

# 113 年農業部林業及自然保育署研究計畫

## 結案報告

### (精簡版)

計畫名稱：AIoT 森林碳匯估算系統建置計畫(2/2)

Establishment Plan for an AIoT Forest Carbon Sink  
Estimation System (2/2)

計畫期間：113 年 01 月 01 日至 113 年 12 月 31 日

執行機關：國立中興大學

## 中文摘要

本計畫旨在建置一套整合人工智慧技術的森林碳匯估算系統，以回應全球氣候變遷與碳中和需求。計畫中提出兩種碳匯估算模組：第一種模組基於 RGB 影像辨識技術，透過樹冠層分割與植株計算推估樹木胸高直徑(Diameter at Breast Height, DBH)與樹高(Height, H)，進一步計算區域總碳儲量；第二種模組則採用多光譜影像結合 Carnegie-Ames-Stanford Approach(CASA)模型，搭配遙測數據與地面氣象資料，估算森林淨初級生產量(Net Primary Production, NPP)。本計畫透過影像辨識技術與數據分析，實現多光譜影像中樹冠層的自動化辨識，並整合地面調查數據進行校驗與比較。系統平台採用前後端分離架構，結合容器化技術，具備高度模組化與可擴展性。平台功能涵蓋數據清理、影像處理、碳匯量計算與結果視覺化展示，使用者透過直觀介面了解森林碳儲量與 NPP 的現況，有效降低傳統地面調查的人力與成本投入，為大規模森林區域的碳匯評估提供可行性方案。

## **Abstract**

This project aims to develop an integrated AI-powered forest carbon sink estimation system to address global climate change and carbon neutrality demands. Two carbon sink estimation models are proposed: the first model uses RGB image recognition technology to estimate tree diameter at breast height (DBH) and height (H) through canopy segmentation and plant counting, enabling the calculation of regional total carbon storage. The second model combines multispectral imagery with the Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model, incorporating remote sensing data and ground meteorological information to estimate forest Net Primary Production (NPP). By leveraging image recognition and data analysis, the project achieves automated canopy identification within multispectral images and integrates ground survey data for validation and comparison. The system platform adopts a front-end and back-end separation architecture enhanced by containerization technology, providing high modularity and scalability. Its features include data cleaning, image processing, carbon sink calculation, and visual presentation of results. Through an intuitive interface, users can easily understand the current status of forest carbon storage and NPP, effectively reducing the labor and costs associated with traditional ground surveys and offering a feasible solution for large-scale forest carbon sink assessments.

## 目錄

第一章 前言 .....	1
第一節 研究背景與動機.....	1
第二節 研究目的.....	3
第三節 重要工作項目與研究方法.....	3
第四節 研究流程.....	4
第二章 森林碳匯估算之方法 .....	5
第一節 地面調查碳匯估算方法.....	5
第二節 圖資影像碳匯估算方法.....	7
第三節 DMC 多光譜影像估算森林碳匯.....	10
第三章 森林碳匯估算系統建置 .....	15
第一節 森林碳匯估算系統概述.....	15
第二節 森林碳匯估算系統架構.....	17
第三節 模組化計算服務.....	20
第四節 資料庫設計.....	23
第五節 工作流程.....	24
第六節 API 設計.....	25
第七節 效能優化設計.....	27
第八節 系統安全性設計.....	28
第九節 系統平台效益.....	28
第四章 圖資與影像估算森林碳匯結果分析 .....	30
第一節 研究區域.....	30
第二節 碳匯估算模組.....	31
第三節 森林碳匯估算系統網站.....	36
第五章 結論 .....	40
第六章 未來展望 .....	41
參考文獻.....	43

## 表目錄

表 1 各樹種最大光能利用率 .....	13
表 2 平台前端技術 .....	18
表 3 平台後端技術 .....	19
表 4 系統環境 .....	19
表 5 FILES 資料表 .....	23
表 6 RESULTS 資料表 .....	23
表 7 TASKS 資料表 .....	24
表 8 台灣樹種地面調查數據 .....	31
表 9 地面調查與圖資影像碳匯估算比較結果 .....	33

## 圖目錄

圖 1 計畫流程圖.....	4
圖 2 第四次全國森林資源調查地面樣區配置及蓄積量分布示意圖.....	6
圖 3 圖資影像碳匯估算方法.....	7
圖 4 MASK R-CNN 模型訓練結果.....	9
圖 5 DMC 多光譜影像與多元資料搭配集成學習演算法估算森林碳匯.....	10
圖 6 植物淨初級生長量、光合有效輻射吸收量(ABSORBED PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION, APAR)與常態化差異植生指標(NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX, NDVI)之關係.....	11
圖 7 以國立成功大學為試區進行 CASA 模型開發驗證成果.....	14
圖 8 森林碳匯估算系統功能流程.....	15
圖 9 森林碳匯估算系統架構.....	17
圖 10 多光譜計算模組流程圖.....	21
圖 11 RGB 計算模組流程圖.....	22
圖 12 森林碳匯估算系統的工作流程.....	25
圖 13 林業署多光譜樣區資料.....	30
圖 14 碳匯估算測試區域.....	31
圖 15 系統首頁.....	36
圖 16 多光譜影像任務上傳頁面.....	37
圖 17 任務進度頁面.....	37
圖 18 多光譜影像任務結果頁.....	38
圖 19 RGB 影像任務結果頁面.....	38
圖 20 地面資料計算頁面.....	39

# 第一章 前言

## 第一節 研究背景與動機

隨著全球對暖化與氣候變遷議題的日益關注，減碳與碳中和已成為企業與政府的首要目標。其中，森林碳匯已成為實現碳中和目標的關鍵策略之一。森林碳匯的計算不僅能精確評估森林吸收和固定碳的能力，還可作為碳交易和碳補償的基準，因此在各界引起高度關注。自 1990 年代初期，國際各國的林業部門便開始致力於估算森林資源的碳量貯存與吸存能力，旨在獲取更準確的數據，作為未來碳交易機制的計量基礎。1997 年，京都議定書(Kyoto Protocol, 1997)規定工業化國家至 2012 年必須將溫室氣體排放量相比 1990 年平均減少 5.2%，並將新植造林、更新造林及伐林所產生的碳吸收或排放淨值納入排放減量計算。2016 年，全球 86%的碳排放來自前 20 大排放國。為了遏制全球氣候變暖，195 個佔全球溫室氣體排放總量 92%的國家簽署巴黎協議(Paris Agreement, 2016)。該協議強調森林在減緩與適應氣候變遷的重要作用，不再僅限於單純的減緩功能。2021 年，歐盟提出 Fit for 55(Fit for 55, 2021)提案，共提出 12 項政策措施，以確保未來的氣候和能源政策符合歐洲氣候法的目標。其中一項目標是在 2030 年前在歐洲種植 30 億棵樹木，利用自然碳匯減少 3.1 億噸二氧化碳。同年，COP26(COP26, 2021)會議呼籲開發中國家逐步減少砍伐並重新造林，以吸收大氣中的二氧化碳。台灣也積極推動新植造林計畫，以滿足企業對於森林碳匯的需求，協助企業實現淨零碳排的目標，還為企業提供一條可持續發展的道路，促進環境保護與經濟發展的雙贏局面。

過去，森林碳匯評估主要分為地面調查與遙感探測兩大類。其中，地面調查要求調查員逐一在森林中進行測量，這種方法不僅繁重且耗時，而且容易受到各種環境因素的影響。人為因素的介入也使得數據的準確性和一致性難以保證。地面調查存在多個缺點，包括時間成本高、費用昂貴、覆蓋範圍有限以及主觀性強等問題。在廣大的森林地區進行人工勘查不僅需要大量投入人力和時間，通常也僅能對有限區域進行評估，這導致數據的代表性和全面性受到限制，使得地面調查難以滿足對大範圍森林碳匯評估的需求。相較之下，遙感探測技術為森林碳匯估算提供一種更加高效和精確的替代方法(Bindu et al., 2020; Massey et al., 2023; Sun et al., 2022; Tian et al., 2023)。利用衛星影像和航空攝影等技術，能夠大範圍、快速地獲取森林的碳儲量數據，極大地提高工作效率和數據的準確性。隨著科技的進步，遙感探測技術不斷發展和完善，為森林碳匯的科學評估提供更強有力的支持。

