

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 地球科學科

第三名

030501

基於雲端運算與多光譜遙感技術探測四草區域
碳息

學校名稱：臺南市立建興國民中學

作者： 國二 張芸瑄	指導老師： 楊孟勳 周育信
---------------	---------------------

關鍵詞：多光譜遙感、紅樹林藍碳、JavaScript

基於雲端運算與多光譜遙感技術探測四草區域碳息

摘要

本研究基於 Google Earth Engine 雲端平台和 JavaScript 程式語法，透過隨機森林分類器的監督式學習，對臺南市安南區四草區域的紅樹林進行自動分類。利用 Sentinel 2 衛星影像資料集，結合文獻的函數公式，對紅樹林植物的面積分布、變化進行統計，並估算藍碳儲存量。此外，計算了常態化差值植生指標（NDVI）和常態化差值水體指標（NDWI），並將其標示於地圖上。同時，使用 Modis LST 和 CHIRPS 資料集分析地表溫度和降水量。

研究結果發現，2018 年至 2023 年間紅樹林的總面積相近，2023 年比 2018 年的碳儲存量減少了 28.63 噸；此外，當地表溫度與降水量都比前一年增加時，紅樹林的總面積和總碳儲存量皆有減少現象；當平均降水量減少時，縱使地表溫度增加，總碳儲存量增加。指標指數、溫度、降水量皆會影響總碳存量。

壹、前言

一、研究動機

(一)臺灣得天獨厚的紅樹林藍碳

2023 年 9 月與友人到有袖珍版亞馬遜河之稱的臺南市安南區四草綠色隧道旅行，除了對其中的美景感到讚嘆不已之外，平時在報章媒體也經常看到了關於「海洋藍碳」的相關文章與報導，面對現今世界面臨的重大挑戰-全球暖化，碳匯被視為減緩氣候變遷的重要途徑，而分佈在熱帶和亞熱帶沿海的紅樹林植被生態系統，能夠吸收和儲存大量的二氧化碳，紅樹林中儲存的碳被稱為藍碳，儲存量和速率遠高於陸地森林，是一種有效的碳匯；然而紅樹林正面臨著嚴重威脅，如人為的開發、污染、氣候變遷等，導致紅樹林的大量減少和退化。因此，估算和監測紅樹林的藍碳儲存量，對於評估紅樹林的生態價值，制定保育和管理策略，參與國際碳交易，具有重要的意義。

本次研究區域四草區域是臺南市重要的生態景點，所指的是四草大眾廟後方排水道的紅樹林區，這條河道因兩側遍佈樹齡逾 50 年的原生紅樹林，紅樹林保護區林相優美，擁有紅海欖(五梨朥)、水筆仔、欖李、海茄苳四種紅樹林，自然形成一彎如隧道般的景象，號稱「迷你版亞馬遜森林」，同時也是臺灣唯一的水上綠色河道。紅樹林不僅蘊藏豐富的藍碳，也為多種海洋生物提供棲息地，還有助於防風、定砂、緩流、消浪等自然保護功能。

(二)遙感技術與雲端運算激出火花

小學時曾經參加過 SDGs 黑客松競賽的經驗，對於程式撰寫等資訊科技擁有強烈興趣，面對目前日益嚴重的暖化問題，想嘗試以自己的科技能力為地球環境盡一份心力；經過文獻探討並積極參加 GIS 研習以及線上自學後，發現傳統的紅樹林碳匯研究方法需要大量的人力和時間投入以進行現場調查和數據收集，無法有效地、即時地監測紅樹林碳匯的長期變化，同時可能無法充分考慮到紅樹林生態系統中的空間異質性，導致碳匯估計的不確定性增加。經過反覆思索後，考量 Google Earth Engine 是一個基於雲端運算的平台，可以處理大量的衛星影像，並提供多種分析工具，將此人工智慧（AI）技術應用在紅樹林碳匯研究中，可以克服傳統方法的限制，因此，本次研究選定 Google Earth Engine 為研究工具以 JavaScript 程式語法以多邊形框選出四草區域，探討並監控四草區域紅樹林(台灣最大的紅樹林區域)藍碳儲存量情形，希望能夠為紅樹林的保育和管理提供有用、有效的資訊。

二、研究目的

為紅樹林藍碳估算提供一種新的方法，為保育和管理提供科學依據。

- (一) 以人工智慧處理和分析衛星影像，獲得研究樣區紅樹林的多時期分佈和動態資訊。
- (二) 應用雲端運算，對研究樣區紅樹林植物的藍碳儲存量進行估算，並以圖表顯示其變化趨勢。
- (三) 透過雲端運算與多光譜衛星影像資料集，進行紅樹林植物與環境因子關聯探討。

三、文獻回顧

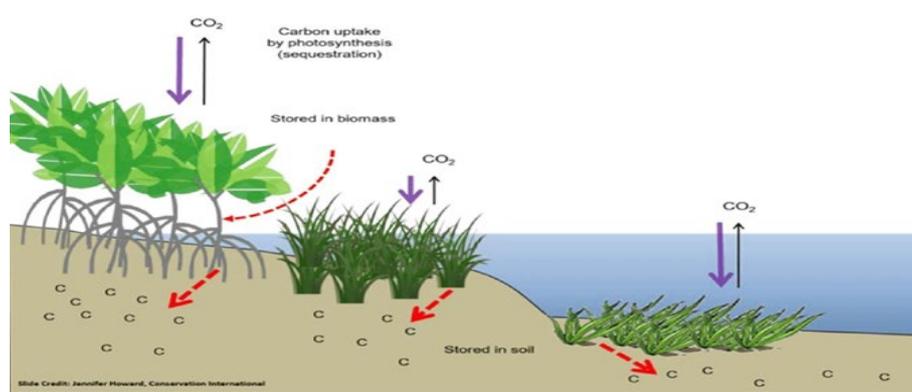
(一) 藍碳

藍碳是指被沿海和海洋生態系統（如紅樹林森林、海草灘和鹽沼）吸收和儲存的二氧化碳（詳圖一）。這些特殊的生態系統就像自然界的碳匯，能夠無限期累積及儲存碳化合物的天然或人工「倉庫」，有助於減少大氣中二氧化碳含量，這些水下植物和棲息地通過儲存碳，就如同陸地上的樹木一樣，對抗氣候變化發揮著關鍵作用，有助於碳的鎖定。（WSP 觀點，2023）

紅樹林的藍碳估算是近年來的熱門研究議題，許多學者利用不同的方法和數據來計算紅樹林的藍碳儲存量，並探討其與環境因子的關係。例如，Donato 等人（2011）利用現場測量和文獻數據，估算了全球紅樹林的藍碳儲存量，並發現紅樹林的藍碳儲存量遠高於其他森林類型，且主要集中在土壤中。Murdiyarsa 等（2015）則利用遙感和現場數據，估算了東南亞紅樹林的藍碳儲存量，並發現紅樹林的藍碳儲存量與紅樹

林的面積、密度、生物量、土壤有機碳、以及海水溫度、鹽度、懸浮固體和氮素等環境因子有顯著的相關性。

然而，傳統研究有一些局限性，如現場測量的範圍和時間的限制，遙感影像的品質和解析度的不足，以及大氣和水體的干擾等。因此，需要一種能夠克服這些困難，並提供高精度和高效率的紅樹林藍碳估算方法；Google Earth Engine 的工具紅樹林映射方法，可以利用雲端運算的優勢，處理大量的衛星影像，並使用機器學習的技術，自動分類和校正紅樹林的分佈和動態進而估算台灣紅樹林的藍碳儲存量。這是一項創新的研究，因為目前尚無文獻使用相關工具對台灣紅樹林進行藍碳儲存量的研究本研究將為紅樹林藍碳估算提供一種新的方法，並為紅樹林的保育和管理提供有用的資訊。



圖一 藍碳示意圖（來源：A. Ahalya, Environmental Science）

（二）遙感探測技術（簡稱遙測）

遙測技術最重要資訊來自衛星，由於衛星科技之進步，可利用衛星軌道上之特殊性，採俯視方式進行宏觀之地面觀測。衛星遙測因偵測範圍較廣，接收運轉週期較固定，系統參數設定易掌握等因素而被廣泛運用。故利用衛星感測器所收集的資料中，可以抽取有關不同資源的型式、內容、位置及情況等資訊。然後將這些資訊以地圖、表格及書面報告的型式展示。

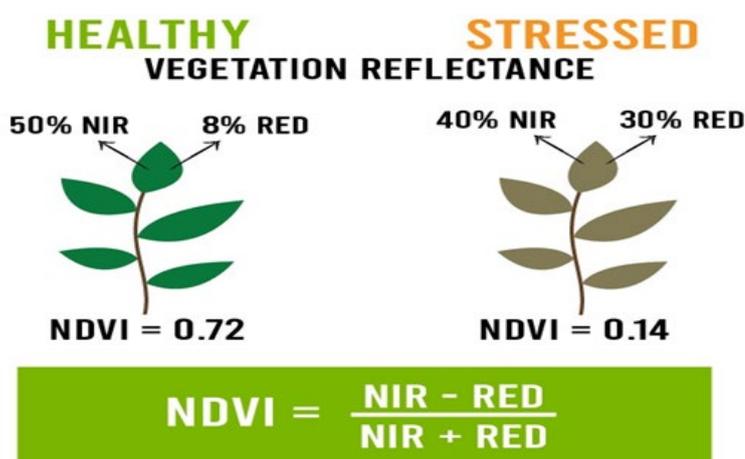
隨著現代物理學、空間技術、電子技術、電腦技術、資訊科學與環境科學等的發展，遙測已成為一種先進與實用之綜合性探測方法，目前已被廣泛應用於農林業、地質、地理、海洋、水文與氣象等環境監測以及地球資源探勘與軍事偵察等領域。

遙測技術具有以下五項優點：（陳清目，2021）

1. 廣域性：大尺度衛星一次取像可以涵蓋數千平方公里之範圍。
2. 多波譜性：擁有多個波段之衛星，能使影像能更準確地判釋地面上各種物質類別。

3. 視覺化：以影像的方法呈現，而非以許多符號或電腦代碼呈現，增加研究的方便性。
4. 先驅性：可拍攝到許多人類無法到達的地方。
5. 高效率：衛星除了定期規律性的執行地表觀測，目前可經由預約的方式，配合使用需求於特定時間拍攝指定區域，使研究者能有系統的配合實驗設計蒐集資料。

在多光譜遙感中可計算各種指標，稱為**多光譜影像分析指數**，其中常態化差異植被指數(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和常態化差異水體指數(Normalized Difference Water Index, NDWI)為兩種重要的指數，對於紅樹林植物的研究具有重要的應用價值；NDVI 能有效地反映植被覆蓋度和生長狀況，為紅樹林的健康狀況和生物量估算提供了重要信息（如圖二）；NDWI 主要用於水體檢測，在紅樹林研究中 NDWI 可以用來評估紅樹林的水分狀況和健康狀態，進一步推測其生長狀況和生態系統的關聯性。（李小娟等，2018）



圖二 不同生長狀態植物對近紅外光與紅光的反射差異（來源:MyEasyFarm 網站）

1. 常態化差異植被指數（Normalized Difference Vegetation Index, **NDVI**）：是使用可見光和紅外波段計算的指標（圖三）。其中 NIR 代表近紅外波段的反射率，RED 代表紅光波段的反射率。在 Sentinel-2 的數據中，NIR 對應於 B8，RED 對應於 B4（圖四）。NDVI 的值範圍從 -1 到 +1，通常情況下，高 NDVI 值表示更多的綠色植被，低 NDVI 值則表示較少的植被或裸地。NDVI 值可以用於監測植被覆蓋度、生長狀態和健康狀態。

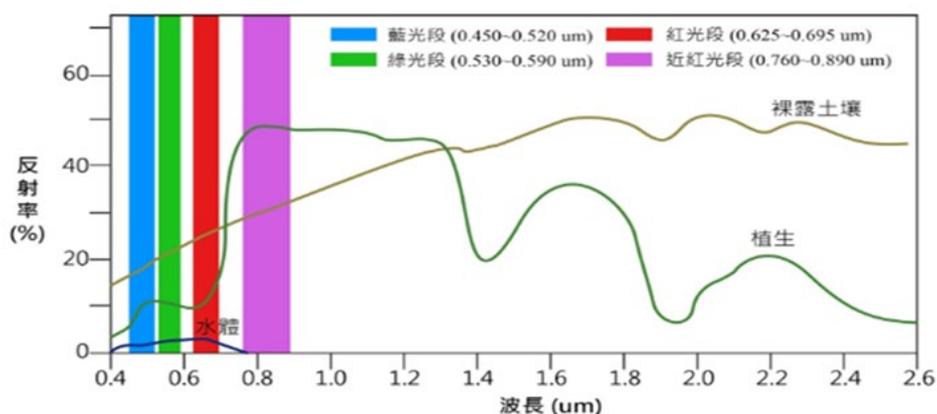
NDVI 計算公式： $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$

$$NDVI \text{ (sentinel 2)} = (B3 - B8) / (B3 + B8)$$

2. 常態化差異水體指數 (Normalized Difference Water Index, **NDWI**)：主要用於評估地表水體的分布和水分含量。透過比較綠光波段和短波紅外波段的反射率來檢測水體覆蓋情況 (如圖三)。Green 代表綠光波段的反射率, NIR 代表近紅外波段的反射率。在 Sentinel-2 的數據中, 綠光波段對應於 B3 波段, NIR 對應於 B8。NDWI 的取值範圍通常在 -1 到 1 之間, 較高的值表示更多的水體覆蓋, 而較低的值則表示較少的水體覆蓋。

NDWI 計算公式: $NDWI (K.McFeeters, 1996) = (Green - NIR) / (Green + NIR)$

$$NDWI (sentinel 2) = (B3 - B8) / (B3 + B8)$$



圖三 反射率圖 (圖片來源: Mountains & River 部落格)

(三) Google Earth Engine (GEE) (農業部技術研究發展平台, GEE 應用分享)

Google Earth Engine (以下簡稱 GEE) 是一個由 Google 提供的雲端平台, 可用於分析和處理衛星影像和地理空間資料, GEE 可提供了大量的衛星影像資料集, 包括 Landsat、Sentinel-2、MODIS 等, 以及各種地理空間資料, 例如地形、土地覆蓋、氣候等, GEE 的使用者可以使用 Python 或 JavaScript 等程式語言編寫程式碼, 來分析和處理這些資料, 以下是 GEE 與其它地理資訊系統的比較和優勢 (如表二)。

表二 GEE 與其它地理資訊系統的比較(資料來源: 作者整理)

方法	優勢	劣勢
QGIS	免費、開源、跨平台	穩定性有待提高、技術支援有限
商業地理資訊系統軟體	易於使用	成本高
Google Earth Engine	大量的資料集、雲端平台、易於使用、可擴展性、靈活性、開放性	需要編寫程式碼

貳、研究設備及器材

一、硬體設備：筆記型電腦、手機(實地踏查時使用)

二、軟體設備：

(一) 程式語言：JavaScript

(二) 開發及測試環境：

1. 作業系統：Window 11
2. 編譯器：Ubuntu 20.04.2 LTS
3. IDE：Google Earth Engine 線上雲端編程平台

(三) 衛星影像：

1. **Sentinel-2** 是歐洲太空總署最新一代的光學衛星，以每 5 天一次的頻率拍攝台灣，可拍攝 13 個波段的高品質遙測影像（圖四），最高 10 公尺解析度，且為支持資料開放政策的高頻度光學衛星影像。

波段	波長 (μm)	波寬 (μm)	波段說明		解析度 (m)
01	0.443	0.020	Aerosol detection	沿海氣溶膠	60
02	0.49	0.065	Blue	藍光	10
03	0.56	0.035	Green	綠光	10
04	0.665	0.030	Red	紅光	10
05	0.705	0.015	Vegetation	植被紅邊	20
06	0.74	0.015	Vegetation	植被紅邊	20
07	0.783	0.020	Vegetation	植被紅邊	20
08	0.842	0.115	Near infrared	近紅外光	10
08A	0.865	0.020	Vegetation	植被紅邊	20
09	0.945	0.020	Water vapour	水氣	60
10	1.375	0.030	Cirrus	捲雲	60
11	1.61	0.090	Snow / ice / cloud	短波紅外光	20
12	2.19	0.180	Snow / ice / cloud	短波紅外光	20

