段反射率較低，近紅外光波段反射率較高。因此可以透過常態化差值植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)分析植被覆蓋並進行比較。NDVI 為近紅外光波段與紅光波段之差和近紅外光波段與紅光波段之和的比值(Tucker, 1979)，值介於-1 至 1 之間，負值表示沒有任何植被，植物的值介於 0 到 1 之間，根據茂密程度的不同來決定(Weier and Herring, 2000)，計算公式如下：

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

其中，NIR 為近紅外光波段，RED 為紅光波段。

常態化差值水體指標(Normalized Difference Water Index, NDWI)則是利用水體對於可見綠光與近紅外光不同反射率的特性，於影像中凸顯水體分佈。NDWI 為近紅外光波段與綠光波段之差和近紅外光波段與綠光波段之和的比值(Mcfeeters, 1996)，計算公式如下：

$$NDWI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$$

其中，NIR 為近紅外光波段，GREEN 為綠光波段。

本計畫使用 2018 至 2022 年福爾摩沙衛星 5 號之多光譜(Multi Spectral)影像進行判釋，多光譜影像包含藍光、綠光、紅光、近紅外光四種波段，影像解析度為 4 公尺，以 NDVI 和 NDWI 進行計畫區域判釋。為避免衛星拍攝前遇到大型降雨事件導致水域範圍有偏頗，已根據中央氣象局紀錄，確認鄰近計畫區域之雨量站於各年衛星影像拍攝

前一個月內均無大型降雨事件。除此之外，由於衛星影像僅能初步區分地表覆蓋類型，且 NDVI 係利用植物葉綠素吸收大部份的紅、藍光，反射綠光及近紅外光的特性進行判釋，故無法區分草本植物、紅樹林樹種。因此，研究團隊依照《台江國家園管理處拍攝(影片)申請須知》規定，於 4 月 24 日以無人機進行空拍，取得解析度優於 0.05 公尺之影像，後續搭配現地勘查進一步劃設細部棲地類型。

表 9 為各年計畫區域內衛星影像拍攝日期及判釋面積；圖 18~圖 22 為衛星影像判釋結果產出之判釋圖。根據判釋結果總面積為 53.71 公頃，依照地表覆蓋類型可分為植被、水體以及裸露地。平均面積分別為植被約 17.71 公頃、水體約 16.51 公頃，其餘裸露地約 19.49 公頃。

表 9. 2018 至 2022 年衛星影像拍攝日期及判釋面積

拍攝日期	植被面積 (公頃；%)	水域面積 (公頃；%)	裸露地面積 (公頃；%)
2018 年 4 月	14.92 (28%)	23.81 (44%)	14.98 (28%)
2019 年 11 月	17.24 (32%)	13.11 (24%)	23.37 (44%)
2020 年 3 月	12.27 (23%)	13.59 (25%)	27.86 (52%)
2021 年 1 月	19.73 (37%)	16.62 (31%)	17.37 (32%)
2022 年 10 月	24.40 (45%)	15.43 (29%)	13.88 (26%)

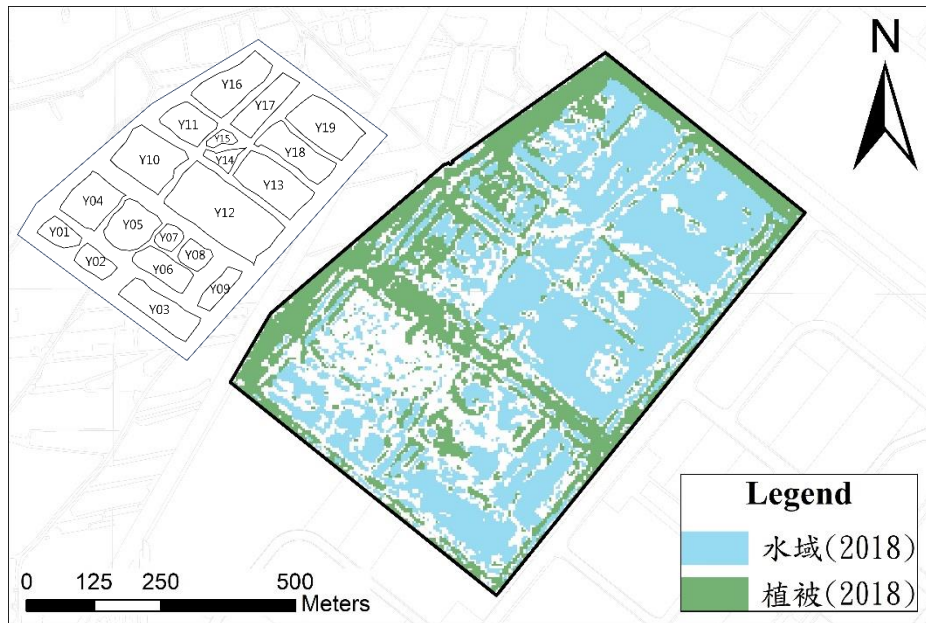


圖 18. 計畫區域 2018 年之衛星影像判釋 (本計畫產製)

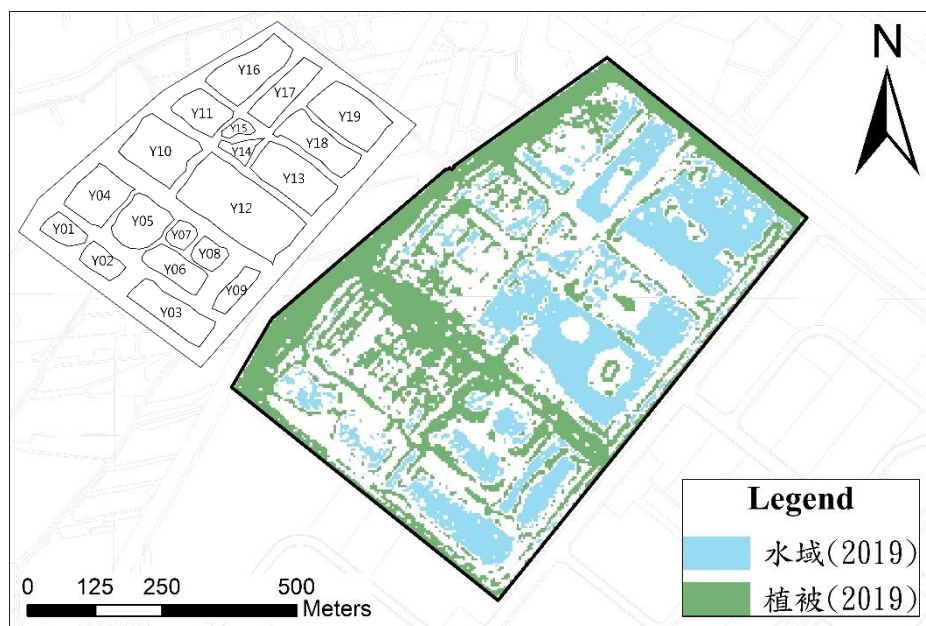


圖 19. 計畫區域 2019 年之衛星影像判釋 (本計畫產製)

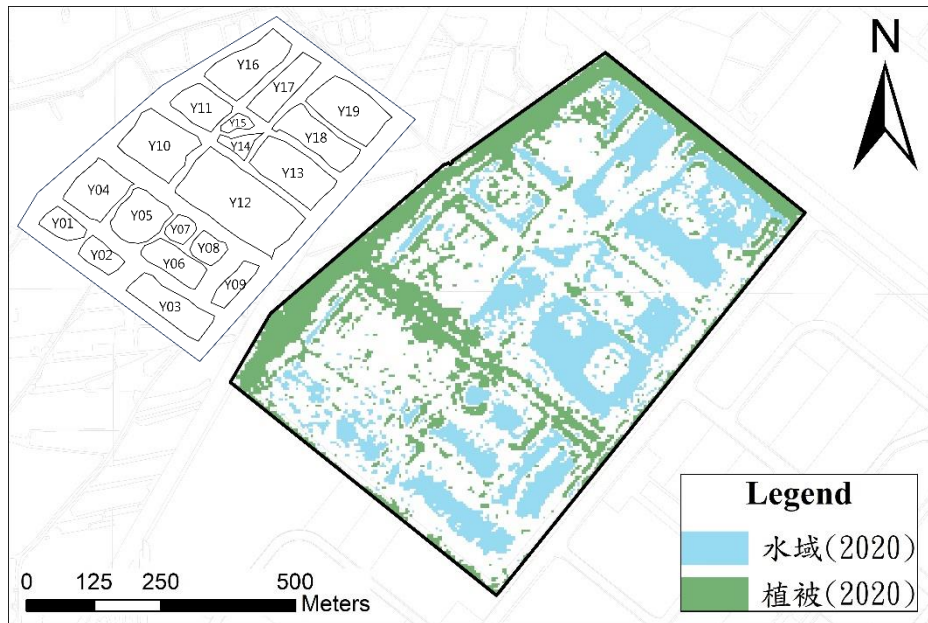


圖 20. 計畫區域 2020 年之衛星影像判釋 (本計畫產製)

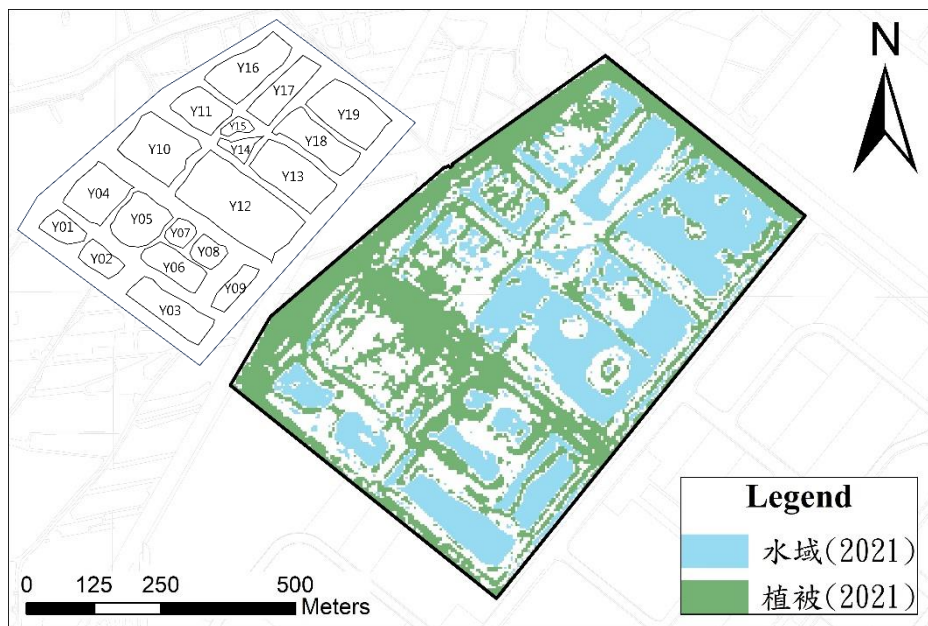


圖 21. 計畫區域 2021 年之衛星影像判釋 (本計畫產製)

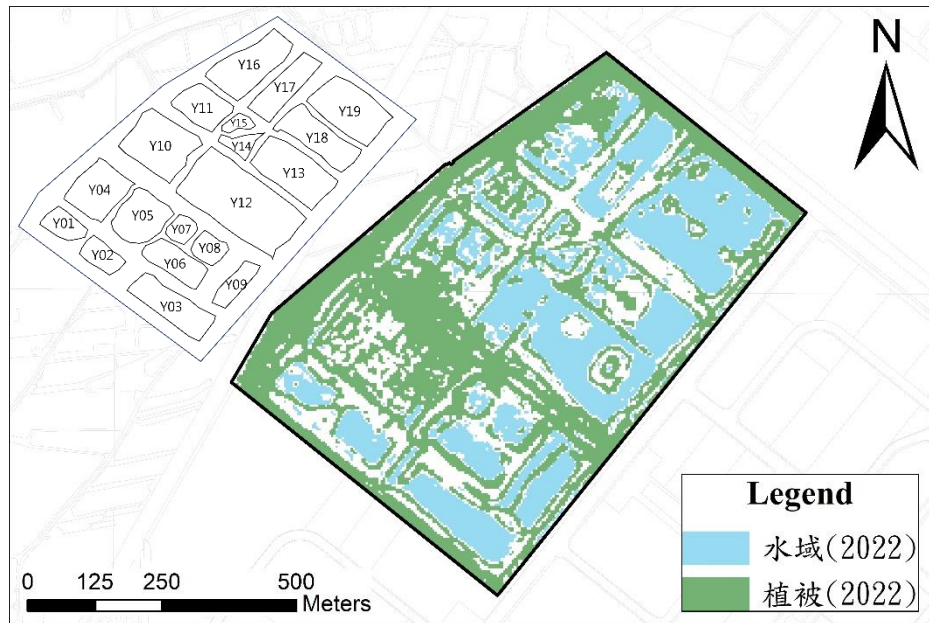


圖 22. 計畫區域 2022 年之衛星影像判釋 (本計畫產製)

利用近五年的衛星影像，可大致區分出長年有水、長年無水以及灘地的區域。藉由比較衛星影像中可以發現，計畫區域內植被有快速增生且水域有減少的趨勢，植被總面積在 2022 年較 2018 年增加約 9.48 公頃(如圖 23)，約增加了 17%計畫區域面積，且集中在水陸交界處，研判增生的植物類型為紅樹林居多，主要集中在 Y04 和 Y05；水域總面積在 2022 年較 2018 年減少約 8.38 公頃(如圖 24)，約減少了 15%計畫區域面積，其中 Y03、Y09、Y12、Y13、Y17 至 Y19 屬於長年有水的情況。

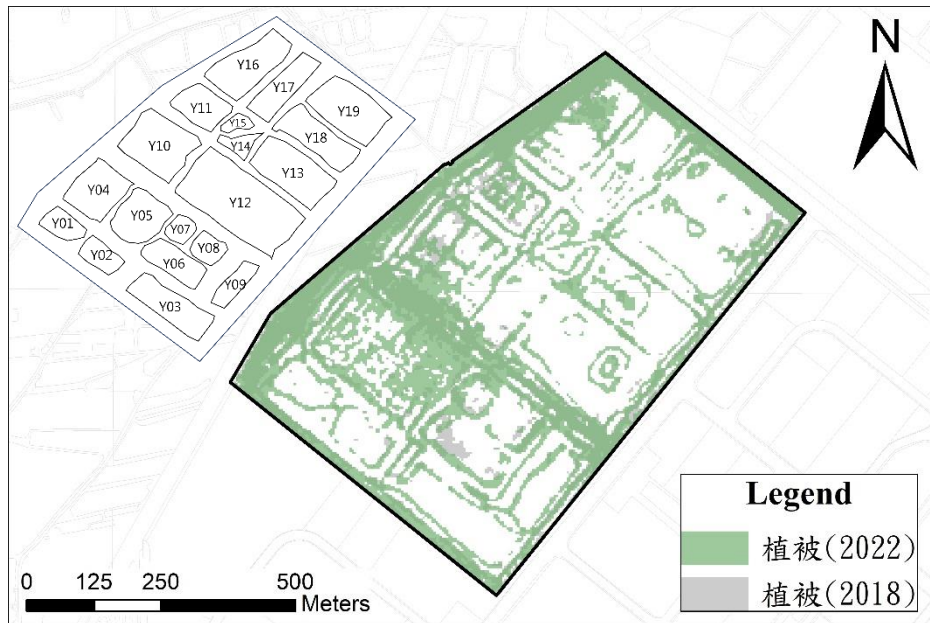


圖 23. 2018 年和 2022 年植被面積判釋比較 (本計畫產製)

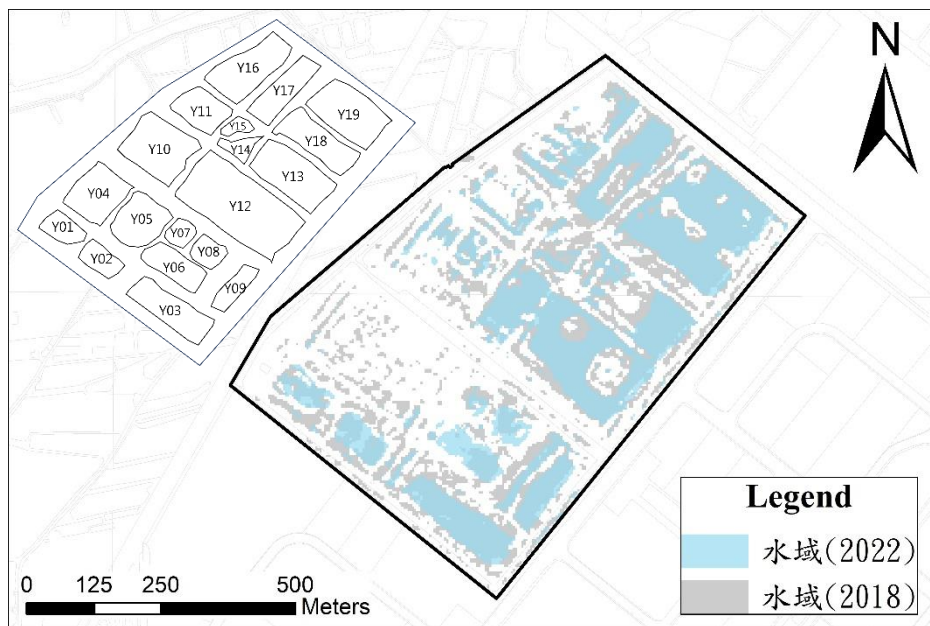


圖 24. 2018 年和 2022 年水域面積判釋比較 (本計畫產製)

(二) 高程測量

內政部所提供的數值地形模型為水面反射訊號而非實際底床，所以無法完全反應計畫區域的高程變化。本計畫進一步透過高程測量以了解計畫區域之高程地形，以掌握水文環境流動情形及探討棲地環境差異，本計畫採用虛擬基準站即時動態定位技術(Virtual Base Station-

Real Time Kinematic，VBS-RTK)配合電子全站儀(Leica FlexLine TS02)來取得基地內特定點位之三維座標。VBS-RTK 為透過多個 GPS 基準站全天候連續地接收衛星資料，並經由網路或其它通訊設備與控制及計算中心連接，彙整計算產生區域改正參數資料庫，藉以計算出任一移動站附近之虛擬基準站的相關資料，根據內政部土地測量局於 2005 年 4 月起在臺灣中、北部地區進行之測試結果，VBS-RTK 定位成果精度在平面方向優於 2 公分，高程方向優於 5 公分(內政部土地測量局，2006)。而全站儀為透過輸入儀器測站及後視點之三維座標，利用二點間相對位置，再利用主機發射紅外光到反射鏡，再接收反射稜鏡反射回的紅外光訊號，紅外光線波長與光線往返時間可以計算主機與反射鏡間距離，加上水平與垂直角度可計算出兩點間的水平距離和垂直高差，並配合稜鏡高度即可針對測量點直接測出三維座標，最後量測一已知點並進行閉合差校正以減少量測時所產生的誤差，調查的資料可以進一步描繪出基地內之高程變化(張家豪，2012)。

由於計畫區域出入口有限，以及部分水路太寬、太深難以跨越，考量到人員及設備安全，研究團隊於難以到達的區域採用攝影測量。攝影測量(Photogrammetry)為一種對目標物體進行攝影，透過記錄當下相機之空間資料，進行模擬運算並重建物體三維模型之技術。近年因智慧型手機、無人機日益興盛，使得攝影測量蓬勃發展，應用領域甚廣，包含考古學、氣象學、建築學、地質學、災害分析、電影製作，甚至是軍事目的等。其原理與人眼產生立體視覺(stereopsis)之概念相似，兩眼具一定距離，所看到的角度與範圍不一，大腦會對兩幅相似且部分重疊的影像進行整合，讓人可判斷眼前物體之遠近距離，進而產生立體視覺。為了能獲取三維空間資訊，進行攝影測量時需要於多個角度進行攝影，但也需要有部分重疊以進行模擬立體效果。進行運

算時，可給定一或多個控制點之空間座標，並給定座標系統，即可將控制點與座標系統進行匹配，生成數值高程模型。其處理步驟可分為下列四個階段：

1. Align Photos：利用各張照片攝影當下之位置與視角資訊，以及照片重疊部分中明顯之特徵點，將各張照片進行匹配，並同時對相機校準參數進行優化，調整各張照片之曝光及色調。
2. Build Dense Cloud：利用校正後之相機位置與匹配後之照片，以特徵點為基礎，計算細部點之空間位置。
3. Build Mesh：透過 Dense Cloud，利用點資料生成面資料，並產生三維多邊形網格模型。
4. 建立模型：依照使用者需求，將三維多邊形網格模型轉換為 3D 模型、數值地形模型或者正射影像。

利用 VBS-RTK 搭配電子全站儀測量範圍為人力可觸及之區域，分別為 Y01 至 Y08；其餘區域(Y09 至 Y19)因水深過深與紅樹林過於茂盛等人力無法到達因素，則採用攝影測量。由於攝影測量為光學原理，水域的高程數值為水面之高程，植被的高程數值為樹頂高度，故計畫團隊整合使用 VBS-RTK 搭配電子全站儀數值，以及攝影測量的數值至同一座標系統。測量結果顯示計畫研究區域高程介於 -1.5 至 3 公尺之間(如圖 25)。

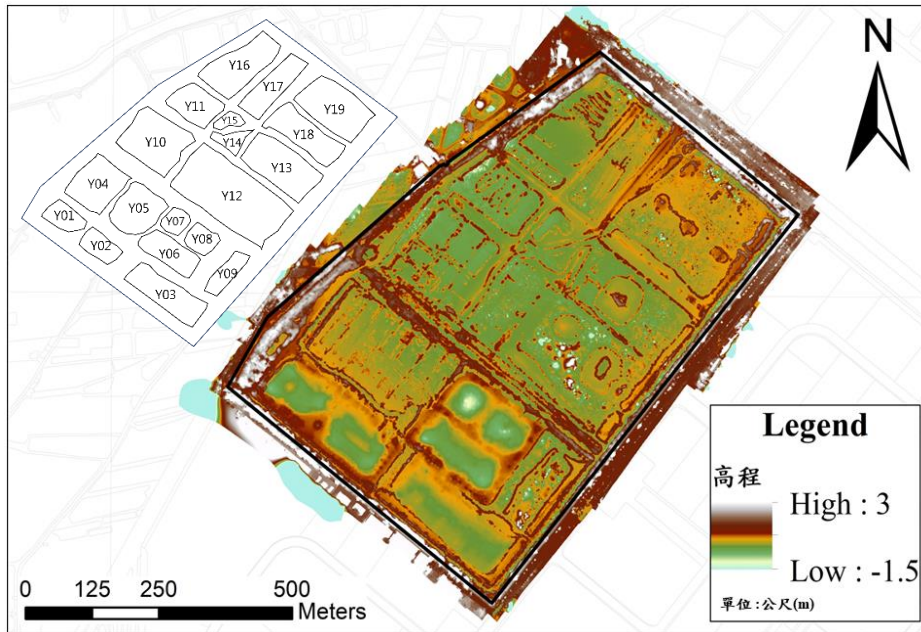


圖 25. 計畫區域地形高程圖 (本計畫產製)

(三) 鹽度

水域為濕地生物群重要棲息環境之一，水域中水體交換亦是生物重要食物來源驅動力。本計畫每月定點監測水域內水溫、壓力、溶氧、導電度、鹽度、酸鹼值等水質資料。其中鹽度是直接反應水體其物理性質，對藻類的合成反應，海洋的生物之分佈、生長、繁殖等亦有重大影響(環境部)，一般海水鹽度約 30~35psu，而當鹽度過高會導致藻類生物量降低(Jack McLachlan, 1961)，並且間接影響水體溶氧量與營養鹽濃度，亦導致水中微生物量降低。由於計畫區域位於鹿耳門、溪心寮、鹽水溪排水系統交界，易受潮汐影響且具有感潮現象，推測水中鹽度來自於感潮帶來之潮水，再加上春夏時適逢連續大雨，帶來豐沛淡水資源，使得豐水期與枯水期鹽度落差高達 10 倍以上。豐水期與枯水期鹽度分布如圖 26 所示。

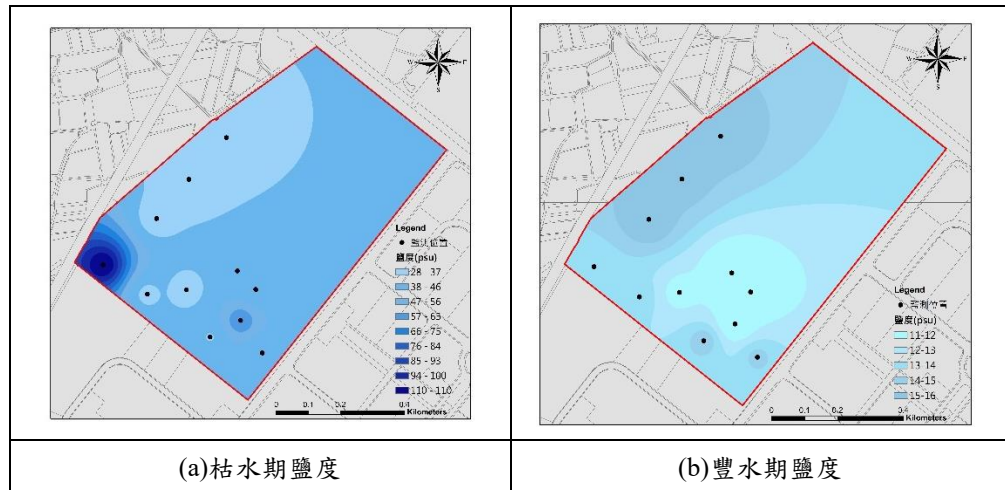


圖 26. 計畫區域不同時期鹽度分布 (本計畫產製)

本計畫先後使用衛星影像與無人機空拍進行計畫區域內微棲地判釋，由於衛星影像解析度為 4 公尺，若根據其分析結果(如圖 18 至 22)，僅能初步將計畫區域初步分為植被、水域以及裸露地三種微棲地類型。為了更細緻分類出計畫區域內之微棲地種類，本計畫使用影像解析度為 0.05 公尺之無人機空拍影像，並綜合上述調查成果與利害關係人訪談資料，又依《內政部四草重要濕地(國際級)保育利用計畫書》，以及本計畫調查區域環境變遷發展，得出計畫區域現被歸類於受潮汐影響而自然感潮的鹽沼濕地(Salt marsh)。根據週期性的潮汐、降雨等因素影響，其生長的植物型態不同，可分為水域、植被以及裸露地等環境。水域易受到週期性潮汐、降雨影響，可分為鹽沼水域及潮溝，其中潮溝為終年有水之區域，主要功用在於水體交換；植被則可以依照植物種類分為淡水草澤、紅樹林植被；其餘未被歸類之裸露地則分類為泥質灘地。計畫區域微棲地面積如表 10 所示，各微棲地劃設分佈如圖 27。

表 10. 計劃區域微棲地種類面積及百分比

微棲地種類	面積 (平方公尺)	百分比 (%)
鹽沼水域	130,340	24.2
紅樹林植被	224,250	41.7
淡水草澤	22,350	4.2
泥質灘地	81,420	15.2
潮溝水域	78,840	14.7
總計	537,200	100

1. 鹽沼水域：經常受潮水淹沒之低窪陸地，由於潮水侵入挾帶泥砂及有機物，兩者沉積形成鹽水沼澤區。此區水體兩側植物以紅樹林為主，部分區域於乾季時，因受沉積物與紅樹林植被阻斷，形成獨立水體；雨季時，沼澤區內水體與潮溝水域連接，形成水體交換。
2. 紅樹林植被：所謂的「紅樹林」泛指生長在熱帶、亞熱帶海濱與河口泥灘地的鹽生常綠喬木或灌叢。紅樹林組成以紅樹科植物為主，如欖李、海茄苳、五梨跤、水筆仔等，分布範圍約介於南北緯 25 度間。紅樹林植被為本計畫區內主要的棲地型態，大多生長於潮溝水域以及鹽沼水域周邊。
3. 淡水草澤：為豐水期帶來豐沛雨量，使水體蓄積於低窪地區形成水域沼澤環境，其水位高低主要受降雨多寡變化且與其他沼澤區無水體連結。當淡水草澤內植物腐敗後，累積形成厚實且充滿有機質底土層，可提供水生植物的進入，此區植物以一年生草本植物為主，如香蒲、蘆葦、鹽荳、水蠟燭等。依水質監測成果發現，淡水草澤水體鹽度於豐水期明顯低於其他感潮區域，於枯水期時

因蒸發量旺盛略高於其他區域，主要分布於 Y06~Y08 區。

4. 泥質灘地：為潮間帶在潮水退後裸露出的大片泥地，亦是紅樹林沼澤與陸域間之裸露地，可提供水鳥覓食、休息和繁殖（李明珠，1994）。泥質灘地通常出現在坡度極為平緩之潮間帶，本區雖為自然感潮濕地，然而因排水路長年泥砂淤積，使得水位與潮位變化並不顯著，故泥質灘地時常裸露於水面上方，且部分泥質灘地因土壤沉積、養分傳遞、地形變化等因素而陸化。區內 Y04 與 Y05 區原為鹽沼水域，後因濕地陸化效應逐漸轉變為泥質灘地。
5. 潮溝水域：為舊時鹽田時所保留的棲地類型，從前海水於漲潮時經由潮溝漫入鹽田，使曬鹽工作順利進行；現況潮溝仍利用潮汐負責區內水體交換，為計畫區域內不可缺少之重要地貌。潮溝內終年有水，水深為全區最深，分布於各棲地間，且大部分紅樹林植被皆在此生長。此微棲地具有生態緩衝區之性質，並維持區內核心保育區生態穩定。