因此，本計畫旨在建立森林碳匯估算平台，透過整合林務局提供的多光譜影像，並結合中央氣象署農業站氣象數據與 Google Earth Engine 的衛星影像數據，提出兩種碳匯估算模組。第一種模組主要計算 RGB 影像中森林之總碳匯量，結合影像辨識技術，從影像中分割出林木的樹冠層，並利用樹冠層面積推算胸高直徑(Diameter at Breast Height, DBH)與樹高(Height, H)，並計算出植株的數量，最終將這些數據帶入碳匯計算模組，得出總碳匯量。第二種模組以 DMC 多光譜影像為基礎，結合多元遙感探測資料以及地面氣象資料，搭配以植物光能利用率為基礎的 Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA)模型，估算 DMC 影像中綠地之淨初級生產量(Net Primary Production, NPP)。該系統具備多光譜圖資與衛星影像數據導入、樹冠層分割、植株數量計算、碳儲量計算等功能。透過這兩種森林碳匯估算模組顯著降低一般民眾、林地主與企業在森林碳匯估算方面的技術門檻，使用者可以透過林業署航測及遙測分署圖資評估自己林地的碳匯量與儲存潛力，並且能夠評估投資林地造林的碳匯效益。2022 年 3 月，國家發展委員會公布淨零排放的 12 項關鍵策略，其中自然碳匯被列為重要策略之一。該策略旨在透過造林和相關管理措施降低大氣中的二氧化碳濃度，並推動負碳農法、海洋棲地建設及動植物保育技術的發展，以保護生物多樣性、防止土壤流失、保護森林並復育碳匯生態系統，從而提升碳吸收功能。2023 年，林業署計劃成立森林碳匯與生態 ESG 媒合平台。該平台在第一階段將以國有林地為主，提供企業進行碳匯認購。隨後，第二階段將逐步納入公有地及民眾造林的私有地，這一舉措充分顯示台灣對於森林碳匯的重要性。此平台的建立不僅有助於實現企業的碳中和目標，還能促進全社會對於生態保護與可持續發展的認識，為全球氣候變遷的應對貢獻力量。因此本計畫考量我國森林現況，提出三點研究動機，如下所示：

## 一、地面調查碳匯估算方法耗時費力

地面調查碳匯估算方法耗時且費力，需要調查員在森林中逐一進行測量。這種方法不僅需要投入大量的人力和時間，還容易受到環境因素的影響，導致數據的準確性和一致性難以保證。此外，由於覆蓋面積有限和主觀性強，地面調查在大範圍森林區域中的應用受限。

## 二、森林碳匯估算流程尚未明確

目前，國外已有許多利用 DMC 多光譜影像進行碳匯估算的方法。這些方法透過衛星影像和航空攝影等技術，能夠快速、大範圍地獲取森林碳儲量數據，提高碳匯估算的效率和精確性。然而，我國尚未將這些計算方法應用於碳匯相關的認證中。

### 三、政府積極推動新植造林計畫，以滿足企業對於森林碳匯的需求

由於政府積極推動新植造林，因此除了地面調查以外，如果能有航遙測相關工具輔助碳匯計算，或是有一套完整的碳匯計算系統，將會大幅度降低地面調查所需的人力。

## 第二節 研究目的

基於我國林業發展目標與森林碳匯估算系統建置目標，並經由文獻回顧，本計畫之計畫目標如下所示：

### 一、森林碳匯估算方法建立

經由過去地面調查與航遙測相關研究文獻回顧分析，說明國內對於地面調查碳匯估算方法，並探討兩種森林碳匯估算模組之流程，透過整合多源數據，提高碳匯估算的精確度，減少因單一數據來源引起的誤差，並確保能夠在不同森林類型和地理條件下應用。

### 二、森林碳匯估算系統建置規劃

依據過去研究不同國家和機構所建立的森林碳匯估算系統，對於這些系統的功能和運作模式進行系統性的分析，規劃本研究計畫之森林碳匯估算系統。

### 三、森林碳匯估算系統與地面調查之比較

基於我國的林業發展目標，對於森林碳匯估算的需求持續增長。因此，本計畫將比較地面調查實際的碳匯估算數據與兩種森林碳匯估算模組之估算數據，進行比較分析，提出未來可改善之方向。

## 第三節 重要工作項目與研究方法

### 一、森林碳匯估算流程建立

透過相關研究文獻的回顧，計畫專注於兩種森林碳匯估算方法之建立，分為圖資影像碳匯估算方法和 DMC 多光譜影像估算森林碳匯，圖資影像碳匯估算方法主要利用林業署所提供之多光譜影像數據轉換成 RGB 影像，使用影像辨識切割圖片中的樹冠層部分，並計算出單位面積內植株的數量，再根據樹冠層算出來的面積，換算成該植株種類的 DBH 與 H，接著系統會參照林業署所公佈的木材密度與植物碳含量來計算每單一植株的碳含量，最終會依據林木儲碳計算方法來估算整片區域的碳匯量。DMC 多光譜影像估算森林碳匯是以 CASA 為基礎，結合 Sentinel 2 衛星資料，以進行森林 NPP 量估算。

## 二、森林碳匯估算系統建置規劃

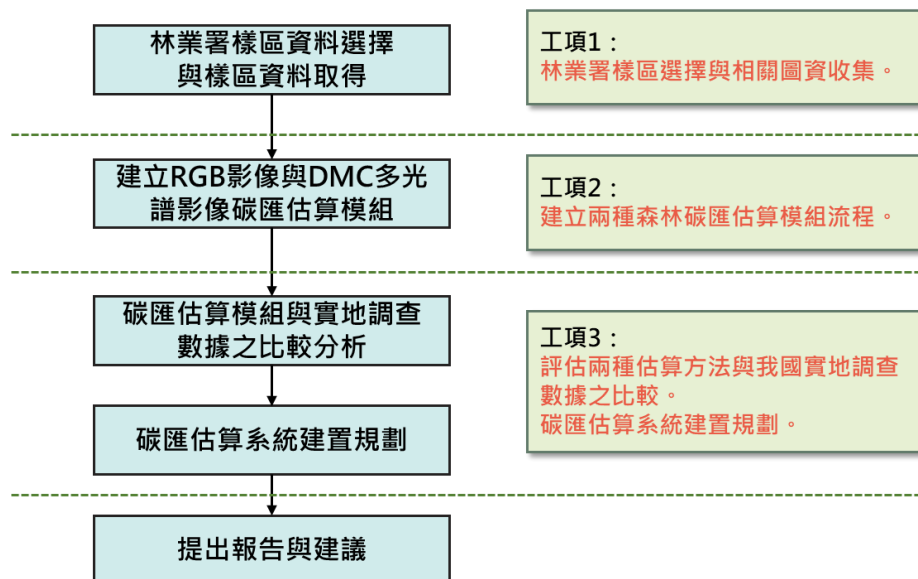
本計畫依據過去研究不同國家和機構所建立的森林碳匯估算系統，並參考過去相關文獻回顧所提出的研究成果。提出本計畫之森林碳匯估算系統功能與森林碳匯計算模組系統建置。

## 三、評估森林碳匯估算結果與地面調查之比較

鑑於我國的林業發展目標，對於森林碳匯估算的需求持續增長。本計畫透過比較地面調查實際的碳匯估算數據與森林碳匯估算模組之估算數據，以評估不同監測技術的可行性，以提供我國在建立此系統時的參考，提出我國森林碳匯估算系統之後續建構方針。

### 第四節 研究流程

本計畫的主要目標是利用林業署航測及遙測分署圖資，選出實際要進行比較的實地樣區圖資數據，並利用本計畫提出的森林碳匯估算模組進行碳匯估算，評估各種監測技術的可行性，以提供我國在建立森林碳匯估算系統時的參考與森林碳匯估算系統建置。計畫流程詳見圖 1。這項計畫將有助於我國有效建立具有國際競爭力的森林碳匯估算系統，以應對氣候變遷和可持續林業管理的挑戰。



資料來源：本研究整理

圖 1 計畫流程圖

## 第二章 森林碳匯估算之方法

本章節將說明森林碳匯估算方法，並進行相關文獻回顧，主要分為三個小節，第一節為地面調查碳匯估算方法，主要回顧一些每木調查方法與第四次全國森林資源調查方法。第二節為圖資影像碳匯估算方法，透過人工智慧技術，對於多光譜影像進行影像分析，切割出每棵樹的樹冠層，並經由樹冠層面積換算成該植株種類的 DBH 與 H，接著系統會參照林務局所公佈的木材密度與植物碳含量來計算每單一植株的碳含量。第三節為 DMC 多光譜影像估算森林碳匯，係基於地面樣區資料作為模型訓練的依變數，搭配多元遙感探測資料獲取之自變數，再利用集成學習演算法進行模型配適，以進行森林碳匯之估算。

### 第一節 地面調查碳匯估算方法

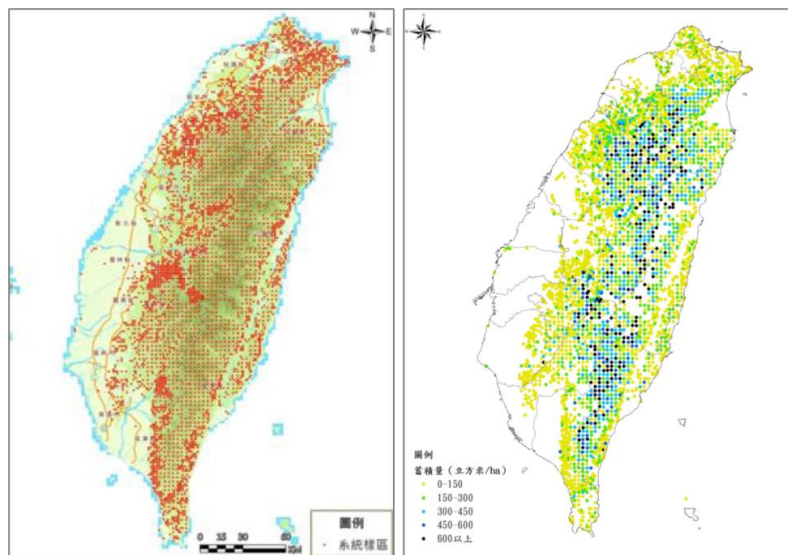
傳統的森林碳匯地面調查方法主要基於每木調查，透過劃設樣區和適當的取樣方式來統計整個林地的材積、林木生物量以及碳匯等資訊。隨著技術的進步，精密測量工具的體積和重量大幅縮減，現地調查人員除了使用傳統的量測工具(如羅盤儀、分度儀、輪尺、測繩、測桿等進行測量並進行複雜的內業計算外，現在還可以利用高精度的電子儀器(如雷射測距儀、光達等)獲取所需的林木資訊(如胸高直徑、樹高、樹冠幅、樹種及樹形等)。調查人員可以將測量數據輸入攜帶型電腦設備，利用專業軟體進行即時計算，迅速獲得碳匯相關的目標資訊。