圖四 Sentinel-2 波段光譜解析度介紹（來源：巨量空間資訊系統）

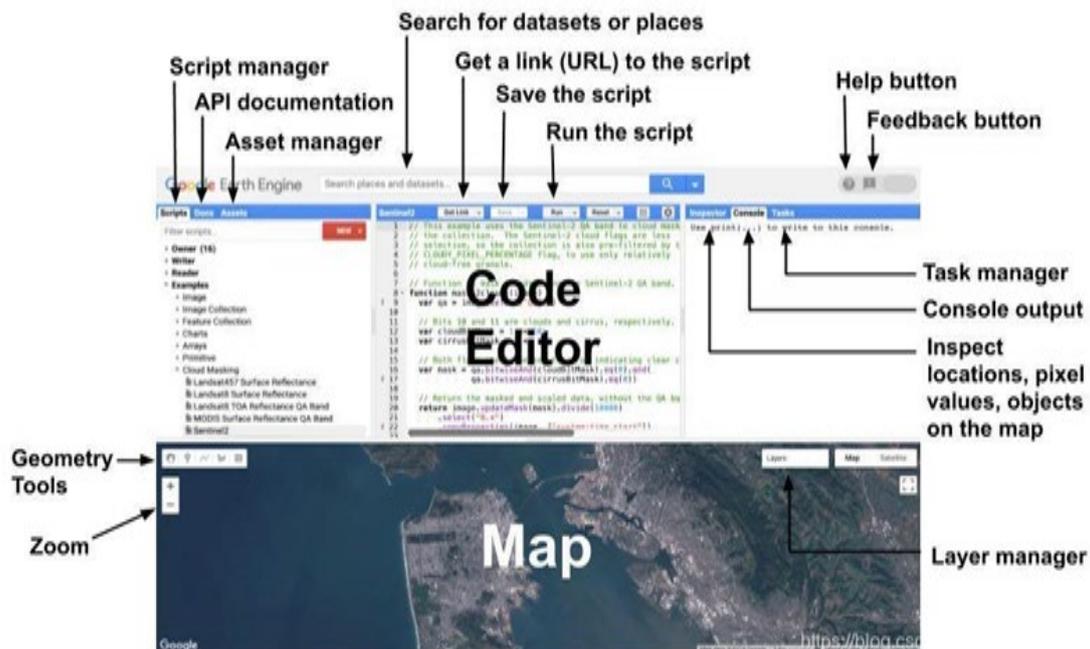
2. **Landsat 8** 是美國地質調查局（USGS）的一顆地球觀測衛星，於 2013 年由 Atlas-V 火箭成功發射。它搭載了兩種科學儀器：運行陸地成像儀（OLI）收集可見光、近紅外和短波紅外光譜帶以及全色帶的數據和熱紅外傳感器（TIRS），這兩種儀器提供了全球陸地的季節性覆蓋，空間分辨率為 30 米（可見光，近紅外，短波紅外），100 米（熱紅外）和 15 米（全色）如圖五。

Sensor	Spectral Band	Use Area	Wavelength	Resolution
OLI	Band 1	Coastal/Aerosol	0.433 – 0.453 μm	30 m
OLI	Band 2	Blue	0.450 – 0.515 μm	30 m
OLI	Band 3	Green	0.525 – 0.600 μm	30 m
OLI	Band 4	Red	0.630 – 0.680 μm	30 m
OLI	Band 5	Near Infrared	0.845 – 0.885 μm	30 m
OLI	Band 6	Short Wavelength Infrared (SWIR 1)	1.560 – 1.660 μm	30 m
OLI	Band 7	Short Wavelength Infrared (SWIR 2)	2.100 – 2.300 μm	30 m
OLI	Band 8	Panchromatic	0.500 – 0.680 μm	15 m
OLI	Band 9	Cirrus	1.360 – 1.390 μm	30 m
OLI	Band 10	Long Wavelength Infrared	10.30 – 11.30 μm	100 m
OLI	Band 11	Long Wavelength Infrared	11.50 – 12.50 μm	100 m

圖五 Landsat 8 波段光譜解析度介紹（來源: 開放地理空間實驗室）

（四）衛星影像取得：

Google Earth Engine 是一個強大的雲端運算平台（圖六），由 Google 與卡內基美隆大學、NASA 等學術機構合作開發。它的主要功能是讓使用者能夠取用、分析衛星遙測資料，讓衛星影像處理變得更加方便和高效，並且提供了多種衛星影像集合，例如 Landsat、Sentinel、MODIS 等。使用者可以根據需求和目標區域選擇合適的影像集合應用其強大的分析能力進行研究，例如植被指數計算、水體指數計算、土地使用變化監測等。它的指令都是基於 JavaScript 語法，讓使用者能夠儲存每次分析作業的指令檔，以方便下次進行類似的分析。



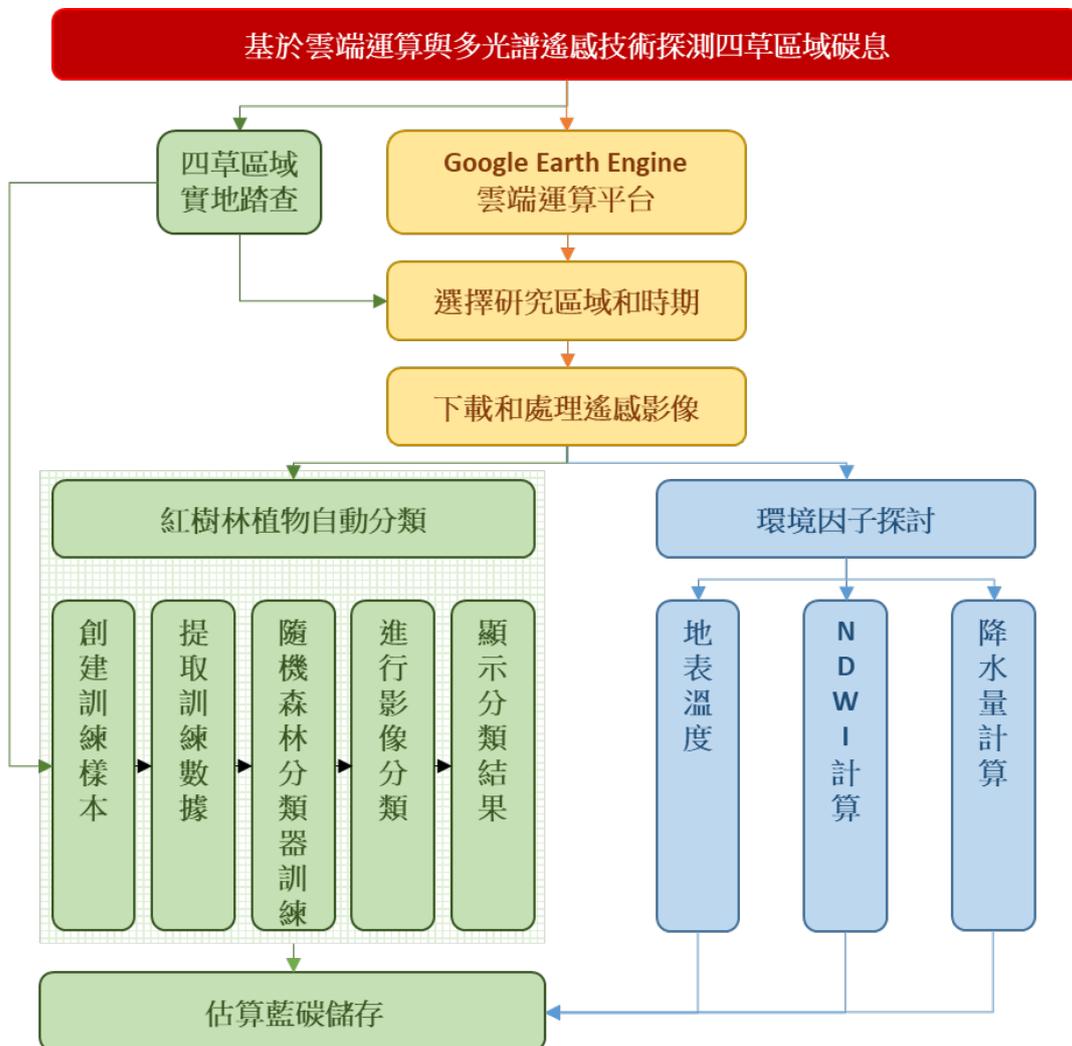
圖六 Google Earth Engine Code Editor（來源：Google Earth Engine 網站）

(五) 衛星影像處理與分析：

1. 過濾和裁剪影像集合：Google Earth Engine 允許使用者過濾和裁剪影像集合，以提高計算效率和精度。這有助於排除不需要的影像，例如雲層覆蓋的影像或超出目標區域的影像。
2. 定義 NDVI 函數：在 Google Earth Engine 中，使用者可以使用 `normalizedDifference()` 函數快速計算 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)。該函數接受近紅外波段和紅光波段的名稱作為參數。
3. 輸出和展示結果：最後，使用者可以使用 Google Earth Engine 提供的輸出和展示工具查看和分析得到的 NDVI 結果。

參、研究方法或過程

一、研究架構



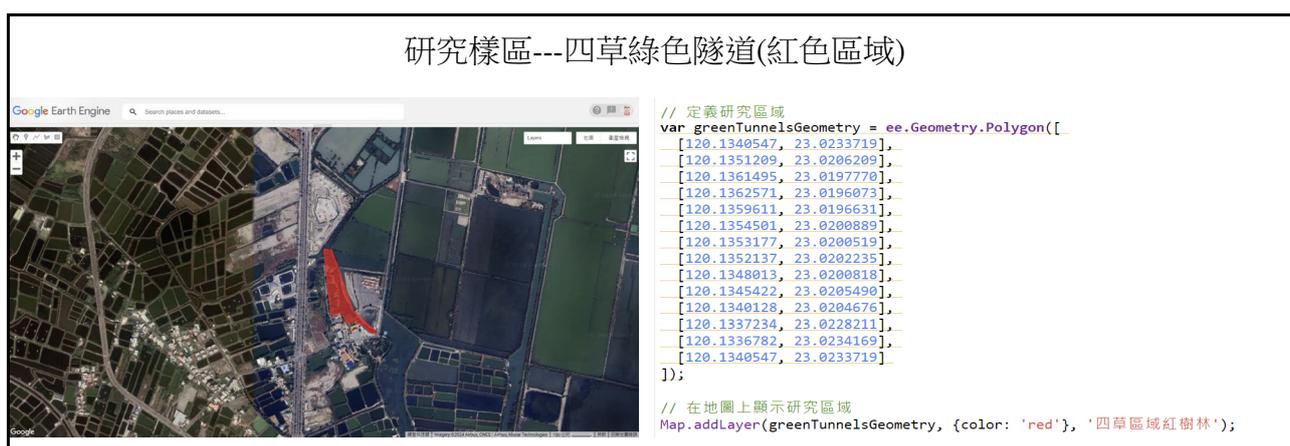
圖七 研究架構圖(圖片來源:作者自行繪製)

二、研究流程

(一) 選擇研究區域和時期

本研究選擇了四草綠色隧道作為研究區域，根據多邊形座標定位以程式碼框選出研究區域範圍(紅色)。選擇了 2018 年至 2023 年共六個時期作為樣區研究時期，以分析紅樹林的分佈和動態變化。研究時期的選擇是基於 Sentinel-2 衛星影像的可用性和品質。研究時期的影像皆有經過大氣校正、水體遮罩以及去雲，以減少水體和雲霧的干擾，以提高紅樹林的識別和分類的準確性（如圖八）。

1. 時間範圍過濾：filterDate(startDate, endDate)以這個指令限定影像集合時間範圍。
2. 地理範圍過濾：使用filterBounds(geometry)以這個指令限定影像集合的地理範圍。



圖八 以程式碼框選出研究樣區(圖片來源:作者執行結果截圖)

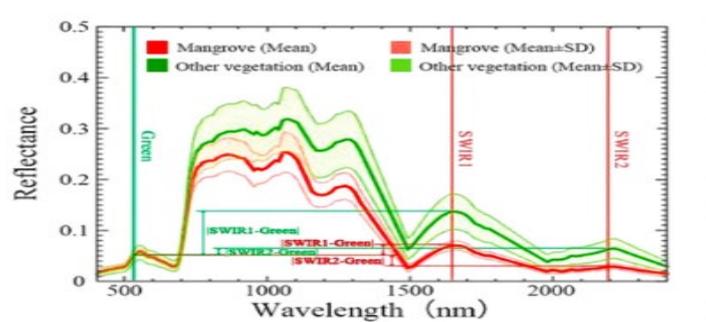
(二) 下載和處理遙感影像

加載 Sentinel-2 的表面反射率影像集合，並根據定義的時間和地理範圍進行篩選。在本研究中，雲層遮蔽與波段選擇是處理衛星影像的重要步驟。

以下是這兩個步驟的詳細說明：

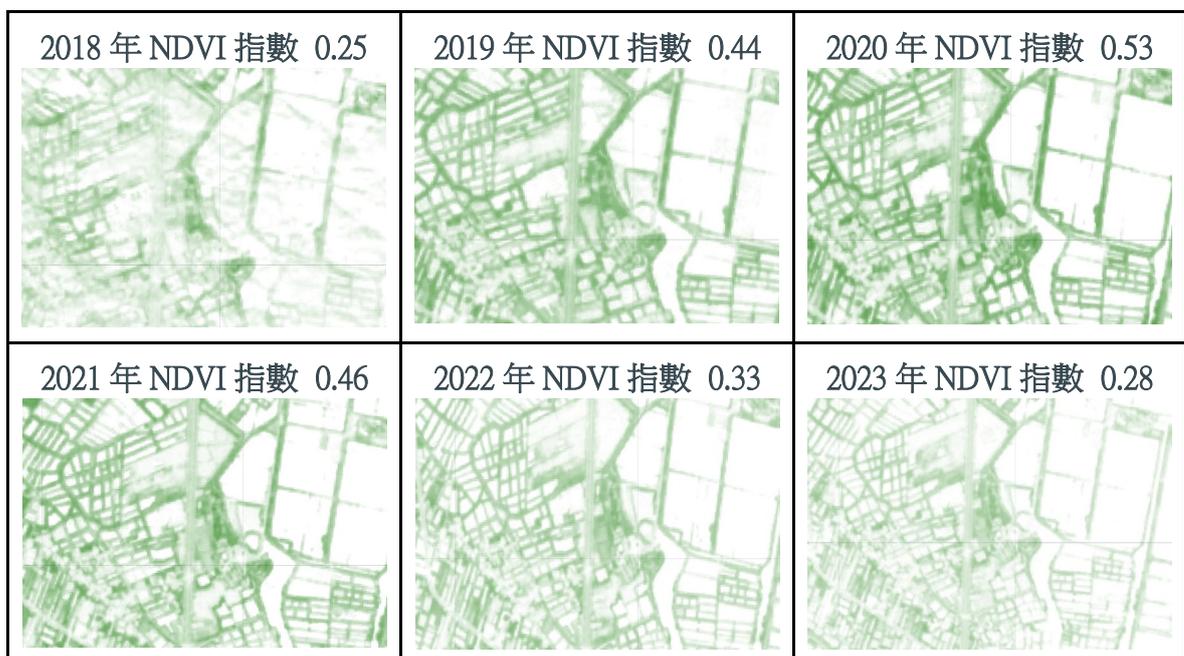
1. **雲層遮蔽**：為了確保分析的準確性，定義了一個名為 maskClouds 的函數，用於識別並遮蔽掉雲層和雲層邊緣（cirrus clouds）從衛星影像中去除雲層的干擾。首先，選擇了 SCL 波段，這是 Sentinel-2 影像的一個品質評估波段，用於雲層檢測，接著設定了兩個位元遮罩：cloudBitMask 和 cirrusBitMask，分別對應於雲層和雲層邊緣的位元位置，透過位元運算，將這些遮罩應用於 SCL 波段，生成一個新的遮罩，最後，使用 updateMask 方法將這個遮罩應用於影像，從而遮蔽掉雲層，並選擇了特定的波段（B2, B3, B4, B8）進行後續分析。
2. **中值合成影像**：使用 cloudMaskedCollection.median() 來建立中值合成影像。