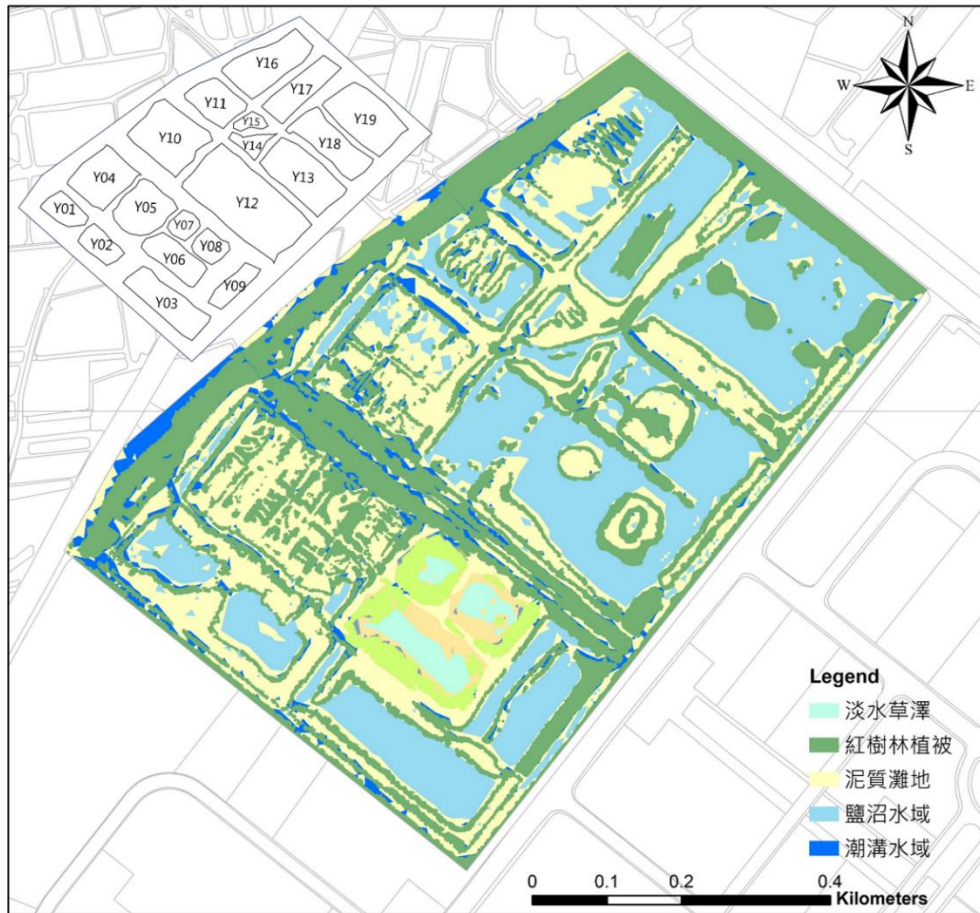


圖 27. 計畫區域微棲地劃設 (本計畫產製)

5.2 水文水質

水文驅使了濕地的發展及功能，水環境提供濕地中生物棲息之環境，而水循環牽動了水體的交換，並為生物提供了食物的來源。研究團隊根據高程測量、棲地環境劃分結果及前人研究，於計畫區域內佈置監測點，以自動及人工方式進行水深紀錄。

本計畫於 Y02、Y11 入流口、Y19 入流口(如圖 28 白色圓點處)，自 2023 年 2 月 18 日至 3 月 24 日非汛期與 2023 年 9 月 10 日至 10 月 20 日汛期，以壓力式水位計(HOBO U20)進行自動逐時紀錄，搭配水體密度及大氣壓力進行修正並換算為水深，再使用本計畫測量高程資料將水深換算為水位高程。然而，位於 Y11 入流口以及 Y19 入流口之

壓力式水位計，推測被擅入計畫區域外籍移工盜取而失竊，故無法取得汛期時資料，僅 Y02 同時具有汛期與非汛期水位高程資料。水位高程結果顯示，在非汛期期間，整體而言三處放置地點水位高程變化並不大，但以 Y19 水位高程最高；汛期期間，由於僅有 Y02 水位高程資料，故無法與其他兩區進行比較。然而，仍可看出 Y02 汛期水位高程較非汛期時高，顯示 Y02 水位高程主要受雨水影響。監測結果如圖 29 所示。

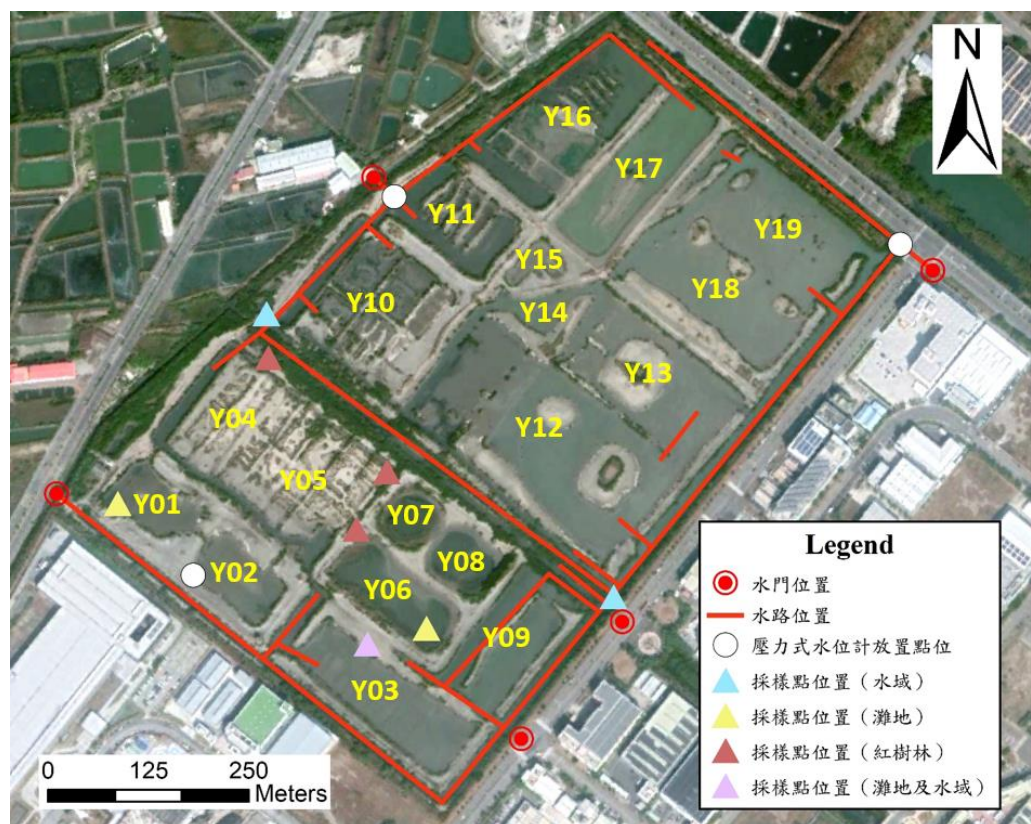


圖 28. 壓力式水位計放置點及碳匯採樣點分布圖

(修改自《台江國家公園及其周緣緩衝區多樣性棲地營造與評估計畫》)

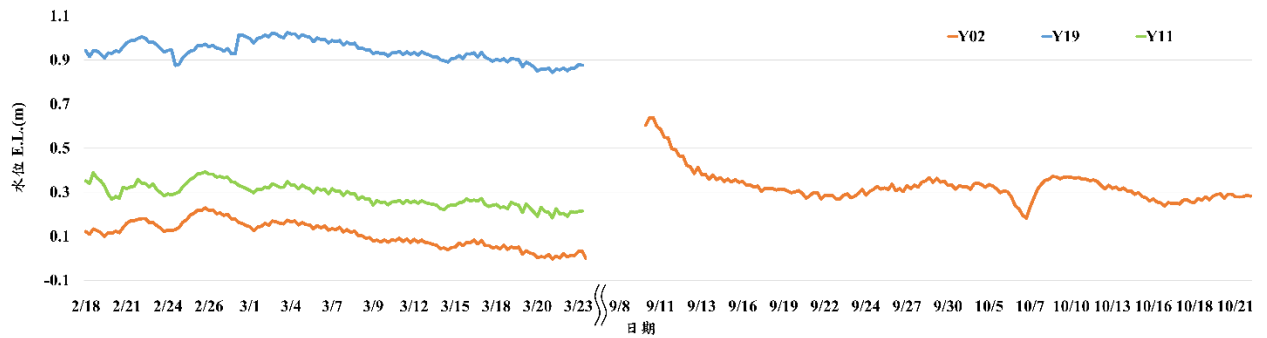


圖 29. 各點位水位高程圖 (本計畫產製)

除了藉由壓力式水位計自動測量之外，本計畫以每月一次的頻度以水尺測量水深、水質儀(YSI Professional Plus，含鹽度、水溫、溶氧、pH 值、導電度、懸浮固體等電極)記錄水文資料，並完成 2 至 12 月現場水文資料調查。由於計畫區域出入口有限，以及 Y12 至 Y19 因為水路太寬、太深難以跨越，考量到人員及設備安全，故水質檢測僅執行 Y01 至 Y11。水質詳細資料如表 10 至表 16 所示，圖 30 至 36 由表 10 至 16 繪製而成。

根據表 11 指出，Y04 於非汛期時(2 至 5 月、10 月)是屬於沒有水的情況，與圖 27 微棲地劃設 Y04 長期屬於泥質灘地情況相符。整體而言，計畫區域內各分區水溫(圖 32)與 pH 值(圖 34)並無太大變化，而自六月起進入汛期，計畫區域水深伴隨著雨水上升，至 10 月進入非汛期開始下降(圖 30)，而鹽度與導電度之變化與雨水息息相關，大量雨水稀釋原本水中鹽分，同使得導電度下降，故 6 至 9 月鹽度與導電度數值皆偏低(圖 31 與圖 35)。本計畫亦根據《重要濕地內灌溉排水蓄水放淤給水投入標準》規範，亦發現儘管汛期間帶來大量雨水稀釋，各區懸浮固體值仍皆高於法規標準 15.0 mg/L 以上(圖 36)。

表 11 計畫區域 2 月至 12 月水深資料

	Y01	Y02	Y03	Y04	Y05	Y06	Y07	Y08	Y09	Y10	Y11
2 月	17.5	38	34	0	27	34	35	29	29	13	24
3 月	7	34	41	0	23	2	27	26	21	11.5	19
4 月	1	43	41	0	34	5	0	23	30	22	25
5 月	29	47	45	0	38	27	0	39	34	26	29
6 月	68	50	50	28	44	56	44	74	40	33	34
7 月	95	55	54	27	45	71	73	94	43	35	41
8 月	102	65	65	36	56	117	118	139	55	48	52
9 月	102	62	65	32	53	113	115	136	52	42	53
10 月	81	49	51	0	39	99	100	120	35	29	39
11 月	73	58	50	0	35	84	96	106	36	28	38
12 月	65	60	46	0	32	78	90	95	34	26	33

※單位：公分

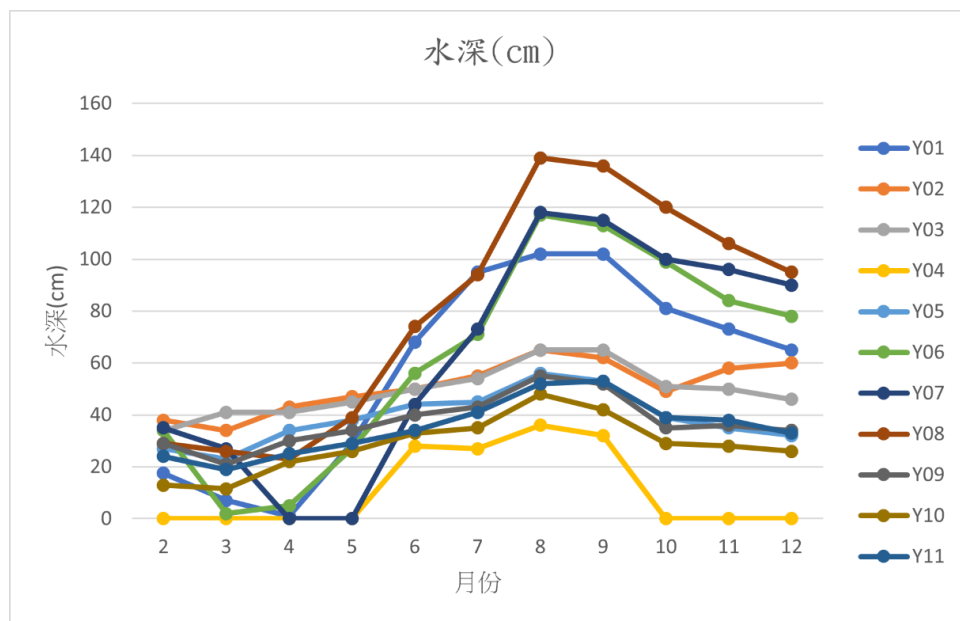


圖 30. 2 月至 12 月水深資料 (本計畫產製)

表 12 計畫區域 2 月至 12 月鹽度資料

	Y01	Y02	Y03	Y04	Y05	Y06	Y07	Y08	Y09	Y10	Y11
2 月	117.37	37.76	39.38	-	32.58	48.6	31.39	41.01	39.31	28.12	32.42
3 月	173.8	41.04	43.78	-	38.16	95.7	37.76	44.65	42.37	30.01	30.94
4 月	151.12	35.92	37.42	-	33.49	84.32	47.62	43.32	39.98	29.69	30.58
5 月	87.94	34.57	35.86	-	33.71	68.16	54.22	38.54	38	30.59	30.85
6 月	30.45	24.17	26.73	31.42	22.94	22.85	24.23	21.49	28.07	19.66	19.51
7 月	24.08	19.9	22.07	22.73	9.84	17.25	12.97	17.22	22.08	20.48	20.26
8 月	11.24	14.49	14.61	20.02	15.42	11.15	11.32	11.34	13.18	21.63	20.69
9 月	11.68	13.65	14.5	18.09	14.93	9.11	9.76	9.99	13.75	15.37	17.12
10 月	19.52	23.98	23.6	-	24.68	13.76	13.86	14.76	22.4	25.56	25.52
11 月	25.43	25.49	26.57	-	24.01	17.09	16.14	18.08	26.57	26.14	25.97
12 月	33.75	31.08	31.17	-	31.16	21.21	18.96	22.41	30.62	29.52	29.66

※單位：psu

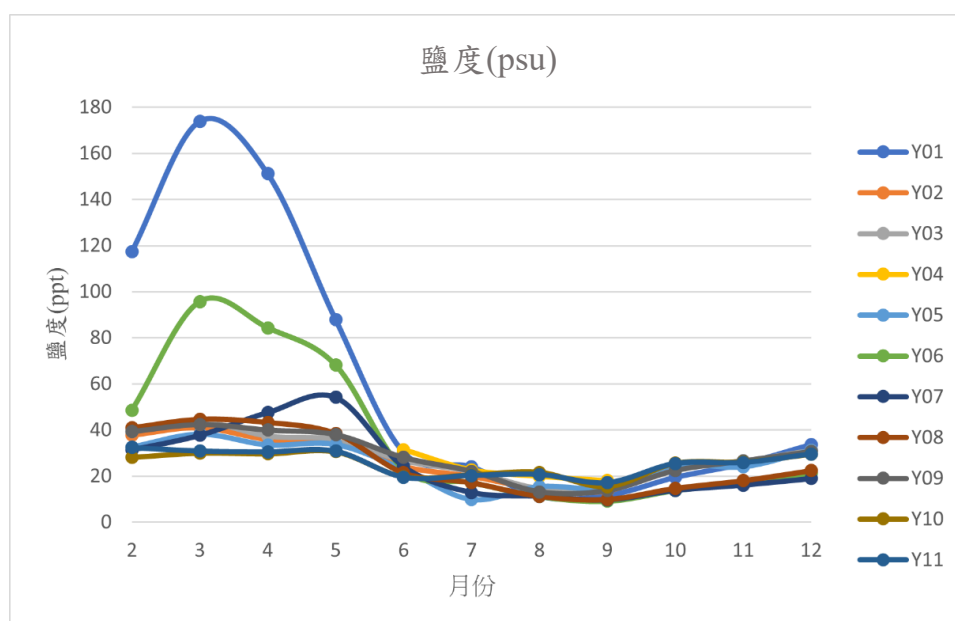


圖 31.2 月至 12 月鹽度資料 (本計畫產製)

表 13 計畫區域 2 月至 12 月水溫資料

	Y01	Y02	Y03	Y04	Y05	Y06	Y07	Y08	Y09	Y10	Y11
2 月	25.6	22.3	24.3	-	26.7	26.7	26.1	25	25.1	26.7	28.2
3 月	20	19.1	19	-	19.2	19.1	19.6	18.8	19.8	19.5	20.4
4 月	29.4	26.9	26.1	-	27	27.7	27.3	26.7	27.5	27.1	27.6
5 月	33.1	30.8	30.7	-	31	30.2	31.3	30.2	31.9	30.1	30.8
6 月	35.5	31.7	31.7	34.9	31.6	30.9	35.9	31.4	31.6	31.6	31.8
7 月	32.2	31.3	30.9	29.5	31.1	30.8	31.1	31	31.4	29.1	31
8 月	34.8	34.6	34.4	36.3	35.2	35.1	35.6	35	33.9	35.8	35.8
9 月	31.4	30.9	30.5	29.4	31.1	31.1	31.5	31	31.5	29.2	31.6
10 月	28.1	27.4	27.4	-	27.3	27.9	27.7	27.8	27.5	27.6	27.2
11 月	24.9	24.6	24.8	-	24.2	24.6	24.6	24.5	24.4	24.1	24.2
12 月	14.7	14.2	14.2	-	14.2	14	15.2	14.1	14.6	14.9	14.6

※單位：℃

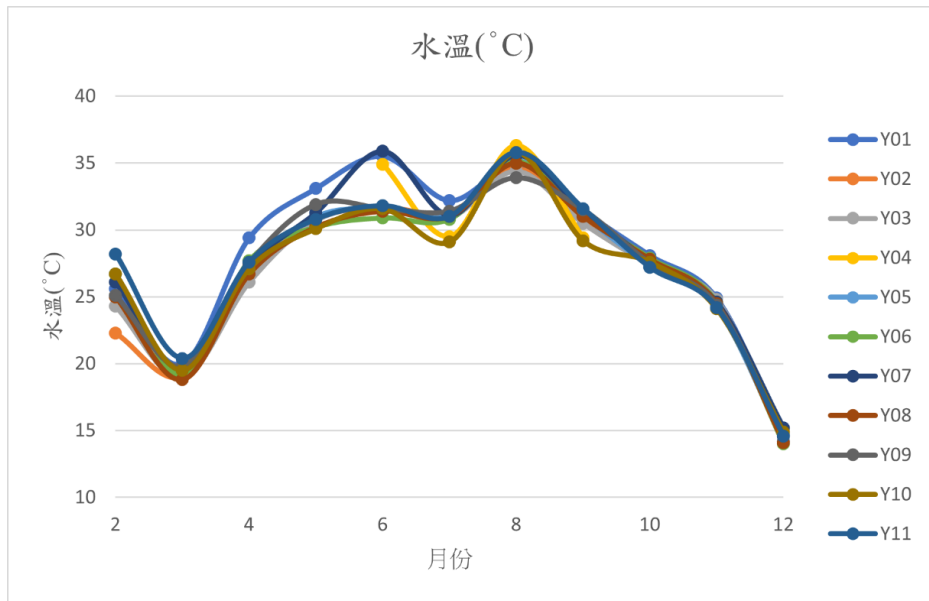


圖 32. 2 月至 12 月水溫資料 (本計畫產製)

表 14 計畫區域 2 月至 12 月溶氧資料

	Y01	Y02	Y03	Y04	Y05	Y06	Y07	Y08	Y09	Y10	Y11
2 月	2.35	6.1	6.4	-	4.38	2.89	7.05	3.87	6.02	9.2	7.57
3 月	4.56	4.97	6.38	-	7.05	3.46	3.97	4.83	5.26	2.25	2.08
4 月	0.53	3.57	4.43	-	5.54	6.94	7.92	4.59	0.85	4.54	2.01
5 月	3.61	2.75	3.33	-	3.22	2.01	7.86	2.21	3.57	1.63	2.12
6 月	4.73	3.82	3.17	2.98	3.39	4.84	3.19	3.86	2.93	1.67	1.63
7 月	2.91	2.85	3.49	2.2	2.77	4.82	3.63	3.64	2.9	2.35	1.72
8 月	5.58	4.98	4.95	8.62	6.72	5.47	4.09	4.4	4.21	7.35	7.92
9 月	2.2	4.91	3.91	3.2	2.43	4.16	2	2.76	3.21	2.91	1.78
10 月	4.85	4.74	3.42	-	2.94	4.1	2.68	3.9	3.95	3.02	2.67
11 月	3.18	3.62	3.67	-	2	4.74	3.33	5.35	3.88	3.79	2.05
12 月	7.62	13.4	8.24	-	6.73	13.56	9.44	7.81	7.66	6.63	6.1

※單位：mg/L

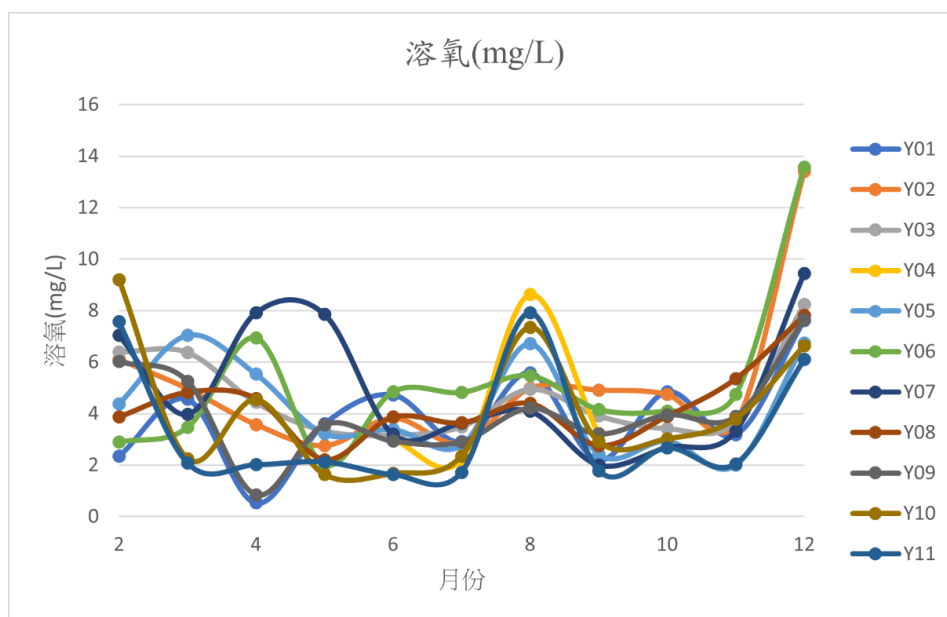


圖 33. 2 月至 12 月溶氧資料 (本計畫產製)

表 15 計畫區域 2 月至 12 月 pH 資料

	Y01	Y02	Y03	Y04	Y05	Y06	Y07	Y08	Y09	Y10	Y11
2 月	7.82	8.4	8.19	-	8.13	8.2	8.56	8.12	8.23	8.59	8.43
3 月	7.80	8.03	8.21	-	7.95	8.11	8.39	8.25	8.11	7.91	7.92
4 月	7.43	8.03	7.94	-	7.93	8.34	8.26	8	7.92	7.85	7.84
5 月	7.94	7.77	7.56	-	7.66	7.84	8.08	8	7.59	7.35	7.52
6 月	7.92	7.66	7.45	7.94	7.31	7.84	7.56	7.59	7.23	7.15	7.29
7 月	7.18	7.47	7.32	7.52	7.05	8.02	6.8	7.52	7.07	7.25	7.2
8 月	7.67	7.73	7.64	7.83	7.66	7.43	7.16	7.24	7.45	7.99	7.95
9 月	7.22	7.56	7.54	7.47	7.3	7.56	7.17	7.43	7.18	7.48	7.46
10 月	7.65	7.75	7.84	-	7.57	7.9	7.59	7.95	7.85	7.83	7.9
11 月	7.55	7.7	7.81	-	7.48	8.12	7.72	7.99	7.77	7.92	7.83
12 月	8.18	8.57	8.31	-	8.03	8.66	8.28	8.44	8.22	8.04	8.14

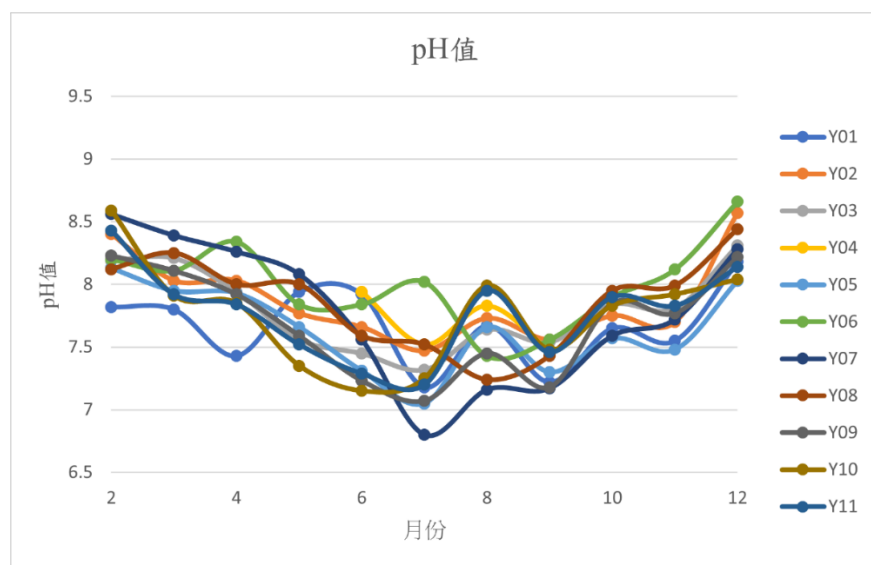


圖 34. 2 月至 12 月 pH 值資料 (本計畫產製)

表 16 計畫區域 2 月至 12 月導電度資料

	Y01	Y02	Y03	Y04	Y05	Y06	Y07	Y08	Y09	Y10	Y11
2月	147,951	56,681	58,917	-	50,095	70,781	48,192	61,125	58,840	43,465	49,686
3月	199,183	61,031	64,563	-	57,225	125,569	56,689	65,738	62,786	46,154	47,241
4月	179,636	54,373	56,340	-	51,107	113,343	69,696	64,162	59,826	45,881	47,132
5月	117,761	52,733	54,465	-	51,641	95,010	78,199	57,994	57,312	47,275	47,662
6月	47,381	38,323	41,963	48,622	36,549	35,277	37,520	34,472	43,933	37,803	31,549
7月	38,200	32,146	35,286	36,180	32,022	28,223	21,762	28,180	35,322	32,928	32,665
8月	19,174	24,134	24,357	32,510	25,687	19,052	19,324	19,339	22,158	34,829	33,500
9月	19,784	22,790	24,068	29,419	24,747	15,740	16,763	17,106	22,897	25,364	28,038
10月	31,460	37,874	37,329	-	38,867	22,868	23,042	24,390	35,603	40,122	40,053
11月	39,844	39,932	41,460	-	37,830	27,796	26,390	29,262	41,445	40,831	40,589
12月	51,341	47,717	47,842	-	47,802	33,778	30,477	35,493	47,070	45,508	45,740

※單位：μs/cm

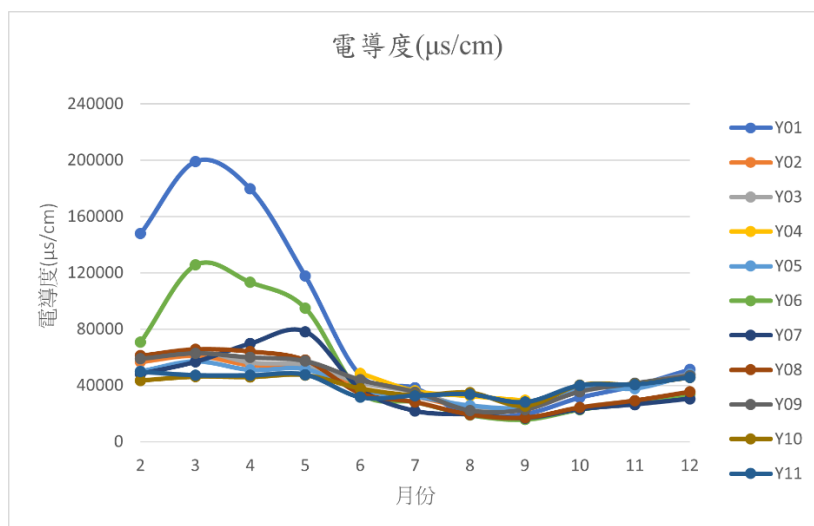


圖 35.2 月至 12 月導電度資料 (本計畫產製)

表 17 計畫區域 2 月至 12 月懸浮固體資料

	Y01	Y02	Y03	Y04	Y05	Y06	Y07	Y08	Y09	Y10	Y11
2月	96,070	36,855	38,285	-	32,500	46,020	31,330	39,650	38,285	28,255	32,305
3月	29,480	39,650	41,990	-	37,180	81,575	36,855	42,705	40,820	30,011	30,758
4月	16,470	35,600	36,590	-	33,215	73,645	45,305	41,665	38,870	29,829	30,641
5月	76,505	34,255	35,425	-	33,540	61,750	50,830	37,700	37,310	30,745	30,940
6月	31,200	24,908	27,274	31,590	23,758	23,679	24,544	22,399	28,561	20,670	20,527
7月	24,837	20,898	22,932	23,517	20,819	18,343	14,144	18,317	22,958	21,398	21,229
8月	12,461	15,704	15,828	21,131	16,646	12,383	12,558	12,571	14,404	22,646	21,775
9月	12,857	14,814	15,645	19,123	16,088	10,231	10,894	11,122	14,924	16,484	18,226
10月	20,446	24,617	24,268	-	25,263	14,865	14,972	15,850	21,345	26,078	26,034
11月	25,903	25,957	26,948	-	24,590	18,066	17,154	19,021	26,939	26,542	26,385
12月	33,381	31,016	31,097	-	31,080	21,953	19,810	23,057	30,594	29,597	29,730

※單位：mg/L

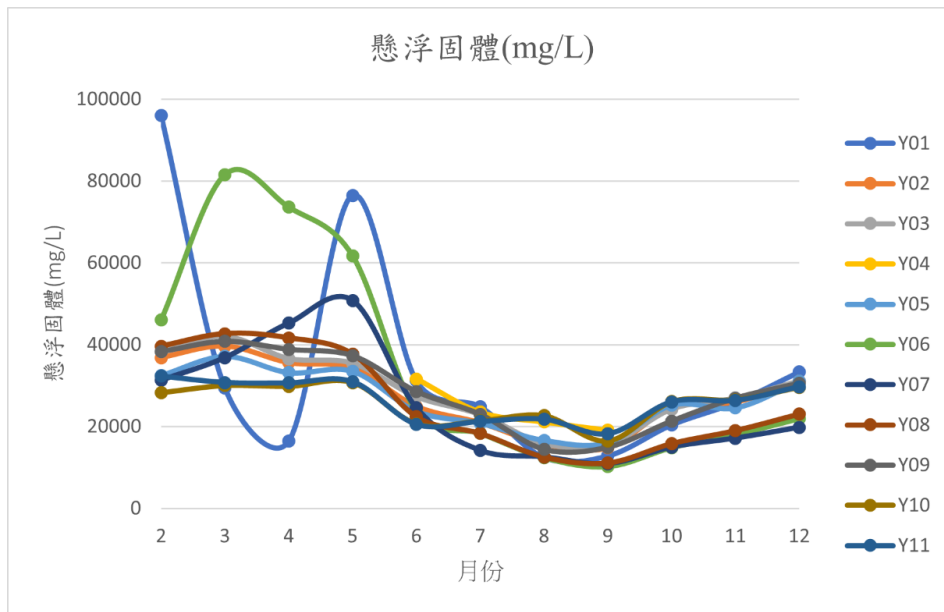


圖 36. 2 月至 12 月懸浮固體資料 (本計畫產製)