根據過去的研究(楊榮啟, 1986)，國內傳統的每木調查方法通常需要至少 2-3 位測定者和 1 位記錄員。此外，根據調查地點的地形、立木的疏密度以及林地障礙物的情況，可能需要增派額外的人員，以確保調查工作的順利進行。在實地調查中(Chave et al., 2014)，調查員需要對樣區內每棵樹的高度和胸徑進行測量。樹高測量通常使用捲尺來完成(Zang et al., 2023)。根據這些調查數據，選擇標準木，然後將這些標準木砍伐，帶回實驗室進行乾燥和秤重，以獲得各種生物量數據，包括樹幹、根、枝、葉、花和果實的資訊。這種傳統方法雖然能夠提供詳細和準確的數據，但過程繁瑣且耗時費力。每木調查需要大量的人力投入，並且在測量過程中容易受到各種環境因素的影響，增加數據收集的複雜性和難度。儘管如此，這種方法仍然是許多森林資源研究中的基礎，為碳匯估算和森林管理提供重要的數據支持。

而最近一期的第四次全國森林資源調查(農業部林業及自然保育署, 2015)為例，全國地面樣區的每木調查自 2008 年開始，直至 2013 年結束，耗時近五年。除了林業署所投入的大量人力資源外，部分樣區(事業區以外)亦透過委外方式進行調查。實地調查採用系統取樣方法，並選取航照樣點的子集進行雙重取樣。國有林事業區內的樣區間隔為 3X3 公里，而事業區外因林地零星分散，將取樣密

度增加四倍至 1.5X1.5 公里。參與調查的人員需以徒步方式到達指定座標地點，設置樣區並調查林木資訊。此次調查共計 3,648 個樣區，如資料來源：農業部林業及自然保育署 (2015)

圖 2 所示。樣區的大小除竹林取 0.01 公頃外，均以 0.05 公頃為原則。然而，若樣區內出現 3 株胸徑大於 100 公分的樣木，則需將面積擴增至 0.1 公頃，以避免大徑林木造成單位面積蓄積量的高估。調查項目包括樣區座標位置與環境等基礎資訊，並對樣區內胸徑大於 6 公分的活存林木逐一記錄其樹種、胸徑、高度、樹冠狀態及相對位置。此外，枯立木及倒木也在調查範圍內。實地調查總天數達 6,955 日，花費高達 1.4 億元，成為此次森林資源調查的主要支出項目(總支出為 1.8 億元)。最終，根據 IPCC 建議的公式，將蓄積量乘以擴展係數和轉換係數後，即可得出碳匯的資訊。根據當時的調查成果，國有林的碳匯量達到 7 億 5 千 4 百萬公噸，其中以闊葉林型的碳匯量最高，佔總量的 63%。



資料來源：農業部林業及自然保育署 (2015)

圖 2 第四次全國森林資源調查地面樣區配置及蓄積量分布示意圖

## 第二節 圖資影像碳匯估算方法

根據林業署所提供之多光譜影像數據森林植株地圖，接下來會透過影像辨識技術切割圖片中的樹冠層，並計算出單位面積內植株的數量，並透過樹冠層算出來的面積，換算該植株種類的 DBH 與 H，接著會參照林務局所公佈的木材密度與植物碳含量來計算每單一植株的碳匯量，最終會依據林木儲碳計算方法來估算整片區域的森林碳匯量。此功能將包含三個模組，分別為森林圖像拼湊模組、森林圖資辨識模組、碳匯儲存量估算模組，如圖 3 所示。


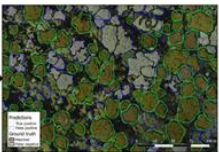
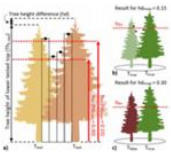
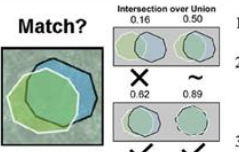
		森林圖資辨識模組		碳匯儲量估算模組		
系統步驟	輸入	輸出		輸入	輸出	
	航照 空拍 RGB 圖像		植株數量	林相分類	植株數量	碳匯儲量
			樹冠面積		樹冠面積	
實施方式				代入樹高曲線式( $H=2.19 \times DBH^{0.5502}$ )式求得樹高，並將其值與 DBH 代入生長關係函數( $W=0.2857 \times DBH^{2.3938}$ )，求取林木鮮重在乘上乾鮮比(50.75%)，即可獲得全株生物量。全株碳貯存量：全株生物量乘上碳含量(47%)即可獲得，全株 CO <sub>2</sub> 固定量：將全株碳貯存量乘上 44/12，即可獲得。		
相關研究		<ol style="list-style-type: none"> <li>James G. C. Ball 等 (2023) 在四個熱帶森林 Accuracy 在 56.8%-68.7%，平均 Accuracy 為 63.4% (F1-score)。</li> <li>Freudenberg, M. 等 (2022) 在城市地區的衛星影像中，Accuracy 為 46.3%，Precision 為 62.8%，Recall 為 63.7%，IoU 為 71.2%。在森林區域的航空影像中，平均 52.0%，Precision 和 Recall 分別為 70.9% 和 66.2%，IoU 為 81.9%。</li> <li>Weinstein, B.G. 等 (2019) 平均 Recall 為 69%，Precision 為 61%。</li> </ol>		<ol style="list-style-type: none"> <li>Ivan Sačkov 等 (2017) 提到了樹冠層面積和樹高之間的關聯性，並提供了數學規則，例如樹冠半徑與樹高的平均比率為 0.15、最大冠寬與樹高的比率為 0.4、最大冠長與樹高的比率為 0.7。</li> <li>Miranda 等 (2015) 在計算橄欖樹樹冠層的投影面積和體積時，表示樹冠面積與樹高和樹徑之間，有顯著正相關。</li> </ol>		

圖 3 圖資影像碳匯估算方法

### 一、森林圖像拼湊模組

此為森林 RGB 影像的全景圖模組，RGB 影像進行分割，導入森林樹冠層影像辨識模組中，辨識完成後將多張的森林圖像照片拼接成完整的森林圖像地圖。圖像拼湊(image-stitching)是一種將多張照片合併成全景影像(Field of View, FOV)的技術，其應用範疇包括全地圖拼湊和全景影片製作等(Wang et al., 2020)。圖像拼湊技術包含三個重要的組成部分，分別為校準、配準和混合(Calibration, Registration, and Blending)，實施方法主要分為空間域拼湊(Spatial Domain-Based Stitching)和頻率域拼湊(Frequency Domain-Based Stitching)兩種方式(Vayalakra et al., 2022)。近年來，隨著無人飛行器(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)的普及和應用範圍的擴大，影像拼湊技術(image-stitching)成為一個新興的議題，影像拼湊是圖像拼湊的延伸，且影像拼湊相較於圖像拼湊技術更為複雜(Jagadeeswari et al., 2021)，原因出自於攝影時可能產生抖動、重影和模糊等問題，這些挑戰會大幅影響拼湊成品的質量。本研究會開發以 RGB 影像的圖像拼湊技術模組，這方面已經有許多相關研究與技術(Chen et al., 2022; Gómez-Reyes et al., 2022; Lyu et al., 2019; Wu et al., 2022)，一般多用於城市建築規劃、資源環境檢測與工程檢查(Yang

et al., 2022)等領域。典型的圖像拼接方法通常使用全域變換(如仿射、相似度和投影)來記錄圖像的重疊區域(Zhang et al., 2022)，但由於拼湊時會根據重疊區域將多個圖像拼接成單個圖像，所以拼接的正確匹配率(Correct Matching Ratio)也會因圖像裡區域的特徵而有所影響，例如在都市建築街道的圖像拼接的匹配率可以達到 70%以上(Chen et al., 2022)，而在森林圖像(枇杷松林)裡僅獲得 55%(Yu et al., 2022)。

本計畫採用林務局航測及遙測中心提供的 DMC 多光譜航測影像，首先透過模組將影像轉換為 RGB 格式，接著依據影像的尺寸與解析度進行適當的切割，切割的區塊數量將根據實際需求調整。切割完成的影像將進一步輸入影像辨識模組進行目標物之識別與分類。所有影像辨識作業完成後，經由模組執行影像拼接作業，最終生成一幅完整的識別影像圖層，作為後續分析的基礎資料。