3. **波段選擇**：在遙感分析中，不同的波段可以提供不同類型的地表信息，水筆仔、五梨跤(紅海欖)、欖李、海茄苳是台灣常見的紅樹植物，它們的葉片具有較高的光譜反射率，尤其是在近紅外波段。這使得它們在遙感影像中具有獨特的特徵，可以用於紅樹林的分類和監測。本研究選擇了以下波段：B2（藍光波段）、B3（綠光波段）、B4（紅光波段）、B8（近紅外波段），這些波段被用於植被指數計算、植被分類和其他地表特徵分析。例如，B8 波段在計算 NDVI（Normalized Difference Vegetation Index）時特別重要，因為它可以反映植被的健康狀態和密度。



圖九 不同類型植被的光譜反射率曲線圖（圖片來源：ScienceDirect 網站）

4. **NDVI 計算**：在 Google Earth Engine 中，使用 `normalizedDifference()` 函數快速計算 NDVI。該函數接受近紅外波段和紅光波段的名称作為參數。最後，使用平台提供的輸出和展示工具查看和分析得到 NDVI 可視化結果（如圖十）。經雲端計算後獲得的年度 NDVI 數據（圖十），發現 NDVI 指標指數自 2020 年至 2023 年呈現逐年減少的趨勢，表示植被覆蓋和健康狀況正在惡化。



圖十 NDVI 計算後遙感影像與數值(圖片來源:作者執行結果截圖)

(三) 紅樹林植物自動分類

本研究採用隨機森林算法，經實際踏查以表四的樹貌特徵蒐集四種紅樹林植物的座標點位做為訓練樣本（如表五），對處理後的遙感影像進行了紅樹林植物的自動分類，並生成了研究區域在不同時期的紅樹林植物的分布圖，以反映紅樹林植物的空間分佈和動態變化。以下是詳細的分類方法：

1. **創建訓練樣本：** 本研究經實地踏查根據四種植物樹貌特徵，從研究區域內以地理座標定位選取了多處具有代表性的樣本點，並為每個樣本點標記了對應的植物類型（包括：水筆仔、海茄苳、欖李、紅海欖）。

表四 四種紅樹林植物的樹貌特徵彙整表(資料來源:作者自行拍攝及整理)

植物名	紅海欖(五梨跤) Rhizophora stylosa	欖李 Lumnitzera racemosa	水筆仔 Kandelia obovata	海茄 Avicennia marina
樹貌特徵	樹冠廣卵形或圓形，樹枝向四面擴展，樹葉茂密。	樹冠廣卵形或圓形，樹枝向四面擴展，樹葉茂密。	樹冠圓錐形或卵形，樹枝向上生長，樹葉較稀疏。	樹冠廣卵形或圓形，樹枝向四面擴展，樹葉茂密。
樹皮	灰褐色，有縱裂紋。	灰褐色，有縱裂紋。	灰褐色，有縱裂紋。	灰褐色，有縱裂紋。
葉片	對生，革質，長橢圓形或卵形，長 8-15 公分，端尖或鈍，葉緣全緣，葉面有光澤。	互生，革質，倒卵形，長 5-6 公分，先端圓形或凹形，全緣或具波狀小齒。	互生，革質，倒卵形，長 5-6 公分，先端圓形或凹形，全緣或具波狀小齒。	葉片互生，革質，圓形或卵形，長 5-10 公分，先端圓形或凹形。
實地踏查照片				

表五 實地踏查定位點與實地踏查照片(資料來源:作者執行結果及整理)

水筆仔 實地踏查定位點座標	紅海欖(五梨朥) 實地踏查定位點座標	欖李 實地踏查定位點座標	海茄冬 實地踏查定位點座標
N23.0198594,E120.1358367	N23.0204777,E120.1352097	N23.0234326,E120.1339444	N23.0207224,E120.1348620
N23.0200022,E120.1355473	N23.0207224,E120.1348620	N23.0227279,E120.1340885	N23.0228291,E120.1342740
N23.0196937,E120.1359567	N23.0200606,E120.1355956	N23.0230710,E120.1341435	N23.0211193,E120.1347343
N23.0197702,E120.1359859	N23.0202380,E120.1354310	N23.0215127,E120.1345687	N23.0211665,E120.1346753
N23.0198044,E120.1358873	N23.0202309,E120.1354159	N23.0215939,E120.1345475	N23.0212677,E120.1346692
N23.0199069,E120.1357830	N23.0204018,E120.1352808	N23.0216510,E120.1345345	N23.0210878,E120.1346260
N23.0197325,E120.1358843	N23.0204401,E120.1352292	N23.0216994,E120.1345164	N23.0209928,E120.1347018
N23.0335180,E120.2259070	N23.0204429,E120.1351866	N23.0217846,E120.1344825	N23.0211251,E120.1346163
N23.0337180,E120.2255170	N23.0205376,E120.1351155	N23.0217318,E120.1345385	N23.0212967,E120.1346418
N23.0340780,E120.2255570	N23.0206185,E120.1350528	N23.0220885,E120.1344537	N23.0212581,E120.1345573
N23.0341880,E120.2250370	N23.0207150,E120.1350042	N23.0224338,E120.1343779	N23.0213523,E120.1345103
N23.0198726,E120.1358062	N23.0207589,E120.1349552	N23.0222548,E120.1344228	N23.0211973,E120.1345284
N23.0198955,E120.1357451	N23.0207255,E120.1348855		
N23.0199624,E120.1357220	N23.0206755,E120.1349247		
N23.0200214,E120.1356429	N23.0207885,E120.1348671		

實地踏查定位分布圖



2. **提取訓練數據**：使用中值合成影像，從每個樣本點提取波段值，這些波段值與樣本點的植被類型標籤一起形成訓練數據。
3. **隨機森林分類器訓練與模型驗證**：使用`ee.Classifier.smileRandomForest(50).train()`來訓練分類器，這是一種機器學習算法，適合處理多類別的分類問題。本研究以 7:3 進行樣本分配訓練與模型驗證，使其學會如何根據波段值識別不同的植被類型，並提高效能以確保其準確性與可靠性（圖十一）。

```

// 添加隨機列
samples = samples.randomColumn('random');

// 按照7:3的比例分割訓練和驗證數據
var split = 0.7;
var trainingSamples = samples.filter(ee.Filter.lt('random', split));
var validationSamples = samples.filter(ee.Filter.gte('random', split));

// 確保訓練數據集不為空
print('Training samples size:', trainingSamples.size());
print('Validation samples size:', validationSamples.size());

```

圖十一 模型建立與驗證程式碼(圖片來源:作者執行結果截圖)

4. **進行影像分類**：使用medianComposite.classify(classifier)來對中值合成影像進行分類。將訓練好的分類器應用於整個中值合成影像，對每個像素進行紅樹林植物類型的分類。
5. **顯示分類結果**：在地圖上顯示分類結果，並為不同的紅樹林植物類型指定不同的顏色，以便於視覺辨識。

(四) 估算藍碳儲存

本研究從 Google Earth Engine 的資料集並參考文獻資料的數據（如圖十二），以及研究區域經機器學習所獲取紅樹林的分佈圖，估算了研究區域不同時期紅樹林植物的藍碳儲存量。

Table 1. Whole-ecosystem inventories of above- and below-ground carbon biomass and soil carbon for natural and replanted mangrove forests.

Location	Dominant species	Age (years)	Total (tC ha ⁻¹)	AGB (tC ha ⁻¹)	BGB and soil (tC ha ⁻¹)	Roots/AGB (tC ha ⁻¹)	Roots (tC ha ⁻¹)	Soil (tC ha ⁻¹)	Soil depth (cm)
Peninsular Malaysia	<i>Rhizophora apiculata</i>	80	2205	312	1893	NA	NA	NA	3800
	<i>R. apiculata</i>	18	1117	193	924	NA	NA	NA	4000
	<i>R. apiculata</i>	5	479	87	392	NA	NA	NA	2800
Southern Vietnam	<i>R. apiculata</i>	6	1179	54	1125	NA	NA	NA	3400
	<i>R. apiculata</i>	20	979	72	907	NA	NA	NA	2750
	<i>R. apiculata</i>	35	1904	153	1752	NA	NA	NA	3600
Southern China	<i>Kandelia candel</i>	NA	619	64	555	2.0	130	425	1850
	<i>K. candel</i>	NA	391	43	348	2.2	94	254	1900
	<i>K. candel</i>	NA	332	7	325	1.1	8	317	1175
Indonesia	<i>Avicennia marina</i>	NA	437	24	413	NA	NA	NA	80
	<i>Rhizophora stylosa</i>	NA	703	19	684	NA	NA	NA	62
	<i>Sonneratia caseolaris</i>	NA	654	28	626	NA	NA	NA	1450
Southern Thailand	<i>R. apiculata</i>	25	808	138	670	1.0	142	528	1900
	<i>R. apiculata</i>	5	579	20	559	2.9	57	502	800
	<i>Ceriops decandra</i>	3	600	29	571	4.4	127	444	1000
Western Australia	<i>R. stylosa</i>	NA	863	115	621	1.1	127	621	1500
	<i>A. marina</i>	NA	662	55	515	1.7	92	515	775
Queensland, Australia	<i>R. stylosa</i>	NA	2139	297	1842	1.1	312	1530	3500

AGB: Aboveground biomass; BGB: Belowground biomass; NA: Not available.
Data from [48,50–54,10].

圖十二：紅樹林生態系統每公頃碳存量（資料來源 Alongi, D. M 等人, 2014）

1. **面積計算**：將分類後的影像與像素面積相乘來完成，並將結果以公頃為單位進行匯總。使用`ee.Image.pixelArea()`函數來計算每個像素的面積，並將其轉換為公頃單位（通過除以 10,000）。
2. **植被類型面積匯總**：利用`reduceRegion`函數和`ee.Reducer.sum().group()`方法，計算每種植被類型的總面積。
3. **碳儲存量估算**：基於文獻探討根據每種植被類型每公頃的碳儲存量來估算總碳儲存量，定義了一個字典`carbonStoragePerHectare`，其中包含了每種植被類型每公頃的碳儲存量（單位：噸）。

4. **碳儲存量分佈**：定義 `carbonStorageDistribution` 字典，用於表示不同植物類型的碳儲存量在地上部、地下部和土壤有機碳之間的分佈比例。
5. **總碳儲存量計算**：將面積與每公頃碳儲存量相乘，並根據碳儲存量分佈來計算每種植被類型地上部、地下部和土壤有機碳的儲存量。使用一個迴圈來遍歷每種植被類型，並計算其總碳儲存量及其在地上部、地下部和土壤有機碳的分佈（圖十三）。

```
// 定義每種植被類型每公頃的碳儲存量
var carbonStoragePerHectare = {
  '0': 236.7, // 水筆仔
  '1': 204.4, // 海茄冬
  '2': 189.1, // 欖李
  '3': 173.6, // 紅海欖
};

// 定義每種植被類型每公頃的碳儲存量分佈
var carbonStorageDistribution = {
  'aboveground': 0.20, // 地上部有機碳
  'belowground': 0.60, // 地下部有機碳
  'soil': 0.20 // 土壤有機碳
};

// 計算每種植被類型的碳儲存量
var carbonStorage = {};
for (var landcover in carbonStoragePerHectare) {
  var area = ee.Number(areaDict.get(landcover));
  var totalStorage = area.multiply(carbonStoragePerHectare[landcover]);
  carbonStorage[landcover] = {
    'total': totalStorage,
    'aboveground': totalStorage.multiply(carbonStorageDistribution['aboveground']),
    'belowground': totalStorage.multiply(carbonStorageDistribution['belowground']),
    'soil': totalStorage.multiply(carbonStorageDistribution['soil'])
  };
};

// 打印每種植被類型的碳儲存量
for (var landcover in carbonStorage) {
  print('Landcover: ' + landcover + ' total carbon storage (tons): ', carbonStorage[landcover]['total'].format('%0.2f'));
  print('Landcover: ' + landcover + ' aboveground carbon storage (tons): ', carbonStorage[landcover]['aboveground'].format('%0.2f'));
  print('Landcover: ' + landcover + ' belowground carbon storage (tons): ', carbonStorage[landcover]['belowground'].format('%0.2f'));
  print('Landcover: ' + landcover + ' soil organic carbon storage (tons): ', carbonStorage[landcover]['soil'].format('%0.2f'));
}
```

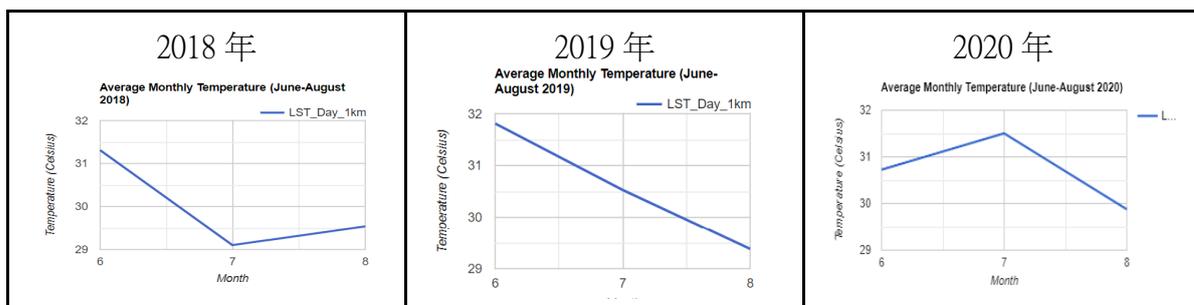
圖十三 碳儲存估算程式碼(圖片來源:作者執行結果截圖)

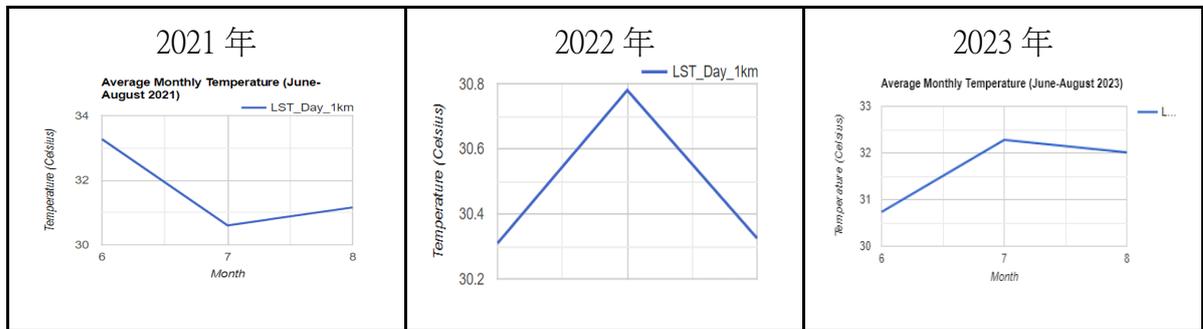
(五) 環境因子探討

水筆仔、紅海欖、欖李、海茄冬的生長期都在夏季，本研究參考文獻的碳儲量包括水筆仔的胎生苗以及花果，因此本研究除了以年度作為探討期間外也增加了不同年度夏季正值植被生長期的研究數據以進行環境因子的分析探討。

1. **地表溫度**：以 MODIS LST 數據集進行 2018 年至 2023 年 6 至 8 月地表平均溫度的計算，單位:攝氏(°C)，結果如表六。

表六 2018 年至 2023 年 6 至 8 月地表平均溫度(資料來源:作者自行計算並截圖)