5.3 濕地碳匯功能調查

計畫區域包含多種濕地型態，本計畫挑選紅樹林、水域及灘地，共三種微棲地類型進行碳匯功能調查，各設置三個採樣點進行碳匯測量。本計畫於 2023 年 3 月(冬季)、5 月(春季)、8 月(夏季)、10 月(秋季)太陽下山前進行現地調查及環境因子採樣，同性質微棲地採樣區之間均間隔 25m 以上。表 18 為各樣站 GPS 位置，圖 28 為各採樣點分布位置，由於 Y09 至 Y19 區域人為無法抵達，故採樣位置集中在 Y01 至 Y08。紅樹林採樣區域為從紅樹林欖李中選擇三塊純林，劃設 5m × 5m 的正方形樣區；於水源附近劃設三個灘地採樣區；水域則選擇流動水域進行採樣調查。各採樣點命名代碼以鄰近鹽田代碼為命名依據，採樣點實地現況如圖 37 所示。

表 18. 採樣點 GPS 座標

棲地類型	命名代碼	座標
紅樹林	Y04	N23.048333°,E120.137841°
	Y05	N23.047061°,E120.139287°
	Y06	N23.046415°,E120.138921°
灘地	Y01	N23.046686°,E120.136018°
	Y03	N23.045124°,E120.139065°
	Y06	N23.045304°,E120.139978°
水域	Y03	N23.045124°,E120.139065°
	Y10	N23.048826°,E120.137815°
	Y12	N23.045671°,E120.142053°

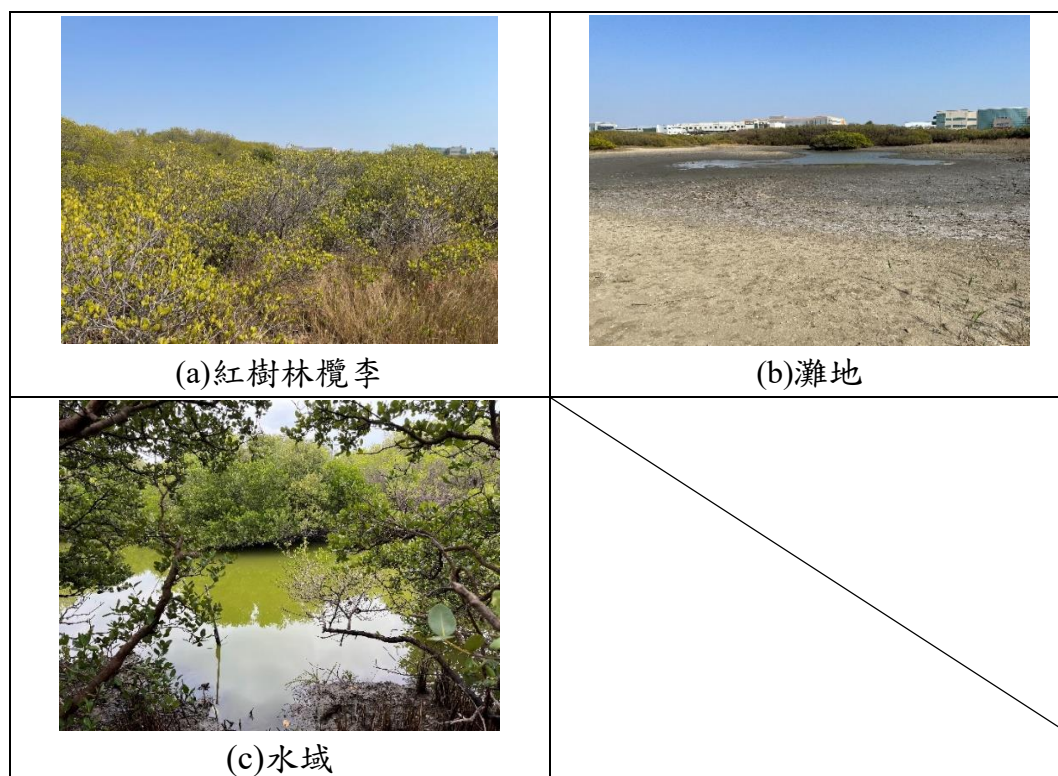


圖 37. 採樣點實地現況

(一) 濕地碳匯測量方法概述

濕地碳匯的調查方法可以分為碳儲量差分法(Stock difference approach)及碳收支法(Gain-loss approach)。碳儲量差分法是利用濕地碳庫(Carbon Pool)在固定時間內的碳儲量變化，推算濕地的碳匯量。碳庫是指濕地內儲存碳元素的場所，濕地生態系可包含 5 種碳庫：(1)植物地上部生物量；(2)植物地下部生物量；(3)枯木；(4)枯落物及(5)土壤有機質。透過測量這 5 種碳庫內有機碳的累積速率，即可推算濕地碳匯量，但仍無法了解碳匯量變化機制。但過去研究指出枯木碳庫及枯落物碳庫的碳儲存量變化不明顯，計算碳匯時常會忽略不計。

碳收支法是根據碳質量平衡理論作為基礎，分別計算各項進入(Input)及離開(Output)濕地的碳質量通量，再加總進入的通量扣除離開的通量，即可計算濕地的碳累積通量，推算濕地的碳匯量。如濕地周圍劃定為生態系統的邊界，濕地的碳進入及離開可分作水平與垂直介

面，水平介面碳通量以河川或潮汐帶入及帶出的碳量為主，在封閉系統即沒有水體交換的濕地(如湖泊)可視為沒有通量產生。垂直介面的碳通量主要則以二氧化碳與甲烷等溫室氣體通量，植物部分可計算植物地上部與地下部的淨初級生產量(Net Primary Production)，土壤及水體碳通量則由二氧化碳與甲烷的氣體通量推算。

(二) 紅樹林棲地

紅樹林碳匯量計算包含測量紅樹林植物地上部、地下部淨生產量及土壤溫室氣體通量。地上部淨生產量由地上部生物量之變化(生長量)、植物枯落物量與草食作用加總獲得，但因草食作用過少所以忽略(Kira and Shidei, 1967)。地下部淨生產量為地下部生物量之變化(生長量)。藉由每季節測量紅樹林地上部及地下部的生物量，透過前後兩季生物量變化(生長量)可以計算每季紅樹林碳吸收量，再扣除土壤溫室氣體通量，若為正值即為碳匯、負值即為碳源。以下針對計畫區域內之紅樹林生物量及生長量、枯落物量以及溫室氣體通量等研究方法及結果進行說明。

- 紅樹林生物量及生長量

目前對於欖李異速生長方程式之相關研究，僅有印尼與斯里蘭卡。其中，印尼文獻只建立地上部方程式；斯里蘭卡文獻則是地上部與地下部方程式皆有。印尼文獻於 2016 年發表，相較於斯里蘭卡文獻(2012 年)發表時間較近期，且該篇發表之期刊被引用程度較高，故本計畫使用印尼文獻之異速生長方程式計算欖李地上部、使用斯里蘭卡文獻之異速生長方程式計算欖李地下部。由於目前台灣沒有屬於台灣欖李之異速生長方程式，故本計畫現階段為引用外國文獻計算紅樹林碳匯。然而，外國環境條件仍與台灣環境條件仍有所不同，建議後續仍須建立屬於台灣之欖李紅樹林異速生長方程式。

藉由將採樣區中每一個樹給予編號，並量測胸徑(diameter at breast height, DBH)，再代入印尼文獻與斯里蘭卡文獻建立之異速生長方程式中，分別求得地上部生物量(aboveground biomass, AGB)(公式(1))及地下部生物量(belowground biomass, BGB)(公式(2))，生長量是透過計算一段時間生物量之差異計算得出(公式(3))。

本次研究利用冬季、春季、夏季與秋季四季生物量資料，以春季生物量減去冬季生物量，得出春季生長量；夏季生物量減去春季生物量，得出夏季生長量；秋季生物量減去夏季生物量，得出秋季生長量，得出三季紅樹林生長量，若計算後得出生長量為正值，代表提供淨生產量。

$$AGB(kg) = 0.184 \times (DBH)^{2.384} \quad (\text{Kangkuso et al. 2016}) \quad -\text{公式(1)}$$

$$BGB(kg) = 0.118 \times (DBH)^{2.063} \quad (\text{Perera et al. 2012}) \quad -\text{公式(2)}$$

DBH：樹高 1.3 m 的胸徑

$$\Delta B = \frac{B_i - B_{i-1}}{d} \quad -\text{公式(3)}$$

ΔB ：植物生長量(kg DW m⁻² d⁻¹)

B_i ：第 i 次所測得的生物量 (kg DW m⁻²)

B_{i-1} ：第 $i - 1$ 次所測得的生物量 (kg DW m⁻²)

d ：兩次測量中所間隔的天數

表 19 為本計畫所測得四季紅樹林胸高直徑(DBH)資料，以 Y06 最高，Y04 最低。紅樹林地上部及地下部生物量(如圖 38(a))生長緩慢，皆以秋季最高、冬季最低；將相鄰兩季地上部及地下部生物量相減，即可得出地上部與地下部生長量(如圖 38(b))，生長量皆以冬季至春季最高、夏季至秋季最低。推測今年夏季時，計畫區域所處之安南區適

逢連續大雨，造成欖李紅樹林的生長環境改變，以致於紅樹林生長量降低。

表 19. 紅樹林四季胸高直徑測量結果

	DBH (cm)			
	冬季(Win.)	春季(Spr.)	夏季(Sum.)	秋季(Aut.)
Y04	1.36±0.37	1.35±0.27	1.38±0.30	1.40±0.29
Y05	3.10±1.30	3.19±1.28	3.22±1.29	3.24±1.28
Y06	3.34±0.71	3.38±0.71	3.39±0.81	3.36±0.86

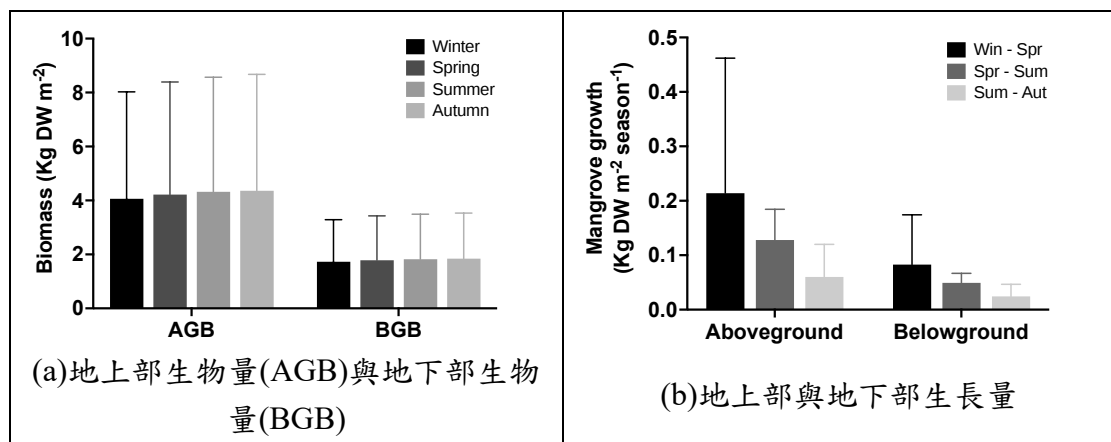


圖 38. 紅樹林生物量與生長量

- 枯落物量

針對枯落物量(Litterfall)採樣方式為在紅樹林樣區內隨機架設 5 個 30 × 30 cm 的正方形塑膠籃，內部置入 1 mm 的尼龍網後，於下次採樣時將塑膠籃收集到的枯落物進行回收，之後將枯落物進行清洗並烘乾秤重，一處樣區 5 個塑膠籃內枯落物量取平均值，即可計算枯落物量(litterfall, L)(g DW m⁻² d⁻¹)。

紅樹林三樣區枯落物量皆以夏、秋季較高，春季較低，其中又以 Y05 樣區的枯落物量有明顯的季節變化(如圖 39)。枯落物組成在春季以葉子為主，高達 81%~93%，夏、秋季的枯落物組成則有較多的枝條及繁殖體(即生殖器官)，兩者在秋季時分別佔枯落物量的 9%~16%

及 34%~55%(如圖 40)。春、夏季時紅樹林繁殖體生長旺盛，又因適逢連續大雨，造成紅樹林枯落物中的枝條和繁殖體比例增加。

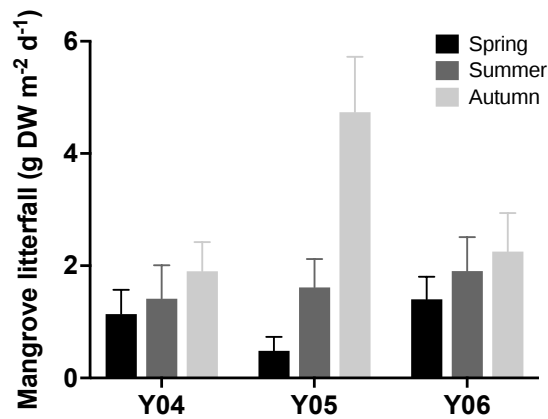


圖 39. 春、夏及秋季枯落物量

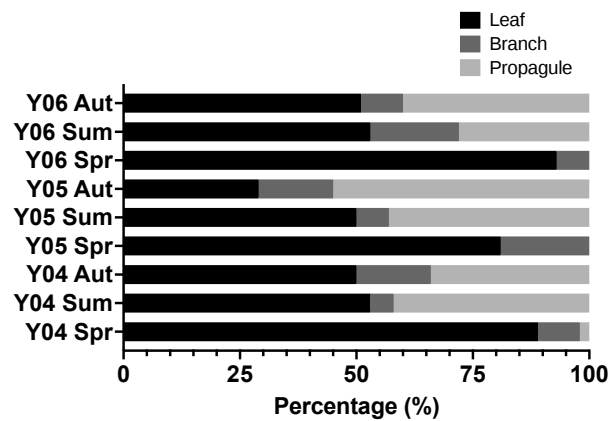


圖 40. 春、夏及秋季枯落物組成

- 紅樹林溫室氣體通量

使用微量氣體分析儀(LI-7820, LI-COR Bioscience, NE, USA)並配合密閉罩蓋法(Lee et al., 2011)測量環境溫室氣體通量。溫室氣體分別為 CO₂、CH₄、N₂O，每種氣體測量時間為 5 分鐘，測量五次重複。土壤環境中則使用 30 cm 圓形鋼圈壓入土壤中，使用長尾夾夾上透明半圓形的壓克力罩蓋使整體呈密閉，再連接管子進行抽氣測量(圖 41)。

本次研究利用透光壓克力罩蓋模擬灘地棲地底土日間狀態，利用不透光壓克力罩蓋模擬紅樹林底土夜間狀態，分別估算紅樹林底土日

間及夜間的溫室氣體通量。首先將儀器測得之數據使用直線回歸法，求得回歸方程式斜率，並帶入公式(4)作為當次採樣的每小時通量，其次再將透光壓克力罩蓋溫室氣體通量乘上日照時數、不透光壓克力罩蓋溫室氣體通量替乘上夜間時數，兩者加總即可得出整日溫室氣體通量，最後再將每日溫室氣體通量進一步換算成每季節溫室氣體通量。

$$\text{Flux} = \frac{\text{flux} \times V \times M \times 3600}{RT \times A \times 1000} \quad \text{-公式(4)}$$

Flux：溫室氣體通量($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ， $\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ， $\mu\text{g N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)

flux：回歸線斜率($\text{ppm CO}_2 \text{ s}^{-1}$ ， $\text{ppb CH}_4 / \text{N}_2\text{O s}^{-1}$)

V：罩蓋體積(L)

M：分子量(g mole^{-1})

R：理想氣體常數($0.082 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)

T：罩蓋內底土絕對溫度(K)

A：罩蓋底面積(m^2)



圖 41. 土壤溫室氣體測量示意圖

紅樹林底土日間與夜間排放三種溫室氣體結果如圖 42 所示，紅樹

林底土二氧化碳通量結果如圖 42(a)與(b)，Y04 及 Y06 的二氧化碳日間通量以夏季較高，其他三季較低，Y04 及 Y06 的二氧化碳夜間通量亦有相同季節變化。Y05 的二氧化碳日間通量的季節變化較不明顯，二氧化碳夜間通量則以夏季較高。圖 42(c)與(d)為紅樹林底土甲烷通量，Y04、Y05 及 Y06 樣區之甲烷日間與夜間通量皆以夏季較高，其他三季較低。紅樹林底土氧化亞氮通量結果如圖 42(e)與(f)，氧化亞氮日間及夜間通量以冬、春季較高，夏、秋季較低，甚至有負值表示氧化亞氮呈現吸收結果。

過去研究(Chen, 2016；Migné A, 2006)指出底土溫度會影響微生物生理代謝的活動，當溫度越高時，生物生理代謝會較快。紅樹林底土二氧化碳通量主要為底土中微生物的異營呼吸作用，紅樹林底土甲烷通量主要為底土中微生物的產甲烷作用。夏季時日間及夜間溫度較高，提高微生物的生理代謝作用，因而增加底土二氧化碳及甲烷的排放量。又因今年夏季台南市安南區適逢連續大雨，可能造成紅樹林棲地變為潮濕淹水，增加紅樹林底土的厭氧環境，並降低底土中的含氮物質，進而增加紅樹林底土甲烷通量，降低紅樹林底土氧化亞氮通量。

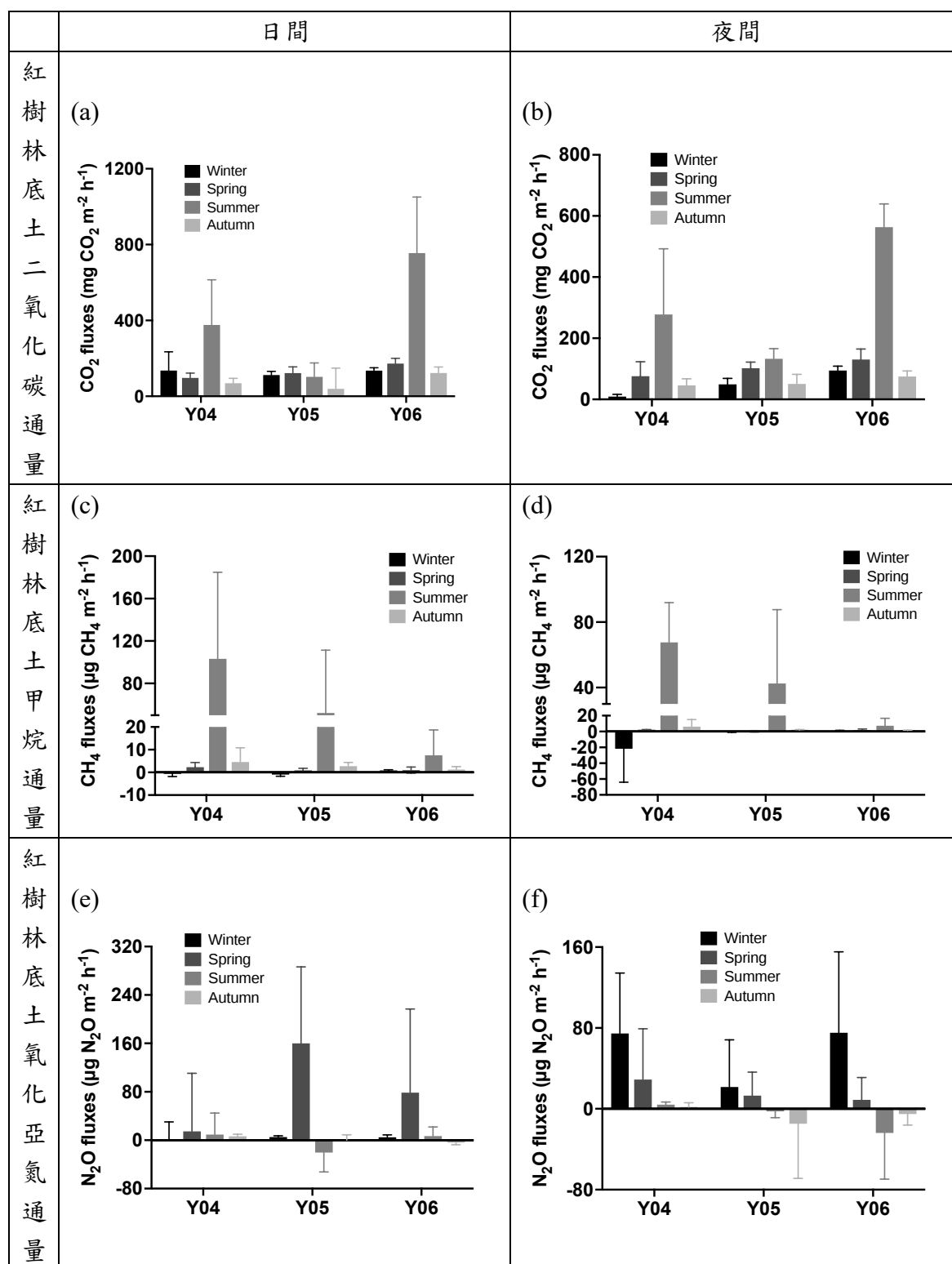


圖 42. 紅樹林底土日間與夜間溫室氣體通量

- 紅樹林碳匯估算

本計畫已完成 2023 年四季的紅樹林碳匯調查數據，並得出冬季至秋季間三季碳匯量，並以此三季碳匯量平均值推估 2023 秋季至 2024 年冬季的紅樹林地上及地下部生長量。另外以植物碳含量為 42.54% (李，2014)計算，將紅樹林地上及地下部生長量換算為二氧化碳吸收量，底土溫室氣體通量則以溫室氣體暖化潛勢(Global warming potential)換算為二氧化碳當量單位，紅樹林整年度碳匯量為 0.7637 Kg CO₂e m⁻² yr⁻¹ (表 20)，結果顯示為碳匯。

表 20. 紅樹林棲地數據及碳匯整理表

	紅樹林碳吸收量 ^A				底土碳排放量 ^B			紅樹林 碳匯 ^C (H)
	紅樹林 地上部 生長量 (A)	紅樹林 枯落物量 (B)	地上部 淨初級 生長量 (C)	地下部 淨初級 生長量 (D)	底土二 氧化碳 通量 (E)	底土甲 烷通量 (F)	底土氧 化亞氮 通量 (G)	
單位	(Kg DW m ⁻² season ⁻¹)	(g DW m ⁻² season ⁻¹)	(Kg C m ⁻² season ⁻¹)	(Kg C m ⁻² season ⁻¹)	(Kg CO ₂ m ⁻² season ⁻¹)	(g CH ₄ m ⁻² season ⁻¹)	(g N ₂ O m ⁻² season ⁻¹)	(Kg CO ₂ e m ⁻² season ⁻¹)
冬季 ~春季	0.2140	92.76	0.1305	0.0352	0.2600	0.0029	0.1179	0.3153
春季 ~夏季	0.1278	151.21	0.1187	0.0210	0.8205	0.1045	-0.0093	-0.3086
夏季 ~秋季	0.0602	269.68	0.1403	0.0104	0.1465	0.0065	-0.0058	0.4076
秋季 ~冬季 _D	0.1340	171.22	0.1298	0.0222	0.1896	-0.0082	0.0684	0.3494
紅樹林棲地年碳匯量 (Kg CO ₂ e m ⁻² yr ⁻¹)								0.7637

※備註：

^A 紅樹林碳吸收量以正值表示吸收，負值表示排放。地上部淨初級生長量為地上部生長量及枯落物量的總和(C=(A+B/1000)*42.54%)，42.54%為紅樹林生物量中碳含量的比例，地下部淨初級生長量即為地下部生長量。

^B 底土碳排放量以正值表示排放，負值表示吸收。二氧化碳、甲烷及氧化亞氮的暖化潛勢分別為 1、27 及 273。

^C 紅樹林碳匯以正值表示碳匯，負值表示碳源。碳匯量為紅樹林碳吸收量扣除底土溫室氣體排放量($H=(C+D) \times 44/12 - E \times 1 - F \times 27/1000 - G \times 273/1000$)。

^D 2023 年秋季至 2024 年冬季資料因尚未進行紅樹林生物量測量，故本計畫先以前三季數據平均值推估生長量及枯落物量；2024 年冬季尚未進行底土溫室氣體通量測量，目前先以 2023 年冬季資料作為代替。

(三) 水域棲地

水域棲地碳匯使用碳收支法計算，加總水域棲地垂直與水平碳傳輸量計算，因計畫區域內水體為封閉水體，水體交換不明顯，因此水體水平傳輸量暫不考慮。水體垂直碳傳輸通量考慮水體浮游藻類光合作用造成的碳吸存量、浮游藻類與底棲生物貢獻的呼吸作用及水體與大氣介面的甲烷排放量。水體生物代謝作用的碳傳輸量，會藉由溶氧代謝法從水體溶氧量(Dissolved Oxygen)的變化推算水體的碳通量。以下針對計畫區域內之水中溶氧代謝以及溫室氣體通量等研究方法及結果進行說明。

• 水體溶氧代謝

在水體表面設置溶氧監測儀(U26-001, HOB0)，於每季連續設置 3 至 5 天，監測水體表層約 10 公分深處的 24 小時溶氧數值，每 30 分鐘記錄 1 次，水體溶氧代謝測量示意圖如圖 44(a)所示。隨後將整日的溶氧變化結果，參考 Odum (1956)提出的溶氧代謝模式計算水體總初級生產量(Gross primary production, GPP)、系統呼吸量(Ecosystem respiration, ER)及淨系統代謝量(Net ecosystem metabolism, NEM)。根據公式(5)可求得淨系統代謝量。

$$NEM = GPP - ER \quad \text{—公式(5)}$$

圖 43 為水域棲地水體溶氧代謝四季調查結果：水體總初級生產量

(GPP)表示水體中初級生產者進行光合作用之氧氣生成量。Y03 的水體 GPP 則以春季較高、秋季較低；Y10 的水體 GPP 以夏季較高、秋季較低，Y12 的水體 GPP 在季節間的差異不大(如圖 43(a))。系統呼吸量(ER)則代表水體中自營及異營生物之呼吸作用消耗氧氣量，Y03、Y10 及 Y12 的水體 ER 趨勢變化與 GPP 相似(如圖 43(a)與(b))。淨系統代謝量(NEM)則代表水體系統光合作用產生氧氣扣除呼吸作用消耗氧氣之淨值。Y03 水體 NEM 則以春季較高、秋季較低；Y10 水體 NEM 以夏季較高、秋季較低；Y12 水體 NEM 以秋季較高、春季較低(如圖 43(c))。

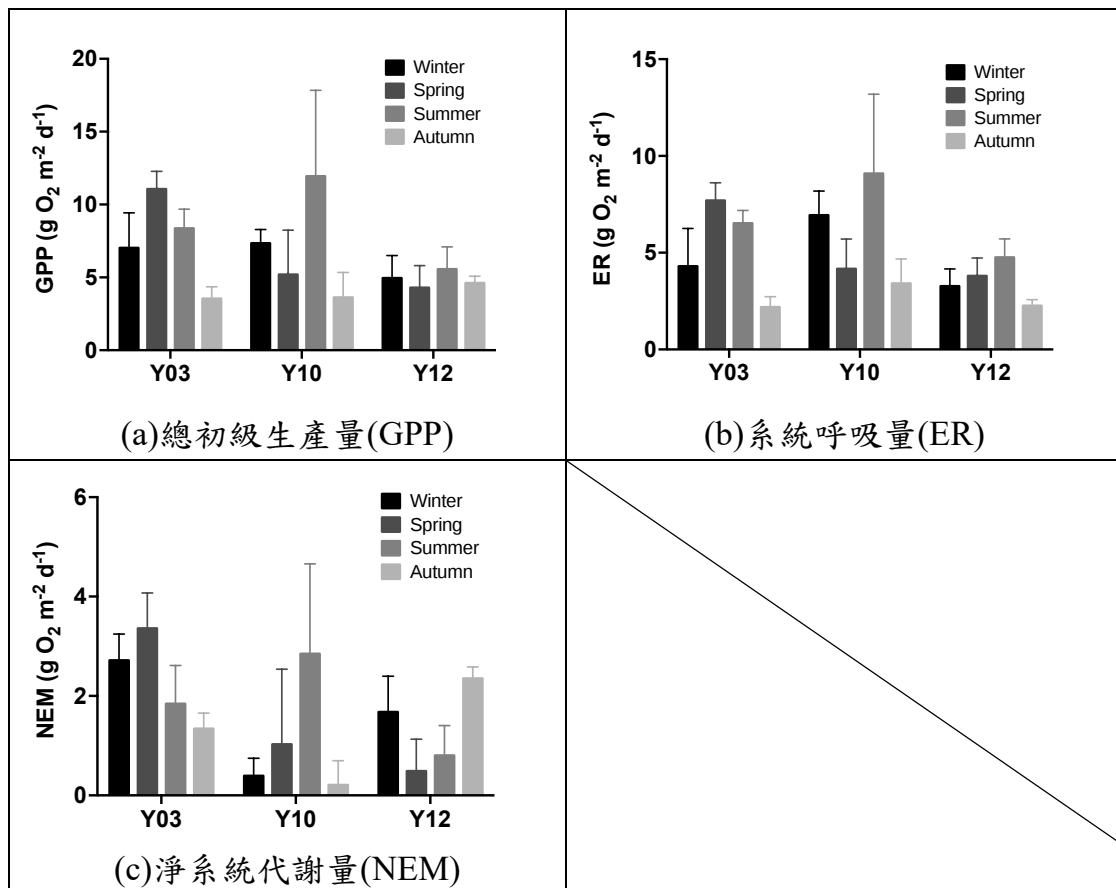


圖 43. 水域棲地水體溶氧代謝四季調查結果

- 水體溫室氣體通量

水體與大氣介面的溫室氣體通量利用浮體罩蓋法(Floating

chamber method)(如圖 44(b))進行測量，利用保麗龍作為底座，使壓克力透明半圓形罩蓋漂浮在水面上，並使用 PVC 水管固定浮體罩蓋的位置，利用管線連接甲烷/二氧化碳微量氣體分析儀(LI-7810, LI-COR)及氧化亞氮微量氣體分析儀(LI-7820, LI-COR)，測量 5 分鐘、連續 5 次時間內浮體罩蓋內溫室氣體的濃度變化，以簡單線性回歸計算固定時間內的氣體濃度變化量(ppm s^{-1})，換算水體與大氣介面溫室氣體的排放量($\text{mg CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)。