## 二、森林圖資辨識模組

這是一個為空中拍攝的森林圖資而設計的辨識模組，目標是識別出圖資影像中的森林的樹冠層，並分割出樹冠層圖像，且計算出影像中的樹木數量。雖然使用高光譜感測器(如 LiDAR)的方法(Nevalainen et al., 2017; Sothe et al., 2019; Sun et al., 2022)可以高精度地識別樹種，但成本高昂，因此不適合小規模森林管理者，本計畫開發的模組可使用一般的 RGB 鏡頭與多光譜影像，結合高解析度圖像和深度學習的方法，使用由葉子形狀和分支模式生成的紋理圖像來識別樹冠層，根據最新的研究指出，在辨識少數種類的植株時，其準確度可高達 90%(Onishi et al., 2021)，在辨識多種，特別是在闊葉林或混合林中，僅依賴 RGB 圖像來進行樹冠層分割仍然是一項困難的議題(Onishi et al., 2022)。本計畫從辨識森林樹冠層進行，根據林業署提供的多光譜森林圖資轉換成 RGB 影像，並經由 Mask R-CNN 模型進行識別，判斷圖片中所呈現的樹冠層。

本計畫採用 Mask R-CNN 樹冠辨識模型進行重新訓練，相關圖片的細節與處理流程如下：原始影像尺寸為 45,410 像素 × 45,410 像素，對應實際地理範圍為 4,541 公尺 × 4,541 公尺，X 軸與 Y 軸的解析度均為 0.1 公尺/像素(比例尺)。為進行數據處理，原始影像被切分為 1,000 像素×1,000 像素的小區塊，每塊對應於 100 公尺×100 公尺的實際範圍。由於影像中並非每個區塊都包含樹冠，因此設定一個樹冠佔比的閾值(threshold)作為篩選標準。當樹冠佔比閾值設為 60%時，僅有 4 張符合條件的影像，其中 3 張用於訓練(train)，1 張用於測試(test)。若將閾值調整為 20%，則可得到 281 張符合條件的影像，其中 15% 用於測試(test)。這種方法根據樹冠佔比篩選影像，確保訓練數據集的有效性，同時保留測試數據集的代表性，為 Mask R-CNN 模型的準確訓練與測試提供有力的基礎。

模型預測結果如圖 4 所示，上方的圖像顯示 Mask R-CNN 模型對森林樹冠層進行影像分割的預測結果，不同顏色的區塊代表模型辨識出的樹冠範圍，框線

則標示出預測的邊界。下方的圖像則是對應真實的數據，代表樹冠層的實際分布情況，從預測結果中可以看出準確度平均為 65%左右，準確度最高為 74%。

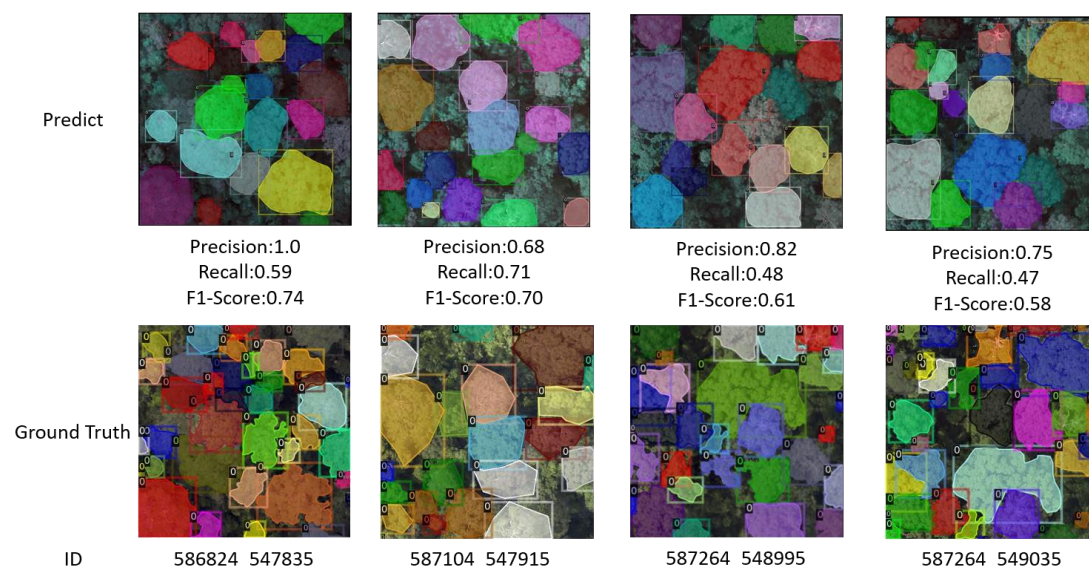


圖 4 Mask R-CNN 模型訓練結果

### 三、碳匯儲存量估算模組

本模組將根據前項模組切割出圖資內的樹冠層，並判斷出林木數量與樹冠層面積，將這些數據帶入到碳匯計算公式中。通常估算碳匯量需要使用 H 與 DBH 等參數，DBH 是指樹木的直徑，這是樹木生物量計算中常用的一個重要指標，過去研究(Sačkov., 2017)分析樹冠層面積和樹高之間的關聯性，並分析數學規則，例如樹冠半徑與樹高的平均比率為 0.15、最大冠寬與樹高的比率為 0.4，最大冠長與樹高的比率為 0.7。因此，樹冠面積所計算的樹冠半徑就可以推算出 H。當有 H 可以經由過去已有數篇相關研究(Su et al., 2021; Zhang et al., 2022; Sumida et al., 2013; Tang et al., 2020)探討樹齡、H 與 DBH 之間的關係。首先根據每個林木樹冠層的面積，結合 DBH 與 H 的關係式數學模型，推算出每棵樹的 DBH 與 H。接著，將這些數據代入材積公式進行計算，立木材積 $= (DBH)^2 \times 0.79 \times H \times \text{形數}$ ，其中形數一般設定為 0.45。計算出立木材積後，再進一步推算每棵樹的固碳能力，公式為：固碳量 $= \text{材積} \times \text{絕乾比重} \times \text{碳含量比例}$ ，最終，將每棵樹的固碳量累加，即可得出整片區域的森林碳匯儲存量。這種方法綜合考慮樹冠層面積、DBH、H、材積與碳含量等多個參數，能夠有效地量化森林的碳匯能力，為森林管理與碳中和目標的評估提供科學依據。

### 第三節 DMC 多光譜影像估算森林碳匯

本章所建構之碳匯估算方法，係基於地面樣區資料作為模型訓練的依變數，搭配多元遙感探測資料獲取之自變數，再利用集成學習演算法進行模型配適，以進行森林碳匯之估算。其中模型自變數除使用航測及遙測分署 DMC 多光譜影像搭配 CASA(Carnegie Institute of Technology)模型所估算之淨初級生產量(Net Primary Production, NPP)外，亦搭配多元且開源之遙感探測資料作為自變數，其中開源部分包含：Sentinel 2 多光譜影像產製之植生指標、水分指標以及樹冠高程模型。演算法部分，本研究使用隨機森林(Random Forest, RF)、梯度提升機(Gradient Boosting, GBM)、極限梯度提升機(eXtreme Gradient Boosting, XGBoost)、輕量級梯度提升機(Light Gradient Boosting, LightGBM)以及類別梯度提升(Categorical Boosting, CatBoost)，並以表現最佳之模型整合各演算法之成果，建構集成學習演算法來估算森林碳匯量。本章節之研究架構如圖 5 所示。

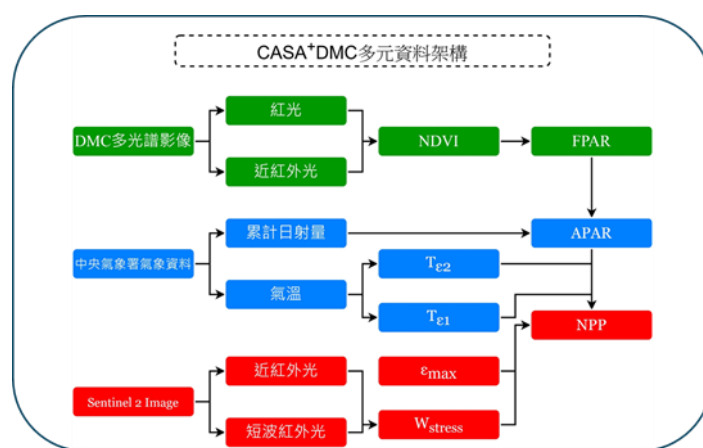
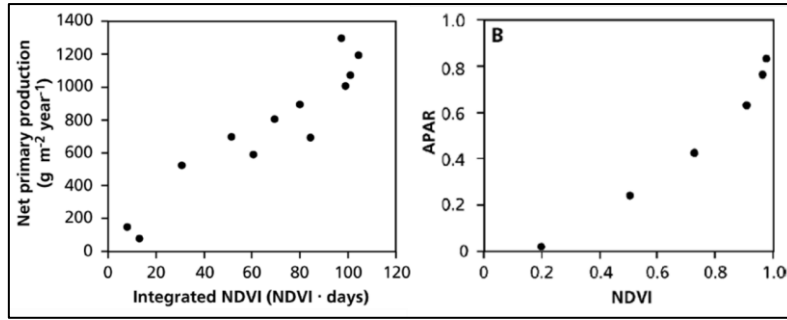