2. **NDWI 計算**：以 JavaScript 程式碼利用 Google Earth Engine API 計算並顯示 NDWI 水體指數，進行遙感衛星影像數據分析，並將 NDWI 圖層添加到地圖上，同時將地圖中心點設置為本研究所框選的紅樹林地理區域（如圖十四）。

```
// 計算歸一化差異水指數 (NDWI)
var ndwi = image.normalizedDifference(['B3', 'B5']).rename('NDWI');
var ndwiParams = {
  min: -1,
  max: 1,
  palette: ['green', 'white', 'blue'] // 綠色表示植被，藍色表示水體
};
print(ndwi, 'NDWI');
Map.addLayer(ndwi, ndwiParams, 'NDWI');

// 將地圖中心設置為ROI
Map.setCenter(120.1351209, 23.0206209, 14);
```

圖十四 計算 NDWI 指數程式碼(圖片來源:作者執行結果截圖)

3. **降水量計算**：以 Google Earth Engine API 來處理和視覺化全球降水量數據。從 UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY 數據集中獲取了降水量數據，引用特定的日期和地理坐標，計算本研究所框選的紅樹林地理區域平均總降水量（圖十五）。

```
// 定義 CHIRPS 資料集
var chirps = ee.ImageCollection('UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY');
// 取得指定日期範圍內的降水量總和
var precipitation = chirps.filterDate('2018-06-01', '2018-08-31')
  .sum()
  .clip(greenTunnelsGeometry);
// 降水量視覺化設定
var rainVis = {
  min: 0,
  max: 100,
  palette: ['red', 'yellow', 'green', 'cyan', 'blue', 'purple']
};
// 顯示低解析度的降水量資料
Map.addLayer(precipitation, rainVis, 'Precipitation 5000 m');
// 焦點操作以提高解析度
var precipitationHighRes = precipitation.focalMean(10, 'square')
  .clip(greenTunnelsGeometry)
  .reproject('EPSG:4326', null, 500);
// 顯示高解析度的降水量資料
Map.addLayer(precipitationHighRes, rainVis, 'Precipitation 500 m');
// 設置地圖中心和縮放級別
Map.setCenter(120.135, 23.021, 15);
// 計算總降水量
var totalPrecipitation = precipitation.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: greenTunnelsGeometry,
  scale: 500,
  maxPixels: 1e9
});
// 打印總降水量
print('Total Precipitation (mm):', totalPrecipitation.get('precipitation'));
```

圖十五 計算降水量程式碼(圖片來源:作者執行結果截圖)

肆、研究結果與討論

一、四種紅樹林植物反射波段分布

本研究利用 Google Earth Engine 進行影像集合過濾和裁剪，以中值合成影像，並以包括 B2（藍色）、B3（綠色）、B4（紅色）和 B8（近紅外），進行水筆仔、紅海欖、欖李、海茄苳的波段反射率計算。表七顯示了透過雲端分析運算，計算出四草區域四種紅樹林植物（紅海欖、欖李、水筆仔、海茄苳）在不同波段的反射率。波段的反射率通常表示為一個介於 0 到 1 之間的小數。這個值代表了從地表反射回衛星傳感器的光的比例。例如，如果反射率為 0.3，則意味著 30% 的入射光被反射。這有助於透過遙感技術識別和分類紅樹林植被。

表七 透過雲端運算分析出四種紅樹林植物反射率(資料來源:作者自行計算結果)

	藍光 (B2) 450~500nm	綠光 (B3) 500~550nm	紅光 (B4) 600~650nm	近紅外 (B8) 700~800nm
水筆仔	0.2094	0.2306	0.2143	0.2576
五梨跤	0.2208	0.2438	0.2404	0.2636
欖李	0.1247	0.1460	0.1161	0.2738
海茄苳	0.2572	0.2621	0.2507	0.2885

二、四種紅樹林植物分布與數據

本研究使用隨機森林算法，對運算後的遙感影像進行了紅樹林的自動分類，最後在地圖上顯示分類結果，並使用不同顏色來表示不同的地表覆蓋類型。

表八表示了從 2018 年至 2023 年間，不同年度以及不同年度夏季四種紅樹林植物經由雲端計算出的面積數據。

表八 不同紅樹林植物經雲端運算出的數據(資料來源:作者自行計算結果)

2018 年度	2018 年夏季
	Google Earth Engine 的資料集內沒有 2018 年 6 月至 8 月的資料。

2019 年度		2019 年夏季	
Inspector	Console	Tasks	
水筆仔面積 (公頃):	0.54	JSON	JSON
海茄冬面積 (公頃):	0.61	JSON	JSON
欖李面積 (公頃):	0.16	JSON	JSON
紅海欖面積 (公頃):	1.60	JSON	JSON
其他植被面積 (公頃):	0.14	JSON	JSON

2020 年度		2020 年夏季	
Inspector	Console	Tasks	
水筆仔面積 (公頃):	0.44	JSON	JSON
海茄冬面積 (公頃):	1.32	JSON	JSON
欖李面積 (公頃):	0.25	JSON	JSON
紅海欖面積 (公頃):	0.97	JSON	JSON
其他植被面積 (公頃):	0.08	JSON	JSON

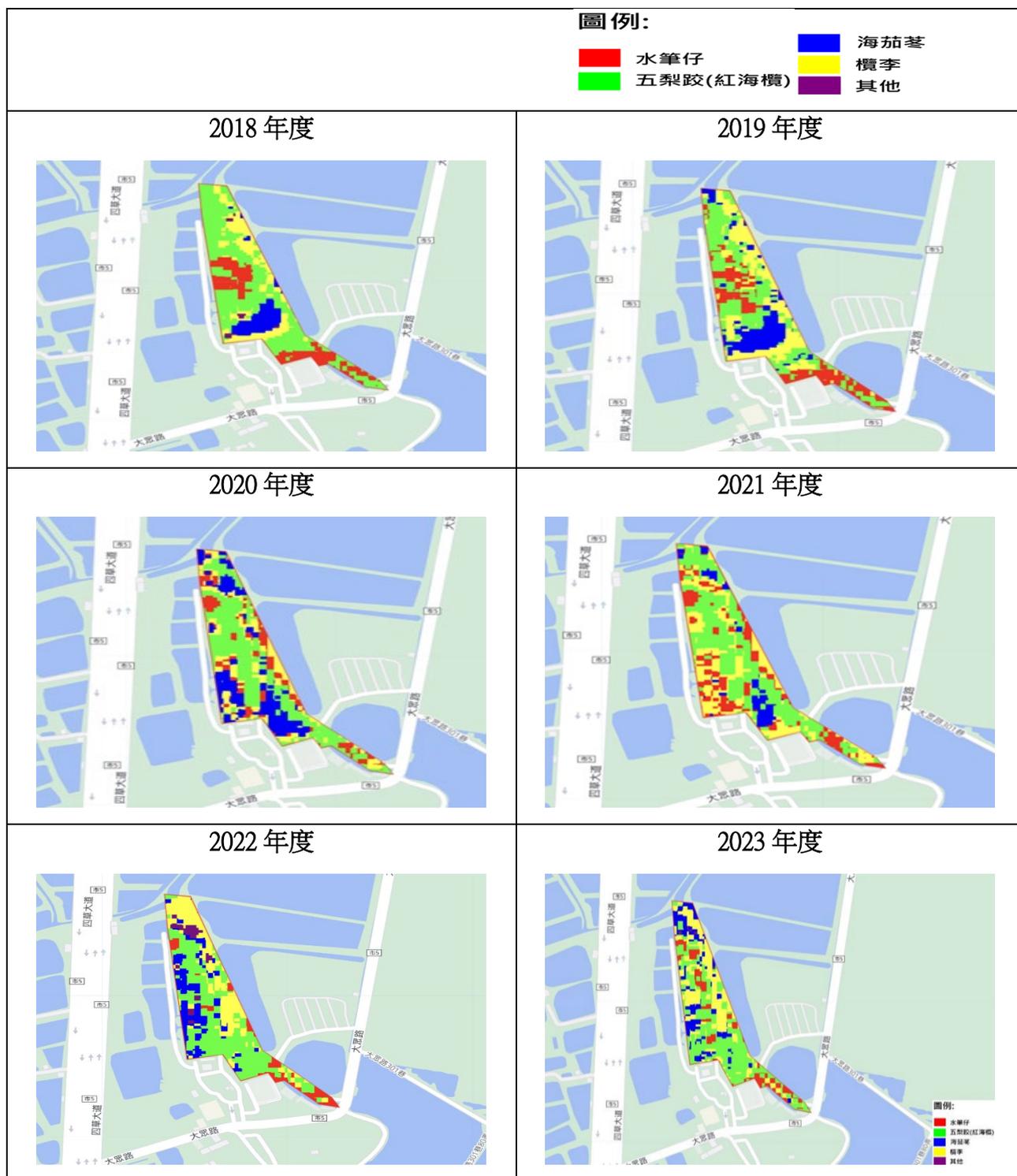
2021 年度		2021 年夏季	
Inspector	Console	Tasks	
水筆仔面積 (公頃):	0.16	JSON	JSON
海茄冬面積 (公頃):	1.74	JSON	JSON
欖李面積 (公頃):	0.16	JSON	JSON
紅海欖面積 (公頃):	0.83	JSON	JSON
其他植被面積 (公頃):	0.16	JSON	JSON

2022 年度		2022 年夏季	
Inspector	Console	Tasks	
水筆仔面積 (公頃):	0.16	JSON	JSON
海茄冬面積 (公頃):	1.10	JSON	JSON
欖李面積 (公頃):	0.16	JSON	JSON
紅海欖面積 (公頃):	1.47	JSON	JSON
其他植被面積 (公頃):	0.16	JSON	JSON

2023 年度		2023 年夏季	
Inspector	Console	Tasks	
水筆仔面積 (公頃):	0.16	JSON	JSON
海茄冬面積 (公頃):	1.18	JSON	JSON
欖李面積 (公頃):	0.16	JSON	JSON
紅海欖面積 (公頃):	1.47	JSON	JSON
其他植被面積 (公頃):	0.08	JSON	JSON

表九以紅色顯示為水筆仔、綠色顯示為紅海欖、黃色顯示為欖李、藍色顯示為海茄苳、紫色顯示為其它植物，用以展示可視化不同紅樹林植物分布覆蓋的變化趨勢圖像。研究發現 Google Earth Engine 2018 年 6 月至 8 月期間的資料不完整，因此可會影響 2018 年的衛星影像分析。

表九 不同紅樹林植物可視化分布圖(資料來源:作者執行結果截圖)



三、四種紅樹林植物面積統計

表十列出了運算後各年度紅樹林植物的平均面積數據，發現紅樹林植物總面積歷年沒有太大的變化，個別紅樹林植物面積。

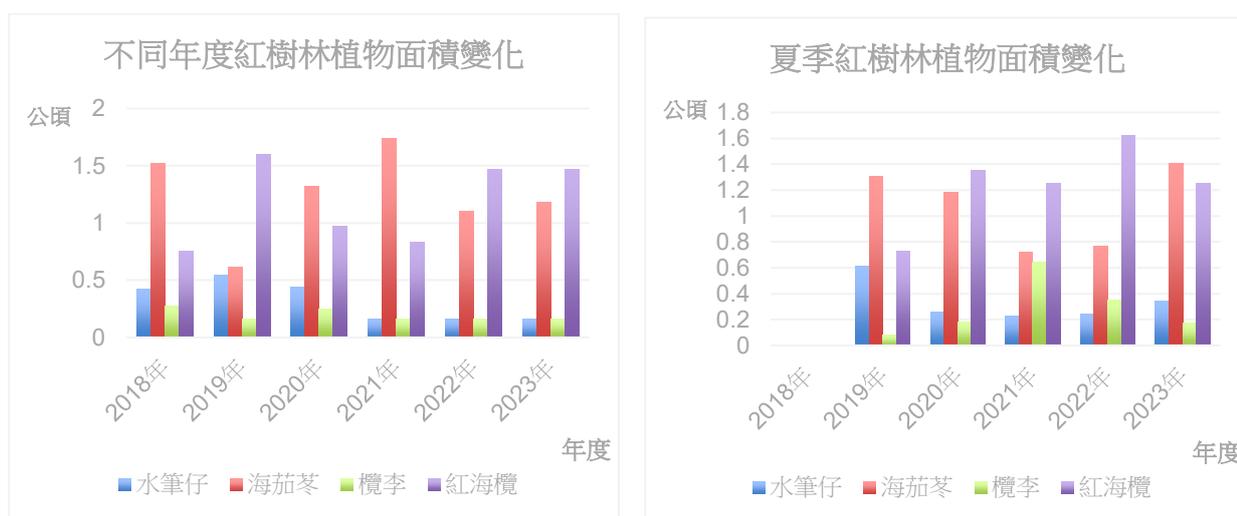
表十 不同年度與夏季紅樹林植物面積數據統計(資料來源:作者自行計算結果)

		水筆仔	海茄冬	欖李	紅海欖	合計
2018 年	年度	0.42	1.52	0.27	0.76	2.97
	夏季	無資料	無資料	無資料	無資料	無資料
2019 年	年度	0.54	0.61	0.16	1.60	2.91
	夏季	0.61	1.31	0.08	0.73	2.73
2020 年	年度	0.44	1.32	0.25	0.97	2.98
	夏季	0.26	1.18	0.18	1.35	2.97
2021 年	年度	0.16	1.74	0.16	0.83	2.89
	夏季	0.23	0.72	0.64	1.25	2.84
2022 年	年度	0.16	1.10	0.16	1.47	2.89
	夏季	0.24	0.77	0.35	1.62	2.98
2023 年	年	0.16	1.18	0.16	1.47	2.97
	夏季	0.34	1.41	0.17	1.05	2.97

圖十六可視化圖表看到個別植物平均面積有明顯的變化，基於運算結果說明如下：

- (一)水筆仔與欖李呈現出減少的趨勢，2023 年比 2018 年的個別植物總面積水筆仔減少 0.26 公頃而欖李的植物面積減少 0.11 公頃，而且 2021 年至 2023 年期間兩種植物的估算面積皆為 0.16 公頃。
- (二)海茄冬在 2020 年與 2019 年相比，減少了 0.71 公頃。
- (三)紅海欖年度面積呈現增加趨勢，2023 年比 2018 年增加了 0.71 公頃。
- (四)夏季的紅樹林植物總面積皆比該年度總面積少，唯有 2022 年夏季的總面積比該年度面積增加了 0.09 公頃。

(五)當研究區域的平均溫度與平均降水量同時增加時，則該年度的紅樹林總面積會比前一年減少。2019 年比 2018 年降水量增加 16.8 mm，面積減少 0.06 公頃；2021 年比 2020 年降水量增加 46.2 mm，面積減少 0.09 公頃。



圖十六 不同年度紅樹林植物面積變化(圖片來源:作者自行計算結果)

由以上的面積變化與探討出的結果發現，NDVU、NDWI 指標指數、地表溫度以及降水量皆會影響紅樹林個別植物的生長，也影響總面積的些微變化。

四、碳儲存量估算

(一) 四種紅樹植被藍碳儲存量估算

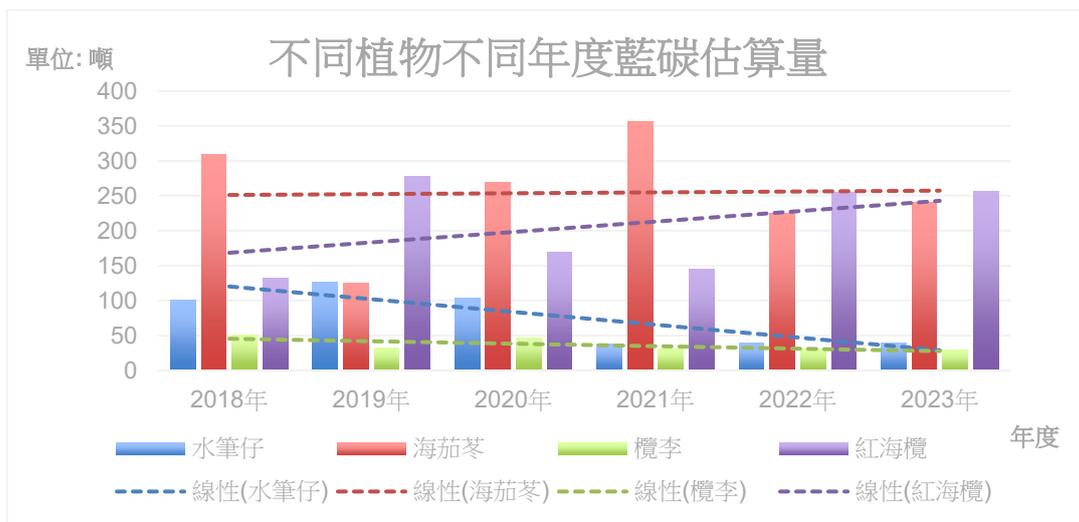
從表十一發現 2018 年至 2023 年研究期間，研究區域的紅樹林年度總碳存量有逐年減少趨勢，2023 年比 2018 年的總碳存量減少了 28.63 噸，而 2022 年的年度總碳存量最低，2021 年的夏季藍碳總估算量為最少。