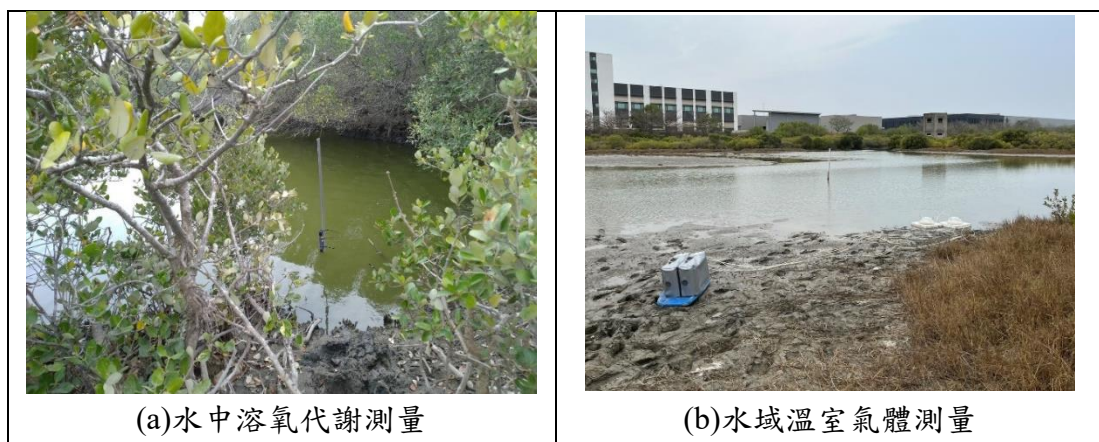


圖 44. 水域溶氧與溫室氣體測量示意圖

水域棲地水體溫室氣體通量四季調查結果如圖 45 所示。水體二氧化碳及甲烷通量趨勢相近，在 Y03、Y10 及 Y12 三測站之間皆以夏、秋季較高，冬、春季較低(如圖 45 (a)與(b))；水體氧化亞氮通量則沒有相似的趨勢變化，在 Y03 春季及 Y10 冬季有較高氧化亞氮排放量，在 Y12 冬季及夏季甚至為負值且有較高氧化亞氮吸收量。

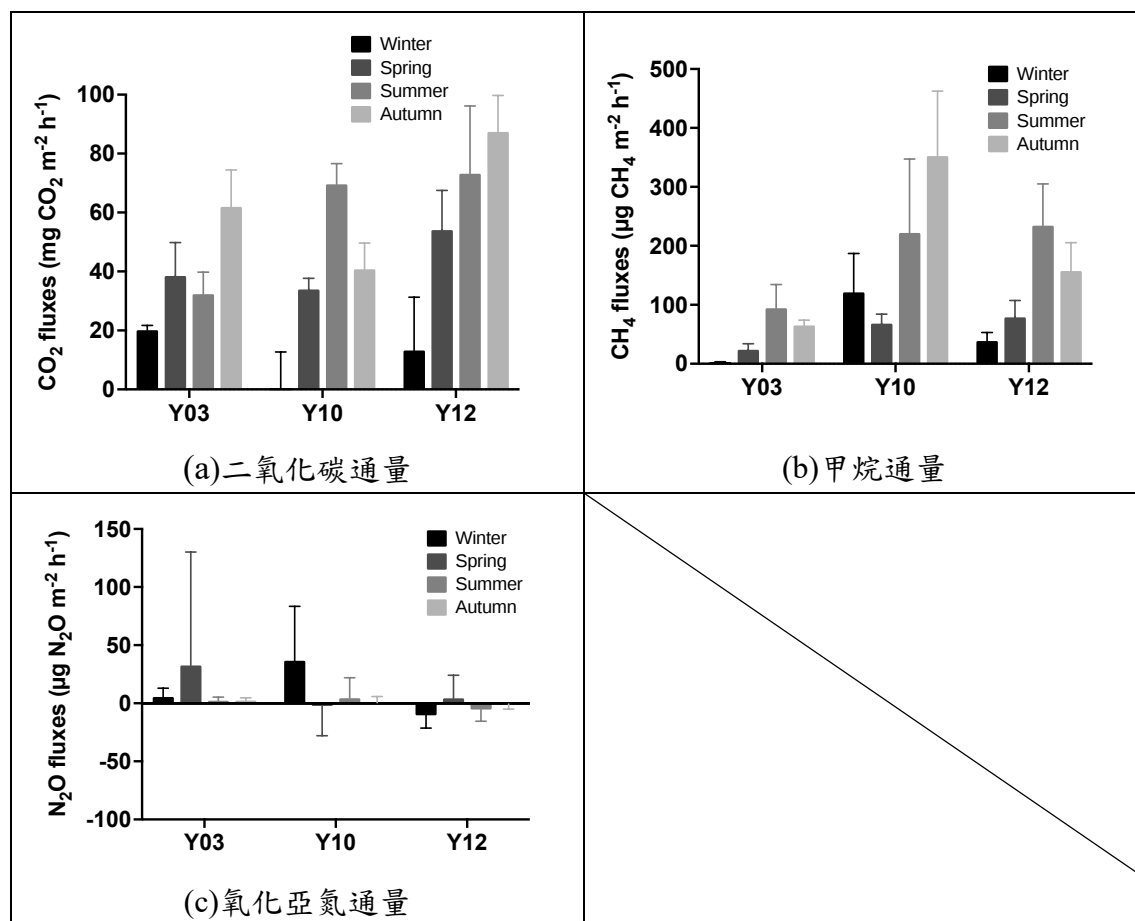


圖 45. 水域棲地四季水中溫室氣體通量

- 水域棲地碳匯估算

水域棲地碳吸收—即水域碳匯量—由水體淨系統代謝量(NEM)貢獻，透過光合作用化學式及利用光合作用商數(photosynthetic quotient)為 1.25 (Williams, 1979)，將淨系統代謝量之氧氣增加量換算為二氧化碳吸收量，視為水域棲地的碳吸收。因水體溶氧代謝測量紀錄連續 24 小時水體內各種產氧或耗氧的生物代謝過程，反之密閉罩蓋法測量水體二氧化碳通量僅為單點單次的測量結果，考量數據的完整性，本次計畫水域棲地碳匯估算不使用密閉罩蓋法的二氧化碳通量。水域甲烷及氧化亞氮通量則以溫室氣體暖化潛勢(Global warming potential)換算為二氧化碳當量單位，水域整年度碳匯量為 0.6064 Kg CO₂e m⁻² yr⁻¹ (表 21)，顯示為碳匯。

表 21. 水域棲地數據及碳匯整理表

	水體碳吸收 ^A		水體碳排放 ^B		水域碳匯 (E)
	水體淨系統 代謝量 (A)	水體二氧化碳 吸收量 (B)	水體甲烷通量 (C)	水體氧化亞氮 通量 (D)	
單位	(g O ₂ m ⁻² season ⁻¹)	(Kg CO ₂ m ⁻² season ⁻¹)	(g CH ₄ m ⁻² season ⁻¹)	(g N ₂ O m ⁻² season ⁻¹)	(Kg CO ₂ e m ⁻² season ⁻¹)
冬季	146.01	0.1606	0.1172	0.0223	0.1513
春季	151.97	0.1672	0.1254	0.0253	0.1569
夏季	171.01	0.1881	0.4050	0.0008	0.1769
秋季	120.84	0.1329	0.4181	0.0015	0.1212
水域棲地年碳匯量 (Kg CO ₂ e m ⁻² yr ⁻¹)					0.6064

※備註：

^A 水體碳吸收為水體淨系統代謝量之氧氣增加量，利用光合作用商數 (photosynthetic quotient) 為 1.25，將氧氣增加量換算為二氧化碳吸收量 ($B=A*44/(32*1.25)$)，正值表示二氧化碳吸收，負值表示二氧化碳排放。

^B 水體碳排放量以正值表示排放，負值表示吸收。甲烷及氧化亞氮的暖化潛勢分別為 27 及 273。

^C 水域碳匯以正值表示碳匯，負值表示碳源。碳匯量為水域水體淨系統代謝量的碳吸收量扣除水體溫室氣體排放量 ($E=B-C*27-D*273$)。

(四) 灘地棲地

灘地棲地碳匯以碳收支法為基礎，將灘地於垂直介面之溫室氣體的吸收和排放量加總計算。灘地溫室氣體測量方法使用密閉罩蓋法 (Migné et al., 2002)，詳細操作方法與紅樹林底土溫室氣體通量調查相同，為利用透光壓克力罩蓋與不透光壓克力罩蓋分別模擬灘地棲地底土日間與夜間狀態，利用不透光壓克力罩蓋模擬紅樹林底土夜間狀態，分別估算灘地底土日間及夜間的溫室氣體通量。

- 灘地溫室氣體通量

灘地底土日間與夜間排放三種溫室氣體結果如圖 46 所示。二氧化

碳通量結果如圖 46(a)及(b)，Y01、Y03 及 Y06 的二氧化碳日間及夜間通量於冬、春季較高，夏、秋季較低，甚至於 Y03 的夏、秋季數值呈現負數，為吸收二氧化碳測量結果；甲烷通量結果如圖 46(c)及(d)，Y01 甲烷日間及夜間通量較高，Y03 及 Y06 的甲烷日間及夜間通量較低；氧化亞氮通量結果如圖 46(e)及(f)，Y01、Y03 及 Y06 三樣區底土氧化亞氮日間通量皆以春季較高，其他三季較低，甚至於 Y06 夏季資料為負值，呈現氧化亞氮吸收的測量結果；底土氧化亞氮夜間通量則以冬、春季較高，夏、秋季較低，甚至於 Y03 及 Y06 夏季呈現氧化亞氮吸收之負值測量結果。

灘地底土二氧化碳及氧化亞氮通量於夏、秋季較低，而甲烷通量則趨向夏、秋季較高，推測由於今年夏季安南區適逢連續大雨，造成灘地夏季後含水量增加，較易形成厭氧環境，而使得底土二氧化碳通量減少，甲烷通量增加。連續大雨易降低底土中的含氮營養鹽，進而降低灘地底土氧化亞氮通量。

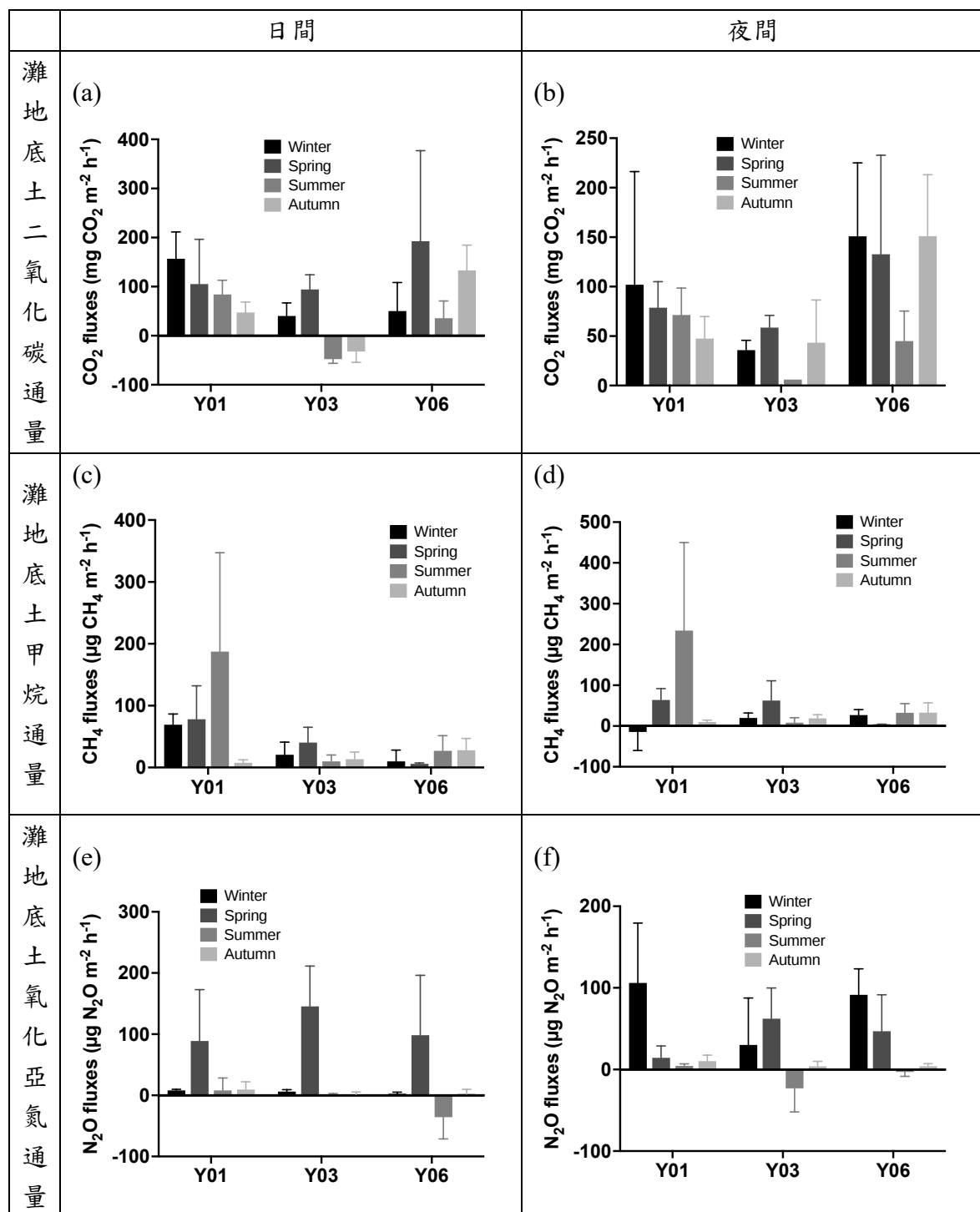


圖 46. 灘地底土日間與夜間溫室氣體通量

- 灘地棲地碳匯估算

灘地底土表層有微細藻類作為灘地棲地生產者，可以行光合作用吸收大氣中二氧化碳，但同時表層也有微生物同時進行自營與異營呼吸作用排放二氧化碳至大氣中。本研究使用密閉罩蓋法測量灘地二氧

化碳通量，測得通量結果為此兩種類微生物代謝作用淨值，因此僅列灘地二氧化碳通量。底土溫室氣體通量以溫室氣體暖化潛勢(Global warming potential)換算為二氧化碳當量單位，灘地整年度碳匯量為-0.7331 Kg CO₂e m⁻² yr⁻¹ (如表 22)，顯示為碳源。

表 22. 灘地棲地數據及碳匯整理表

	灘地 二氧化碳通量 ^A (A)	灘地甲烷通量 ^A (B)	灘地 氧化亞氮通量 ^A (C)	灘地碳匯 ^B (D)
單位	(Kg CO ₂ m ⁻² season ⁻¹)	(g CH ₄ m ⁻² season ⁻¹)	(g N ₂ O m ⁻² season ⁻¹)	(Kg CO ₂ e m ⁻² season ⁻¹)
冬季	0.1935	0.0464	0.0908	-0.2195
春季	0.2475	0.0935	0.1742	-0.2976
夏季	0.0700	0.1821	-0.0180	-0.0700
秋季	0.1419	0.0402	0.0112	-0.1460
灘地棲地年碳匯量 (Kg CO ₂ e m ⁻² yr ⁻¹)				-0.7331

※備註：

^A 灘地三種溫室氣體通量皆以正值表示溫室氣體吸收，負值表示溫室氣體排放。

^B 灘地碳匯以三種溫室氣體通量加總計算(D= -A -B×27 -C×273)，以正值表示碳匯，負值表示碳源。

六、生態系統功能及服務評估

本計畫強調生態系統組成、生態系統功能及生態系統服務之關聯。生態系統服務常用的評估方法之一為經濟價值法，包含市場價格法、條件評估法、旅行成本法、替代成本法等(農業委員會林務局，2016)，雖然可與開發價值進行比較，但容易受單價、估算方法、貨幣、利率、折現率影響。本計畫考量計畫區域基線資料之現況與工作時程，以現地調查、利害關係人訪談及狀態指標等方式，定性或定量描述功能及服務，以更確實反應其內涵，並以此為基礎建立方法性通則以提供台江國家公園管理處作為經營管理之參考依據。

本計畫根據研究計畫的地域性以及關聯性篩選出訪談的利害關係人名單完成訪談。透過生態系統功能及服務評估架構，初步列出符合計畫區域之生態系統服務，並進一步搭配 RAWES 方法以及綜合利害關係人訪談結果，辨識計畫區域特徵。同時選定 InVEST 模式子模式，利用 RAWES 評估成果、現地調查等各式資料數據，輸入 InVEST 模型進行模擬，將計畫區域內生態系統服務評估成果以空間形式呈現。透過定性及定量方式進行評估，滾動式檢討建立台江地區濕地生態系統服務評估方法論通則。以下茲就評估項目、利害關係人辨識及訪談、RAWES 方法、濕地生態系統服務評估模型、方法論通則等進行說明。

6.1 評估項目

TEEB(2010)基於千禧年生態系統評估報告，進一步將生態系統服務細分為 17 個項目，包含食物、原料、淡水、藥用資源 4 項供給服務；氣候與空氣質量的調節、碳吸收和儲存、減緩極端氣候、廢水處理、防止水土流失和土壤肥力維護、授粉、生物防治等 7 項調節服務；棲息地物種、維護遺傳多樣性 2 項支持服務；及休閒與身心健康、旅

遊、美學鑑賞和文化、藝術和設計靈感、精神的經驗和意識歸屬等 4 項文化服務。Petter et al. (2013)透過土地利用、生物多樣性、生態系多樣性、土壤粒徑分布、水文水質指標等 59 項資料集，評估並建立澳洲 South East Queensland 的 19 項生態系統功能地理分布，包含水分調節、土壤留存、氣候調節、生物棲地、遺傳資源等，發現 62%的土地同時提供 5 種以上、82%的土地同時提供 2 種以上的生態系統功能。研究結果指出，藉由地理分布進行生態系統功能分析，可進一步建立與生態系統服務之關聯，提出適當的保育策略。謝蕙蓮等人(2012)基於千禧年生態系統評估報告、TEEB 以及 The Development of an Ecosystem Services Framework for South East Queensland (Maynard et al., 2010)，列出氣候調節、生物防治、土壤形成、營養循環、農業資源、遺傳多樣性等 33 項生態系統功能並增添神聖地景、象徵地景、療癒地景及棲居地景等 4 項文化功能。生態系統服務則在調節、供給、文化服務下細分出水質品質、空氣品質、飲水、食物、美學價值、知識系統等 27 項生態系統服務。McInnes & Everard (2017)以千禧年生態系統評估報告為基礎，根據可透過現場調查與利害關係人訪談得到的結果，列出 37 項生態系統服務。以空氣品質調節為例，可以藉由觀察工廠排放、汽機車廢氣、農地揚塵判斷，或者透過「這邊是否有空氣汙染排放源？」、「濕地的環境與結構是否有助於減少空氣中的汙染物？」等利害關係人訪談歸納。

表 23. 生態系統功能及服務項目

修改自 TEEB (2010)、Maynard et al. (2010)、McInnes & Everard (2017)

	生態系統功能	生態系統服務
調節	• 氣候調節 • 穩定微氣候 • 穩定海岸線 • 洪氾調節 • 海嘯衝擊 • 土壤留存 • 營養調節 • 廢物處理 • 授粉 • 植相屏蔽	• 空氣品質 • 當地氣候 • 全球氣候 • 水資源調節 • 洪水災害 • 淨化水質 • 授粉 • 鹽度 • 火勢 • 碳吸存

	• 水循環 • 補注地下水 • 碳吸存	• 暴風災害 • 害蟲管理 • 人類疾病 • 家畜疾病 • 侵蝕調節 • 生物防治 • 可耕地 • 土壤肥沃度 • 噪音降低
供給	• 農業資源 • 漁業資源 • 木業資源 • 狩獵資源 • 燃料能源 • 水之供給 • 遺傳多樣性 • 生物棲地 • 醫藥資源	• 淡水 • 食物 • 纖維 • 燃料 • 基因資源 • 天然藥品 • 裝飾材料 • 黏土礦物 • 廢物處理 • 運輸建設
支持	• 土壤形成 • 初級生產力 • 營養循環 • 營養物留存 • 生物多樣性 • 支持其他生態系	• 土壤形成 • 初級生產力 • 營養循環 • 水循環 • 棲息地供應 • 棲息地物種 • 遺傳多樣性
文化	• 神聖地景 • 象徵地景 • 療癒地景 • 棲居地景	• 文化遺產 • 娛樂與旅遊 • 美學價值 • 精神與宗教 • 鼓舞人心 • 社會關係 • 教育與研究 • 身心健康 • 療癒性地景 • 知識系統 • 標誌性地景 • 標誌性物種 • 文化多樣性 • 靈感啟發 • 社會互動 • 地方歸屬感

表 23 彙整 TEEB (2010)、Maynard et al. (2010)、McInnes & Everard(2017)等研究對於生態系統功能及服務之項目，可以發現專家學者對於分類及項目並無一致的看法。Maynard et al. (2010)將生態系統功能定義為「生態系中發生的生物、地球化學以及物理過程或組成」，而將生態系統服務定義為「人類從自然中得到的好處」，故氣候調節歸類於生態系統提供的調節功能，但 TEEB (2010)則是將生態系統功能做為提供生態系統服務的基礎，且將生態系統服務定義為「生態系統對人類直接或間接的貢獻」，故 TEEB (2010)將氣候調節其歸類於生態系統提供的調節服務，McInnes & Everard (2017)更將其細分為當地氣候及全球氣候。又 Maynard et al. (2010)將遺傳多樣性視為供給功能，TEEB (2010)將其視為支持服務。由於 Costanza et al. (1997)為第一篇

將生態系統服務進行明確定義的文章，故本計畫依循 Costanza et al. (1997)對於生態系統功能(生物、棲地及生態系統的特性及過程)與生態系統服務(人類直接或間接地從生態系統中獲得各種利益)的定義進行分類。

6.2 利害關係人辨識及訪談

利害關係人通常能由公共政策相對應的關係進行初步盤點，再透過基本資料(如保育利用計畫、經營營運計畫)、環境因素(如法規、政策)、專案前例、專家意見等方式辨識利害關係人及建立權力關係(林沂曄，2018)。以計畫區域為例，潛在利害關係人包含內政部營建署(重要濕地主管機關)、農業委員會林務局(野生動物保護區主管機關)、台江國家公園(國家公園主管機關及重要濕地管理單位)、臺南市政府(野生動物保護區管理單位)、台灣濕地保護聯盟(前野生動物保護區受託認養管理單位)、經濟部水利署第六河川局(水利主管機關)，周邊則有農民、漁民、居民、地主、台南科技工業區、國立成功大學安南校區、媽祖宮里與顯宮國小等。考量對計畫區域地理位置以及參與程度，研究團隊經篩選且詢問利害關係人團體/單位訪談意願，擬定訪談利害關係人有(1)社團法人台灣濕地保護聯盟、(2)台江國家公園巡邏員與業務單位、(3)國立成功大學安南校區、(4)社團法人高雄市野鳥學會、(5)地方民意代表—媽祖宮里與鹿耳社區發展協會，共 5 種類別。其餘利害關係人已於 5 月 31 日至 9 月 05 日完成訪談，利害關係人訪談名單如表 24 所示。本計畫透過與利害關係人進行訪談方式，了解對計畫區域的利用，以及利害關係人對於計畫區域未來願景，進而識別計畫區域潛在生態系統功能、生態系統服務之調查監測資料。

表 24. 利害關係人訪談名單

類別	關係單位	受訪者	訪談日期
NGO 團體	社團法人台灣濕地保護聯盟	劉清榮前秘書長	112.05.31
主管機關	台江國家公園-濕地巡查員	黃奕超巡查員 邱姿儀巡查員 許隆逸巡查員	112.06.02
主管機關	台江國家公園-業務單位保育研究科	林哲宇技士	112.06.05
專家學者	成功大學安南校區	朱木壽博士	112.06.09
NGO 團體	社團法人高雄市野鳥學會	林昆海總幹事	112.06.20
地方民意代表	媽祖宮里(舊稱顯宮里)	林志英里長	112.06.28
主管機關	台江國家公園-業務單位解說教育科	高介志聘用研究員 吳秉玲環境教育教師	112.08.09
地方民意代表	鹿耳社區發展協會	蔡登進理事長	112.09.05

6.3 快速評估生態系統服務方法(Rapid Assessment of Wetland Ecosystem Services, RAWES)

(一) RAWES 方法

RAWES 方法共分為三個階段(McInnes & Everard, 2017)。首先依 RAWES 評估中建議準備(Preparation)階段選定 2 位以上研究人員，以了解 RAWES 所涵蓋之生態系統服務內涵及其對應現地指標。接續以現地評估(Field Assessment)階段透過訪談專家學者、NGO 團體、居民、鄰近計畫區位之單位團體以及台江國家公園管理處等利害關係人，參考 McInnes & Everard (2017)及 De Groot (2010)對於狀態指標之定義與建議，評估計畫區域所供應的生態系統服務。最後研究人員於資訊管理(Information Management)階段進行討論並總結現地觀察與訪談結果，

完成資料紀錄與建檔。上述三個階段流程如圖 47 所示。

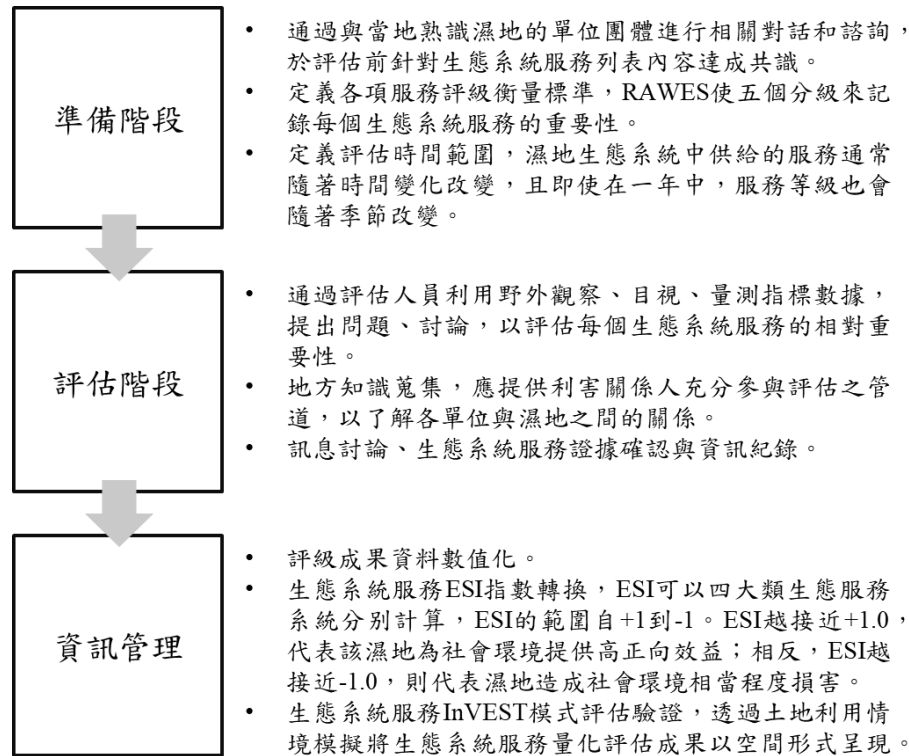


圖 47. RAWES 方法三階段方法執行流程

RAWES 方法將濕地提供之生態系統服務細分為 37 項，本計畫採用 De Groot 於 2010 年提出的狀態指標(state indicators)概念，將各項生態系統服務定義出狀態指標用來描述服務供應能力，補足 RAWES 方法忽略定量評估的情況(石心柔，2020)，擬訂計畫區域生態系統服務指標項目，並透過定性或定量評估指標，完成狀態指標資料擬定與蒐集以進行後續定量評估。計畫區域 RAWES 的狀態指標項目如表 25 所示

表 25. 計畫區域 RAWES 生態系統服務項目

生態系統服務		RAWES 的狀態指標參考
供給服務	提供淡水	提供飲用水資源、灌溉用水資源、淡水養殖資源等。
	提供食物	供應魚類，藻類等。
	提供天然材料	供應木材、纖維、稻草、動物纖維（羊毛、獸皮、筋肉、鹿角等等）

	提供燃料	供應可做為燃料使用之資源。
	提供遺傳資源	提供物種繁殖之場所，請敘明物種。
	提供觀賞資源	提供景觀觀賞資源等。
	黏土礦物資源提供	提供可供經濟使用之黏土，土壤資源，礦物資源等。
	廢物處理	提供周邊環境廢棄物、廢污水之處理場域等。
	從自然空氣或水流中獲取能量	風力發電，水力發電，太陽能發電等。
調節服務	調節空氣品質	清除由汽車排放、工廠煙囪、農地揚灰等的空氣污染物。
	調節當地氣候	利用紅樹林蔭降溫，調節當地微氣候。
	調節全球氣候	具有固碳效益之功能等。
	水調節	供水，用水，區域水體乾季保存或利用調節等。
	洪水災害調節	提供抵禦洪水之災害調節功能。
	暴風災害調節	提供抵禦颱風或海浪侵蝕之災害調節功能。
	害蟲管理	提供病蟲害抵禦之調節功能紀錄。
	人類疾病調節	提供人類疾病抵禦之調節功能紀錄者。
	動物疾病調節	提供動物疾病抵禦之調節功能紀錄者。
	植物疾病調節	提供植物疾病抵禦之調節功能紀錄者。
調節服務	土壤侵蝕調節	可提供土壤因風化、水流或其他原因侵蝕之調節功能。
	淨化水質	濕地提供之水質淨化功能。
	授粉	蜜蜂、蝴蝶、黃蜂等，為植物和農作物傳授花粉。
	鹽度調節	濕地中的淡水提供阻截鹽水的天然屏障。
	火勢調節	提供天然障礙或維持區域濕潤環境以攔截火勢蔓延等。
文化服務	噪音與視覺緩衝	濕地樹木或高蘆葦吸收及緩衝噪音的影響。
	文化遺產	濕地因有歷史或考古價值而具有重要性，例如作為傳統利用或管理實踐，或是位於國家文化景觀中等。
	休閒娛樂與旅遊	濕地因提供休閒娛樂場所上運動、游泳，或本身是旅遊景點等。
	美學價值	提供濕地美學價值。
	精神與宗教價值	提供某特定對象精神價值或宗教價值等。
	靈感價值	提供某特定對象靈感價值。
	社會關係	提供良好社會互動關係。
支	教育和研究	提供教育用途，可進行環境教育或長期研究監控之區域。
	土壤形成	沉積物沉積與有機質累積等。

持 服 務	初級生產力	當無機化合物被能量合成為有機分子促使植物生長並產生食物，進而直接成為農作物或間接作為牲畜飼料，或者成為用於喜慶活動或節日的花卉等觀賞資源。
	養分循環	農地營養物質輸入、植物內部養分循環之提供等。
	水循環	蒸發散與水之局部循環、地表水與地下水進行交換之區域等。
	棲息地提供	存在重要棲息地環境與物種，並受保育關注之地區。

(二) RAWES 方法成果

本計畫透過利害關係人與研究人員進行計畫區域生態系統服務之評估，然而由於部分利害關係人因對於計畫區域較不熟悉，抑或是訪談時間較為有限，故無法針對計畫區域提供之生態系統服務項目逐一進行評級。其餘 6 位利害關係人評級結果則利用評分者間信度(Inter-rater reliability)，以確認利害關係人與研究人員對計畫區域生態系統服務項目的內部一致性(internal consistency reliability)。