圖 5 DMC 多光譜影像與多元資料搭配集成學習演算法估算森林碳匯

受益於植物光譜反射特性，多光譜影像被廣泛應用於植物生長狀況與健康狀況的分析，而植物的之生長狀況、光譜植生指標、光合作用及淨初級生長量呈現顯著的正相關性，詳如圖 6 所示，因此多光譜影像被廣泛應用於並被廣泛應用於植物淨初級生產量(Net Primary Production, NPP)的推估(Chen et al., 2024; Peng et al., 2022)。美國太空總署、卡內基梅隆大學與史丹佛大學共同開發的 Carnegie-Ames-Stanford Approach(CASA)模式，即為基於光合作用與植生指標間的關係為基礎，建構的估算植物 NPP 的工具，NPP 為單位面積、單位時間植物透過光合作用所轉化的碳含量(Wu et al., 2022)，透過植生指標、太陽輻射量、氣溫與環境水分含量，估算植物的淨初級生產量，CASA 模式被廣泛應用於綠地 NPP 的計算(鄭祈全, 2014; Yan et al., 2021; Wu et al., 2022)。



資料來源：Lamber et al. (2008)

圖 6 植物淨初級生長量、光合有效輻射吸收量(Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR)與常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)之關係

## 一、模型自變數資料及相關參數處理

### 1. CASA 模型淨初級生產量估算

NPP 為判定植物固碳能力的重要依據之一，本研究使用之 CASA 模型係由卡內基科技研究所、美國太空總署艾姆斯研究中心(Ames Research Center)以及史丹佛大學(Stanford University)，於 1993 年基於衛星多光譜植生指標與植物光能利用效率(Light Use Efficiency, LUE)開發之植物淨初級生產量(Net Primary Production, NPP)模型，也是聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)所建議之碳吸存模型之一，本研究擬基於相同原理，使用航測及遙測分署 DMC 多光譜影像為基礎，並結合多元遙感探測資料做為輔助，以估算 NPP，做為後續機器學習建模的第一個自變數。NPP 估算詳如公式(1)：

$$NPP = APAR \times \varepsilon \quad (1)$$

APAR 為光合作用有效吸收輻射量(Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR)， $\varepsilon$ 為光能利用率(LUE)。其中 APAR 計算如下公式(2)

$$APAR = SOL \times 0.5 \times FPAR \quad (2)$$

SOL 為太陽輻射量，0.5 為光合有效輻射範圍 0.38–0.71  $\mu\text{m}$  波長區間之光譜所佔總太陽輻射量比例(Potter et al., 1993; Field et al., 1995; Yan et al., 2021; Wu et al., 2022)，FPAR 為被植被冠層吸收的光合有效輻射的比例(Fraction of the Photosynthetically Active Radiation Absorbed, FPAR)，有關 FPAR 計算之方法，本案採用 Field et al. (1995)提出以常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)估算之 FPAR。FPAR 計算公式如式(3) (Field et al., 1995; Wu et al., 2022)：

$$FPAR_{\text{Field}} = \frac{(NDVI_n - NDVI_{\min}) \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min})}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} + FPAR_{\min}; \quad (3)$$

公式(1)中之光能利用率( $\varepsilon$ )計算公式如(4)所示，式中 $W_{\text{stress}}$ 為水分壓力因子 (Water Stress Factor)， $T_{\varepsilon 1}$ 代表最高、最低溫對於植物光合作用造成之限制，而 $T_{\varepsilon 2}$ 則代表相較於最適生長溫度，向高溫與低溫變化時對於植物光能利用率衰減的趨勢， $\varepsilon_{\text{max}}$ 為不同種類植物之最大光能利用率。

$$\varepsilon = W_{\text{stress}} \times T_{\varepsilon 1} \times T_{\varepsilon 2} \times \varepsilon_{\text{max}} \quad (4)$$

公式(4)中 $W_{\text{stress}}$ 之計算公式主要參考國際知名學者所提出之應用遙感探測資料所估算之方法，並搭配 Sentinel 2 之相關光譜資料進行計算，計算公式詳如公式(5) (Xiao et al., 2004; Zhang et al., 2016; Ma et al., 2018; Huang et al., 2022; Shi et al., 2023)：

$$W_{\text{stress}} = \frac{1 + \left( \frac{\rho_{\text{Nir}} - \rho_{\text{Swir}}}{\rho_{\text{Nir}} + \rho_{\text{Swir}}} \right)}{1 + \left( \frac{\rho_{\text{Nir}} - \rho_{\text{Swir}}}{\rho_{\text{Nir}} + \rho_{\text{Swir}}} \right)_{\text{max}}} \quad (5)$$

公式(4)中 $T_{\varepsilon 1}$ 與 $T_{\varepsilon 2}$ 之計算公式如公式(6)與公式(7)，式中 $T_{\text{opt}}$ 代表 NDVI 數值最高月分之月均溫， $T$ 代表影像拍攝時之月均溫。

$$T_{\varepsilon 1} = 0.8 + 0.08 \times T_{\text{opt}} - 0.0005 \times (T_{\text{opt}})^2 \quad (6)$$

$$T_{\varepsilon 2} = \frac{1.1814}{[1 + e^{0.2 \times (T_{\text{opt}} - 10 - T)}] \times [1 + e^{0.3 \times (-T_{\text{opt}} - 10 - T)}]} \quad (7)$$

$\epsilon_{\max}$ 為不同植物在理想狀況下之最大光能利用率( $\text{g C/MJ}^{-1}$ )，本研究使用之  $\epsilon_{\max}$ 詳如下表 1 所示(朱文泉等，2007；王素芬等，2019)。

表 1 各樹種最大光能利用率

植被類型	$\epsilon_{\max}$
針葉林	0.389
常綠闊葉林	0.985
針闊葉混合林	0.768
竹林	0.542
草生地	0.542
耕地	0.542
非植被	0.542

由於 CASA 模型是基於衛星遙感探測資料所開發之模型，本研究基於相同資概念使用航照多光譜影像進行計算。為確保 CASA 模型在使用非衛星遙感探測資料時仍之結果準確度，本研究在模型開發初期，預先以國立成功大學為研究區域，並搭配航高更低之無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)多光譜影像進行 CASA 模型之 NPP 估算，並搭配地面觀測資料所計算之 NPP 進行模型驗證，地面觀測資料之 NPP 計算公式是依據 Lamber et al. (2008)所提出，如(8)所示：

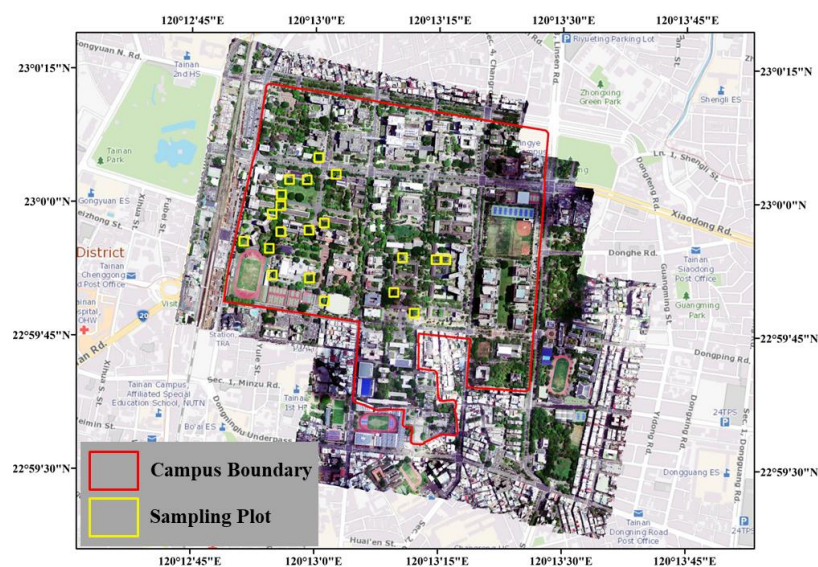
$$\text{NPP} = \text{Biomass} \times \text{Relative Growth Rate} \quad (8)$$

公式(8)中之 Biomass 為植物生物量(kg)，Relative Growth Rate為植物於特定時間段相對成長量，本研究之 Biomass 計算如公式(9)所示(趙國榮等，2022; Chave et al., 2014; IPCC 2006)：

$$\text{Biomass} = 0.0673 \times (\rho \times \text{DBH}^2 \times H)^{0.976} \times C(1 + \text{SR}) \quad (9)$$

公式(9)中  $\rho$  為植物密度，DBH 為樹木之胸高直徑(cm)，H 為樹高(m)，C 為含碳比率，SR 為根莖比，其中  $\rho$  與 C 均參考趙國榮等(2022)所建置之資料庫，本研究所使用之 SR 數值為 0.24。

本研究於模型開發期間於國立成功大學做為測試區域，總計選取 20 處地面樣區，並使用公式(8)與(9)計算地面觀測之 NPP 進行比對。結果顯示 CASA 模型結合 UAV 多光譜植生指標所估算出 NPP 與地面觀測估算之 NPP，兩者間之判定係數( $R^2$ )均高於 0.75，詳如圖 7 所示。