表十一 不同年度植被藍碳儲存估算數據統計 (資料來源:作者自行計算結果)

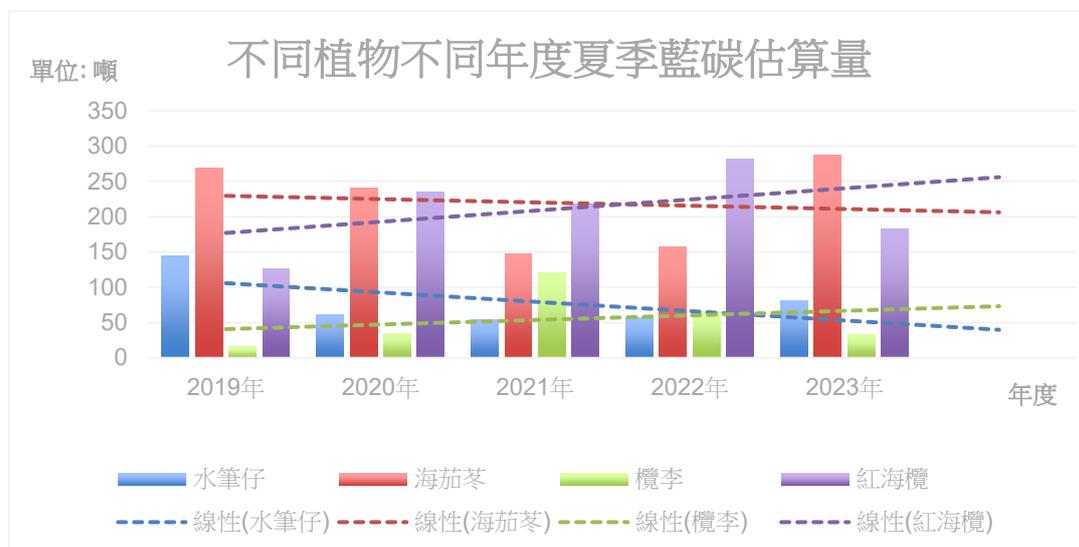
單位: 噸	水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖	合計
2018 年年度	101.17	309.68	50.38	132.69	593.92
2018 年夏季	無資料	無資料	無資料	無資料	無資料
2019 年年度	126.66	124.97	31.80	277.78	561.21
2019 年夏季	144.95	268.71	15.65	126.79	556.10
2020 年年度	103.55	269.10	46.77	168.72	588.14
2020 年夏季	61.22	241.15	34.36	234.90	571.63

2021 年年度	38.42	356.27	30.57	144.70	569.96
2021 年夏季	53.34	147.11	120.20	217.44	538.09
2022 年年度	38.95	225.02	30.26	254.37	548.60
2022 年夏季	56.33	156.89	65.85	281.15	560.22
2023 年年度	39.03	240.89	29.65	255.72	565.29
2023 年夏季	81.28	287.48	32.34	182.70	583.80

從圖十七與圖十八趨勢線發現水筆仔的總碳存量呈現減少趨勢，紅海欖呈現增加趨勢。

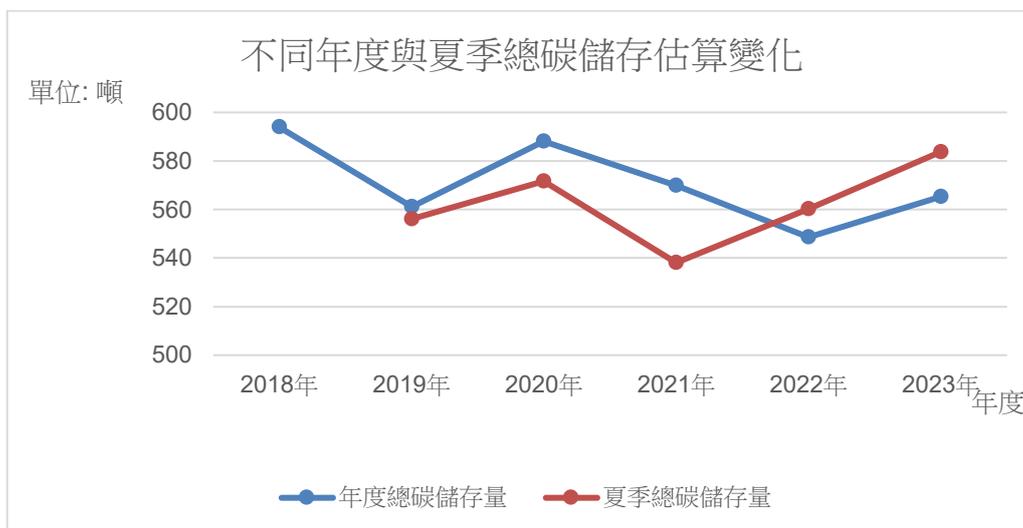


圖十七 不同植物不同年度藍碳變化(資料來源:作者自行計算結果)



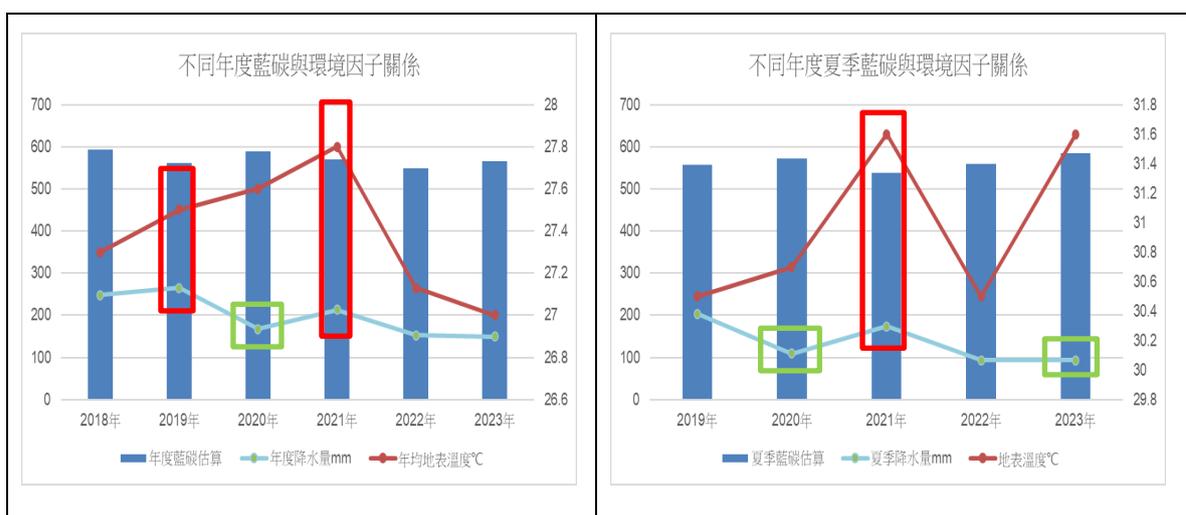
圖十八 不同植物不同年度藍碳變化(資料來源:作者自行計算結果)

進一步發現 2021 年至 2023 年水筆仔與欖李的植物平均總面積皆為 0.16 公頃，估算出的總碳儲存量卻不同，由此可以得知紅樹林的面積與總碳存量並沒有完全的正相關。圖十九在 2022 年與 2023 年的夏季平均總碳存量皆比該年度平均總碳存量高。



圖十九 不同年度與夏季總碳儲存估算變化(資料來源:作者自行計算結果)

圖二十發現當地表溫度與降水量增加時，平均總碳存量則是減少；當降水量減少時縱使溫度上升，總碳存量增加。發現降水量對於總碳存量的影響大於地表溫度。



圖二十 不同年度與夏季藍碳與環境因子的關係(資料來源:作者自行計算結果)

(二) 四種植被不同部位藍碳儲存量估算

四草綠色隧道的水深約為一米多，不到兩米的高度，本研究根據參考文獻資料以雲端運算的方式提供了表十二-1 至表十二-6，不同年度四種不同紅樹林植物地上部、地下部含土壤有機碳儲存量統計，對於評估紅樹林的碳匯功能和氣候變化緩解潛力具有重要意義。

表十二-1 2018 年度與夏季植被不同部位藍碳儲存估算數據統計(資料來源:作者自行計算結果)

2018 年		水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖
地上部碳儲存量 (tons)	年度	2.02	6.19	1.00	2.65
	夏季	無資料	無資料	無資料	無資料
地下部含土壤碳儲存量 (tons)	年度	98.98	303.31	49	129.85
	夏季	無資料	無資料	無資料	無資料

表十二-2 2019 年度植被不同部位藍碳儲存估算數據統計(資料來源:作者自行計算結果)

2019 年		水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖
地上部碳儲存量 (tons)	年度	2.53	2.49	0.6	5.55
	夏季	2.89	5.37	0.31	2.53
地下部含土壤碳儲存量 (tons)	年度	123.97	122.01	29.4	271.95
	夏季	141.61	263.13	15.19	123.97

表十二-3 2020 年度植被不同部位藍碳儲存估算數據統計(資料來源:作者自行計算結果)

2020 年		水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖
地上部碳儲存量 (tons)	年度	2.07	5.38	0.93	3.37
	夏季	1.22	4.82	0.68	4.69
地下部含土壤碳儲存量 (tons)	年度	101.43	263.62	45.57	165.13
	夏季	59.78	236.18	33.32	229.81

表十二-4 2021 年度植被不同部位藍碳儲存估算數據統計(資料來源:作者自行計算結果)

2021 年		水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖
地上部碳儲存量 (tons)	年度	0.76	7.12	0.61	2.89
	夏季	1.06	2.94	2.44	4.30
地下部含土壤碳儲存量 (tons)	年度	37.24	213.76	18.34	86.82
	夏季	51.94	144.06	119.56	210.7

表十二-5 2022 年度植被不同部位藍碳儲存估算數據統計(資料來源:作者自行計算結果)

2022 年		水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖
地上部碳儲存量 (tons)	年度	0.77	4.50	0.60	5.08
	夏季	1.27	3.18	1.31	5.62
地下部含土壤碳儲存量 (tons)	年度	37.73	220.50	29.4	248.92
	夏季	62.23	155.82	64.19	248.03

表十二-6 2023 年度植被不同部位藍碳儲存估算數據統計(資料來源:作者自行計算結果)

2023 年		水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖
地上部碳儲存量 (tons)	年度	0.78	4.88	0.53	5.14
	夏季	1.62	5.70	0.67	3.64
地下部含土壤碳儲存量 (tons)	年度	38.22	239.12	25.97	251.86
	夏季	79.38	279.30	32.83	178.36

五、環境因子的探討

(一) 地表溫度與降水量

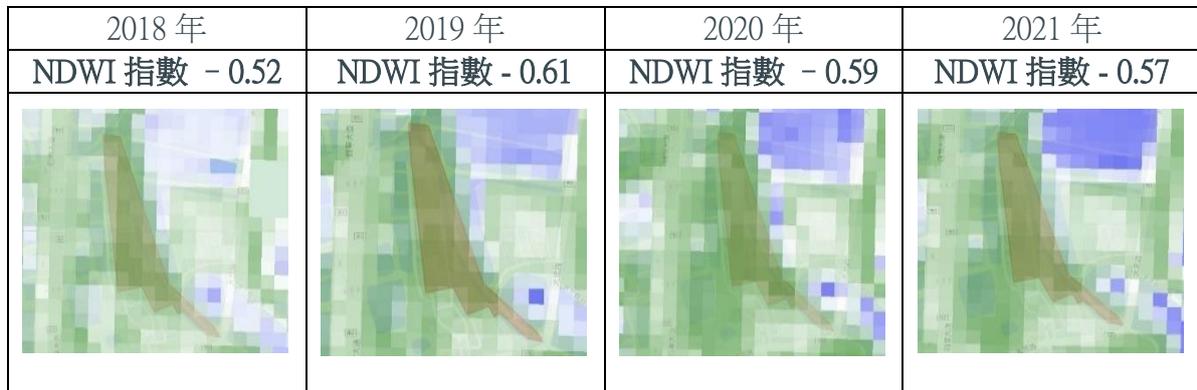
以下為應用雲端平台與衛星資料以程式碼執行後，將 2018 年至 2023 年的年度地表溫度以及降水量數據以圖表方式呈現與藍碳估算量的關係，從圖十八發現 2019 年和 2021 年的年度地表溫度與降水量都比前一年上升，而總碳存量都比前一年減少；2021 年夏季的地表溫度與降水量都比 2022 年多，而總碳存量減少。因而推論當平均地表溫度與降水量都增加時總碳存量會減少。更進一步發現平均降水量少於前一年度時，縱使地表溫度增加，平均總碳存量增加。從表六發現 2019 年和 2021 年的年度紅樹林總面積與 2021 年夏季的紅樹林總面積都比前一年減少。2021 年的年度與夏季地表溫度與降水量都比前一年上升，而總面積比 2020 年減少。因此推論地表溫度與降水量會影響紅樹林植物的總面積也會影響藍碳儲存量。

表十三 不同年度的 6 月至 8 月的降水量統計表(資料來源:作者自行計算結果)

	夏季降水量	年度降水量
2018 年	212.6 (mm)	247.9 (mm)
2019 年	204.2 (mm)	264.7 (mm)
2020 年	109.7(mm)	167.2 (mm)
2021 年	174.0 (mm)	213.4 (mm)
2022 年	93.6 (mm)	152.1 (mm)
2023 年	93.4 (mm)	149.7 (mm)