評分者間信度為將利害關係人與研究人員對於生態系統服務項目勾選與否數據化，若利害關係人或研究人員勾選某項生態系統服務項目，則該項評量成績設定為 1；反之未勾選則設定為 0。再依據美國教育心理學家李·克隆巴赫 (Lee Cronbach) 於 1951 年提出 Cronbach's alpha(α)相關係數檢驗理論，作為計畫區域是否提供該項生態系統服務之信度標準，依據 Cronbach's alpha 相關係數檢驗理論中說明， α 相關係數達 0.8 以上為良好，但應視測量性質、目的而定。根據 Nunnally(1978)提出在實際應用上 α 相關係數至少要大於 0.5。因本計畫進行 RAWES 方法評估前，已初步篩選與計畫區域關聯度較高之利害關係人，故以 α 相關係數大於 0.5 為標準。將每項生態系統服務項目勾選與否數據化的分數代入公式(6)，若某項生態系統服務項目 α 相關係數大於 0.5，則代表本計畫區域可提供該項生態系統服務。 α 相關係數評估結果如表 26 所示。

$$\alpha = \frac{N \times \bar{c}}{1 + (N-1)\bar{c}} \quad \text{公式(6)}$$

N = 關係人數

c= 代表項目 N 之間 Pearson 相關係數的平均值

表 26. RAWES α 相關係數評估結果

生態系統服務		研究人員評估	利害關係人訪談				α 相關係數
			社團法人台灣濕地保護聯盟	台江巡邏員	台江業務單位	社團法人高雄市野鳥學會	
供給服務	提供淡水				V		0.18
	提供食物		V	V		V	0.54
	提供天然材料						0
	提供燃料						0
	提供遺傳資源	V	V	V	V	V	0.9
	提供觀賞資源	V	V	V	V	V	0.9
	黏土礦物資源提供						0
	廢物處理				V		0.18
	從自然空氣或水流中獲取能量					V	0.18
調節服務	調節空氣品質	V	V	V	V	V	0.9
	調節當地氣候	V	V	V	V	V	0.9
	調節全球氣候	V	V		V	V	0.72
	水調節					V	0.18
	洪水災害調節	V	V	V	V	V	0.9
	暴風災害調節			V		V	0.36
	害蟲管理					V	0.18
	人類疾病調節					V	0.18
	動物疾病調節					V	0.18
	植物疾病調節					V	0.18
	土壤侵蝕調節	V		V	V	V	0.72
	淨化水質		V		V	V	0.54
	授粉		V	V		V	0.54
	鹽度調節		V	V		V	0.54
	火勢調節				V	V	0.36
	噪音與視覺緩衝		V	V	V	V	0.72
文	文化遺產			V		V	0.36

化 服 務	休閒娛樂與旅遊			V		V	0.36
	美學價值		V		V	V	0.54
	精神與宗教價值					V	0.18
	靈感價值		V			V	0.36
	社會關係		V			V	0.36
	教育和研究	V	V	V	V	V	0.9
支 持 服 務	土壤形成	V	V	V	V	V	0.9
	初級生產力	V	V		V	V	0.72
	養分循環	V	V	V	V	V	0.9
	水循環	V	V	V		V	0.72
	棲息地提供	V	V	V	V	V	0.9

在 RAWES 評估所列 37 種生態系統服務中，盤點 α 相關係數 0.5 以上的生態系統服務項目，代表計畫區域可提供之生態系統服務。結果顯示計畫區域具有 19 項生態系統服務。為進一步了解計畫區域內各項生態系統服務情形，請利害關係人與研究人員針對 19 項生態系統服務進行評分，評分方法採用李克特量表進行 5 個等級分級，選擇 5 表示該項生態系統服務為顯著，評分分數依生態系統服務顯著與否遞減，若評分分數為 0 表示計畫區域內生態系不具有該項生態系統服務。評分成果如表 27 所示。

從評分結果發現(表 27)，19 項生態系統服務評量分數平均值為 2.85，且有 10 項服務未達評量分數平均值，其中提供食物、授粉、鹽度調節、噪音與視覺緩衝等 4 項服務評級分數未達 2 分，可判斷利害關係人與研究人員認為其服務提供水平較低，利害關係人與研究人員均認同計畫區域內具有供給服務中遺傳資源提供與觀賞資源提供等 2 項服務；在支持服務中則認同具有土壤形成、養分循環與棲息地提供等服務；在調節服務中則認同主要具有調節空氣品質、調節當地氣候以及洪水災害調節。評估分數中總平均最高的服務為棲息地提供，平均分數高達 4.6 分，其次為教育與研究平均分數達 4.2 分，而洪水災

害調節服務平均分數也達 4 分。

表 27. RAWES 生態系統服務情形評估結果

生態系統服務		研究人員評估	利害關係人訪談				平均分數
			社團法人 台灣濕地 保護聯盟	台江 巡邏員	台江 業務單位	社團法人 高雄市野 鳥學會	
供給服務	提供食物	0	2	3	0	3	1.6
	提供遺傳資源	4	4	3	3	3	3.4
	提供觀賞資源	3	4	4	4	3	3.6
調節服務	調節空氣品質	2	3	5	2	4	3.2
	調節當地氣候	3	3	3	5	4	3.6
	調節全球氣候	2	3	0	5	3	2.6
	洪水災害調節	4	4	3	5	4	4
	土壤侵蝕調節	2	0	2	2	1	2.2
	淨化水質	0	3	0	3	4	2
	授粉	0	3	2	0	3	1.6
	鹽度調節	0	2	2	0	3	1.4
	噪音與視覺緩衝	0	2	3	2	2	1.8
文化服務	美學價值	0	4	0	4	3	2.2
	教育和研究	4	5	4	5	3	4.2
支持服務	土壤形成	3	2	5	2	4	3.2
	初級生產力	4	3	0	3	4	2.8
	養分循環	3	2	4	5	4	3.6
	水循環	3	2	4	0	4	2.6
	棲息地提供	5	4	5	5	4	4.6
總平均分數							2.85

本計畫藉由調查 110 年至 112 年鳥季期間(10 月至隔年 3 月)，在計畫區域停棲鳥類數量，並將鳥種區分為黑面琵鷺以及其他鳥種。由於 112 年適逢鳥季剛開始，故僅統計 112 年 10 月數據。根據表 9 結果顯示，水域面積於 110 年非汛期時較 111 年汛期時大，由此可推測 111 年為雨量較少的一年，使得計畫區域內水深較淺進而導致食物量不足，故 111 年黑面琵鷺數量較 110 年少。整體而言，計畫區域於鳥季時仍提供將近 4 萬隻鳥內棲息，符合 RAWES 評估結果。110-112 年鳥類停

棲數量如圖 48 所示。

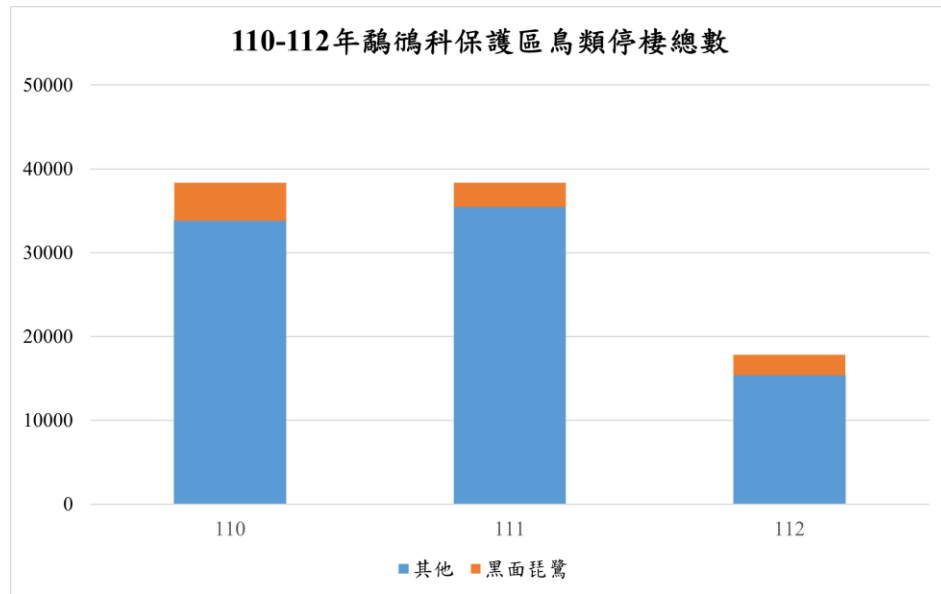


圖 48. 110-112 年鸛鵒科保護區鳥類總數

6.4 濕地生態系統服務評估模型

科學家、決策者或利益相關者等面臨生態系統服務評估問題時，常常需要於簡單或複雜評估方法中進行權衡(J. Martínez-López et al., 2019)。複雜評估方法可以針對特定地區產生較為準確的數據結果，但是會需要大量時間蒐集該地區的各式資料，故其使用上更具挑戰性且難以擴展；簡單評估方法能加快評估速度並取得定性的評估成果，但根據評估方法差異，可能無法得到定量評估結果。(J. Martínez-López et al., 2019)。濕地生態系統評估可作為理解生態發展的主要評估工具，其中模式的建立可有效預測並擴大對濕地生態的理解，以及濕地生態系對社會的幫助。藉由已建立的模式可測試對於預期模擬情境是否成立來分析檢查這些假設。

目前全球有五種廣泛運用於濕地生態系統評估之模型和工具包含，空間生態系統服務模型、生態系統清單方法、溫室氣體循環模型、流

域和水文傳輸模型、遙感和空間模型(C. Langan, 2018)。以下針對各評估模型種類進行說明。

1. 空間生態系統服務模型：以土地利用或土地覆蓋進行預測的方法，其能通過設定情境變化，檢查土地利用變化對生態系統服務的影響。常見的模式包含 InVEST、ARIES、WaterWorld、LUCI。
2. 生態系統清單方法：清單和矩陣類型方法是基於生態和環境特徵識別來預測生態系統服務之間的關係，此方法由於獨特的環境特徵需要對濕地進行整體廣泛的實地觀察，因此清單方法對局部濕地功能進行了詳細描述區域，這種方法預測能力有限，但可深入了解資源管理對生態服務系統的作用，並通過擴大評估結果來決定替代管理做法和濕地對氣候變化影響，清單評估方法包含 RAWES 與 Wet EcoServices。
3. 溫室氣體循環模型：溫室氣體模型通常對植被和土壤成分（例如生物量、植物凋落物、土壤有機質）使用數據庫的方法，並且模型模擬外部環境變量在改變不同碳庫之間的轉換率中的作用，模型結合水循環與碳循環的過程，使用土壤層和碳庫的數據、水文循環用以進行及光合作用和生產力的計算，常見溫室氣模型評估方法包含 LPJ、DNDC、Pestlands、HPM 等。
4. 流域和水文傳輸模型：流域模型廣泛用於通過模擬滲透、逕流、基流和污染物負荷來研究水文和土壤相互作用，流域建模通常在區域到全球範圍內大規模進行，以檢查政策和氣候變化對生態系統服務的影響，而不是探討特定服務因子對生態系統的影響，SWAT 和 VIC 等分布式和半分布式流域模型被廣泛用於研究水、土壤和植被在水循環中的相互作用。

5. 遙感和空間模型：因近年衛星圖像和空間數據集可用性的增加，讓新技術的快速擴展，遙感和空間模型通過繪製生物物理參數來解釋與檢查濕地生態系統服務相關的生態評估數據，例如土壤水分、植被類型、葉面積指數等，常見遙感和空間模型評估方法包含 SimGro、DRAIN MOD、WETMOD 等。

綜合上述介紹各種生態系統服務評估方法，其中以 InVEST 模型的發展最為成熟，是目前最常運用的生態系統服務功能評估模型。根據詹為巽(2019)中提及 InVEST 具有下列幾項特性與優勢：

1. InVEST 各模組可根據使用者所擁有之資料量進行模式參數設定，各項資料與參數可以透過自訂或參考官方之建議數值進行設定，依不同地區因地制宜調整參數，因此相當具有彈性可應用於各個不同國家環境。
2. 可透過模擬未來情境之數據的設定(如土地利用型不同年度間之變化)，或使用其開發之情境模擬功能，進行未來情境模擬分析以進行比較。
3. 透過結合地理資訊系統(geographic information system, GIS)，利用空間化及視覺化的方式呈現生態系服務評估結果，並可以地圖形式呈現，彌補過去生態系服務評估模型所欠缺價值評估法與空間特徵解釋，也因此 InVEST 與其他模型相比更能廣泛應用於環境相關決策。

此外，InVEST 模型具有多個子模組的特點，常被用來解決過去自然資源管理方案多關注於單一目標之限制。如 Tallis and Polasky (2009) 利用 InVEST 多個子模組，綜合評估美國威拉米特盆地以及南美洲亞馬遜河盆地生態系統服務供應與其服務間競合關係，進而模擬並選擇

最適合之自然資源管理方案；Wu et al.於 2014 年透過 InVEST 與土地利用變遷模式，採用整合方法模擬各種農林景觀保存政策，探討景觀政策調解國道 6 號興建對於南投埔里地區產生棲地破碎化之影響；王虹婷(2018)以 InVEST 模式模擬南投縣蓮華池試驗林 1995 年與 2015 年營養鹽傳輸、產水量、沉積物傳輸、碳儲存與碳封存四個服務的空間分布，同時預測 2035 年不同土地利用情境下生態系統服務的變化，提供森林經營者進行管理規劃的參考依據。

故本計畫藉由 InVEST 模型，使用彙整 RAWES 評估成果、現地調查資料以及利害關係人訪談結果等各式資料數據，選定符合計畫區域條件之子模式，將計畫區域內生態系統服務評估成果以空間形式呈現。

(一) InVEST 模型說明

InVEST 系統已發展出多種服務和多種目標功能，被用來解決過去自然資源管理方案多關注於單一目標的問題，包含產水量服務、碳儲存量服務、生物多樣性服務與土壤保持服務等。其中，InVEST 模型可模擬不同棲息地與不同土地利用情景下生態服務系統物質量和價值量變化，評估結果有助於管理與合理利用土地等自然資源、保護生物多樣性、協調生態系統保護與保護區發展之間的關係，維繫社會和自然的利益平衡。除此之外，InVEST 模型可以量化生態系統服務功能並以圖形表達出來，進而識別應優先保護區域或優先改善區域，相較其他清單式生態系統服務評估方法，所得結果更為直觀。本計畫為使用 InVEST 3.13.0 模型，其結構示意圖如圖 49 所示。

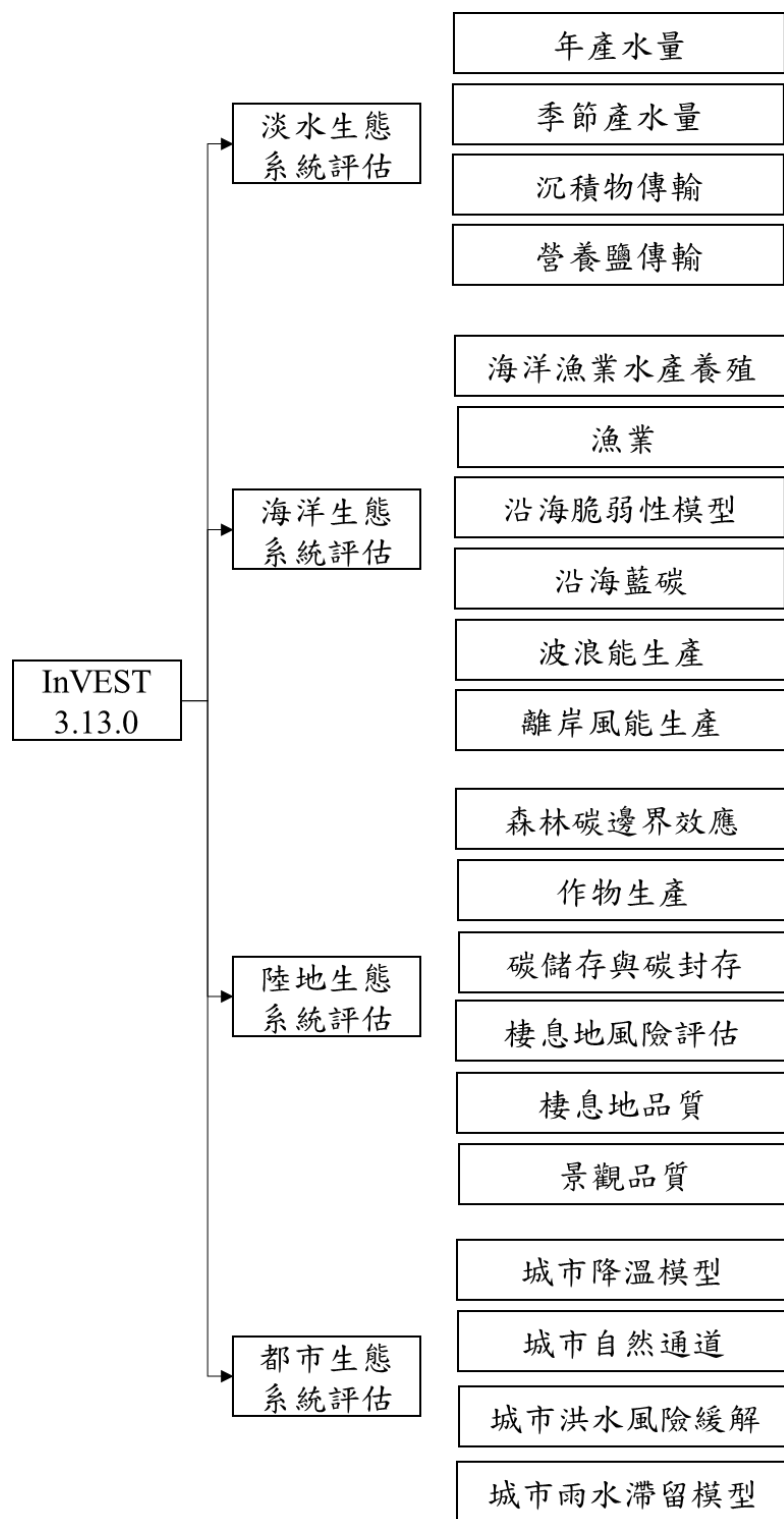


圖 49. InVEST 結構示意圖(本計畫產置)

(二) InVEST 模式建立與成果

本計畫完成計畫區域現況調查以及 RAWES 生態系統服務評估。

依據 RAWES 評分結果(表 26)顯示評分為高者為支持服務中之棲息地提供，顯示利害關係人與研究人員皆認為計畫區域內具有提供良好棲息地品質，故本計畫選用「棲息地品質(Habitat Quality)」模擬研究區域生態系統服務現況成果。

- 棲息地品質(Habitat Quality)：

將計畫區域與周遭土地利用狀況，連結環境威脅因子（如工廠、道路等），以分析整體棲息地品質空間分布，以及其受環境威脅程度。棲息地品質與威脅因子之間距離、土地使用強度有極大關聯性。高棲息地品質表示其擁有相對完整且穩定棲息地結構，反之若鄰近土地使用強度較大，則會加速棲息地品質衰退速率，藉由模擬棲息地品質好壞，以反映模擬區域生物多樣性。

InVEST 模型以網格進行運算，首先依據微棲地分類與內政部國土測繪中心國土利用現況調查成果，完成土地利用劃分，如圖 50 所示。假定不同土地利用類型受威脅因子影響的敏感度不同，敏感度越高，表示該土地越容易受外界環境影響，棲地退化的風險越大，依據不同土地利用類別，參考 InVEST 建議參數設定每種土地分類的棲息地適宜性，以及其與各環境威脅因子之相對敏感性。

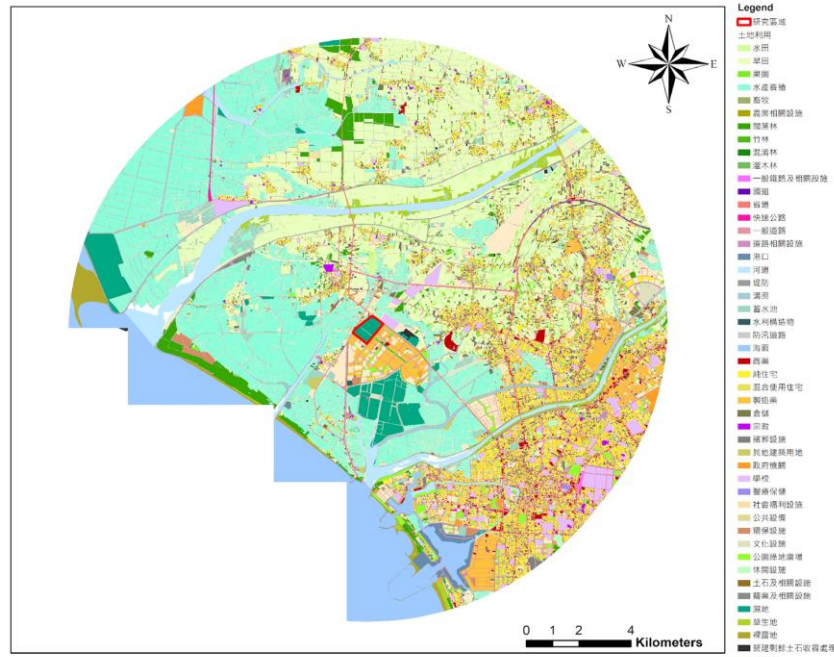


圖 50. 計畫區域半徑十公里土地使用分區(本計畫產置)

以人為活動範圍及強度定義環境威脅因子，威脅因子包含農業用地、畜牧用地、都市計畫區、公共設施用地與製造業；道路層級設定，依照計畫區域四周道路寬度與使用頻率進行分類，分為高速公路、省道、快速道路與一般道路。各環境威脅因子、最大影響距離依據 InVEST 建議參數設定，且依據各威脅因子衰減形式不同，InVEST 參數設定亦不同：若為線性距離衰減則使用公式(5)、若為指數性距離衰減則使用公式(6)，權重設置考量土地利用對自然環境產生之衝擊強度進行分配，權重數值越大表示對環境影響程度越大，影響程度隨距離增加而遞減，如表 28 所示。

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{r \max}} \right) \text{ if linear} \quad \text{公式(5)}$$

$$i_{rxy} = \exp \left(- \left(\frac{2.99}{d_{r \max}} \right) d_{xy} \right) \text{ if exponential} \quad \text{公式(6)}$$

i_{rxy} 表示在網格 y 的威脅 r 對位置 x 的環境品質網格影響， d_{xy} 是網格 x 與 y 的線性距離， $d_{r \max}$ 是威脅 r 的最大作用距離。

表 28. 威脅因子與權重比例

項次	威脅因子 Effect Factors	衰減形式	最大影響 距離(km)	權重
1	農業用地	線性距離衰減	8	0.4
2	畜牧用地	指數距離衰減	5	0.6
3	都市計畫用地	指數距離衰減	5	1
4	公共設施用地	指數距離衰減	10	0.6
5	製造業	指數距離衰減	8	1
6	港口	指數距離衰減	3	0.4
7	鐵路	指數距離衰減	5	0.6
8	高速公路	線性距離衰減	3	1
9	省道	線性距離衰減	1	0.9
10	快速道路	線性距離衰減	0.5	0.7
11	一般道路	指數距離衰減	0.5	0.6

將顯示棲息地品質好壞之指數設置於 0~1 區間內，其值越高代表環境品質越好。根據圖 51 模式評估成果指出計畫區域(紫圈處)周遭環境棲息地品質較低，是由於計畫區域緊鄰台南科技工業區。儘管如此，計畫區域棲息地品質於整體周邊環境中屬於品質良好區域，與利害關係人、研究人員以及 RAWES 評分結果相同。由於目前計畫資料僅能模擬計畫區域棲息地品質現況，未來期許能有更充足之數據資料進行計畫區域未來退化程度模擬評估。儘管目前計畫區域評估現況結果為良好，但由於計畫區域位於工業區周遭，環境品質上仍有高機率受其影響，故建立濕地長期經營策略維持棲息地品質為管理處須執行之作為。

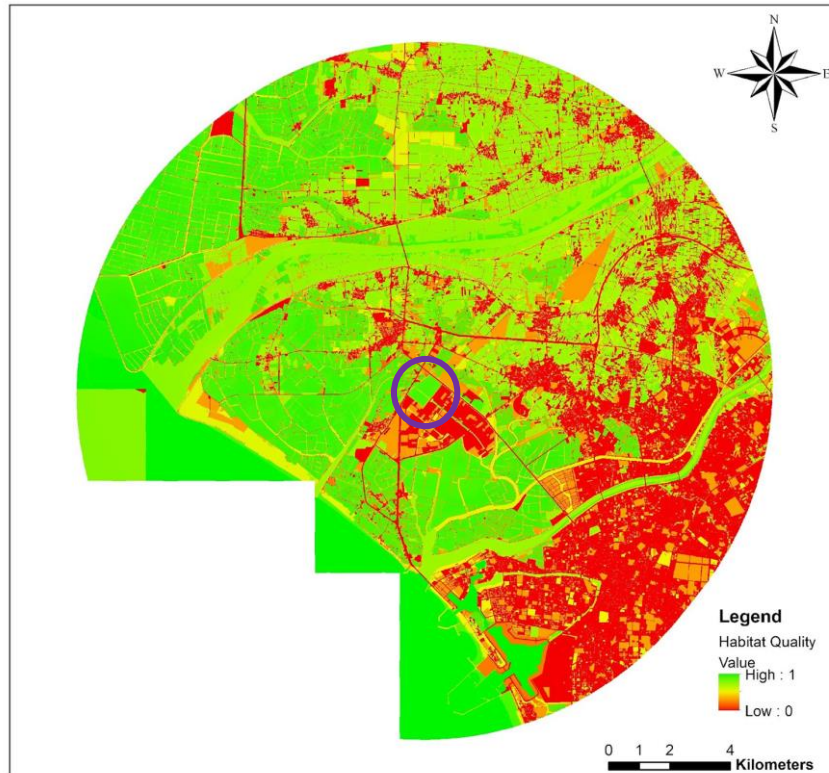


圖 51. 計畫區域半徑十公里棲息地品質好壞(本計畫產置)

6.5 方法論通則

本計畫屬生態服務評析可行性示範計畫，主要目的為藉由於鹿耳門鸕鶿科生態保護區執行之工作項目，綜整並建立具有系統性之方法論，以期許將此方法論延伸並應用至各濕地環境。

由於目前評估環境生態服務方法論眾多，面臨生態系統服務評估問題時，常常需要進行使用方法之權衡，而無論所選擇方法為何，可增進對於濕地生態系統以及濕地生態系統服務的理解，為關鍵目標。依據本計畫今年度工作經驗，計畫區域內之生態系統服務尚未被綜整辨識與了解，且若濕地具有代表性之現地調查數據資料，便能加速進行生態系統服務辨識。因此，根據本計畫對於計畫區域以及台江國家公園範圍之了解，茲建議評析一濕地生態系統服務之方法順序可為：進行現地調查為首要，其次是利用訪談利害關係人與 RAWES 方法進

行分析，最後為使用 InVEST 模式進行該濕地現況評估或未來情形預估。方法論順序流程圖如圖 52 所示。以下為方法論內容詳細說明：

1. 現地調查：濕地對於減緩與調適氣候變遷扮演重要角色，為了瞭解一個濕地實際情況與樣貌，現場調查為不可忽略之步驟，亦是整個方法論之基礎。濕地本身具有環境條件眾多，例如：水文、高程地形、碳匯功能、生態多樣性等。其中，水文是濕地生物群們食物的來源，即是造就濕地生態多樣性之重要關鍵，可利用水質儀等儀器設備定期監測；濕地中生長著多樣化植物具有提供碳匯功能，可藉由測量紅樹林生長量變化估算而得。現地調查目的除了瞭解濕地現況，調查資料也可運用於後續濕地生態系統服務評估。
2. RAWES 方法：快速評估生態系統服務方法(RAWES)，可用於跨多個空間尺度之大尺度評估，亦可適用於小尺度的現況評估。應用此方法上考慮了所有生態系服務和服務類別，從支持服務、調節服務、文化服務與供給服務，RAWES 方法以服務受益者的角度，建立一共同基線來比較生態系統服務結果。然而此方法評估基礎，需基於已經取得的大量的相關資訊與知識，且尚缺乏對生態系結構與服務之間複雜關係以及生態過程與服務發揮與保育之間聯繫的科學解釋。儘管如此，此方法評估原則明確，應用簡單，且評估速度相對較其他方法更加快速，為本計畫使用之原因。
3. InVEST 模型模擬評估：InVEST 模式以土地利用為分析基礎，透過結合地理資訊系統，利用空間化及視覺化的方式呈現生態系服務評估結果，並可以地圖形式呈現，彌補過去生態系服務評估模型所欠缺的價值評估法與空間特徵解釋。模式優勢是可

以透過模擬未來情境數據的設定，進行未來情境模擬分析以進行比較；評估結果視覺化與未來情境可模擬性是 InVEST 與其他模型相比更能廣泛應用於環境相關決策的原因(詹，2019)。然而，在針對土地利用變化較小，區域土地利用種類單一的環境，較難精確展現可視化生態服務水準的差異，因此模式適用於大尺度或跨時空的生態服務系統評估，模式評估仰賴子模式的開發，目前可針對淡水生態系、陸地生態系、海洋生態系及都市生態系進行評估，但針對文化服務中，教育與研究、歷史價值等尚缺乏評估工具，因此評估結果尚無法涵蓋完整生態服務系統。

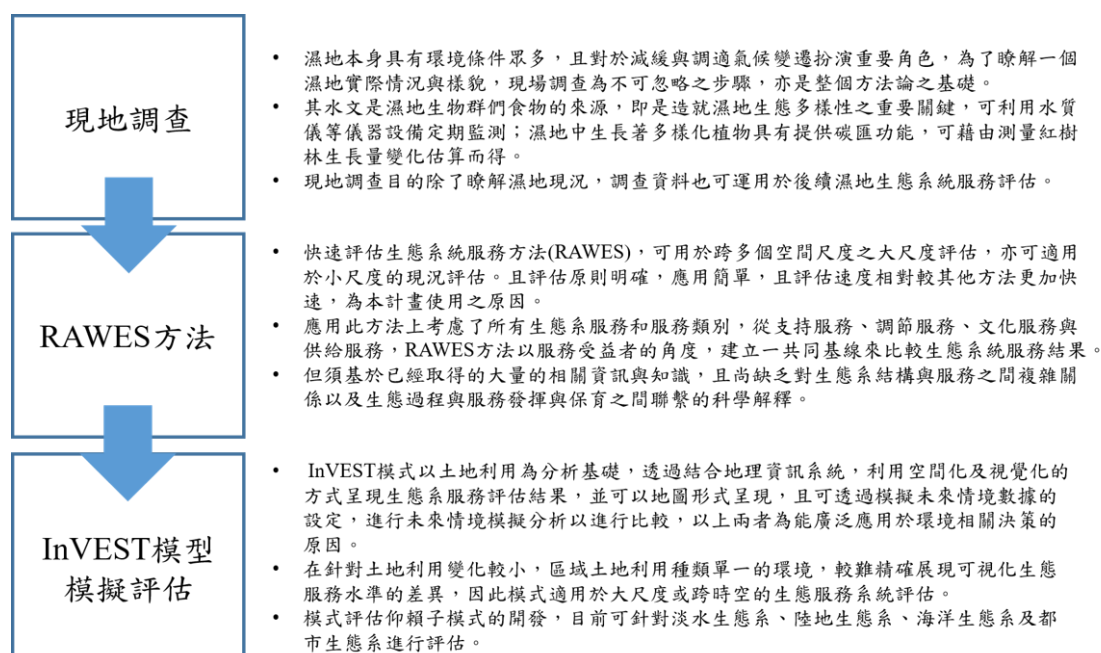


圖 52. 方法論順序流程圖(本計畫產置)