	$R^2$	MAE(gC/m <sup>2</sup> /Month)	MAPE(%)
NPP(FPAR <sub>Potter</sub> )	0.831	52.655	78.6 (Underestimate)
NPP(FPAR <sub>Field</sub> )	0.758	47.281	70.8 (Overestimate)
NPP(FPAR <sub>Los</sub> )	0.776	2.044	3.1

圖 7 以國立成功大學為試區進行 CASA 模型開發驗證成果

## 第三章 森林碳匯估算系統建置

### 第一節 森林碳匯估算系統概述

依據前述章節的方法與模型，本章將說明森林碳匯估算系統建置，此系統核心功能將整合林業署提出的 RGB 圖資與多光譜圖資，並結合衛星影像數據，納入多項指標，提升森林碳匯估算模型的精確度和效率。森林碳匯估算系統的主要目標是提供高效分析、精準計算和決策支持。系統能夠自動化處理來自多個來源的數據，支持大範圍和多層次的碳匯評估。通過模組化算法並結合多種數據來源，系統提供具有高度發展性的碳匯估算前瞻方法。此外，系統還能生成多維度的可視化結果，為政策制定和資源管理提供有力的輔助支持。這些功能共同確保系統在森林碳匯估算領域的全面性和實用性。以下為系統使用流程，如圖 8 所示，當中包括各功能模組。

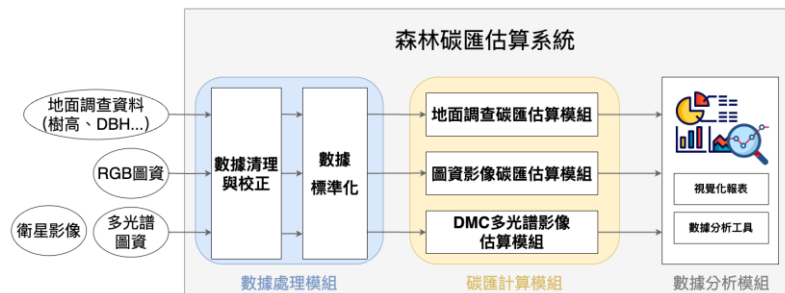


圖 8 森林碳匯估算系統功能流程

#### 一、數據收集

- (一)地面調查資料：依據林業署所提供的實地樣區調查資料，為森林碳匯估算提供影像數據支持。
- (二)RGB 圖資：依據林業署所提供的樣區圖資資料，導入多個樣區的 RGB 圖資，為森林碳匯估算提供影像數據支持。
- (三)多光譜圖資：依據林業署所提供的樣區圖資資料，導入多個樣區的多光譜圖資，為森林碳匯估算提供影像數據支持。
- (四)衛星影像：衛星影像系統旨在透過整合衛星多光譜數據，納入植生指標和水文指標，並參考衛星相關樣區的樹高數據，提升森林碳匯估算的精確度。

#### 二、數據處理模組

- (一)數據清理與校正：對多光譜圖資進行校正，包括幾何校正和輻射校正，以提高數據的精確性。

(二)數據標準化：使用先進的圖像處理技術去除圖像中的雜訊，提升圖像質量。

### 三、碳匯計算模組

(一)地面調查碳匯估算模組：現地調查人員使用傳統的量測工具(如羅盤儀、分度儀、輪尺、測繩、測桿等進行測量並進行複雜的內業計算外，或利用高精密的電子儀器(如雷射測距儀、光達等)獲取所需的林木資訊(如胸高直徑、樹高、樹冠幅、樹種及樹形等)。使用者可以將測量數據輸入至平台中，以進行森林碳匯之估算。

(二)圖資影像碳匯估算模組：利用林業署所提供之 RGB 影像數據，計算出單位面積內植株的數量，再根據使用者提供種植年齡，換算成該植株種類的 DBH 與 H，接著系統會參照林業署所公佈的木材密度與植物碳含量來計算每單一植株的碳含量，最終依據林木儲碳計算方法來估算整片區域的木材碳含量。

(三)DMC 多光譜影像估算模組：基於地面樣區資料作為模型訓練的依變數，搭配多元遙感探測資料獲取之自變數，再利用集成學習演算法進行模型配適，以進行森林碳匯之估算。

### 四、數據分析模組

(一)數據分析工具：依據碳匯估算模組計算結果與實地調查資料進行比較分析，幫助用戶了解不同估算方法的精確度和適用性。

(二)視覺化報表：視覺化報表旨在將兩種碳匯估算模組計算出的結果展示於系統介面中，提供直觀的數據展示和分析功能，幫助用戶更好理解和利用碳匯估算結果進行分析比較。

## 第二節 森林碳匯估算系統架構

森林碳匯估算系統採用前後端分離架構，並以容器化技術進行部署，如圖 9 所示。此設計確保系統具有靈活的功能擴展性與高效的運行能力。系統架構分為三個主要層次：前端層、後端層及資料層。透過這種現代化架構設計，大幅提升系統的擴展性與維護性，各層次皆負責特定功能如下：

1. 前端層：提供使用者操作介面，支援檔案上傳及數據互動的視覺化呈現。
2. 後端層：負責業務邏輯處理、資料運算與演算法執行。
3. 數據層：提供資料儲存與管理功能，支援結果快取與任務紀錄。

前後端分離架構允許前端和後端獨立開發和部署，提高開發效率和系統靈活性。前端通常使用基於 JavaScript 或 TypeScript 的網頁框架開發，後端則常採用 Python、Java 或 Go 等語言開發的 RESTful API 框架。兩者透過 HTTP 協定進行通信送出請求與回覆。例如：GET /api/v1/forests/{forest\_id} 這個 API 用於獲取特定森林的詳細資訊。當用戶需要查看某個特定森林的數據時，可以使用這個 API，其中 {forest\_id} 是該森林的唯一識別碼。

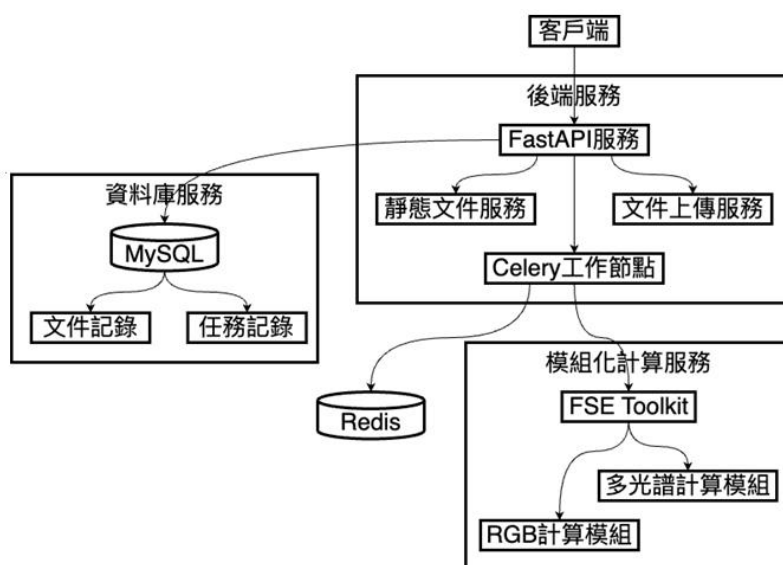


圖 9 森林碳匯估算系統架構

這種 API 設計方式讓系統介面更加直觀、易於操作與擴展，同時也便利與其他系統的整合。它為森林碳匯估算系統提供一個清晰且一致的介面，使客戶端（前端應用、移動裝置還是其他服務）都能夠輕鬆地與系統進行集成，從而大幅提升系統的可用性、靈活性與擴展性。

### 一、前端架構

系統的前端介面採用 Vue 3 框架開發。Vue 3 是一個現代化的 JavaScript 框架，能提供高效的頁面渲染和良好的用戶體驗。系統使用 Pinia 進行狀態管理，

這是一個專為 Vue 設計的狀態管理工具，可有效管理複雜的數據狀態。開發語言選用 TypeScript，這種帶有類型檢查的 JavaScript 超集能提供更可靠的代碼質量。界面組件則使用 Quasar Framework，這個框架提供豐富的 UI 組件，使系統具有美觀且一致的視覺風格。前端主要提供以下功能：

1. 文件管理：使用者可方便地上傳森林影像數據，系統支援預覽這些影像，並可下載分析結果。
2. 數據可視化：系統將複雜的碳匯評估結果轉化為直觀的視覺化展示，包括熱圖和各種統計圖表，幫助使用者更好地理解分析結果。
3. 即時進度監控：通過 WebSocket 技術，使用者可實時查看分析任務的執行進度，了解當前處理階段。

表 2 平台前端技術

類別	技術
框架	Vue 3
狀態管理	Pinia
開發語言	TypeScript
組件庫	Quasar Framework

## 二、後端架構

系統後端採用 FastAPI 作為主要框架。FastAPI 是一個現代化的 Python 網頁框架，具有高性能和易於開發的特點。系統使用 Celery 作為任務調度工具，能夠有效管理和執行大量分析任務。Redis 作為消息佇列和快取系統，提供高效的數據交換和暫存功能。主要的數據存儲則使用 MySQL 資料庫，確保數據的持久化儲存和高效查詢。後端系統的核心功能包括：