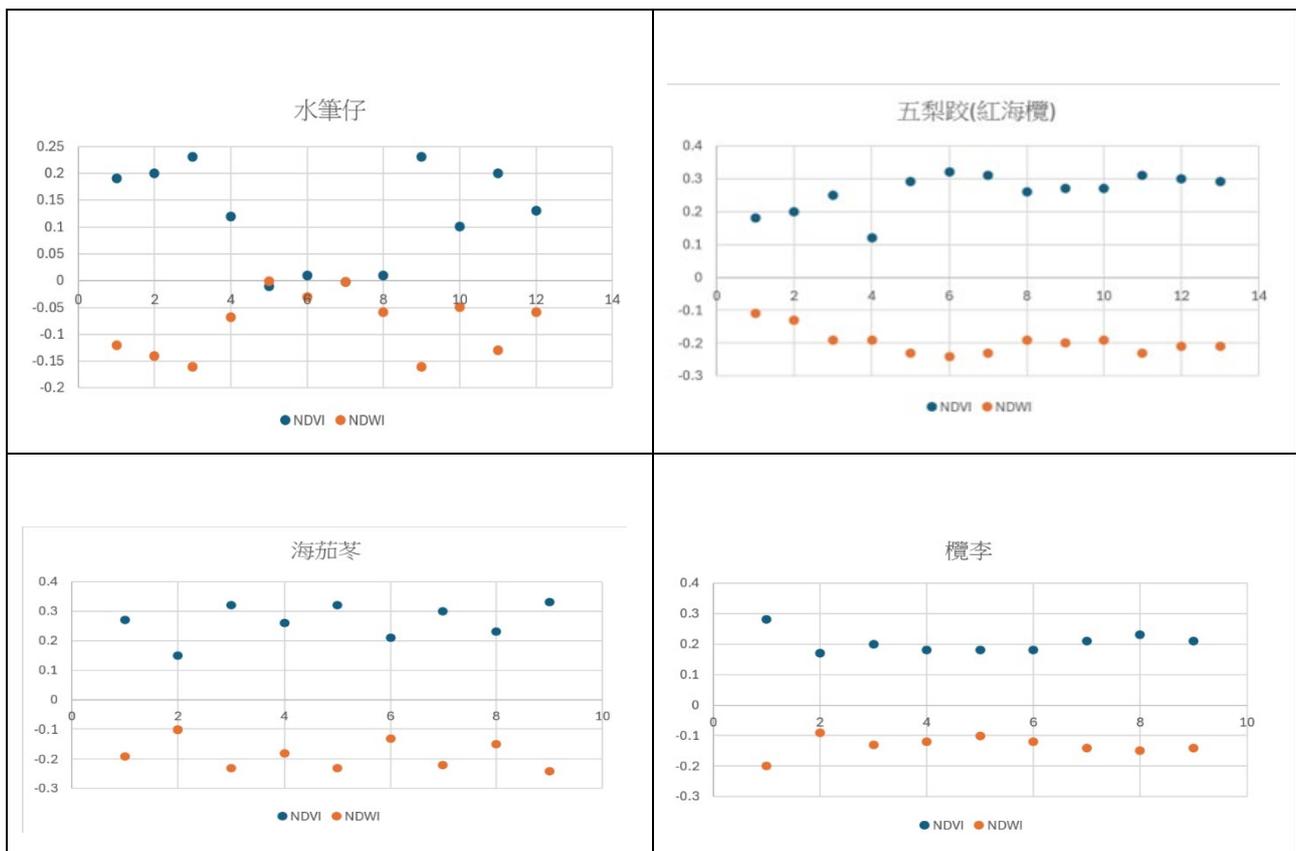
(二) NDWI 計算：

圖二十一為應用雲端平台與 Landsat 8 衛星資料以程式碼計算 NDWI，研究區域所計算出來的指數。歷年 NDWI 的指數趨勢與圖十四的年度海茄苳的總面積趨勢呈現一致;與圖十五的年度海茄苳的藍碳估算量也呈現一致的趨勢，這反映在本研究的區域裡，海茄苳的生長和覆蓋面積與水體變化有密切的關聯。



圖二十一 不同年度 NDWI 指數與圖像(資料來源:作者執行結果截圖)

從圖二十二發現當 NDWI 指標下降時，NDVI 產生上升趨勢，而當 NDWI 指標上升時，情形則反之。由此推論紅樹林個別植物生長情形與指標指數有關聯。



圖二十二 不同植物與指標關係圖(資料來源:作者執行結果截圖)

伍、結論與應用

本研究應用雲端運算平台 Google Earth Engine 與平台內豐富的衛星影像資料集，使用 JavaScript 程式語言撰寫隨機森林算法，以隨機森林算法對台南市安南區四草綠色隧道的紅樹林植物進行了自動分類，並估算了其藍碳儲存量。研究結果顯示 2018 年至 2023 年本研究區域的紅樹植被面積約 2.9 公頃，紅樹林總碳儲存量有逐年減少的趨勢，與 2018 年相比，2023 年的平均總碳儲存量減少了 28.63 噸。

應用 MODIS 的地表溫度資料和 Landsat 8 的降水量資料，以及計算 NDVI 和 NDWI 指標指數結果進行環境因子探討，發現當地表溫度與降水量同時增加，則平均總碳儲量減少。歷年 NDVI 指數呈現下跌趨勢表示研究區域的植被健康狀態正在惡化；不同年度 NDWI 指數與海茄苳的總面積和總碳儲量皆呈現一致的趨勢，推論本研究區域裡海茄苳的生長和覆蓋面積與水體變化有密切的關聯。

驗證環境因子會影響個別紅樹林植物的面積與總碳存量。另外從夏季研究以及 NDWI 研究發現，Google Earth Engine 資料庫裡衛星影像的資料有些不完整的情形，本研究 2018 年的夏季植物面積與碳儲存量皆無資料可用以進行研究分析，同時發現同一顆衛星影像的資料集更新時間也不一致，例如 Sentinel-2 衛星關於 NDWI 的資料集僅提供至 2021 年，官網公告下次更新時間為 2024 年 7 月。

一、結論

- (一) 遙感技術的應用：本研究利用 Google Earth Engine 等遙感技術並以 JavaScript 程式語言來撰寫和執行，進行紅樹林植物自動分類和監測，只要有足夠的資料集就可以快速分析和歸納研究區域的資訊，以科技與程式相結合可以大大縮短人力並有效監測和管理紅樹林生態系統，為保護和可持續利用這些珍貴資源提供科學依據。
- (二) 紅樹林面積變化：本研究結果發現，紅樹林植物總面積在 2018 至 2023 年間維持相對穩定。然而，個別植物面積變化顯著，水筆仔和欖李面積減少，而紅海欖面積增加。夏季植物總面積通常低於年度平均面積，但 2022 年例外。研究顯示地表溫度和降水量的增加與藍碳儲存量減少相關。當降水量減少，即使地表溫度上升，總碳存量增加。NDWI 指數與不同年度海茄苳總面積呈現相同的趨勢。這些變化除了與 NDVI 相關，與地表溫度、降水量、NDWI 等環境因子也有著密切關聯。這些發現強調了監測環境變化對紅樹林保育的重要性。

(三) 紅樹林藍碳儲存能力：透過雲端運算與多光譜遙感技術，本研究成功估算了台南市四草綠色隧道內紅樹林的藍碳儲存量並探討其變化的原因。結果顯示，2018 年至 2023 年間，紅樹林的總面積變化不大，但總碳儲存量有所減少。研究發現，當地表溫度與降水量同時增加時，紅樹林的總面積與碳儲存量均會減少。NDWI 指數與不同年度的海茄苳總碳存量呈現相同的趨勢。這表明環境因子如溫度和降水量對紅樹林植物的生長與藍碳儲存能力有直接影響。因此，環境變化對紅樹林生態系統的健康狀態及其碳匯功能具有重要意義。

二、應用

- (一) 技術創新：本研究以人工智慧 AI 技術利用遙感數據和機器學習算法，快速估計紅樹林植物的面積與碳儲存量。此外，AI 技術還可以實現對紅樹林碳匯的長期監測，並能夠識別出影響碳匯的關鍵因素。因此，AI 技術的應用，為紅樹林碳匯研究帶來了新的可能性也為環境科學研究開辟新的途徑，提高研究的效率和範圍。
- (二) 氣候變遷研究：本研究提供了一種新的紅樹林藍碳估算方法，未來，透過持續監測與分析，可進一步了解紅樹林對氣候變遷的適應性，用以提供相關單位制定有效的保護策略，以維護這一寶貴的自然資源。紅樹林的藍碳儲存量估算對於全球碳循環和氣候變遷研究至關重要，這將有助於推動國際碳交易，並促進全球氣候治理的進程。
- (三) 政策制定：應用人工智慧的方式為紅樹林保育與管理提供科學依據。研究結果可以為政府和非政府組織制定相關環境政策和管理策略提供數據支持，有助於制定更有效的減碳策略。

三、未來展望

未來持續自學加強理論，精進技術，更進一步建立 InVEST 模型以提高紅樹林藍碳儲存量估算的精確度，以及環境因子的更深入探討，探索更多紅樹林保育和管理的新方法。

陸、參考文獻

1. WSP in Asia(2023)。藍碳秘境：海洋生態的永續儲存。台灣永續網。
<https://www.esgtw.net/wsp-231005/>
2. 中央社（2023年9月10日）。台灣現有藍碳 35 萬噸 紅樹林減碳是森林 2.5 倍。中興大學永續農業創新發展中心。<https://idcsa.nchu.edu.tw/page-1.php?id=bec175f2-5051-11ee-ae27-56000176fdd3>
3. 王樂、時晨、田金炎、宋曉楠、賈明明、李小娟、劉曉萌、鍾若飛、殷大萌、楊杉杉、郭先仙（2018）。基於多源遙感的紅樹林監測。生物多樣性，26，838 -849。
<https://doi.org/10.17520/biods.2018067>
4. 高苑科技大學綠工程技術研發中心（2011）。國家重要濕地碳匯功能調查計畫總結報告書。內政部營建署城鄉發展分署。<https://wetland-tw.tcd.gov.tw/upload/file/20190522110235955.pdf>
5. Alongi, D. M. (2014). Carbon sequestration in mangrove forests. Carbon Management, 5(2), 131-142. <https://doi.org/10.4155/cmt.14.8>
6. 陳清目（2021）。Google Earth Engine 時空大數據於全球環境議題探究學習之應用構想。台灣教育，727，31-52。
7. 農業部農村發展及水土保持署（2021年9月8日）。影像變異分析。巨量空間資訊系統。<https://gis.ardswc.gov.tw/image-variation-analysis/20>
8. 農業部農村發展及水土保持署。GEE 應用分享。農業部農村發展及水土保持署技術研究發展平台。<https://tech.ardswc.gov.tw/Results/GEE>
9. Bingbin Fen, Yancheng Tao, Xiansheng Xie, Yingying Qin, Baoqing Hu, Renming Jia, Lianghao Pan, Wenai Liu , & Weiguo Jiang (2024). Identification of Suitable Mangrove Distribution Areas and Estimation of Carbon Stocks for Mangrove Protection and Restoration Action Plan in China. <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/3/445>
10. BUILDING LOW EMISSION ALTERNATIVES TO DEVELOP ECONOMIC RESILIENCE AND SUSTAINABILITY PROJECT(B-LEADERS) (2017). ASSESSMENT OF CARBON SEQUESTRATION POTENTIAL OF MANGROVE FORESTS IN THE TALON-TALON AND MAMPANG TREEVOLUTION SITES OF ZAMBOANGA CITY. Terminal Report. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00TC68.pdf

11. Claudia Kuenzer, Andrea Bluemel, Steffen Gebhardt, Tuan Vo Quoc, & Stefan Dech(2011). Remote Sensing of Mangrove Ecosystems: A Review. <https://www.mdpi.com/2072-4292/3/5/878>
12. 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(4), 293 – 297.
13. G. Bindu, Poornima Rajan, E.S. Jishnu, K. Ajith Joseph (2020). Carbon stock assessment of mangroves using remote sensing and geographic information system. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982317303861>
14. Murdiyarso, D., Purbopuspito, J., Kauffman, J. B., Warren, M. W., Sasmito, S. D., Donato, D. C., ··· & Kurnianto, S. (2015). Indonesia’ s blue carbon: a globally significant and vulnerable sink for seagrass and mangrove carbon. *Wetlands Ecology and Management*, 23(6), 981 – 997.
15. Tien Dat Pham, Naoto Yokoya, Dieu Tien Bui, Kunihiko Yoshino, & Daniel A. Friess(2019). Remote Sensing Approaches for Monitoring Mangrove Species, Structure, and Biomass: Opportunities and Challenges. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/3/230>

【評語】 030501

本研究選用大量的遙感探測衛星影像，對臺南市安南區四草區域的紅樹林進行自動分類。透過對紅樹林植物的面積分布、變化進行統計，估算藍碳儲存量。內容具體，未來宜提升更長的衛星觀測時間段及連結更多鄉土議題。

作品簡報

基於雲端運算與多光譜遙感技術

探測四草區域碳息



摘要

本研究基於 Google Earth Engine 雲端平台和 JavaScript 程式語法，透過隨機森林分類器的監督式學習，對臺南市安南區四草區域的紅樹林進行自動分類。利用 Sentinel 2 衛星影像資料集，結合文獻的函數公式，對紅樹林植物的面積分布、變化進行統計，並估算藍碳儲存量。此外，計算了常態化差值植生指標 (NDVI) 和常態化差值水體指標 (NDWI)，並將其標示於地圖上。使用 Modis LST 和 TerraClimate 資料集分析地表溫度和降水量。

研究結果發現，2018年至2023年間紅樹林的總面積相近，2023年比2018年的碳儲存量減少了28.63噸；此外，當地表溫度與降水量都比前一年增加時，紅樹林的總面積和總碳儲存量皆有減少現象；當平均降水量減少時，縱使地表溫度增加，總碳儲存量增加。指標指數、溫度、降水量皆會影響總碳存量。

壹、前言

一、研究動機

分佈在熱帶和亞熱帶沿海的紅樹林植被生態系統，能夠吸收和儲存大量的二氧化碳，紅樹林中儲存的碳被稱為藍碳，儲存量和速率遠高於陸地森林，是一種有效的碳匯；然而紅樹林正面臨著嚴重威脅，如人為的開發污染、氣候變遷等，導致紅樹林的大量減少和退化。經過文獻探討並積極參加GIS研習以及線上自學後，發現傳統的紅樹林碳匯研究方法需要大量的人力和時間投入以進行現場調查和數據收集，無法有效地、即時地監測紅樹林碳匯的長期變化，同時可能無法充分考慮到紅樹林生態系統中的空間異質性，導致碳匯估計的不確定性增加。本研究決定以人工智慧 (AI) 技術應用在紅樹林碳匯研究中，以克服傳統方法的限制，希望能夠為紅樹林的保育和管理提供有用、有效的資訊。

二、研究樣區地理介紹

四草綠色隧道 23°01'10.7"N 120°08'10.1"E:四草綠色隧道是臺南市安南區的一個重要生態景點，所指的是四草大眾廟後方排水道的紅樹林區，這條河道因兩側遍佈樹齡逾 50 年的原生紅樹林，自然形成一彎如隧道般的景象，號稱「迷你版亞馬遜森林」，同時也是臺灣唯一的水上綠色河道。四草大眾廟紅樹林保護區林相優美，擁有紅海欖(五梨朥)、水筆仔、欖李、海茄苳四種紅樹林。

三、研究的目的

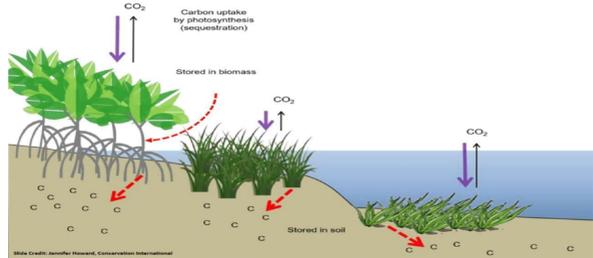
- (一) 以人工智慧處理和分析衛星影像，獲得區域紅樹林的多時期分佈和動態資訊。
- (二) 應用雲端運算，對區域紅樹林藍碳儲存量進行估算，並以圖表顯示其變化趨勢。
- (三) 透過雲端運算與多光譜衛星影像資料集，進行紅樹林植物與環境因子關聯探討。

四、文獻回顧

紅樹林的藍碳估算是近年來熱門研究議題，許多學者利用不同的方法和數據來計算紅樹林的藍碳儲存量，並探討其與環境因子的關係。例如，Donato 等 (2011) 利用現場測量和文獻數據，估算了全球紅樹林的藍碳儲存量，並發現紅樹林的藍碳儲存量遠高於其他森林類型，且主要集中在土壤中。Murdiyarso 等 (2015) 則利用遙感和現場數據，估算了東南亞紅樹林的藍碳儲存量。

(一) 藍碳：

是指被沿海和海洋生態系統(如紅樹林森林、海藻灘和鹽沼)吸收和儲存的二氧化碳(CO₂)，詳圖一。



圖一 藍碳示意圖(圖片來源:A. Ahalya, Environmental Science)

(二) 遙感探測技術(簡稱遙測)：

遙測技術具有以下五項優點：(陳清目, 2021)