然而現地調查仍須根據經費等資源多寡、經營管理策略等條件決定調查之面向以及優先順位；而 RAWES 方法雖為拉姆薩爾公約所認定之辨識方法(McInnes & Everard, 2017)，但僅提供快速評估，仍需要更多科學研究資料以及更細節之現地調查資料加以補充，並持續滾動調整；另 InVEST 模型受限於模式本身輸入參數假設，故每一個使用

者須了解每一個子模式所代表之意義以及應用方式。本研究使用 InVEST 模型中一子模型「棲息地品質(Habitat Quality)」作為範例。綜合上述結果，本計畫所提出之濕地生態系統服務之評析方法可作為未來台江國家公園範圍內評估參採之依據，惟生態系統服務為一個動態過程，仍需要長時間監測並滾動調整，以提出長期調整策略。

七、氣候變遷減緩及調適能力

面對氣候變遷威脅，2012 年行政院經濟建設委員會(現為國家發展委員會)為因應氣候變遷的調適措施，進行能讓風險最小化的決策。為健全與提升國家調適能力，降低社會脆弱度，並建立我國整合性的運作機制，以作為政策架構與計畫推動的實施基礎，爰訂定「國家氣候變遷調適政策綱領」。隨著氣候變遷造成影響日遽嚴重，我國更進一步於今年(2023)三讀通過將《溫室氣體減量及管理法》修正為《氣候變遷因應法》，明定我國應在 2050 年達成溫室氣體淨零排放。此法針對溫室氣體(二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)、氫氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)、六氟化硫(SF₆)、三氟化氮(NF₃)及其他經中央主管機關公告者)之排放進行規範，為未來氣候治理主要法源基礎，明定主管機關淨零排放權責、分階段徵收碳費等。

根據 Sweet et al. (2017)指出 2050 年全球海平面於理想情況可能會上升 0.34 公尺，極端情況會上升 0.63 公尺；而 2100 年海平面上升於理想情況可能達 1.00 公尺，極端情況可能達 2.50 公尺。此外，氣候變遷亦是威脅濕地存續重要因素之一，也是濕地復育與管理不可迴避的重要課題（張睿昇與戴昌鳳，2003；Erwin, 2009）。位於臺灣西南沿海地帶，且擁有大面積濕地之台江國家公園，隨著氣候變遷影響加劇，將導致海平面上升、生物多樣性降低、低地淹沒、濕地喪失與海岸線侵蝕等衝擊，皆為管理處必須因應之課題。為了因應氣候變遷帶來之影響，本計畫使用現地調查之碳匯結果以及 RAWES 分析結果，評估計畫區域氣候變遷減緩與調適能力。並搭配台江國家公園管理處於 107 年度「台江國家公園計畫（第一次通盤檢討）」，提出適合計畫區域之減緩與調適長期策略建議。最後，檢視計畫區域現況之減緩與調適能力，並以氣候變遷風險評估為基礎，提出長期減緩及調適策略。

然而，氣候變遷減緩及調適，亦需要藉由教育扎根與風險辨識，讓更多人瞭解氣候變遷的嚴重性以及減緩及調適的重要性。本計畫透過蒐集國內與計畫區域環境相似的科教、科研活動，同時藉由與濕地學會合作於 9 月 2 日辦理紅樹林碳匯工作坊（參見附錄四）之經驗，評析計畫區域設置科研基地可行性並提出建議。

7.1 減緩與調適能力現況描述

經濟部水利署(2020)利用東石、將軍等潮位站進行統計，結果顯示嘉義、臺南沿海平均每年上升 0.55-0.58 公分。若依照此趨勢發展，2050 年累積上升量將達 0.17 公尺，2100 年累積上升量更達 0.45 公尺。除此之外，臺南沿海屬於沙丘沙岸性質，地質強度較弱，容易受到事件影響導致地貌大幅改變(經濟部水利署,2013)。除了嘉義、臺南沿海受影響之外，氣候變遷亦是威脅濕地存續重要因素之一，是在濕地復育與管理方面不可迴避重要課題(張睿昇與戴昌鳳,2003;Erwin,2009)。

由於台灣氣候於時間及空間皆有高度變異性，尚無法精準預測氣候變遷下對於計畫區域之影響。依據 TCCIP 預測，在溫室氣體極高排放情境下（AR6 SSP5-8.5），計畫區域所處之台南市安南區，其 2050 年年均溫預計達 26.4℃，較 2021 年提高 2℃，如圖 53 所示；同樣情境下，年均雨量變化不如 2021 年前劇烈，但整體略為上升，如圖 54 所示。而就颱風事件最大 24 小時累積雨量進行分析，事件極端平均雨量自基期(1979 年-2008 年)至世紀末(2075 年-2099 年)逐步呈現增加趨勢(如圖 55)；根據圖 56 指出，台南地區最大 24 小時累積雨量整體趨勢自沿海往內陸遞增，且約介於 10%至 50%。而本計畫區位約介於 0%至 10%(圖 56，黃圈處)。綜上模擬結果皆顯示在氣候變遷影響下，不僅整體年均溫度增加，事件導致之淹水或短時降雨強度亦會同步提升。

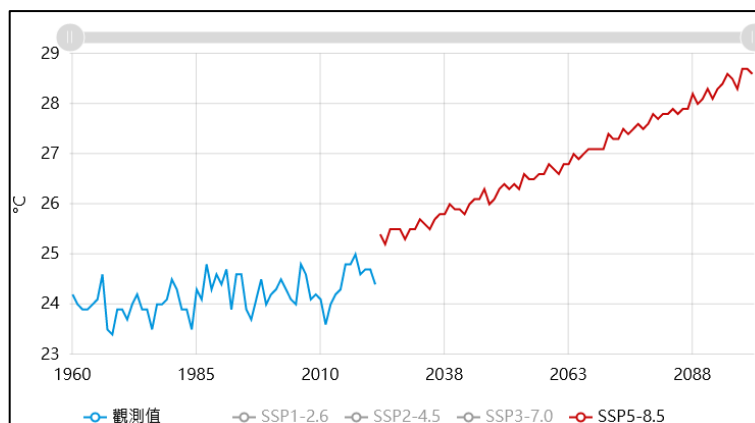


圖 53. 台南市安南區年均溫趨勢圖

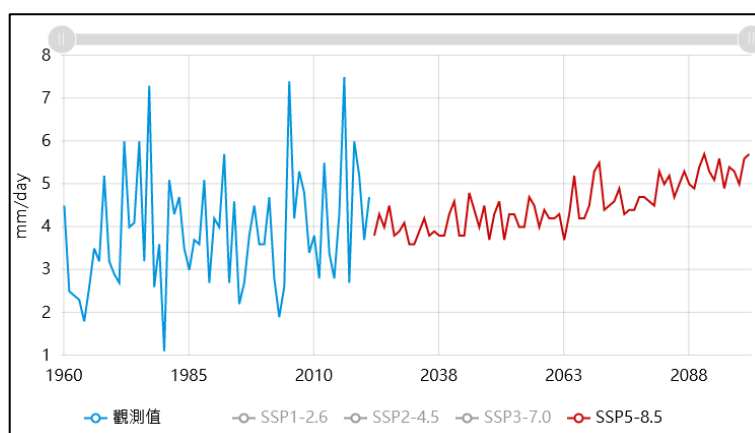


圖 54. 台南市安南區年均雨量趨勢圖

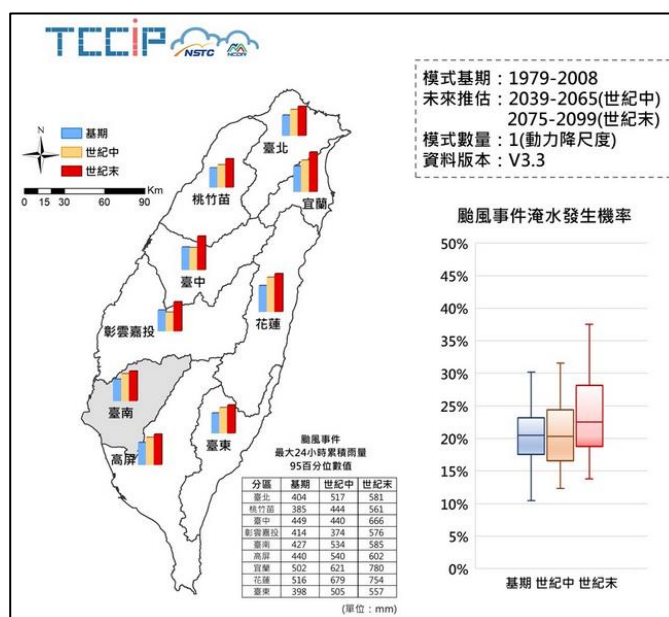


圖 55. 台南市颱風事件淹水發生機率

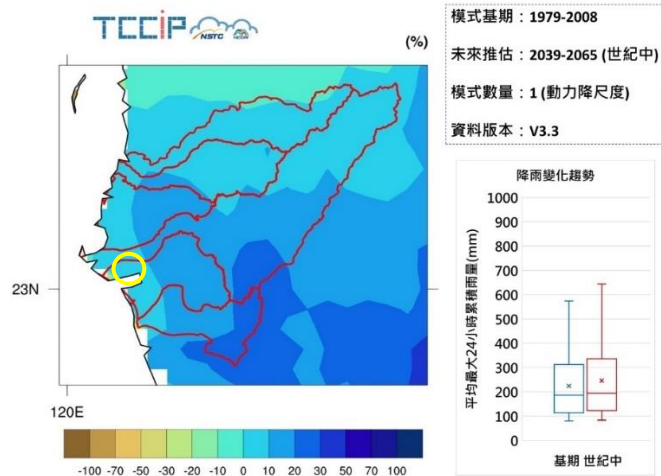


圖 56. 台南市世紀中最大 24 小時累積雨量

為理解海平面上升影響西南沿海之七股區域溢淹範圍與深度變化，圖 57 為引用本計畫主持人於今年相關研究成果，在不考慮海堤的情形下，目前海平面、海平面上升 1.0 公尺，以及 50 年與 100 年重現期共四種情境之七股區域假想溢淹範圍與深度圖。根據 50 年與 100 年重現期兩者比較，無論是目前海平面或海平面上升 1.0 公尺其溢淹範圍皆無太大變化，然而，海平面上 1.0 公尺造成之溢淹深度，亦會同步造成溢淹範圍深度增加 1.0 公尺左右。由此可知，台江國家公園及周邊範圍未來將受到氣候變遷的衝擊影響，應及早於減緩與調適策略上作出因應。

有關氣候變遷減緩，行政院環境保護署 2021 年《中華民國國家溫室氣體排放清冊報告》中，提出國有林地每年約 22 百萬公噸二氧化碳當量貢獻比率，但對於濕地生態系的能力則付之闕如，故本計畫研究成果中之碳匯能力可於減緩策略上作出貢獻。而有關氣候變遷調適，本計畫範圍之生態系統服務功能具有調節空氣品質、調節當地氣候、調節全球氣候、洪水災害調節、土壤侵蝕調節、淨化水質、授粉、鹽度調節、噪音與視覺緩衝等功能，其中洪水災害調節亦可對未來溢淹情境的調適策略作出貢獻。

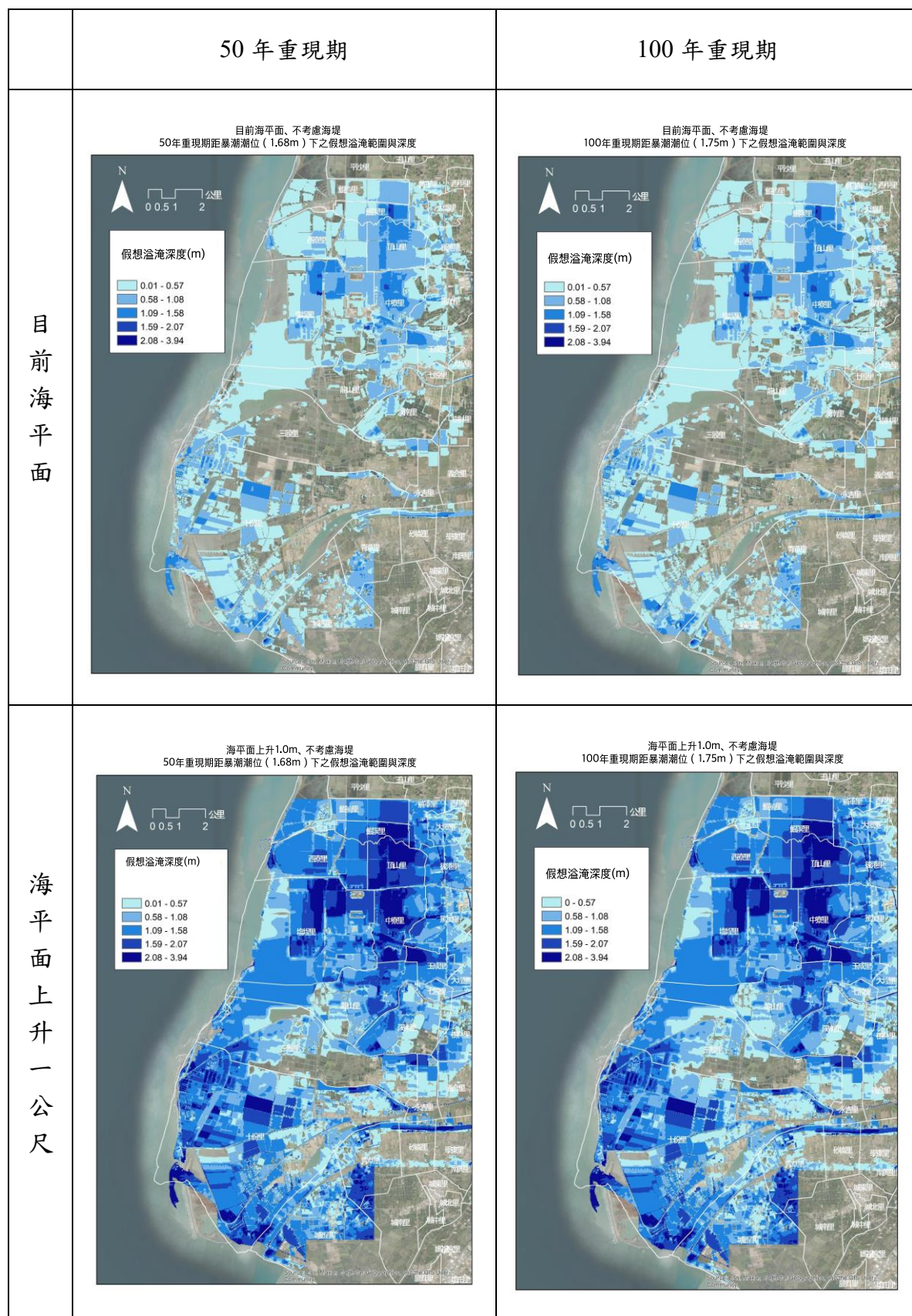


圖 57. 七股區域假想溢淹範圍與深度圖(資料來源：成功大學永續水環境研究

室)

7.2 減緩與調適能力長期策略

台江國家公園位於臺灣西南沿海地帶，隨著氣候變遷影響加劇，將導致海平面上升、生物多樣性降低、低地淹沒、濕地喪失與海岸線侵蝕等衝擊，皆為管理處必須因應之課題。為了因應氣候變遷帶來之影響，台江國家公園管理處於 107 年度「台江國家公園計畫（第一次通盤檢討）」，將氣候變遷課題納入考量，其相關因應策略條列如下：

1. 減緩策略

- (1). 區域合作增加實質保護面積與生態功能，檢討擴大保護區之範圍，增加碳匯面積，協助減輕溫室氣體之影響。同時協助區外自然生態環境復育工作，提昇河川生態健康品質。
- (2). 鼓勵既有聚落社區進行綠色更新，包括綠能的應用與生活方式的改變，以減少碳排。
- (3). 改善園區公共交通運輸服務，推動低碳低耗能運具，強化區域步道連結，限制私人汽機車之使用，以減少溫室氣體排放。並推動綠色建築與基礎服務設施之更新，降低建築設計營建與公共設施之能耗。

2. 調適策略

- (1). 減少非氣候性壓力來源：棲地破碎化或消失、污染、強勢物種的入侵，會減少自然系統對於氣候變遷的耐受度與適應力。減少相關因素，可強化自然系統的耐性。
- (2). 強化保護區之生態性功能與生物多樣性：健康、生物多樣性高的生態系統對有助於減緩氣候變遷的影響。生物的耐候性可藉由保護多種生態功能族群、族群中的種類、以及其數量之多樣性而強化。

- (3). 強化重要棲息地與其緩衝區之串聯：改善棲息地的串聯以利於物種遷徙，以因應氣候變遷。
- (4). 積極施行管理手段與復育策略：施行可有效促成物種、棲息地，以及生態系統對適應氣候變遷能力之策略。例如復育相關物種，種植耐候性高之植栽、移入增加相關物種的數量等。
- (5). 強化環境監測：對於未來的氣候變遷以及管理策略的有效性總是有很高的不確定性，因此必須進行對於施行策略對於生態系統之影響及其健康的監測。

濕地是台江國家公園的重要特色之一，濕地生態系也為氣候變遷提供減緩與調適功能。本計畫使用今年度碳匯量調查與估算結果初步評估計畫區域因應氣候變遷減緩能力，並根據表 26 結果盤點計畫區域內所具有調節服務項目，以做為未來管理處執行氣候變遷調節策略之參考。

(一) 減緩能力作為長期策略基礎

根據台江國家公園管理處於 107 年度「台江國家公園計畫（第一次通盤檢討）」減緩策略中指出，增加碳匯面積能夠協助減輕溫室氣體之影響。計畫區域內具有豐富紅樹林植被，藉由計算紅樹林棲地之碳匯量，以評估計畫區域因應氣候變遷減緩能力。

紅樹林棲地碳匯量為兩季節差值扣除土壤異營性呼吸作用排出二氧化碳後所得(Kira and Shidei, 1967)。然而，2023 年秋季至 2024 年冬季資料因尚未進行紅樹林生物量測量，故本計畫先以前三季數據平均值推估紅樹林生長量及枯落物量；2024 年冬季尚未進行底土溫室氣體通量測量，故先以 2023 年冬季資料作為代替，將兩者數據相減以推估冬季之碳匯量數據。

從表 29 結果指出三處棲地碳匯量總和為正值，表示今年度計畫區域調查範圍結果總計為碳匯系統。其中灘地棲地每季結果皆為負值；水域棲地每季結果則皆為正值；紅樹林棲地僅夏季因適逢連續大雨，造成欖李紅樹林生長環境改變，以致於紅樹林生長量降低，使得夏季結果呈現負值(碳源系統)，但整年度紅樹林棲地結果仍為碳匯系統。建議未來紅樹林區域可透過增加欖李的種植密度，增加紅樹林的碳匯量。灘地棲地則可增加種植耐鹽耐旱植物，增加碳吸收量。水域部分若能增加耐鹽植物，亦可增加水域區域的碳匯量。

考量到計畫區域特殊性及濕地環境間差異性，本計畫調查之三處類型棲地碳匯係數，相關數值僅適用於本區域內進行估算氣候變遷減緩能力，不建議其他濕地直接引用估算。未來建議逐步建立適用臺灣本土紅樹林異速生長方程式，並對不同區域濕地碳匯係數執行現地調查，避免高估或低估濕地碳匯功能，

表 29. 本年度計畫區域棲地調查之碳匯量

棲地 類型	面積 (m ²) ^C	碳匯量 ^B				
		(Kg CO ₂ e m ⁻² season ⁻¹)				(Kg CO ₂ e m ⁻² yr ⁻¹)
		冬季	春季	夏季	秋季	全年
紅樹林 (欖李)	67,078	0.3493 ^A	0.3153	-0.3085	0.4074	0.7637
水域	231,530	0.1513	0.1569	0.1769	0.1212	0.6064
灘地	81,420	-0.2195	-0.2976	-0.0700	-0.1460	-0.7332
年碳匯量總和						131,930.1166

※備註：

^A2023 年秋季至 2024 年冬季資料因尚未進行紅樹林生物量，故先以春至秋季，三季數據平均值推估生長量及枯落物量；2024 年冬季尚未進行底土溫室氣體通量測量，目前先以 2023 年冬季資料作為代替，並推估冬季季系統生產量。

^B 碳匯量結果若是正值為碳匯系統、負值為碳源系統。

^C 為使用無人機空拍結果，並以 Arc GIS 進行人工判釋後估算出面積，故與 NDVI 判釋結果不同。

(二) 調適能力作為長期策略基礎

氣候變遷對於整體環境帶來影響已是昭然若揭，除了減緩其影響下，如何具備相應調適策略亦是不容忽視。本計畫根據表 27 結果確認計畫區域調節服務項目中，具有調節空氣品質、調節當地氣候、調節全球氣候、洪水災害調節、土壤侵蝕調節、淨化水質、授粉、鹽度調節、噪音與視覺緩衝等共 9 項功能。

由於氣候變遷調節成效需要投入大量人力與時間，持續進行監測與調查，由於本計畫期程僅為一年，僅先根據表 30 提及氣候變遷課題，擬定計畫區域之減緩與調適因應對策，亦建議管理處於後續國家重要濕地保育利用計畫再檢討時也可納入考量。氣候變遷因應對策如表 30 所示。

表 30. 氣候變遷因應對策

國家公園計畫提及因應策略		計畫區域因應對策
減緩	增加碳匯面積	維持或增加紅樹林碳匯能力
	群落社區綠能更新	非本計畫內容
	園區低碳交通與綠建築	非本計畫內容
調適	減少非氣候性壓力來源	提昇本濕地生態系統品質與韌性
	強化保護區之生態性功能與生物多樣性	提昇濕地生態品質，強化其生態系統服務功能並提高其生物多樣性
	強化重要棲息地與其緩衝區之串聯	維持或營造適宜棲地，以作為園區其他海岸濕地之補充或替代棲地
	積極施行管理手段與復育策略	依功能分區及經營目標並考量成本效益以執行經營管理及復育措施
	強化環境監測	持續監測工作並依策略目標增加監測項目

考量氣候變遷響影包括年均氣溫持續上升、年均雨量與淹水機率皆逐漸增加等因素，再加上未來海平面上升趨勢，以及西南沿海地區每逢大潮皆面臨淹水課題。因此本計畫提出針對各濕地之長期經營建議策略。首先須辨識不同階段之生態系統服務功能優先順序，以作為

各階段經營管理工作主軸設定，例如：以氣候變遷減緩功能方面，須著重維持紅樹林生長，以提供碳匯功能；以社會所關心的防洪減災方面，則應維持足夠滯洪面積及可管控的水門設施；以生物多樣性及維持西南沿海濕地生態廊道（特別是黑面琵鷺等候鳥）方面，則除了透過水門調控適宜水質與水深，以及足夠感潮量能之外，同時需要考量不同生物需求，檢討是否適時抑制紅樹林生長以分配不同面積棲地環境。

綜合上述內容，本計畫針對計畫區域長期經營管理之建議操作方式有三項，一是利用水門設施的管控來發揮濕地滯洪減災的功能，同時調控水位為不同鳥類提供適宜水深，在台灣已獲得實證案例（Kuo & Wang, 2018；黃仲安，2022；Wang, Salim & LePage, 2023），因此藉由水門設施控管，以調節濕地內水位深度，創造不同鳥類棲息適宜棲地，或是調節氣候變遷造成之惡化水質與暴雨時之洪汛漫淹；二則是管理紅樹林生長與分佈，以提供碳匯功能及創造合適生物棲息環境，進一步提高濕地生物多樣性。三則是將本濕地作為未來長期科研基地。

濕地長期經營原則若能兼具促進生態系統服務功能最大化，以及經營管理之成本效益地小化、增進自然過程，即是理想中最佳長期經營策略。本計畫建議策略目標與操作方式如下：

1. 水門設施維護管控

- (1). 調節濕地內適宜鳥類棲息的水位深度
- (2). 調節氣候變遷可能造成的水質惡化
- (3). 調節暴雨時流域洪汛漫淹

2. 紅樹林分布

- (1). 管理紅樹林生長提供碳匯
- (2). 管理紅樹林分布以提高生物多樣性，並創造受氣候變遷影響

而劣化濕地之替代棲地

除了上述提及策略外，本計畫參考本團隊王筱雯教授研究室另案於今年 9 月 21 日於臺南市七股區辦理之「2023 海岸環境規劃參與式工作坊」部分成果，對於因應氣候變遷極端氣候下海平面上升之調適策略包含迴避、撤退、順應、保護。惟海岸地區規劃應就整體作通盤考量，但也需思考各地區的差異性與不同需求而因地制宜，且各執行單位與部門間應協調溝通。除此之外，若透過長期持續地科學研究與環境教育，並將科學化資料轉化為口語，同時作視覺化呈現，有助民眾與部門相互理解與溝通。

7.3 科研基地評估

(一) 國內科研基地案例

濕地提供之生態系統服務在近年來受到許多關切，故關於濕地科研教育議題也受到重視，其中濕地科研教育包含了科學教育與社會教育，藉由提供良好的棲地觀察與研究環境，培養並提高民眾科學素養的教育，使參與者了解科學概念、訓練科學方法、培養科學態度、精進國內科學研究成果與培育科學人才。

計畫區域東側緊鄰科技五路，交通來往便利，東北隅有木製賞鳥亭、西南隅有貨櫃屋組成的工作站及生態監測塔等硬體資源，可進一步活化作為西南海岸濕地尺度的共用科研基地，包含管理機關、保育團體與學術機構交流、野生動物緊急救護、實驗儀器設備、觀測資料管理、教育解說、實作課程等用途。國內有許多濕地保護、科研監測和宣傳教育工作，藉由參考國內對於濕地所辦理之科研教育基地與計畫案例，作為後續計畫區域推行科教或科研基地評估參考，如表 31 所示。

表 31. 國內濕地科研教育活動

序號	場域	濕地類型	科研教育活動名稱	特色與目標效益
1	關渡自然公園	自然溼地	濕地小天使	透過與地方特殊教育學校或機構、國民中學、國民小學特殊教育班或資源班在校學生結合，引領學生探索自然鳥類認識植物。
2	陽明山國家公園	自然溼地	森生不息—七星公園夢幻湖	夢幻湖是國家重要濕地，同時也是很精彩的戶外聆聽教室。平時夢幻湖生態保護區僅供教學及研究人員申請進入及陽明山國家公園管理人員維護管理時進入，湖邊設有眺望平台供民眾觀賞湖區自然生態使用。然後透過夢幻湖環境教育活動，讓民眾跟隨解說員的腳步，沿著步道探訪多樣性的森林生態，觀察國寶級植物—臺灣水韭的棲地，眺望大臺北盆地，透過多面向的接觸，享受來自大自然最原始的交響樂。
3	奧萬大自然教育中心	人工溼地	水水奧萬大	奧萬大自然教育中心中的生態池是台灣第一座中海拔人工濕地，孕育著許多的動植物，透過科學調查的方式，探索奧萬大的水域生態系的奧妙，進而認識棲地重要性
4	舊鐵橋濕地教育園區	人工溼地	濕地生態教室	人工濕地具有豐富生態系統，能讓學員藉由濕地體驗觀察，瞭解濕地生態演變，同時濕地遭受過氣候變遷極端氣候影響，使生態系統嚴重遭受破壞，經由這些歷程讓學員瞭解濕地對生態保育的重要性，以及認識濕地中之動物、植物。同時培養學員尊重生命及了解生命的價值與重要性。
5			認識大地的腎臟	介紹人工濕地種類及功能作用，並以現地場址讓學員瞭解並體驗人工濕地之功能與效益，幫助學員認識濕地水質淨化過程，讓學員瞭解人工濕地水質淨化效益。同時讓學員動手量測體驗水體品質。藉由濕地體驗觀察，瞭解濕地水質淨化功能，讓學員能更容易瞭解水污染防治重要性。

(二) 科研基地初步評估及規劃

圖 58 為彙整現地調查資料、RAWES 分析結果、與濕地學會合作辦理紅樹林碳匯工作坊之經驗，依照 SWOT 分析理論(優勢(Strength)、劣勢(Weakness)、機會(Opportunity)與威脅(Threat))分類結果。計畫區域內優勢為擁有豐富紅樹林等自然生態資源，但仍有硬體設備不足、野狗或移工擅入等劣勢與威脅條件須納入考量。若未來管理單位想進一步推廣與擴大辦理科研或科教活動規模，建議可和多單位/團體合作或是與企業或學校進行結合。整體而言，計畫區域雖然還有許多需要調整與改善的部分，但具有成為科研以及科教基地之潛力。

STRENGTHS	WEAKNESSES
• 生態豐富 • 交通便利 • 能近距離貼近自然 • 紅樹林及碳匯等科教資源便利 • 能有實際操作的機會	• 離室內教室太遠 • 人性化硬體設備不足 • 人為活動太多可能會影響當地生態 • 環境太過於悶熱 • 某些區域人力無法進入
• 可與多個單位合作 • 課程設計可以更貼近學員生活 • 可與企業結合，推廣企業培訓 • 與國高中學習歷程結合 • 改善通風問題	• 紅樹林增生，將使棲息地快速陸化 • 野狗或外籍移工擅入 • 棲地食物來源不穩定，可能會影響生態多樣性
OPPORTUNITIES	THREATS

圖 58 計畫區域 SWOT 分析

本計畫根據 SWOT 分析結果、參與受眾、教育與研究分類提供科研/科教基地初步課程規劃。若年齡為國高中以下，考量其體力以及知識廣度尚不充足，課程內容以教育為主要規劃方向，課程天數以半日或至多一日，並以單次參與為主；如果參加者為大學生/研究生、社會人士，其背景多為在相關領域進修或工作，故課程內容以研究為方向為主，課程天數可拉長至一日以上，以便更深入了解計畫區域之本質，且學員們可以多次參與，了解計畫區域不同時間點樣貌。初步課程規劃內