### (一)任務管理系統：

1. 負責創建和管理分析任務
2. 提供任務狀態查詢功能
3. 支援結果下載服務

### (二)算法執行環境：

1. 運行模組化計算服務(FSE Toolkit)
2. 處理影像數據
3. 執行碳匯估算計算

### (三)API 服務：

1. 提供標準的 RESTful API 接口
2. 支援 WebSocket 即時通訊
3. 處理前端的各種請求

表 3 平台後端技術

類別	技術
框架	FastAPI
任務調度	Celery
消息隊列	Redis
數據庫	MySQL + Redis 快取
模組化計算服務	FSE Toolkit (本計畫開發)

### 三、部署環境

系統採用容器化技術進行部署，大幅提高系統的可移植性和擴展性。本計畫選用 Docker 作為主要的容器化平台，將各個核心組件(如 FastAPI 服務、Celery 工作節點、Redis、MySQL 等)封裝在獨立的容器中。這種做法帶來以下優勢：

- (一)環境一致性：確保開發、測試和生產環境的一致性，減少「在我的機器上可以運行」的問題。
- (二)快速部署：容器可迅速啟動和停止，顯著縮短部署時間。
- (三)資源隔離：每個容器擁有獨立的資源配額，防止單一服務過度佔用系統資源。
- (四)版本控制：容器鏡像可進行版本化管理，便於回滾和管理不同版本的應用。
- (五)水平擴展：可靈活地增減服務實例，以應對負載變化。

本計畫採用 Docker Compose 來協調多個容器的運行，並統一定義應用的服務、網路與資料。此方式使整個系統能透過單一指令完成啟動或關閉，大幅簡化系統部署與運維的操作流程，提升工作效率。

表 4 系統環境

類別	技術
作業系統	Ubuntu Server 22.04
負載均衡	Nginx (支持 HTTPS 憑證管理)
容器管理工具	Docker, Docker compose

### 第三節 模組化計算服務

FSE Toolkit 是本系統的核心模組化工具包，提供多光譜影像與 RGB 圖像的計算功能，圖 10 為多光譜計算模組流程。

#### 一、多光譜計算模組

##### (一)功能

1. 植生指數計算：
  - (1) 處理多光譜數據
  - (2) 計算各種植生指數
  - (3) 評估植被健康狀況
2. 氣象數據整合：
  - (1) 自動定位研究區域座標
  - (2) 搜索並獲取政府氣象站數據
  - (3) 整合氣象參數到計算模型
3. 水分壓力分析：
  - (1) 透過 Google Earth Engine 獲取衛星數據
  - (2) 計算水分壓力因子分布
  - (3) 評估水分對植被生長的影響
4. 淨初級生產力(NPP)計算：
  - (1) 基於 CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型
  - (2) 整合多個環境參數
  - (3) 計算森林的碳吸收能力

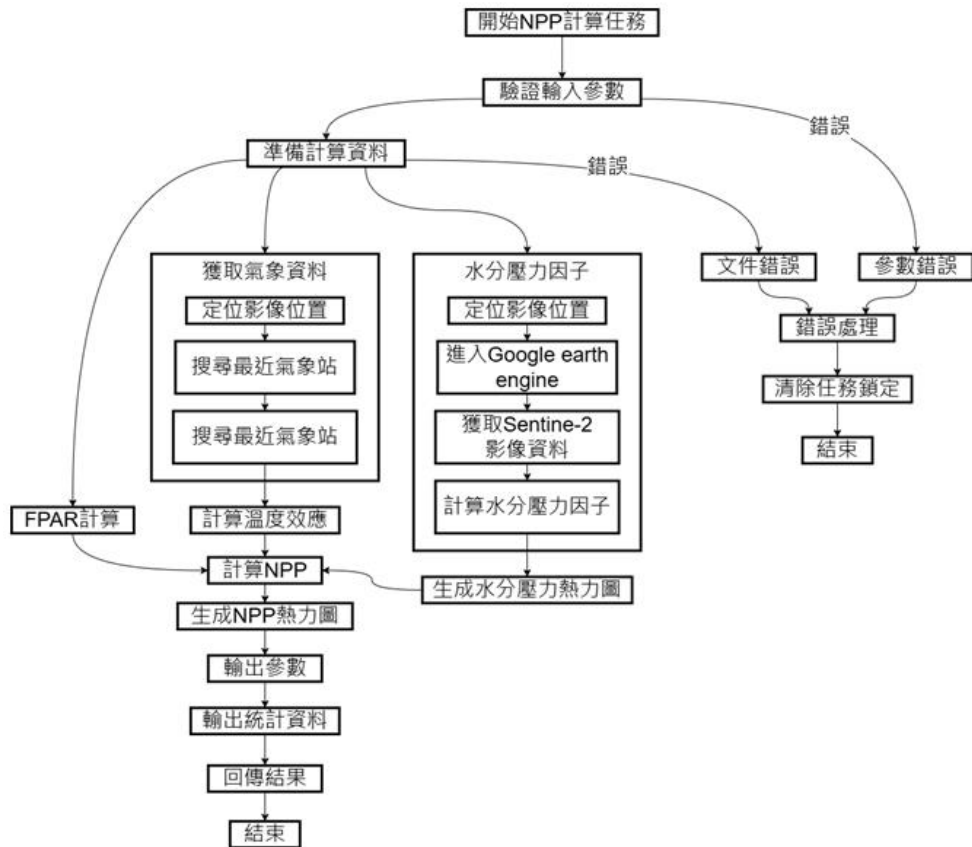


圖 10 多光譜計算模組流程圖

## (二)技術實現

1. Rasterio 進行數據取得和處理
2. Selenium 建立自動搜尋氣象資料腳本
3. Google Eearth Engine 是一個分析和視覺化地理資料的雲端運算平台，提供研究人員陸地衛星和 Sentinel-2 的資料。通過衛星資料，可以觀察農業、自然資源和氣候的變化，除了線上圖形介面也提供 Javascript 與 Python 程式套件。
4. 透過 Matplotlib 輸出數值熱圖

## (三)輸出

1. 原檔座標資訊
2. 熱圖(FPAR, NPP)
3. 統計報告

## 二、RGB 計算模組

### (一)功能

1. 影像處理：將 TIF 格式多光譜影像轉換為可處理的 PNG 格式，進而將大型影像分割成較小的區塊，以便進行並行處理。
2. 樹冠識別：使用已訓練的深度學習模型進行樹冠區域識別。模型輸出包含每棵樹的位置和輪廓信息。
3. 碳匯計算：基於樹冠面積，通過一系列生物量方程式計算單株樹木的碳匯量。

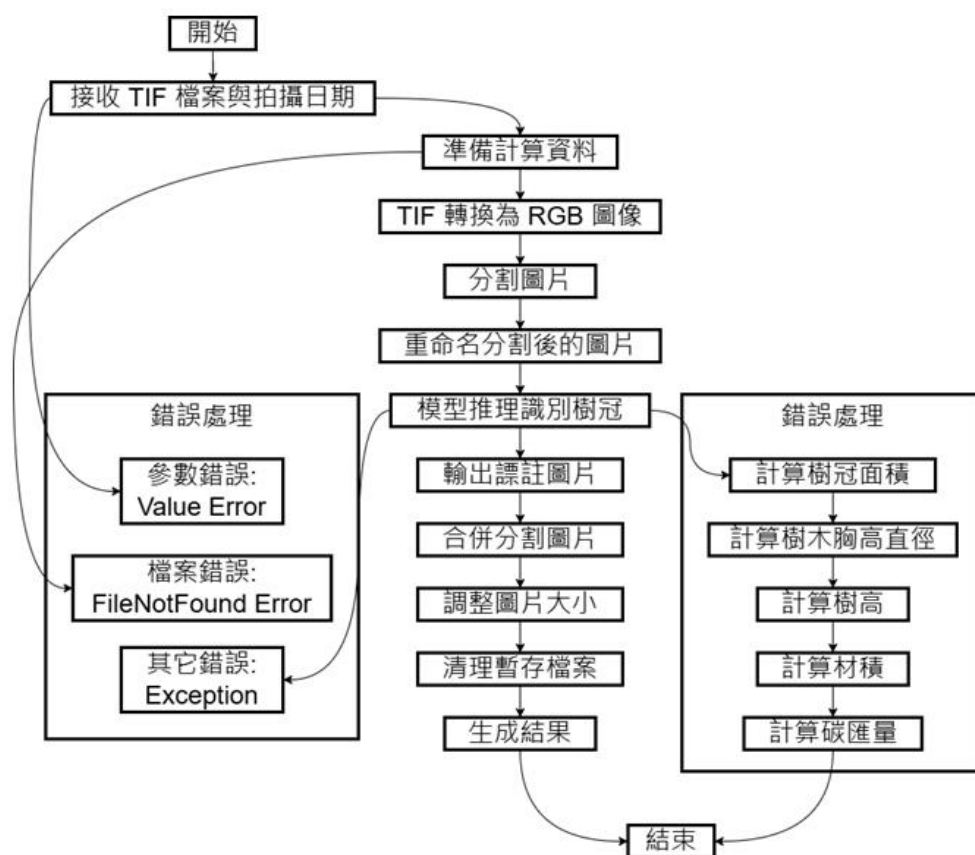


圖 11 RGB 計算模組流程圖

### (二)技術實現

1. 使用 Rasterio, Pillow 等套件進行影像處理。
2. 樹冠偵測模型基於 Facebook 的 Detectron2 框架和劍橋大學的 Detectree2 套件(Ball, J.G.C., 2023)進行開發，結合高效的物件偵測能力和專門針對樹冠識別的優化。這種組合不僅提高模型在森林環境中的識別準確度，還確保系統的可擴展性，能夠適應不同類型的森林環境和未來的技術發展。