1. 廣域性：大尺度衛星一次取像可以涵蓋數千平方公里之範圍。
2. 多波譜性：多個波段之衛星，使影像能更準確地判釋地面上各種物質類別。
3. 視覺化：以影像的方法呈現，非以符號或電腦代碼呈現，增加研究的方便性。
4. 先驅性：可拍攝到許多人類無法到達的地方。
5. 高效率：衛星除了定期規律性的執行地表觀測，目前可經由預約的方式，配合使用需求於特定時間拍攝指定區域，使研究者能有系統的配合實驗設計蒐集資料。

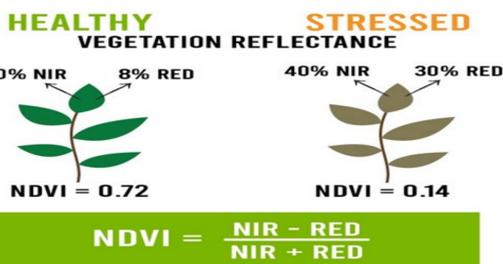
(三) 多光譜影像分析指數：

1. 常態化差異植被指數 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)

NDVI 的值範圍從 -1 到 +1，通常情況下，高 NDVI 值表示更多的綠色植被，低 NDVI 值則表示較少的植被或裸地。NDVI 值可以用於監測植被覆蓋度、生長狀態和健康狀態。NDVI 計算公式：

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

$$NDVI (sentinel 2) = (B8 - B4) / (B8 + B4)$$



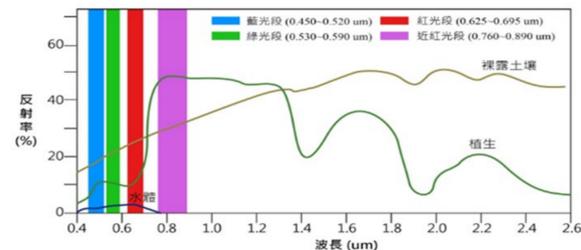
圖二 不同生長狀態植物對近紅外光與紅光的反射差異 (來源:MyEasyFarm網站)

2. 常態化差異水體指數 (Normalized Difference Water Index, NDWI)

NDWI 的取值範圍通常在 -1 到 1 之間，較高的值表示更多的水體覆蓋，而較低的值則表示較少的水體覆蓋。NDWI 計算公式：

$$NDWI (K. McFeeters, 1996) = (Green - NIR) / (Green + NIR)$$

$$NDWI (sentinel 2) = (B3 - B8) / (B3 + B8)$$



圖三 光波反射率圖 (圖片來源:Mountains & River部落格)

(四) Google Earth Engine (GEE)：

Google Earth Engine (以下簡稱GEE) 雲端平台，可用於分析和處理衛星影像和地理空間資料，其衛星影像資料集，包括Landsat、Sentinel-2、MODIS等，以及各種地理空間資料，可以使用 Python 或 JavaScript 等程式語言編寫程式碼，分析和處理這些資料，以下是 GEE 與其它地理資訊系統的比較和優勢 (如表一)。

表一 GEE 與其它地理資訊系統的比較(資料來源:作者整理)

方法	優勢	劣勢
QGIS	免費、開源、跨平台	穩定性有待提高、技術支援有限
商業地理資訊系統軟體	易於使用	成本高
Google Earth Engine	大量的資料集、雲端平台、易於使用、可擴展性、靈活性、開放性	需要編寫程式碼

貳、研究設備及器材

一、衛星影像：

(一) Sentinel-2是歐洲太空總署最新一代的光學衛星，以每5天一次的頻率拍攝台灣，可拍攝13個波段的高品質遙測影像(圖四)，最高10公尺解析度且為支持資料開放政策的高頻度光學衛星影像。

波段	波長 (nm)	波寬 (nm)	波段說明	解析度 (m)
01	0.443	0.020	Aerosol detection	沿海氣溶膠
02	0.49	0.065	Blue	藍光
03	0.56	0.035	Green	綠光
04	0.665	0.030	Red	紅光
05	0.705	0.015	Vegetation	植被紅邊
06	0.74	0.015	Vegetation	植被紅邊
07	0.783	0.020	Vegetation	植被紅邊
08	0.842	0.115	Near infrared	近紅外光
08A	0.865	0.020	Vegetation	植被紅邊
09	0.945	0.020	Water vapour	水汽
10	1.375	0.030	Cirrus	捲雲
11	1.61	0.090	Snow / ice / cloud	短波紅外光
12	2.19	0.180	Snow / ice / cloud	短波紅外光

圖四 Sentinel-2波段光譜解析度介紹 (來源:巨量空間資訊系統)

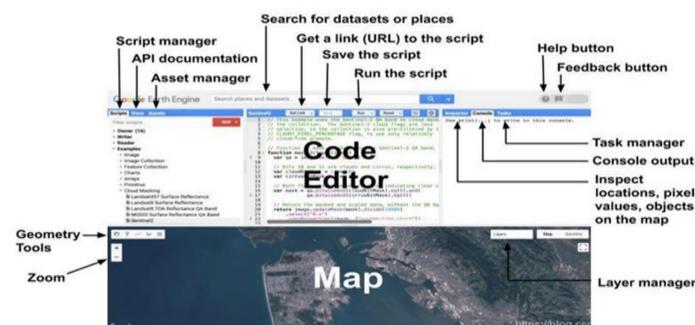
(二) Landsat 8 是美國地質調查局 (USGS) 的一顆地球觀測衛星，於2013年由Atlas-V火箭成功發射。它搭載了兩種科學儀器：運行陸地成像儀 (OLI) 收集可見光、近紅外和短波紅外光譜帶以及全色帶的數據和熱紅外傳感器 (TIRS)，這兩種儀器提供了全球陸地的季節性覆蓋，空間分辨率為30米 (可見光，近紅外，短波紅外)，100米 (熱紅外) 和15米 (全色) 如圖五。

Sensor	Spectral Band	Use Area	Wavelength	Resolution
OLI	Band 1	Coastal/Aerosol	0.433 - 0.453 μm	30 m
OLI	Band 2	Blue	0.450 - 0.515 μm	30 m
OLI	Band 3	Green	0.525 - 0.600 μm	30 m
OLI	Band 4	Red	0.630 - 0.680 μm	30 m
OLI	Band 5	Near Infrared	0.845 - 0.885 μm	30 m
OLI	Band 6	Short Wavelength Infrared (SWIR 1)	1.560 - 1.660 μm	30 m
OLI	Band 7	Short Wavelength Infrared (SWIR 2)	2.100 - 2.300 μm	30 m
OLI	Band 8	Panchromatic	0.500 - 0.680 μm	15 m
OLI	Band 9	Cirrus	1.360 - 1.390 μm	30 m
OLI	Band 10	Long Wavelength Infrared	10.30 - 11.30 μm	100 m
OLI	Band 11	Long Wavelength Infrared	11.50 - 12.50 μm	100 m

圖五 Landsat 8波段光譜解析度介紹 (來源:開放地理空間實驗室)

二、衛星影像取得：

Google Earth Engine是一個強大的雲端運算平台(圖六)，由Google 與卡內基美隆大學、NASA 等學術機構合作開發。



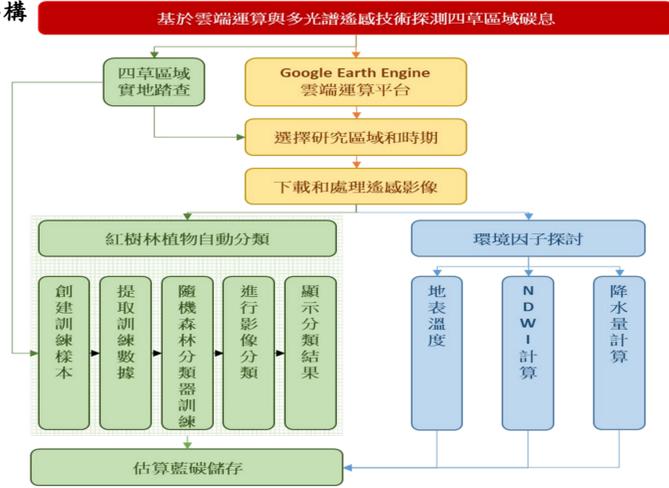
圖六 Google Earth Engine Code Editor (來源: Google Earth官網作者後製)

三、衛星影像處理與分析：

1. 過濾影像集合：使用過濾和裁剪影像集合，進行去雲和去霧，避免造成偵測指數時的誤差以提高計算效率和精度。
2. 裁剪影像：以Geometry的定義方式可將範圍縮小至研究區域，避免範圍過大影響結果的準確程度。

參、研究方法或過程

一、研究架構

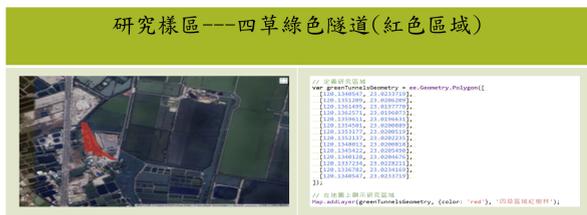


圖七 研究架構圖 (圖片來源:作者自行繪製)

二、研究流程

(一) 選擇研究區域和時期：本研究選擇了四草綠色隧道作為研究區域，選擇了2018年至2023年共六個時期作為分析紅樹林植物的分佈和動態變化。研究時期的影像為了減少水體和雲霧的干擾，以提高紅樹林的識別和分類的準確性，皆有經過大氣校正、水體遮罩以及去雲。

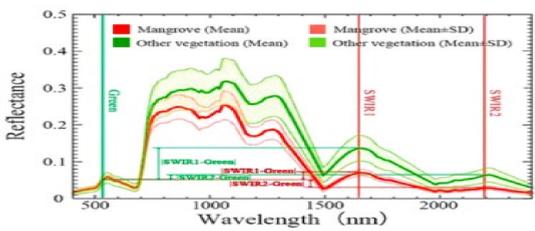
1. 時間範圍過濾：使用 filterDate(startDate, endDate) 來限定影像集合的時間範圍
2. 地理範圍過濾：使用 filterBounds(geometry) 來限定影像集合的地理範圍



圖八 以程式碼框選出研究樣區(圖片來源:作者執行結果)

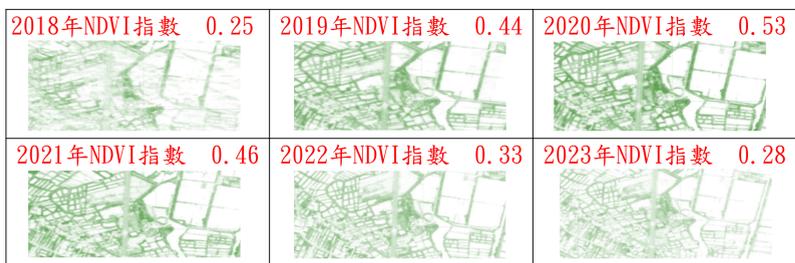
(二) 下載和處理遙感影像：加載Sentinel-2的表面反射率影像集合，並根據定義的時間和地理範圍進行篩選。本研究中，雲層遮蔽與波段選擇是處理衛星影像的重要步驟。以下是這兩個步驟的詳細說明：

1. 雲層遮蔽：為了確保分析的準確性，從衛星影像中去除雲層干擾。定義了一個名為 maskClouds 的函數，遮蔽掉雲層和雲層邊緣 (cirrus clouds)。
2. 中值合成影像：使用 cloudMaskedCollection.median() 建立中值合成影像。
3. 波段選擇：本研究選擇了以下波段：B2 (藍光波段)、B3 (綠光波段)、B4 (紅光波段)、B8 (近紅外波段)，這些波段被用於植被指數計算、植被分類和其他地表特徵分析。



圖九 不同類型植被的光譜反射率曲線圖(圖片來源: ScienceDirect網站)

4. NDVI指數計算：使用 normalizedDifference() 函數快速計算 NDVI。該函數接受近紅外波段和紅光波段的名稱作為參數。最後以輸出和展示工具查看和分析得到 NDVI 可視化結果(如圖十)。發現NDVI指標指數自2020年至2023年呈現逐年遞減的趨勢，表示植被覆蓋和健康狀況正在惡化。



圖十 NDVI 計算後遙感影像與數值(圖片來源:作者執行結果)

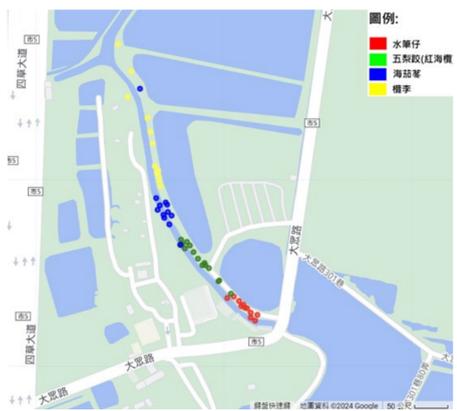
(三) 紅樹林植物自動分類：本研究採用隨機森林算法，經實際踏查以樹貌特徵蒐集四種紅樹林植物的座標點位做為訓練樣本(如表二)，對處理後的遙感影像進行了紅樹林植物的自動分類，並生成了研究區域在不同時期的紅樹林植物的分佈圖，以反映紅樹林植物的空間分佈和動態變化。以下是詳細的分類方法

1. 創建訓練樣本：實地踏查從研究區域內選取了多處具有代表性的樣本點，並為每個樣本點標記了對應的植被類型(有：水筆仔、海茄苳、欖李、紅海欖)。

表二 四種紅樹林植物的樹貌特徵彙整表(資料來源:作者自行拍攝及整理)

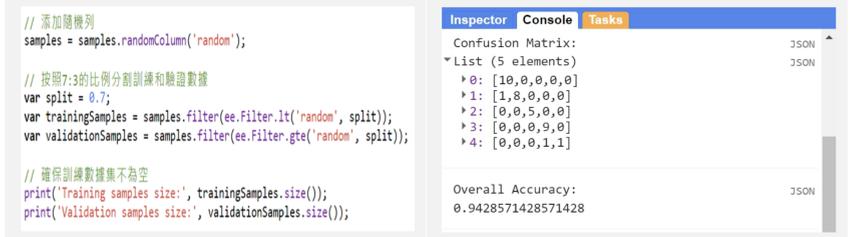
植物名	紅海欖(五梨朥) Rhizophora stylosa	欖李 Lumnitzera racemosa	水筆仔 Kandelia obovata	海茄苳 Avicennia marina
樹貌特徵	樹冠廣卵形或圓形，樹枝向四面擴展，樹葉茂密	樹冠廣卵形或圓形，樹枝向四面擴展，樹葉茂密	樹冠圓錐形或卵形，樹枝向上生長，樹葉較稀疏	樹冠廣卵形或圓形，樹枝向四面擴展，樹葉茂密
樹皮	灰褐色，有縱裂紋。	灰褐色，有縱裂紋。	灰褐色，有縱裂紋。	灰褐色，有縱裂紋。
葉片	對生，革質，長橢圓形或卵形，長8-15公分，端尖或鈍，葉緣全緣，葉面有光澤	互生，革質，倒卵形，長5-6公分，先端圓形或凹形，全緣或具波狀小齒。	互生，革質，倒卵形，長5-6公分，先端圓形或凹形，全緣或具波狀小齒。	葉片互生，革質圓形或卵形，長5-10公分，先端圓形或凹形。
實地踏查照片				

2. 提取訓練數據：使用中值合成影像，從每個樣本點提取波段值，這些波段值與樣本點的植被類型標籤一起形成訓練數據。



圖十一 實地踏查定位分佈圖(資料來源:作者自行整理)

3. 隨機森林分類器訓練與模型驗證：使用 ee.Classifier.smileRandomForest(50).train() 來訓練分類器。本研究以7:3進行樣本分配訓練與模型驗證，讓分類器學習如何根據波段值識別不同的植被類型，更進一步計算並顯示混淆矩陣以確保其準確性與可靠性，本研究機器學習模型整體準確度為94.29%(如圖十二)。



圖十二 分配訓練驗證部分程式碼與混淆矩陣計算(圖片來源:作者執行結果)

4. 進行影像分類：使用 medianComposite.classify(classifier) 來對中值合成影像進行分類。
5. 顯示分類結果：在地圖上顯示分類結果，並為不同的紅樹林植物類型指定不同的顏色。