容詳細結果如表 32 所示。

表 32. 計畫區域初步課程規劃

教育 ←————→ 研究		
受眾	民眾(國高中以下)	大學生/研究生、社會人士
課程 內容	1. 濱海植物觀察 2. 簡易水質檢測 3. 鳥季賞鳥 4. 濕地的前世今生 5. 生態系統服務介紹 6. 濕地周邊廢棄物調查 7. 濕地日攝影或寫生	1. 水位、流速測量 2. 生物調查(鳥類、魚類含甲殼類、底棲、藻類及紅樹林等) 3. 碳匯調查 4. 生態系統服務盤點 5. 微棲地協作(爬蟲、昆蟲)
課程 天數	半日或一日	一日至三日以上
參與 次數	僅一次	可重複參加

八、結論與建議

本計畫透過文獻資料收集彙整、現地調查及利害關係人問卷調查，盤點及評析計畫區域現況之生態系統服務，以及藉由實地調查計畫區域之碳匯功能，評估其氣候變遷減緩能力。

為評析計畫區域內環境現況特性，劃分各類型微棲地以及盤點及評析計畫區域所提供之生態系統服務，本計畫利用衛星影像以 NDVI 及 NDWI 判釋水域、植被以及裸露地在計畫區域內面積大小及分布情形，並比較 2018 年與 2022 年水域與植被的變化，發現植被約增加了 17%計畫區域面積，且集中在水陸交界處，研判增生的植物類型為紅樹林居多；高程測量則根據現地環境條件，分為人力可進入的區域(Y01 至 Y08)與無法進入的區域(Y09 至 Y19)，人力可進入的區域以人工方式利用 VBS-RTK 配合電子全站儀進行測量，而人力無法進入的區域則使用攝影測量。整合上述調查資料、無人機空拍照及利害關係人問卷調查結果，並根據不同區域所受之週期性潮汐、降雨等因素影響，將計畫區域內三種微棲地類型細分為屬於水域之潮溝與鹽沼水域；屬於植被之紅樹林植被與淡水草澤；其餘未被歸類區域則為泥質灘地。

水文為驅使濕地的發展及功能的重大角色之一，水環境提供濕地中生物棲息之環境，而水循環牽動了水體的交換，並為生物提供了食物的來源。本計畫使用壓力式水位計、水尺、水質儀等設備，以人工方式測量水深、水溫、pH 值、導電度、鹽度、懸浮微粒等資料，以了解計畫區域內水文與水質變化情形。本計畫亦利用紅樹林生長量變化、溫室氣體排放測量等方式，調查計畫區域碳匯功能。本計畫已完成一年四季不同棲地類型碳匯功能調查，四季調查結果總和為正值（131,930.1166 Kg CO₂e yr⁻¹），

顯示今年度計畫區域為碳匯系統。

除了藉由現地調查瞭解計畫區域環境現況之外，本計畫根據計畫區域地理位置以及參與程度篩選出訪談的利害關係人名單，並已完成利害關係人訪談，進一步透過生態系統功能及服務評估架構。利用 RAWES 評估本計畫範圍之生態系統服務功能，評估結果分數中總平均最高的服務為棲息地提供，平均分數高達 4.6 分，其次為教育與研究平均分數達 4.2 分，而洪水災害調節服務平均分數也達 4 分。同時利用 InVEST 空間分析，分析結果儘管目前計畫區域評估現況結果為良好，但由於計畫區域位於工業區周遭，環境品質上仍有高機率受其影響，故建立濕地長期經營策略維持棲息地品質為管理處須執行之作為。

氣候變遷減緩及調適，需要藉由教育的力量向下扎根，來讓更多人瞭解氣候變遷的嚴重性以及減緩及調適的重要性。本計畫業已蒐集國內與計畫區域環境相似的科教、科研活動，利用現地調查資料、RAWES 分析結果，再加上工作坊學員們實際參與工作坊之心得分享，並搭配工作坊前後測問卷回饋進行 SWOT 分析，發現計畫區域雖然還有許多需要調整與改善的部分，但具有成為科研以及科教基地之潛力。

鑑於前述調查研究成果，本計畫建議如下：

1. 由於目前台灣沒有屬於台灣欖李之異速生長方程式，故本計畫現階段為引用外國文獻計算紅樹林碳匯，然而鑑於外國環境條件仍與台灣環境條件仍有所不同，故建議後續仍須建立屬於台灣之欖李紅樹林異速生長方程式。
2. 紅樹林具有碳匯功能，已成為氣候變遷減緩策略考量手段之一，建議盤點國家公園內各種紅樹林分布範圍，同時建立本地不同紅樹林樹種

之異速生長方程式及碳匯能力，以彰顯國家公園內紅樹林生態系回應氣候變遷衝擊的貢獻。

3. 儘管目前計畫區域評估現況結果為良好，但由於計畫區域位於工業區周遭，環境品質上仍有高機率受其影響，故建立濕地長期經營策略維持棲息地品質為管理處須執行之作為。
4. 利用本濕地作為生態系統服務功能評析之示範性研究，已獲得不少成果，建議以本計畫成果作為基礎建立系統性方法論，考量各方法之限制條件據以因地制宜適用於台江國家公園範圍內之各種生態環境。
5. 因應氣候變遷衝擊，回應上位法制規定與計畫，妥善管理提昇濕地生態品質，建議考量水門設施維護管控作為，增進濕地生態系統服務功能，包括創造生物棲息環境、確保良好水質及維護防洪功能等，以回應氣候變遷調適策略。
6. 濕地生態環境為台江國家公園重要特色之一，也是全國惟二國際級重要濕地的所在地，面對氣候變遷衝擊，建議考量紅樹林的減緩功能之餘，同時兼顧濕地內各項重要生態系統服務功能不偏廢。
7. 計畫區域內之生態系統服務功能，其棲地功能已獲得驗證，而科學研究與環境教育功能仍有待彰顯，建議利用本濕地作為台江國家公園科研基地之一，推動有特色的科研活動。

參考文獻

- Adame, M. F., Santini, N., Tovilla, C., Vázquez-Lule, A., Castro, L., & Guevara, M. (2015). Carbon stocks and soil sequestration rates of tropical riverine wetlands. *Biogeosciences*, 12(12), 3805-3818.
- Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual review of marine science*, 6, 195-219.
- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon management*, 3(3), 313-322.
- Alongi, D. M., Murdiyarso, D., Fourqurean, J. W., Kauffman, J. B., Hutahaean, A., Crooks, S., . . . Fortes, M. (2016). Indonesia's blue carbon: a globally significant and vulnerable sink for seagrass and mangrove carbon. *Wetlands Ecology and Management*, 24, 3-13.
- Assessment, M. E. (2005). *Ecosystems and human well-being: wetlands and water*: World resources institute.
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological monographs*, 81(2), 169-193.
- Bloom, A. A., Palmer, P. I., Fraser, A., Reay, D. S., & Frankenberg, C. (2010). Large-scale controls of methanogenesis inferred from methane and gravity spaceborne data. *Science*, 327(5963), 322-325.
- Bridgham, S. D., Megonigal, J. P., Keller, J. K., Bliss, N. B., & Trettin, C. (2006). The carbon balance of North American wetlands. *Wetlands*, 26(4), 889-916.
- Chen, G. C., Chen, B., Yu, D., Tam, N. F. Y., Ye, Y., & Chen, S. Y. (2016). Soil

greenhouse gas emissions reduce the contribution of mangrove plants to the atmospheric cooling effect. *Environmental Research Letters*, 11(12).

Chmura, G. L., Anisfeld, S. C., Cahoon, D. R., & Lynch, J. C. (2003). Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global biogeochemical cycles*, 17(4).

Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., . . . Paruelo, J. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *nature*, 387(6630), 253-260.

Daily, G. C. (1997). Introduction: What Are Ecosystem Services? Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. In: Island Press. Washington, DC: Gretchen C. Daily.

Davoudi, S., Crawford, J., & Mehmood, A. (2009). *Planning for climate change: strategies for mitigation and adaptation for spatial planners*: Earthscan.

De Groot, R. S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., & Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological complexity*, 7(3), 260-272.

Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature geoscience*, 4(5), 293-297.

Gardner, B. (2015). A review and analysis of the use of 'habit' in understanding, predicting and influencing health-related behaviour. *Health psychology review*, 9(3), 277-295.

Goldsmith, S. T., Carey, A. E., Lyons, W. B., Kao, S.-J., Lee, T.-Y., & Chen, J.

- (2008). Extreme storm events, landscape denudation, and carbon sequestration: Typhoon Mindulle, Choshui River, Taiwan. *Geology*, 36(6), 483-486.
- Kira, T., & Shidei, T. (1967). Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the western Pacific. *Japanese Journal of Ecology*, 17(2), 70-87.
- Kuo, P. H., & Wang, H. W. (2018). Water management to enhance ecosystem services in a coastal wetland in Taiwan. *Irrigation and Drainage*, 67, 130-139.
- Lal, R. (2008). Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 815-830.
- Langan, C., Farmer, J., Rivington, M., & Smith, J. U. (2018). Tropical wetland ecosystem service assessments in East Africa; A review of approaches and challenges. *Environmental Modelling & Software*, 102, 260-273.
- Lee, L.-H., Hsieh, L.-Y., & Lin, H.-J. (2011). In situ production and respiration of the benthic community during emersion on subtropical intertidal sandflats. *Marine Ecology Progress Series*, 441, 33-47.
- Li, S. B., Chen, P. H., Huang, J. S., Hsueh, M. L., Hsieh, L. Y., Lee, C. L., & Lin, H. J. (2018). Factors regulating carbon sinks in mangrove ecosystems. *Global Change Biology*, 24(9), 4195-4210.
- Lin, W. J., Lin, C. W., Wu, H. H., Kao, Y. C., & Lin, H. J. (2023). Mangrove carbon budgets suggest the estimation of net production and carbon burial by quantifying litterfall. *Catena*, 232.
- Liu, C., Lu, M., Cui, J., Li, B., & Fang, C. (2014). Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 20(5), 1366-1381.
- Maynard, S., James, D., & Davidson, A. (2010). The Development of an

- Ecosystem Services Framework for South East Queensland. *Environmental Management*, 45(5), 881-895.
- McInnes, R. J., & Everard, M. (2017). Rapid Assessment of Wetland Ecosystem Services (RAWES): An example from Colombo, Sri Lanka. *Ecosystem Services*, 25, 89-105.
- McLachlan, J. (1961). The effect of salinity on growth and chlorophyll content in representative classes of unicellular marine algae. *Canadian Journal of Microbiology*, 7(3), 399-406.
- Migné, A., Davoult, D., Spilmont, N., Menu, D., Boucher, G., Gattuso, J. P., & Rybarczyk, H. (2002). A closed-chamber CO₂-flux method for estimating intertidal primary production and respiration under emersed conditions. *Marine Biology*, 140(4), 865-869.
- Migné, A., Davoult, D., Spilmont, N., Ouisse, V., & Boucher, G. (2016). Spatial and temporal variability of CO₂ fluxes at the sediment-air interface in a tidal flat of a temperate lagoon (Arcachon Bay, France). *Journal of Sea Research*, 109, 13-19.
- Mitsch W.J., G. J. G. (2007). *Wetlands*, 4th ed.: Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.
- Mitsch, W. J., Bernal, B., Nahlik, A. M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C. J., . . . Brix, H. (2013). Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape ecology*, 28, 583-597.
- Mitsch, W. J., Zhang, L., Stefanik, K. C., Nahlik, A. M., Anderson, C. J., Bernal, B., . . . Song, K. (2012). Creating wetlands: primary succession, water quality changes, and self-design over 15 years. *Bioscience*, 62(3), 237-250.
- Nam, V. N., Sasmito, S. D., Murdiyarso, D., Purbopuspito, J., & MacKenzie, R. A. (2016). Carbon stocks in artificially and naturally regenerated mangrove

ecosystems in the Mekong Delta. *Wetlands Ecology and Management*, 24, 231-244.

Nelson, E., Mendoza, G., Regetz, J., Polasky, S., Tallis, H., Cameron, D. R., . . . Shaw, M. R. (2009). Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), 4-11.

Odum, H. T. (1956). PRIMARY PRODUCTION IN FLOWING WATERS. *Limnology and Oceanography*, 1(2), 102-117.

Olila, O., & Reddy, K. (1993). Phosphorus sorption characteristics of sediments in shallow eutrophic lakes of Florida. *Archiv für Hydrobiologie*, 45-65.

Perera, K. 2012. Carbon retention capacity of two mangrove species, *Bruguiera gymnorhiza* (L.) Lamk. and *Lumnitzera racemosa* Willd. in Negombo estuary, Sri Lanka. Faculty Grad. Stud. Univ. Kelaniya 1:56–70.

Prow, N. A., Tan, C. S. E., Wang, W. Q., Hobson-Peters, J., Kidd, L., Barton, A., . . . Bielefeldt-Ohmann, H. (2013). Natural Exposure of Horses to Mosquito-Borne Flaviviruses in South-East Queensland, Australia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(9), 4432-4443.

Roulet, N. T. (2000). Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto Protocol: Prospects and significance for Canada. *Wetlands*, 20(4), 605-615.

Saunders, M., Jones, M., & Kansiime, F. (2007). Carbon and water cycles in tropical papyrus wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, 15, 489-498.

Schuwirth, N., Borgwardt, F., Domisch, S., Friedrichs, M., Kattwinkel, M.,

- Kneis, D., . . . Vermeiren, P. (2019). How to make ecological models useful for environmental management. *Ecological Modelling*, 411.
- Seo, S.-N. N., Mendelsohn, R., & Munasinghe, M. (2005). Climate change and agriculture in Sri Lanka: a Ricardian valuation. *Environment and development Economics*, 10(5), 581-596.
- Suratman, S., Jickells, T., Weston, K., & Fernand, L. (2008). Seasonal variability of inorganic and organic nitrogen in the North Sea. *Hydrobiologia*, 610, 83-98.
- Swart, R., Bergamaschi, P., Pulles, T., & Raes, F. (2007). Are national greenhouse gas emissions reports scientifically valid? *Climate Policy*, 7(6), 535-538.
- Sweet, W., Hamlington, B., Kopp, R. E., Weaver, C., Barnard, P. L., Bekaert, D., . . . Zuzak, C. (2022). *Global and regional sea level rise scenarios for the United States*. Retrieved from
- TEEB, R. O. (2010). Mainstreaming the Economics of Nature. *TEEB Geneva, Switzerland*.
- Whalen, S. (2005). Biogeochemistry of methane exchange between natural wetlands and the atmosphere. *Environmental Engineering Science*, 22(1), 73-94.
- Williams, P. J. B., Raine, R. C. T., & Bryan, J. R. (1979). Agreement between the c-14 and oxygen methods of measuring phytoplankton production - reassessment of the photosynthetic quotient. *Oceanologica Acta*, 2(4), 411-416.
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of sensors*, 2017.
- Zedler, J. B. (2003). Wetlands at your service: reducing impacts of agriculture at the watershed scale. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(2), 65-72.

行政院經濟建設委員會 (2012)，國家氣候變遷調適政策綱領。

朱木壽 (109)，台江國家公園生態多樣性棲地水土環境營造調控試驗示範計畫。台江國家公園管理處委託辦理計畫。

中華民國綠野生態保育協會 (2018)，辦理海岸資源調查案第二期計畫。內政部營建署。

林沂曄 (2018)，專案利害關係人分析之研究－以地方政府勞務專案為例。

王虹婷 (2017)，不同時期土地利用生態系服務價值之比較評估。

中華民國野鳥學會 (2022)，2022 黑面琵鷺全球同步普查結果。

內政部 (2018)，20 公尺網格數值地形模型資料。

內政部 (2018)，台江國家公園計畫(第 1 次通盤檢討)計畫書。

內政部 (2018)，四草重要濕地(國際級)保育利用計畫書。

內政部土地測量局(2006)，e-GPS 衛星基準站即時動態定位系統 VBS-RTK 定位測試成果報告。

王筱雯 (2019)，七股鹽田濕地水文生態環境永續管理計畫。台江國家公園管理處委託辦理計畫。

玉山國家公園管理處，科研成果，<https://www.ysnp.gov.tw/FileList/C004100>

石心柔 (2020)，太陽光電開發對鹽田濕地生態系統服務影響性評估。國立成功大學水利及海洋工程學系研究所碩士學位論文。

交通部氣象局，觀測資料查詢，<https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp>

行政院 (2022)，《溫室氣體減量及管理法》修正草案。

何昕家、葉凱翔、蔡宜佳、黃天麒、李妮庭、蔡政惠、舒玉 (2020)，臺灣國家公園科學研究教育推展規劃案。玉山國家公園管理處委託辦理計畫。

李欣輯 (2020)，從氣候變遷資料應用到調適知識的 TCCIP。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫成果交流會，臺灣臺北，2020 年 11 月 27 日。

林幸助、陳琦玲、陳添水 (2018)，106-107 年度重要濕地碳匯調查計畫。

內政部營建署城鄉發展分署委託計畫。

邱祈榮、林俊成（2017），森林生態系服務面面觀。科學發展，529 期。

國家發展委員會、行政院環境保護署、經濟部、科技部、交通部、內政部、行政院農業委員會、金融監督管理委員會（2022），2050 淨零排放政策路徑藍圖。

張家豪（2012），七家灣溪壩體移除對河相演變之探討。國立成功大學水利及海洋工程學系研究所碩士學位論文。

經濟部中央地質調查所，地質資料整合查詢圖台，
<https://gis3.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/t3/index1.cfm>

經濟部水利署（2010），鹽水溪排水系統-鹽水溪排水及安順寮排水治理計畫。

經濟部水利署（2015），第三代淹水潛勢圖。

經濟部水利署（2015），鹽水溪治理計畫(含支流荳拔林溪)。

經濟部水利署（2019），韌性水城市評估地方政府首長參考手冊。

經濟部水利署（2020），臺南市一級海岸防護計畫。

經濟部水利署（2021），近海水文年報，中華民國一一〇年臺灣水文年報。

經濟部水利署水利規劃試驗所（2007），紅樹林疏伐操作參考手冊。

經濟部水利署，2013，台南海岸侵蝕原因及防護設施改善對策研究(八掌溪口至曾文溪口)-

臺南市政府（2011），鹿耳門排水系統治理計畫。

臺南市政府（2020），臺南市四草野生動物保護區保育計畫書(修正版)

臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台，調適百寶箱，
<https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ark.aspx>

行政院環境保護署（2017），國家因應氣候變遷行動綱領。

行政院環境保護署（2018），中華民國國家溫室氣體排放清冊報告。

行政院環境保護署（2021），中華民國國家溫室氣體排放清冊報告。

謝宗欣(2019)，台江國家公園植物資源調查，台江國家公園管理處委託辦理計畫。

謝蕙蓮、錢玉蘭、李培芬、吳珮瑛、陳義雄(2012)，淡水河生態系之服務機制、價值評估及效益移轉--水域食物網之功能損失分析、現存生態價值評估與復育之應用(I)。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。

李世博(2014)，台南七股紅樹林碳收支模式。國立中興大學生命科學系碩士學位論文。

黃心潔(2020)，福德坑環保復育公園生態系統服務之經濟價值分析。國立台灣大學環境工程學系碩士學位論文。

張睿昇、戴昌鳳(2003)，全球變遷對海岸濕地的衝擊與生物群聚的應變。全球變遷通訊雜誌，37，p.11—16

詹為巽、盧學甫、林俊成，森林生態系服務效益評估—InVEST之運用。林業研究專訓，26(5)，p.54—57

附錄一 期初審查意見回覆

審 查 意 見	辦 理 情 形
1.工作計畫書所載各項調查方法，包含計畫區域各類型微棲地劃分、碳匯功能現地調查、生態系統功能及服務評估等，併綜整協助評估濕地科研基地發展可行性，以及氣候變遷減緩與調適能力長期策略等內容，原則符合本處需求。	感謝肯定。
2.有關微棲地劃分方式規劃以衛星影像以及無人機空拍方式取得影像，並搭配現地調查進行棲地環境劃分。惟考量計畫區域係黑面琵鷺度冬棲地，相關空拍作業請於4月下旬執行。相關微棲地劃分成果是本計畫執行基礎，後續將視實際需要以及微棲地調查工作執行進度辦理工作會議，俾確認各項工作規劃進度內容。	謹遵辦理。 已於4月底完成計畫區域空拍攝影，並於期中前完成各區微棲地類型初步分類。後續將配合貴處需要參與工作會議。
3.有關濕地科研基地發展可行性，建議以科教研複合面向，協助就短、中、長期評估各階段發展內容及可行性，例如短期：以計畫區域為科教場域，協助評析計畫區域內可供民眾實作體驗課程項目，諸如紅樹林植群探訪、碳匯功能實作體驗及濕地水文調查體驗等內容，俾提供來訪	謹遵辦理。 預計期中時提供短期科研基地課程建議，並於期末總整各項成果後，提出中期與長期科研基地評估建議。

民眾適度生態體驗相關建議策略； 中期：以計畫區域為科教基地，擴大 並連結園區各處重要濕地生態體 驗；長期：以計畫區域為科研平臺基 地，形成園區各處重要濕地科學研 究交流中心。	
--	--

附錄二 期中審查意見回覆

審 查 意 見	辦 理 情 形
高雄師範大學生物科技系梁世雄委員	
1.服務建議書評選階段之問題與回覆，如需列入，請補齊。	感謝建議，相關回覆已統一彙整列入期末報告中。
2. 英文摘要之「Sicao Important wetlands」列出多次，也許是因頁 18 之四草重要濕地直譯，但讀起來奇怪，建議移除 important 用字。	感謝建議，研究區域英文統一更名為 Sandpiper Ecological Protection Area。
3.頁 6-7 都市林內容出現與報告前後文之內容突兀，請修改。	感謝建議，已進行修正。
4.頁 45-47 計畫區微棲地劃設(頁 47 之圖 27)與頁 52 表 10 之採樣點棲地類型不相符，請說明，例如頁 45 說明紅樹林沼澤有 Y01-Y03 及 Y10-Y19，但頁 52 之紅樹林樣點為 Y04-Y06；頁 45 說明淡水沼澤為 Y06，泥質灘地為 Y04-Y05，但頁 52 裸灘地為 Y01、Y03、Y06，水域為 Y03、Y10、Y12。	計畫區域微棲地劃設為初步劃設，且以面積或物種佔較多數者為分類依據。以 Y04-Y05 為例，雖被分類為泥質灘地，然而現地有零星分布叢狀紅樹林，故表 10 之分類才會與圖 27 略有不同。將會於期末更新成更細緻之微棲地劃分圖。
5.頁54估算AGB及BGB之方程式，均為估算地上植物橫向增生而增重的方程式，兩方程式的format相似，以下疑問請釐清： (1) 在BGB估算，為何以陸上植物生長方程式可估算地下部之生物量，請說	(1) 本計畫執行對象為紅樹林欖李。文獻中紅樹林欖李是以參數(如 DBH、樹高等)及生物乾重，並建立經驗公式來分別得出地上部地下部公式。 紅樹林地下部特徵較不易測量，過去研究多以植物地上部特徵（樹高、樹徑）建立植物地下部生物量關係式，藉此能

明。 (2) AGB為印尼研究資料，BGB為斯里蘭卡研究資料，為何選用印尼資料估算AGB，而BGB以斯里蘭卡資料估算。 (3) 如可以地上部計算重量之方程式估算地下部重量，為何兩方程式不能互相調換估算，如附有相關計算，如何取捨？	夠透過簡易量測植物參數，進一步求得植物生物量。 (2) 因目前較少有研究建立關於欖李地上、地下部生物量之生長方程式，僅有印尼和斯里蘭卡等 2 篇研究建立欖李地上部的生長方程式，僅有斯里蘭卡的研究有完成建立地下部的生長方程式。目前本計畫使用印尼生長方程式得出碳匯結果優於使用斯里蘭卡生長方程式。 (3) 欖李地上部及地下部生長方程式建立為使用不同植物參數(如 DBH、樹高等)，故兩者為不同方程式，無法調換估算。
6. 頁 80，依表 17，如負值為碳源，表示紅樹林及灘地在冬季及夏季均為釋放二氧化碳至空氣中之水域嗎？但若考慮上述 5-(3)，則數據如何妥適反應其碳匯或碳源之結果。	是/冬季及春季。 首先，計畫區域中的紅樹林與灘地環境因無潮汐，所以將紅樹林、灘地及水域分開計算；其次，紅樹林及灘地為碳源，即表示紅樹林及灘地在冬春季均釋放二氧化碳到大氣中。 第 5.3 節碳匯功能調查提到碳匯計算方式為紅樹林使用樹碳吸收量扣除環境

	碳排量，灘地環境異營性呼吸則是土壤排放的 CO ₂ 。
7.土壤異營性呼吸作用來源為何	土壤生物的分解作用及呼吸作用。
8.參考文獻標題為主要參考書，可再思考。另格式應統一，第 14、31 各重複列舉且文獻年份與內文不符，請再細查。	感謝建議，已進行修正。
9.RAWES 目前利害關係人訪談多為贊同或支持濕地保育團體及人員，是否思考對濕地保育持反對態度人員之意見。	感謝建議。已於 6 月 28 日及 9 月 15 日分別訪問顯宮里里長及鹿耳社區理事長，兩位反饋結果皆對於保護區的劃設抱持一定程度之反對態度，詳細訪談內容會列於期末報告中。
嘉義大學生物資源學系陳宣汶委員	
1.過去曾經進行的棲地改造（水路挖深），對鄰近微棲地變化趨勢有無影響？可否由影像分析得知？	由於水路挖深範圍為局部面積且範圍不大，故在衛星影像中無法看出顯著差異。
2.紅樹林的增加是否代表碳匯功能提升？同時，紅樹林增加也代表陸化區域增加，水域面積減少，這些微棲地的變化是否需要適當的人為介入改善棲地、維持生態系服務或生物多樣性的最大化，可否提供相關經營管理的建議。	紅樹林數量增加會提升陸化程度之可能性，可根據 Ho 等人於 2018 年利用計算紅樹林密度與碳匯量進行回歸，計算計畫區域內紅樹林最佳植株密度數量，並藉由水位調整或適當疏伐紅樹林數量用以達碳匯最大化、陸化最小化之目標。 另外，亦可藉由控制水閘門、出水口等，增加水的流入，使土地呈現淹水厭氧的情況亦可降低二氧化碳的排放。若輸入高鹽度水體，亦能降低甲烷的排放。

3.最初兩季在三種類型棲地所得的碳收支資料，可否推估影響碳匯功能的一些關鍵環境因子，例如溫度、日照、水質、有機質、生物活動等等，也可作為後續調適減緩手段之參考。	感謝建議。目前兩季資料較少，較難推估出關鍵因子，需要待後續期末監測的資料較為齊全時，會進行關鍵因子的推估。
臺南大學生態暨環境資源學系謝宗欣委員	
1.頁 54 說明紅樹林生長量使用 DBH 的差異估測生長量，但因本區的樹大部分很矮，且分支常位於 1.3 米以下，在此方法下，會否有很大部分生物量被忽略未加以計算。目前所調查得 2 季(冬季-夏季)生長差異，但屬乾季，植物生長量很少。	本團隊在進行監測時，根據 IUCN 標準，「在測量時若樹木很分叉接近地面時，須當成兩棵樹分別平行於主幹測量至 1.3 m 處」，用以降低低估可能性。一般情況下乾季生長量會比較少，待之後期末四季資料一同比較評估
2.欖李會在 5 月份掉落老葉並隨之長出新葉，調查時間是否有收集到大量落葉?如何併入加以計算。	在第 5.3 節碳匯功能調查中有提及枯落物籃是作為計算紅樹林 ANPP 的一部分，結果也有進行計算敘述。 期末報告將納入枯落物量比較，以得知春季是否有收較多枯落物。
3.紅樹林地下部土壤溫室氣體排放量很高，其可能來源為何？	委員應是指「紅樹林土壤」。 推測與水文有關，在淹水缺氧的區域，二氧化碳的排放量較低，而裸露在大氣的土地提供了充足的氧氣給土壤中生物進行分解及呼吸作用。
4.頁 64 之 Y04 是否為特別樣區，現地水文條件會否容易水文不足呈缺水狀況。	Y04 樣區現地在採樣過程中，土壤因缺水硬化，使土壤採樣較為困難。
5.欖李生長量估計引用文獻之作者不	感謝建議，已進行修正。

一致，作者年代在報告頁 54 及簡報頁 32 彼此不一致，請參考修正。	
企劃經理科蘇瑋佳技士	
1.本課定期辦理遙測影像資料收集計畫，包含高解析度衛星影像、特定區域無人機影像拍攝等，後續可依業務實際需要，向本課提出特定遙測影像需求。	遵照辦理。由於本計畫業務需求為無人機影像，經與貴課承辦洽談後得知無人機影像拍攝範圍不位於計畫區域內，故不進行使用。
2.報告頁 81-82 所提海平面上升預測，所引用資料來源是否可預測 2030 年狀況？	資料來源具有 2030 年預測資料，將於期末報告中新增。
解說教育科林文敏科長	
有關報告中所呈現土壤中異營呼吸作用高，所代表土壤狀態是好或壞，目前也影響濕地碳匯狀況，應如何改善此趨勢。	異營呼吸作用較高的情況，僅能推估土壤中異營生物較多，土壤狀態之好壞需要後續持續的監測。目前初步建議可增加水域面積來減緩呼吸作用過高的問題。
保育研究科王建智科長	
1.透過高程資料、影像判釋、植被覆蓋分析等綜合資料，並結合關係人訪談來區分各類型微棲地，相關方法建議可列入方法論通則內容，後續也請運用於濕地碳匯調查樣點描述以及生態系服務評析之各區域狀態指標敘述。	遵照辦理。
2.碳匯功能是區分成紅樹林、灘地、水域等 3 類型，是否可依微棲地劃設成	可以將微棲地之碳匯乘上面積，即碳匯量。由於經費因素於計畫開始時僅

果，推估對應面積並換算為計畫區域碳匯或碳排放狀況。	規劃測量紅樹林、水域及灘地等三種微棲地，在缺乏實測資料狀況下，本計畫試著利用其他地點資料進行估算。例如過去有在關渡濕地測量蘆葦碳匯量的數據資料($376.12 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)，但兩地的環境差異仍需要考慮。 除此之外，由於無細部盤點 3 種紅樹植物的分佈面積，較難估算欖李的面積佔比。初步建議估算整體計畫區域碳匯之替代方法為：藉由欖李生長於高潮位位置，故假設陸域紅樹林是欖李，水域紅樹林為紅海欖及海茄苳，以此比例進行估算。
3.碳匯功能調查 3 種微棲地各設置 3 個採樣點，各採樣點間是否有顯著差異；另外 3 種微棲地中，紅樹林以及水域已說明可能之碳吸存及碳排放來源，但灘地土壤則尚無，建議補充。	各採樣點位的選擇會先以人員能夠安全抵達為首要目標，因為保護區東北側因水域過深不易操作，所以採樣點位聚集在西南側。 同一微棲地的各採樣點位會盡量分散設置，互相間隔一段區間，各樣點間無顯著差異，僅水域 Y12 則為少數能夠靠近東北側的水體採樣點。 泥質灘地的土壤中有微細藻類(以矽藻為主)作為初級生產者，可以藉由光合作用吸收二氧化碳，但土壤中也有其他異營生物行呼吸作用釋放二氧化碳，兩者含碳的生物代謝量的差值，即為土壤碳吸存或碳排放。

4.利害關係人訪談部分，建議可增加鹿耳社區發展協會理事長，以及本處環教人員，俾提供更多面向資料。	遵照辦理。已於8月9日及9月15日分別與貴處環教人員以及鹿耳社區發展協會理事長進行訪談。訪談內容將補充於期末報告中。
5.有關計畫區域生態服務項目指標狀態，建議可優先參考本處歷年計畫資料，以及保育巡查員定期鳥類生態觀測成果，若尚缺乏項目對應指標狀態資料，則可列入後續執行內容建議。	遵照辦理。將參考歷年計畫以及鳥類生態觀測結果，擷取與本計畫工作項目相關內容新增至期末報告中。
6.未來科研基地透過發展定位確認，可再依階段需求，據以規劃辦理各面向硬體設施改善。	遵照辦理。
保育研究科林哲宇技士	
1.水文資料現地調查內容，已進行2月18日至3月24日間連續水深變化測量，是否可另套用高程資料轉為水位變化？另2月份係屬乾季，是否可能增加濕季水深變化調查。	遵照辦理，已於9月至10月進行濕季水深變化調查，並於期末報告中將原水深圖更新成乾季與濕季之水位高程圖。
2.承上，圖29所示潮汐資料的引用測站來源建議敘明。	感謝建議，潮汐資料的引用測站來源將會列入期末報告中。
3.水質現地調查內容包含有水溫、壓力、溶氧、導電度、鹽度等項目，若有順利取得每月資料，建議表列說明各項目數值。	感謝建議，相關資料將會彙整列入期末報告中。
4.整體而言今年上半年的碳匯調查屬於碳排放狀態，除可能因生長季節差異導致，後續再請完成夏秋2季調查，	過去紅樹林的研究有建立密度和紅樹林碳匯的關係式，海茄苳有最大碳匯量的最佳密度是 1 tree m^{-2} ，水筆仔有最大

俾建立計畫區域碳匯基線資料，另請協助評估如何透過經營管理方式，改善增加濕地碳匯功能，例如灘地缺乏生產者情況，是否可栽植貝氏鹽草等水生耐鹽維管束植物等策略。	碳匯量的最佳密度是 3 trees m⁻²。可能可以透過紅樹林疏伐調整紅樹林密度已達到最大碳匯量。 灘地缺乏維管束植物作為生態系統的初級生產者，因此在本研究中灘地的碳吸收量趨近為 0，如栽種耐鹽性維管束植物，可加入植物的碳吸收量，增加灘地的碳匯量。
5.有關濕地科研基地發展可行性，目前已收集現地狀況資料，以及國內濕地科研教育活動內容，建議短期可再透過與本處環教人員訪談成果，優先評析短期內生態體驗教育課程可行性。另也請於 9 月 2 日與濕地學會合辦所規劃之工作坊，協助收集參與者回饋意見。	遵照辦理，已於 8 月 9 日與環教人員進行訪談。訪談內容及工作坊之意見回饋將列入期末報告中。
6.有關歷次審查意見回復，請補充於後續期末、成果報告內。	感謝建議，相關回覆將會彙整列入期末報告與成果報告中。
洪政乾秘書	
本處園區包含有紅樹林海茄冬、欖李、紅海欖等樹種，各物種彼此碳吸存、碳排放狀況是否一致，未來可如何運用至園區其他重要濕地，是否有一致參數可套用。	根據「臺灣沿海重要碳匯生態系統調查與評估計畫」紅樹林各物種的碳匯量有差，例如水筆仔植物體碳吸收量較高。其中有初步彙整不同紅樹林物種的碳匯數據，可做為參數用於估算不同紅樹林的碳匯量。 目前台灣欖李的研究較少，因此這次計畫以欖李為主要研究對象，藉此增加台

	灣欖李的相關研究，使欖李的碳匯數據更具代表性。另外，由於計畫區域內之海茄苳因分布區域多被水深較深潮溝隔離，人力難以進入，故本次計畫無法進行測量。
許嘉祥副處長	
1.簡報 51 頁，所提到利害關係人訪談內容，請列入期末報告附件。	感謝建議，利害關係人訪談內容將彙整列入期末報告。
2.報告內文部分圖表格式再請調整編排，例如頁 7 表 1、頁 20 表 5、頁 27 圖 10、頁 29 圖 13、頁 77 表 15、頁 78 表 16。	感謝建議，已進行修正。
3.第七章主要參考書，建議修正為參考文獻，及不宜列為主要章節。	感謝建議，已進行修正。
謝偉松處長	
1.本處是濕地型國家公園，責無旁貸先行執行濕地碳匯、生態系服務評析等示範計畫工作，且計畫區域有 53 公頃，若定位為濕地科研基地，應有其發展潛力，若在未來透過硬體設施改善形成自然教育中心，目標可用於展現濕地相關研究成果。	遵照辦理。
2.計畫受限於執行期限，只能收集年度內計畫區域碳匯/碳排狀況，目前透過衛星影像分析植被與水域分布面積變化，並有植被逐年增加趨勢，對應每年碳匯/碳排的增減狀況，可採	可使用未來紅樹林、水域等棲地面積變化乘上今年度測量之碳匯量進行估算，可以完成較基礎碳匯量估算，惟本計畫仍建議應持續監測碳匯項目。

用哪種方式推估？	
3.紅樹林碳吸存能力應是濕地生態系相對較高棲地類型，台江分布樹種有海茄冬、紅海欖、欖李等，而最常見應是海茄冬，後續請思考調整可能，或透過文獻資料來分析推估，以利後續應用於其他濕地。	由於計畫執行期程限制，本計畫引用林幸助老師在七股濕地測量之海茄冬碳匯資料，乘上本計畫區域預估的海茄冬面積，藉此推估海茄冬碳匯量。
4.計畫目前成果顯示灘地土壤為碳排狀況，推估可能原因為何？	推測與水文有關，在淹水缺氧的區域，二氧化碳的排放量較低，而裸露在大氣的土地提供了充足的氧氣給土壤中生物進行分解及呼吸作用。
5.未來方法論通則內容，應更審慎且多面向化提出。	遵照辦理。
6.針對科研基地發展定位性質，請於後續協助評估。未來初期仍由保育課試辦科普性質課程活動，再由解說課歸納研擬各面向課程。	遵照辦理。

附錄三 工作會議審查意見回覆

審 查 意 見	辦 理 情 形
臺南大學生態暨環境資源學系謝宗欣委員	
1.本計畫整合國內外相關碳吸存的樹種資料，並應用在鵲鴝科保護區，實在很辛苦，值得肯定。	感謝肯定。
2.簡報頁 28 保護區的欖李，相較七股地區有明顯的降低，且在夏季呈現碳排現象，相對於其他樹種亦較低，未來如做為示範區域，是否會降低整體的碳吸收效果。	計畫區域內欖李紅樹林土壤溫室氣體碳排放量較高，如作為示範區域，可研究經營管理措施降低紅樹林土壤溫室氣體排放，增加紅樹林的碳匯量。
3.簡報頁 27 海茄冬的數據來在何處，請加以說明。因為整體保護區內海茄冬數量分布相當大，此部分的數據影響全區碳吸存數據。	簡報 27 頁海茄冬的數據來源為 Lin et al. (2023)，引用自該篇論文對於七股溪口紅樹林的碳收支研究。該篇研究中對於紅樹林底土碳排放量資料引用自高語岑(2021)於 2019 至 2020 年的實測結果，由於七股溪口紅樹林底土有機質與海茄冬呼吸根密度較高，因此有較多的溫室氣體排放。 未來可重複測量檢視七股溪口紅樹林的環境是否改善而降低底土溫室氣體排放量，或研議使用臺南沿海其他海茄冬的數據資料，如 Lin et al. (2023)研究中亦有臺南北門海茄冬紅樹林的研究成果。

4.未來若能持續進行碳匯調查，建議可同步觀察收集樣區水文資料，相關成果未來也可運用於解說素材。	感謝建議。
解說教育科林文敏科長	
1.依據今日簡報資料，保護區的棲地品質是否偏差，未來是否需執行相關棲地經營管理作為來提升保護區碳匯功能。	根據目前紅樹林碳匯計算結果，計畫區域內欖李紅樹林底土溫室氣體排放較高，未來可探討適當棲地經營管理，以降低溫室氣體排放量而提升紅樹林的碳匯量。
保育研究科王建智科長	
1.本計畫另有試辦計畫區域碳匯現況調查，請協助評估所設置樣點是否足以代表計畫區域碳匯量，以及若參考林業署 MRV 原則，目前應是測量階段，計畫所調查成果是否足以列入溫室氣體清冊報告？。也請協助提出後續定期監測、公民參與等建議內容，以及未來不同濕地區域，如何選定適合微棲地或紅樹林測量物種。	1. 本計畫透過調查計畫區域內水域、灘地及欖李紅樹林三種棲地類型的碳匯量，推算計畫區域碳匯現況。唯因計畫區域內有大片海茄苳面積生長在人力難以到達之處，因此於本計畫評估初期便未將海茄苳納入考慮，並以其他地點之海茄苳碳匯數據搭配海茄苳生長面積進行估算。 2. 本研究對於紅樹林的溫室氣體排放或碳匯數據，未來可列入國家溫室氣體清冊報告中。唯該報告僅以棲地類型登載，如紅樹林棲地，而不會明列保護區名稱。 3. 建議可持續累積計畫區域2年監測資料，計算全區域能夠提供的自然碳匯量，未來間隔數年持續監測即

	可。其他不同濕地類型亦可參照本研究先劃分重要或佔比較高的棲地類型，針對不同棲地類型進行碳匯調查與估算。而紅樹林測量物種可選擇目前台灣研究較少的欖李或紅海欖(五梨跤)，可避免重複投入資源研究水筆仔或海茄苳。 4. 碳匯量測專業門檻較高且仍在發展中，目前或仍不建議以公民科學方式執行。
2.針對計畫區域碳匯現況，是否可協助提供後續增匯策略，例如紅樹林碳匯，如何透過經營管理方式減少碳排，以及是否栽植紅樹林、水域海草等方式。	已於期末報告中提供後續增匯策略建議，如紅樹林區域可透過增加欖李的種植密度，增加紅樹林的碳匯量。灘地棲地則可增加種植耐鹽耐旱植物，增加碳吸收量。水域部分若能增加耐鹽植物，亦可增加水域區域的碳匯量。
3.綜上請依據全年度執行工作成果，協助建立台江地區濕地生態系統服務評估方法論通則，供本處後續運用園區範圍各處重要濕地。	遵照辦理。已彙整本計畫工作成果並撰寫成方法論供管理處參考。
保育研究科林哲宇技士	
1.本計畫主軸之一為計畫區域濕地生態服務評析，目前透過權益關係人訪談及狀態指標等方式，了解受關注之生態服務項目及目前狀態。再請於期末報告，協助整理尚缺乏哪些狀態指標資料，及對應建議執行之研究調查	本計畫使用之狀態指標為生態系統服務之內容定性說明，有關可量化描述之狀態指標仍待後續研究投入進行探討。

項目，供本處後續規劃保育研究計畫內容參考。	
2.承上所評析之各項濕地生態服務，其中哪幾項是應長期關注且維護項目，也請協助提出對應維護建議。	綜合本計畫研究結果，認為水文以及碳匯資料為須長期監測並且滾動調整維護之重點項目，建議方式已列入期末報告建議中。
3.紅樹林碳吸存測量是採異速生長方程式，再請協助整理今年度每季所測量胸高徑數值供後續應用，也請協助評估如何調整各物種異速生長方程式。	1. 期末報告時整理各季欖李各樣區胸高直徑的平均值，提供後續管理處應用。 2. 欖李紅樹林生物量異速生長方程式可藉由實測樹木生物量進行公式校正，但此工項未列於今年度計畫中，建議未來可編列經費研議修正適合計畫區域之欖李紅樹林的方程式。
賴建良副處長	
1.濕地經營管理相關計畫內容，應仍由管理處決定未來操作及執行方向。	遵照辦理。
2.濕地基線資料收集與建立，確實是濕地經營策略擬定基礎，通常也是要2-3年期間累積相關資料。後續再請受託單位提供定期監測策略建議。	遵照辦理。碳匯部分建議可持續累積2年監測資料以了解全區碳吸收情形，未來間隔數年持續監測即可。
3.考量資源有限，未來計畫區域所需執行經營管理策略，再請協助依照重要性、議題性等面向，提出棲地維護、水門控制、碳匯功能提升等，於期末階段提出相關建議策略。	遵照辦理，已將相關策略列入期末報告建議中。

附錄四 紅樹林碳匯調查工作坊

隨著氣候異常對地球影響日益顯著，減緩氣候變遷已經是刻不容緩。濕地能從大氣中吸收二氧化碳將其轉換為碳匯，也具有洪氾調節、淨化水質等功能，對於減緩氣候變遷有重大貢獻。為了讓更多人了解濕地提供之生態系統服務，以及評估計畫區域成為科研基地之能力，本計畫於9月2日與社團法人台灣濕地學會合作，於計畫區域之特別景觀區辦理紅樹林碳匯調查工作坊，並邀請營利組織/企業、NGO 團體、一般民眾、學生等一同共襄盛舉。工作坊活動內容包含紅樹林碳匯及濕地水文之室內解說課程與戶外實作課程，以及各組學員心得分享(圖 1)，並進一步利用課程前測與後測問卷調查，比較學員們對於紅樹林碳匯及濕地水文了解程度。從前測問卷與後測問卷結果發現，紅樹林碳匯之平均分數分別 2.84 與 4.15；而濕地水文之平均分數分別為 3.15 與 3.84，顯示學員們在兩項議題上了解程度皆有提升，前測與後測比較結果如圖 2 所示。



濕地水文室內課程



紅樹林碳匯室內課程



濕地水文實作測量



紅樹林碳匯實作測量



圖 1 紅樹林碳匯工作坊活動照片

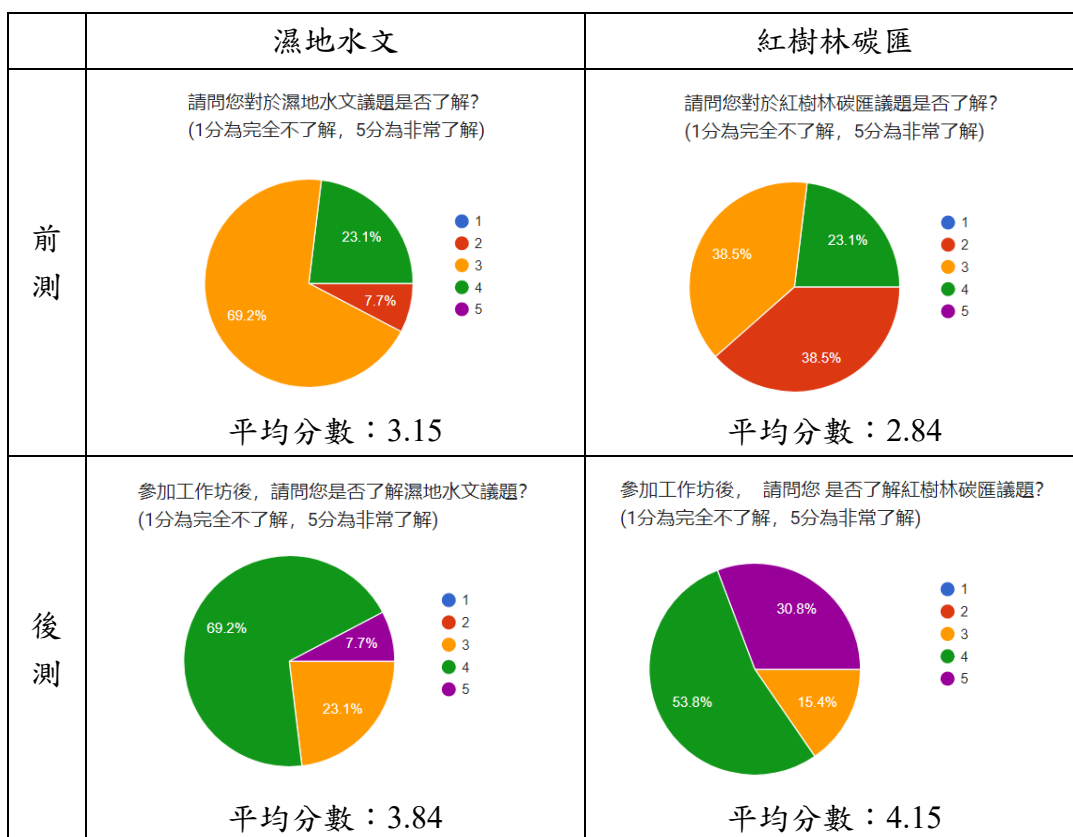


圖 2 工作坊前測與後測問卷結果

附錄五 期末審查意見回覆

審 查 意 見	辦 理 情 形
高雄師範大學生物科技系梁世雄委員	
1.報告格式應符合委託單位要求，請與承辦人確認。	感謝建議，已向承辦確認報告格式無誤。
2.中文摘要目前類似描述計畫招標之工作內容敘述，無法顯示計畫成效，請重新撰寫。應清楚描述碳匯計算之量化結果、RAWES 之訪談分析，及相關建議。	感謝建議，已進行修正。
3.參考文獻格式請統一及重新制定，問題包括：(1)以數字排列之意義為何？內文並未以數字指示；(2)人名多以縮寫列出，但也有以全名列出，如第 1 條文獻；(3)人名多數以姓名列出，但也有用名，姓之方式，如第 12、15 條文獻；(4)標點符號不統一；(5)許多缺列，例如頁 9 之 Li et al.	感謝建議，已將文獻格式進行修改並統一。 (1)數字編號無意義，已將數字編號去除。 (2)、(3)統一使用縮寫列出。 (4)已將標點符號統一一致 已補齊缺列文獻
4.頁 51-57，Y04 樣點若無資料，則不在圖中顯示。	感謝建議，已更新各樣點數據及圖示。

審 查 意 見	辦 理 情 形
5. 頁9-10均有臺灣估算紅樹林碳吸存量之文獻，是否與本研究使用同樣方法估算？是否選取相同國家(如本研究)之方程式？如果各自不同方法、不同國家之係數，不同物種應以何為標準？行政單位如何判定計算數字之準確性及正確性。	頁 9-10 中關於臺灣估算紅樹林碳吸存之文獻，對於不同樹種使用不同的方程式估算紅樹林生物量，以區別不同樹種的生長特性。 不同方程式雖然為了區分不同樹種而分別建立，但因建立的方法相同，應可視為同一標準。行政單位可利用樹型參數(如樹高)帶入生物量方程式，即可瞭解計算數字的準確性及正確性。
6. 頁 60 列出報告使用方程式的問題，但是委託單位有其任務導向及需求，如向中央單位回報管轄濕地之碳匯能力及功能，因此須對計算數字有較深入之說明。例如引用方程式之國家，其環境與我國環境之差異為何？因此計算數字可能高或低估研究區域之碳匯量？建立臺灣紅樹林異速生長方程式之程序及方法為何(簡介)？及其他使用本報告計算之碳匯資料，應注意的相關事項，建議應以增加一專章或段落方式處理。	比較 Dahanayaka(2023)及 Kangkuso et al.(2015)結果得出，雖然斯里蘭卡氣候環境條件與我國較為相似，然而藉由印尼公式所得之生物量與生長量結果皆高於使用斯里蘭卡公式，且印尼文獻於2016年發表且該篇發表之期刊受引用頻率較高，故計畫使用印尼文獻進行計算。 建立台灣紅樹林異速生長方程式的作法可使用以下兩種方式： (1)實地砍除數株紅樹林地上部及挖土採集完整地下部，以樹高、胸高樹徑等樹型參數，與紅樹林地上、地下部生物量進行回歸計算，找出最適當關係式。 (2)利用過去發表的生物量方程式，先以現地所測得的樹型參數帶入方程式計算生物量，再砍除數株紅樹林地上

審 查 意 見	辦 理 情 形
	部及挖土採集完整地下部，攜回實驗室烘乾秤重。透過公式計算值與實際測量數值進行回歸得到兩者的關係式，再以此關係式校正該樹種的生物量方程式。 另外，計算碳匯使用生物量方程式，應注意過去文獻建立時使用的參數(樹高、胸高樹徑)的資料範圍，如調查的紅樹林其樹高或胸高樹徑超過或不足過去文獻的範圍時，應考量此方程式的適用性。
7.目前紅樹林之碳匯能力與功能尚因調查期程而採估算方式，但即使其能決定，紅樹林過多也有濕地陸化及阻礙排水之負面影響，須予以疏伐，如臺灣香山及關渡等地，高屏溪河口更為嚴重，意即可能其碳匯效能只到某階段，即反而必須要考慮削減之現實。所以紅樹林執行碳匯能考慮是一減少 CO₂ 排放量之有效方法?是否有其他有效之替代方案。	紅樹林過度生長確實會造成濕地陸化或阻礙排水等負面影響，且 Ho et al. (2017)發現紅樹林碳匯能力在最佳密度下有最大的碳匯量，水筆仔為 3 trees m⁻²，海茄苳為 1 tree m⁻²。因此，可針對紅樹林進行輪伐或疏伐等經營管理措施，使紅樹林的植株密度維持在最佳密度狀態，而有最大的碳匯量。現階段紅樹林仍為自然碳匯中有效吸收 CO₂ 的藍碳生態系統，應搭配經營管理措施維持紅樹林高碳匯量。
臺南大學生態暨環境資源學系謝宗欣委員	
1.本報告詳細調查保護區內的紅樹林碳匯功能，以及其生態功能，仔細詳實，中文摘要請將結果結論等資料加	感謝建議，已進行修正。

審 查 意 見	辦 理 情 形
入。	
2.本區域中，有海茄苳和欖李等 2 種紅樹林樹種，各樣區中樹種組成可否提供數據，兩種植物是否有差別。	由於海茄苳多生長於水域環境，而計畫區域東北側主要為水域但人力難以進入，故本計畫使用空拍圖並以人工判釋的方式區分兩種紅樹林面積—欖李面積為 51,480.3 平方公尺，海茄苳面積為 134,755.9 平方公尺。
3.紅樹林植物的生物量地下部好像接近地上部，但本報告中地下部明顯較低，請問可能原因。	以目前的資料尚看不出來地下部接近地上部，且從過去臺灣 6 處水筆仔及 4 處海茄苳紅樹林的調查結果發現，紅樹林地上部生物量皆高於地下部生物量。
4.表 28 指出本區域碳匯總和合正值，但紅樹林是負值(表 29)，但對照表 2 卻非常不同(正值很高)，可否解釋其差異。	1. 表 29 中所列海茄苳數據為引用 Lin et al. (2023)在七股溪海茄苳紅樹林的研究資料，以估算本計畫區域海茄苳紅樹林的碳匯結果。因該研究中海茄苳紅樹林為碳源生態系，故以此數值計算本計畫區域的海茄苳碳匯量為負值。 2. 表 2 的碳匯單位為每年每平方公尺有多少克碳，表 28 的碳匯單位為每年每平方公尺有多少公斤二氧化碳當量。兩者表示單位不同而使得數值有所差異。
嘉義大學生物資源學系陳宣汶委員(書面意見)	

審 查 意 見	辦 理 情 形
1.根據微棲地調查與評估結果，園區內植被(主要是紅樹林)有快速增加和水域面積減少趨勢。關於此點是否有相關經營管理措施建議？	建議管理單位先確定經理管理目標方向，例如若需抑制紅樹林快速增生，則建議以人為疏伐泥質灘地與淡水草澤區之紅樹林幼苗生長，特別是海茄苳幼苗；其次是持續監測以確立水交換量，以高水位浸淹時間來緩和紅樹林生長；最後是延伸監測不同微棲地之紅樹林與其他棲地類型之競合關係，以利就不同微棲地操作合適措施。
2.碳收支估算部分，只有水體部分是採溶氧法計算，其餘紅樹林底土與泥灘地都是利用罩蓋法量測的氣體通量計算，這部分是否會對後續各微棲地與總體碳收支估算有所影響？	因應不同的微棲地型態，本計畫使用不同的方法建立各微棲地的碳收支，但各棲地的碳吸收和碳排放的過程都會包含於現地調查和碳匯計算中，因此不會因為方法不同而影響計畫區域總體碳收支的計算。
3.考量區內微棲地類型變化趨勢，紅樹林增加可提升碳匯功能，但灘地減少可能影響鳥類生物多樣性；反之泥灘地雖為碳源，但卻是魚類、甲殼動物、底土生物與鳥類重要棲息環境。綜合考量生態系功能與生物多樣性維護目標，在報告中 RAWES 或 InVEST 評估模擬部分，可有對該區內微棲地維護與經營管理之後續建議？	本計畫是以整體濕地、水文與碳匯等較為宏觀的角度去探討棲息地生態系統服務，針對各微棲地內部詳細生態服務評估不為本計畫研究範圍，建議管理單位可納入後續計畫辦理 以利提供各微棲地的經營管理後續建議。
保育研究科王建智科長	
1.本計畫工作項目如先前議程說明所	感謝肯定。

審 查 意 見	辦 理 情 形
述，經業務單位查核受託單位所提送期末報告，本階段成果包含計畫範圍微棲地劃分、定期水文水質調查、濕地碳匯 4 季調查、並完成計畫區域濕地生態系服務評估，以及科研基地相關案例收集與評估工作，尚符契約規定工作內容。	
2.碳匯功能現地調查方面，原則是依計畫區域分布比例較大的紅樹林、水域、灘地等 3 類型微棲地進行調查，並取得對應碳排放參數。目前看來灘地為碳源，而紅樹林(欖李)及水域為碳匯。再請協助確認碳匯調查水域是鹽沼水域或是潮溝水域，抑或是 2 種水域皆可適用此排放參數。	Y03 為鹽沼水域，Y10 及 Y12 為潮溝水域。兩種水域類型碳匯計算方式架構相同，故可適用此排放參數。
3.承上在頁 105 氣候變遷減緩服務內文，表 28 棲地碳匯量的總和應是誤植，目前僅為 3 種排放參數加總，但實務上應要以活動數據(棲地面積)* 排放參數，再請依簡報內容修正。	感謝建議。數據已修正完成。
4.頁 95 所述生態系服務評析方法論通則，建議除文字敘述，可適當轉化為流程圖呈現方式。	感謝建議。已更新並補上流程圖。
5.有關科教研基地發展評估，本科將再與解說科商討如何妥善運用計畫區域特性，及參考今年度試辦工作坊模	感謝建議。

審 查 意 見	辦 理 情 形
式，辦理科教研各面向濕地課程。	
保育研究課林哲宇技士	
1.頁 46 圖 26 所示鹽度分布圖及頁 29 各點位水位圖，後續可應用推估計畫區域內不同區域水文流動狀況。	感謝建議。
2.頁 48 圖 27 計畫微棲地劃設圖，建議可列表顯示各類微棲地面積，可作為探會估算之活動數據來源。另是否可能依空拍影像再判釋不同種類紅樹林分布面積，或是需要現地人力調查？	已列表說明各微棲地面積大小。空拍影像為紅樹林整體樣貌，較難以呈現細節之處。且主要以觀察葉子來判斷紅樹林樹種，故建議以現地人力調查較為合適。
3.頁 106 表 29 也初步區分欖李、海茄冬分布面積，但海茄冬數據為引用七股地區，若依據國家公園碳管理計畫專家諮詢會議意見，考慮到各地區差異大，仍建議實地調查不同地區的碳排放參數。今年度建議可以將實際調查欖李碳排放參數*其面積，並加總另 2 種棲地，來估算計畫區域碳匯-氣候變遷減緩服務。	計畫區域整體碳匯-氣候變遷減緩能力已重新計算並詳列於頁 105 表 28。
4.有關計畫區域生態系服務評析，透過 RAWES 評估出表 26 等各項生態系服務，是否可再依據平均分數篩除低於一定值之服務項目，或是如何聚焦及突顯計畫區域重要生態服務。頁 86	RAWES 為快速評估方法，後續仍需更多科學資料或關鍵角色參與，建議持續滾動調整。 評估分數高低可以作為濕地經營管理之啟發與指引，部分分數較高之生態系

審 查 意 見	辦 理 情 形
業透過本處歷年鳥類資料佐證”棲息地提供”此項生態服務，再請協助評估本處歷年相關調查成果可佐證哪幾項生態服務，而又有哪幾項生態服務值得作為本處後續研究計畫探討內容。	統服務項目，可從管理處歷年研究調查成果進行佐證，但仍存在須持續進行調查的項目；而分數較低或目前較缺乏佐證資料之生態系統服務項目，可納入後續加強經營管理考量。
5.頁 115 建議第 6 點敘及紅樹林氣候變遷減緩服務，並建議應兼顧濕地各項生態服務，再請協助說明具體策略，例如應維持那些分區應保留適當灘地，哪些區域可參考頁 105 內容，透過栽植原生植物增加碳匯量。	長期策略擬定需以台江國家公園對濕地生態系的功能定位為基礎，再透過與管理單位討論或是利害關係人評估等方法，以界定各項服務功能的權重，再依據濕地地貌現況判別未來分區經營方向。
洪政乾秘書	
有關報告頁 67 表所列數字，經已備註公式合算數字能有其落差，再請確認是否有參數轉換等問題。	頁 67 表所列數字已重新確認，備註所列公式已加入適當參數。
賴建良副處長	
1.有關計畫內濕地碳匯調查估算方法，請業務科持續留意是否與署內「國家公園碳管理計畫」之濕地碳匯估算方法一致，以及未來推廣用到其他濕地碳匯現地調查的估算方式也應維持一致。	感謝建議。
2.本計畫區域調查內容均位於重要濕地，相關調查成果建議可上傳濕地資	感謝建議。

審 查 意 見	辦 理 情 形
料庫供後續研究利用。	
謝偉松處長	
1.紅樹林的擴散仍有影響其他生態服務的風險，例如七股溪口紅樹林植群也有因過大而影響防洪風險，因此在管理處成立前曾執行過疏伐作業。本處近年有因應十份黑面琵鷺生態保護區之黑面琵鷺保育目標，與權益關係單位討論，並逐年採取分區執行海茄冬植群抑制疏伐等相關作為，以同時維護提供黑面琵鷺棲息生態服務，並維持既有紅樹林植群碳匯服務。	感謝建議。
2.臺灣現生紅樹林樹種有海茄冬、欖李、水筆仔及紅海欖，請教全球紅樹林樹種分布優勢狀況如何。	全球紅樹林分佈在北緯及南緯 30 度之間，主要生長在陸地與海洋交界的潮間帶地區。全球紅樹林面積為 145,068 km²，主要以亞洲分佈最多(39.2%)，其次是非洲(19.3%)和南美洲(15.4%)。各種紅樹林植物可廣泛分佈在各洲，以臺灣的海茄冬(<i>Avicennia marina</i>)為例，廣泛分佈在非洲東岸、阿拉伯半島、亞洲、澳洲及紐西蘭。但儘管是相同種類的紅樹林，樹型結構仍會因各地的環境區域及地理條件而有所限制及改變。