(四) 估算藍碳儲存

本研究從Google Earth Engine的資料集並參考文獻資料的數據(如圖十三)，以及研究區域經機器學習所獲取紅樹林的分佈圖，估算了研究區域不同時期紅樹林植物的藍碳儲存量。

Location	Dominant species	Age (years)	Total (tC ha ⁻¹)	AGB (tC ha ⁻¹)	BGB and soil (tC ha ⁻¹)	Roots/AGB (tC ha ⁻¹)	Roots (tC ha ⁻¹)	Soil (tC ha ⁻¹)	Soil depth (cm)
Peninsular Malaysia	Rhizophora apiculata	80	2205	312	1893	NA	NA	NA	3800
	R. apiculata	18	1117	193	924	NA	NA	NA	4000
Southern Vietnam	R. apiculata	5	479	87	392	NA	NA	NA	2800
	R. apiculata	6	1179	54	1125	NA	NA	NA	3400
Southern China	R. apiculata	20	979	72	907	NA	NA	NA	2750
	R. apiculata	35	1904	153	1752	NA	NA	NA	3600
Indonesia	Kandelia candel	NA	619	64	555	2.0	130	425	1850
	K. candel	NA	391	43	348	2.2	94	254	1900
Southern Thailand	R. apiculata	NA	332	7	325	1.1	8	317	1175
	Avicennia marina	NA	437	24	413	NA	NA	NA	80
Western Australia	Rhizophora stylosa	NA	703	19	684	NA	NA	NA	62
	Sonneratia caseolaris	NA	654	28	626	NA	NA	NA	1450
Queensland, Australia	R. apiculata	25	808	138	670	1.0	142	528	1900
	R. apiculata	5	579	20	559	2.9	57	502	800
Queensland, Australia	Ceriops decandria	3	600	29	571	4.4	127	444	1000
	R. stylosa	NA	863	115	748	1.1	127	621	1500
Queensland, Australia	A. marina	NA	662	55	607	1.7	92	515	775
	R. stylosa	NA	2139	297	1842	1.1	312	1530	3500

圖十三 紅樹林生態系統每公頃碳儲存量(資料來源Longi, D. M等人. 2014)

1. 面積計算：使用 'ee.Image.pixelArea()' 函數來計算每個像素的面積。
2. 植被類型面積匯總：以 'reduceRegion' 函數和 'ee.Reducer.sum().group()' 計算。
3. 碳儲存量估算：基於文獻探討，定義了一個字典 'carbonStoragePerHectare'，其中包含了每種植物類型每公頃的碳儲存量(單位：噸)。
4. 碳儲存量分佈：定義 'carbonStorageDistribution' 字典，用於表示不同植物類型的碳儲存量在地上部、地下部與土壤有機碳之間的分佈比例。
5. 總碳儲存量計算：使用一個迴圈來遍歷每種植物類型，並計算其總碳儲存量及其在地上部、地下部與土壤有機碳的分佈。

(五) 環境因子探討

水筆仔、紅海欖、欖李、海茄苳的生長期都在夏季，本研究參考文獻的碳儲量包括水筆仔的胎生苗以及花果，因此本研究除了以年度作為探討期間外也增加了不同年度夏季正值植被生長期的研究數據以進行環境因子的分析探討。

1. 地表溫度：以MODIS LST數據集進行地表平均溫度的計算，單位:攝氏(°C)。
2. NDWI計算：以JavaScript程式碼利用Google Earth Engine API計算並顯示NDWI水體指數，進行遙感衛星影像數據分析，並將NDWI圖層添加到地圖上。
3. 降水量計算：以Google Earth Engine API來處理和視覺化全球降水量數據。從TerraClimate數據集中獲取了降水量數據，引用特定的日期和地理坐標，計算本研究所框選的紅樹林地理區域平均總降水量。

肆、研究結果與討論

一、四種紅樹林植物反射波段分布：本研究透過多光譜影像與雲端分析運算，計算出四草區域四種紅樹林植物(紅海欖、欖李、水筆仔、海茄苳)在不同波段的反射率(表三)。

表三 多光譜影像透過雲端運算分析出四種紅樹林植物反射率(資料來源:作者自行計算結果)

	藍光 (B2) 450~500nm	綠光 (B3) 500~550nm	紅光 (B4) 600~650nm	近紅外 (B8) 700~800nm
水筆仔	0.2094	0.2306	0.2143	0.2576
五梨朥	0.2208	0.2438	0.2404	0.2636
欖李	0.1247	0.1460	0.1161	0.2738
海茄苳	0.2572	0.2621	0.2507	0.2885

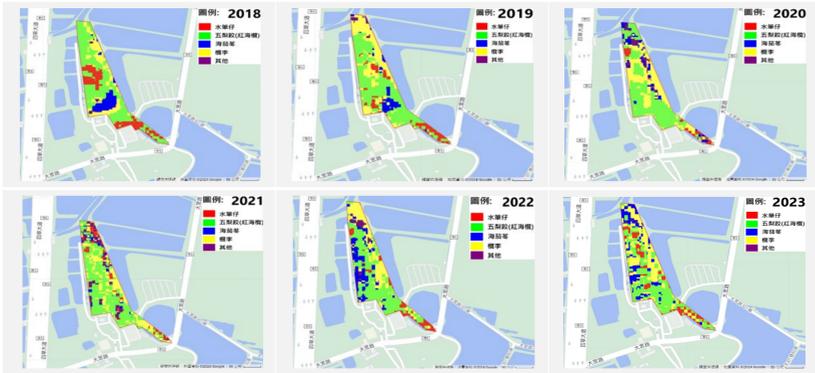
二、四種紅樹林植物分布與數據：本研究使用隨機森林算法，對運算後的遙感影像進行了紅樹林的自動分類，最後在地圖上顯示分類結果，並使用不同顏色來表示不同的地表覆蓋類型。表四表示了以2018年與2023年為例，不同年度以及不同年度夏季四種紅樹林植物經由雲端計算出的面積數據(表四)。

表四 不同紅樹林植物經雲端運算出的數據(資料來源:作者自行計算結果)

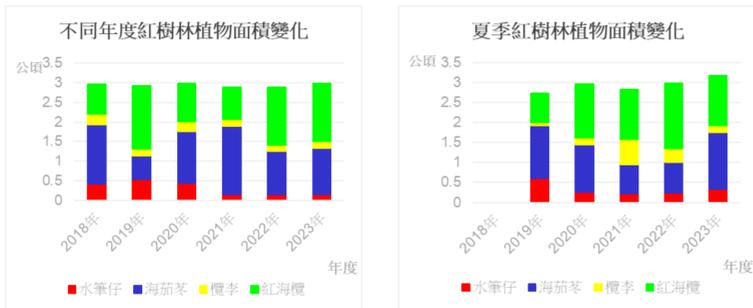


圖十一 實地踏查定位分佈圖(資料來源:作者自行整理)

表五 不同紅樹林植物可視化分佈圖(資料來源:作者執行結果)



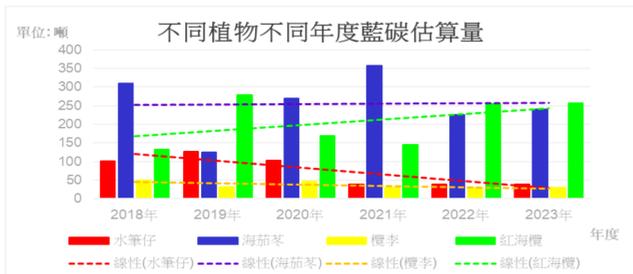
三、四種紅樹林植物面積統計



圖十四 不同年度紅樹林植物面積變化(圖片來源:作者自行計算結果)

四、碳儲存量估算

(一) 四種紅樹植被藍碳儲存量估算



圖十四 不同植物不同年度藍碳變化(資料來源:作者自行計算結果)



圖十五 不同植物不同年度藍碳變化(資料來源:作者自行計算結果)



圖十六 不同年度與夏季總碳儲存估算變化(資料來源:作者自行計算結果)



圖十七 不同年度與夏季藍碳與環境因子的關係(資料來源:作者自行計算結果)

(二) 四種植被不同部位藍碳儲存量估算

四草綠色隧道的水深約為一米多，不到兩米的高度，本研究根據參考文獻資料以雲端運算的方式計算不同年度四種不同紅樹林植物地上部、地下部含土壤有機碳儲存量統計(表六)。

表六 不同年度植被不同部位藍碳儲存估算數據統計(資料來源:作者自行計算結果)

2018年		水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖
地上部碳儲存量 (tms)	年度	2.02	6.19	1.00	2.65
	夏季	無資料	無資料	無資料	無資料
地下部含土壤碳儲存量 (tms)	年度	98.98	303.31	49	129.85
	夏季	無資料	無資料	無資料	無資料
2019年		水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖
地上部碳儲存量 (tms)	年度	2.53	2.49	0.6	5.55
	夏季	2.89	5.37	0.31	2.53
地下部含土壤碳儲存量 (tms)	年度	123.97	122.01	29.4	271.95
	夏季	141.61	263.13	15.19	123.97
2020年		水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖
地上部碳儲存量 (tms)	年度	2.07	5.38	0.93	3.37
	夏季	1.22	4.82	0.68	4.69
地下部含土壤碳儲存量 (tms)	年度	101.43	263.62	45.57	165.13
	夏季	59.78	236.18	33.32	229.81
2021年		水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖
地上部碳儲存量 (tms)	年度	0.76	7.12	0.61	2.89
	夏季	1.06	2.94	2.44	4.30
地下部含土壤碳儲存量 (tms)	年度	37.24	213.76	18.34	86.82
	夏季	51.94	144.06	119.56	210.7
2022年		水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖
地上部碳儲存量 (tms)	年度	0.77	4.50	0.60	5.08
	夏季	1.27	3.18	1.31	5.62
地下部含土壤碳儲存量 (tms)	年度	37.73	220.50	29.4	248.92
	夏季	62.23	155.82	64.19	248.03
2023年		水筆仔	海茄苳	欖李	紅海欖
地上部碳儲存量 (tms)	年度	0.78	4.88	0.53	5.14
	夏季	1.62	5.70	0.67	3.64
地下部含土壤碳儲存量 (tms)	年度	38.22	229.12	25.97	251.86
	夏季	79.38	279.30	32.83	178.36

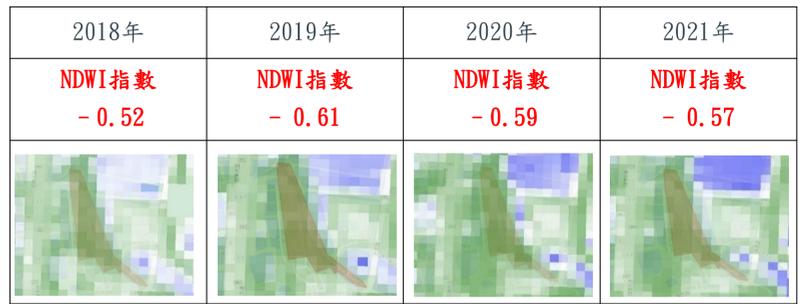
五、環境因子的探討

(一) 地表溫度與降水量

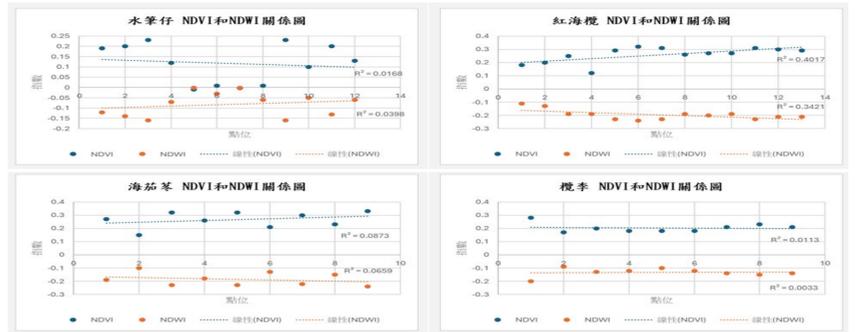
表八 不同年度的6月至8月的總降水量統計表(資料來源:作者自行計算結果)

	夏季月降水量(mm)	年度降水量(mm)
2018年	347.25	2089.44
2019年	377.76	2136.96
2020年	309.75	1423.08
2021年	423.99	2093.04
2022年	120.51	1298.76
2023年	101.25	1970.04

(二) NDWI計算



圖十八 不同年度NDWI指數與圖像(資料來源:作者執行結果截圖)



圖十九 不同植物與指標關係圖以2023年為例(資料來源:作者執行結果)

伍、結論與應用

本研究應用雲端運算平台Google Earth Engine與平台內豐富的衛星影像資料集，使用JavaScript程式語言撰寫隨機森林算法，以隨機森林算法對台南市安南區四草綠色隧道的紅樹林植物進行了自動分類，並估算了其藍碳儲存量。研究結果顯示2018年至2023年本研究區域的紅樹植被面積約2.9公頃，紅樹林總碳儲存量有逐年遞減的趨勢，與2018年相比，2023年的平均總碳儲存量減少了28.63噸。

應用MODIS的地表溫度資料和Landsat 8的降水量資料，以及計算NDVI和NDWI指標指數結果進行環境因子探討，發現當地表溫度與降水量同時增加，則平均總碳儲量減少。歷年NDVI指數呈現遞減趨勢表示研究區域的植被健康狀態正在惡化；不同年度NDWI指數與海茄苳的總面積和總碳儲量皆呈現一致的趨勢，推論本研究區域裡海茄苳的生長和覆蓋面積與水體變化有密切的關聯。

驗證環境因子會影響個別紅樹林植物的面積與總碳存量。另外從夏季的研究結果以及NDWI研究發現，Google Earth Engine資料庫裡衛星影像的資料有些不完整的情形，本研究2018年的夏季植物面積與碳儲存量皆無資料可用以進行研究分析，同時發現同一顆衛星影像的資料集更新時間也不一致，例如Sentinel-2衛星關於NDWI的資料集僅提供至2021年，官網公告下次更新時間為2024年7月。

一、結論

- (一) 遙感技術的應用：以科技與程式相結合可以大大縮短人力並有效監測和管理紅樹林生態系統，為保護和可持續利用這些珍貴資源提供科學依據。
- (二) 紅樹林面積變化：NDWI指數與不同年度海茄苳總面積呈現相同的趨勢，從紅海欖(五梨歧)的NDVI和NDWI關係圖發現正相關，顯示個別植物的面積變化與NDVI和NDWI有著密切關聯。
- (三) 紅樹林藍碳儲存能力：研究發現，當地表溫度與降水量同時增加時，紅樹林的總面積與碳儲存量均會減少。NDWI指數與不同年度的海茄苳總碳存量呈現相同的趨勢。這表明環境因子如溫度和降水量對紅樹林植物的生長與藍碳儲存能力有直接影響。

二、應用

- (一) 技術創新：本研究以人工智慧 AI技術利用遙感數據和機器學習算法，快速估計紅樹林植物的面積與碳儲存量。此外，AI技術還可以實現對紅樹林碳匯的長期監測，並能夠識別出影響碳匯的關鍵因素。因此，AI技術的應用，為紅樹林碳匯研究帶來了新的可能性也為環境科學研究開辟新的途徑，提高研究的效率和範圍。
- (二) 氣候變遷研究：本研究提供了一種新的紅樹林藍碳估算方法，未來，透過持續監測與分析，可進一步了解紅樹林對氣候變遷的適應性，用以提供相關單位制定有效的保護策略，以維護這一寶貴的自然資源。
- (三) 政策制定：應用人工智慧的方式為紅樹林保育與管理提供科學依據。研究結果可以為政府和非政府組織制定相關環境政策和管理策略提供數據支持，有助於制定更有效的減碳策略。

三、未來展望

未來持續自學加強理論，精進技術，更進一步建立InVEST模型以提高紅樹林藍碳儲存量估算的精確度，以及環境因子的更深入探討，探索更多紅樹林保育和管理的新方法。