### (三)輸出

1. 原檔座標資訊

2. 總碳匯量

3. 辨識圖

### 三、整合優勢

森林碳匯估算系統的設計具有多項優勢。首先，系統的靈活性使得每個模組都可以獨立更新或替換，這為未來的擴展和優化提供便利。其次，透過利用 GPU 加速技術，系統大幅提升計算性能，能夠更快速地處理大量數據。最後，系統採用模組間錯誤隔離的設計，有效避免單點故障，從而增強整體系統的穩定性和可靠性。這些特性共同確保系統能夠高效、穩定地運行，同時保持對未來技術發展的適應性。

## 第四節 資料庫設計

以下為森林碳匯估算平台的資料庫資料表結構設計：

1. files：記錄上傳文件的元數據，詳見表 5
2. results：存儲分析結果的摘要與詳細數據，詳見表 6
3. tasks：管理和跟蹤分析任務，詳見表 7

表 5 Files 資料表

欄位名稱	描述
id	主鍵，唯一標識每個文件
file_name	文件名稱
file_path	文件儲存的路徑
file_size	文件大小(單位：字節)
uploaded_at	文件上傳時間戳

表 6 Results 資料表

欄位名稱	描述
id	主鍵，唯一標識每個結果
task_id	外鍵，關聯到相應的任務
result_summary	分析結果摘要，存儲關鍵數據(如總碳匯量)
result_file_path	存儲結果報告或圖像的文件路徑
generated_at	結果生成時間
status	分析結果的狀態(如 "completed" 或 "error")

表 7 Tasks 資料表

欄位名稱	描述
id	主鍵，唯一標識每個任務
file_id	外鍵，關聯到分析使用的文件
task_type	任務類型(如 "RGB 分析" 或 "多光譜分析")
created_at	任務創建時間
completed_at	任務完成時間
status	任務狀態(如 "pending"、"in_progress"、 "completed")
progress	任務進度百分比(0-100)

以下為森林碳匯估算平台的檔案存儲結構：

1. /output/uploads：存放上傳的原始影像。
2. /output/results：保存分析生成的圖表與報告。
3. /output/temp：任務執行期間的臨時文件。

## 第五節 工作流程

以下說明整個森林碳匯估算系統的工作流程，如圖 12 所示。

### 一、文件上傳與任務創建

- (一) 客戶端上傳影像文件。
- (二) 後端保存文件並創建任務記錄。

### 二、任務執行與進度更新

- (一) 後端通過 Celery 調用 FSE Toolkit。
- (二) FSE Toolkit 分配計算模組，執行影像處理。
- (三) Redis 儲存計算進度，供前端實時查詢。

### 三、結果生成與存儲

- (一) 模組完成計算，結果存入資料庫。
- (二) 結果以圖表和報告形式返回給用戶。

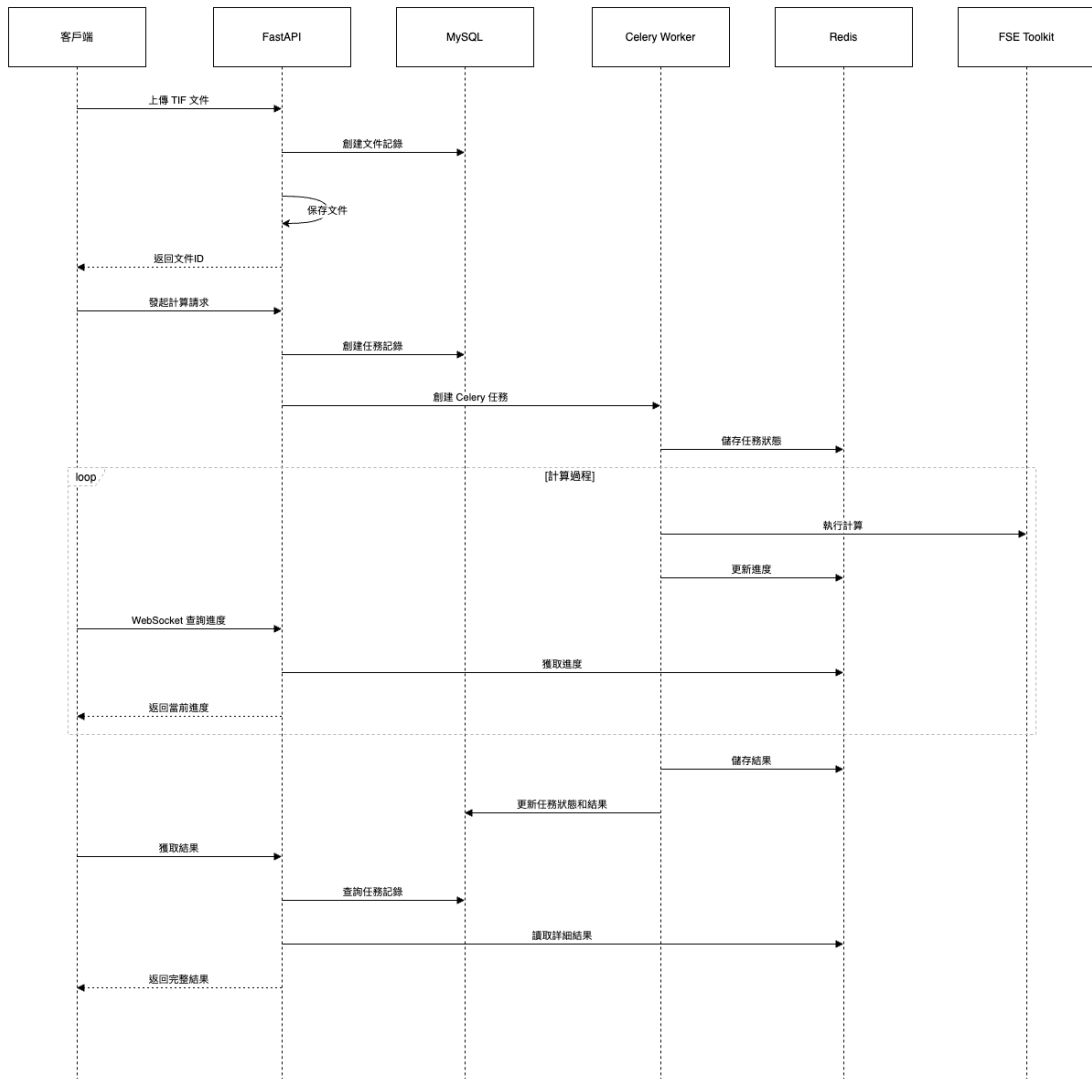


圖 12 森林碳匯估算系統的工作流程

## 第六節 API 設計

系統提供標準化的 RESTful API 和 WebSocket 接口，支持用戶進行任務管理、文件上傳、進度查詢以及結果下載。

## 一、RESTful API

### (一)文件管理 API

1. POST /file/upload：上傳文件。
  - (1) 請求參數：文件數據(格式：TIF)。
  - (2) 響應：文件 ID 和存儲路徑。
2. GET /files/{file\_id}：獲取文件信息。
  - (1) 請求參數：文件 ID。
  - (2) 響應：文件描述數據(名稱、大小、格式等)。

### (二)任務管理 API

1. POST /tasks：創建新任務。
  - (1) 請求參數：文件 ID、計算模組類型(RGB 或多光譜)。
  - (2) 響應：任務 ID 和狀態。
2. GET /tasks/{task\_id}：查詢任務狀態。
  - (1) 請求參數：任務 ID。
  - (2) 響應：任務當前進度與計算摘要。

### (三)結果查詢 API

1. GET /results/{task\_id}：下載任務結果。
  - (1) 請求參數：任務 ID。
  - (2) 響應：分析報告(JSON 或 PDF 格式)。

## 二、WebSocket API

(一)用途：支持實時進度推送，讓用戶隨時查看任務執行情況。

### (二)接口設計

1. ws://<server>/ws/progress/{task\_id}
  - (1) 請求參數：任務 ID。
  - (2) 響應數據：進度百分比與狀態信息(如"計算中"、"已完成")。

(三)數據格式：{ "task\_id": "12345", "progress": 85, "status": "Progress" }。

## 第七節 效能優化設計

### 一、多光譜影像處理

TIF 多光譜影像因記錄大範圍的數據，導致檔案容量龐大，因此需要進行多種不同程度的優化。為了解決這個問題，我們採用兩種主要的優化策略：分塊上傳和格式優化。

- (一)分塊上傳策略將大文件分成多個小塊進行傳輸，這樣可以有效避免因傳輸中斷而導致整個文件上傳失敗的問題。這種方法不僅提高上傳的成功率，還能夠在網絡不穩定的情況下提供更好的用戶體驗。
- (二)格式優化則是在上傳和回傳過程中對影像進行壓縮。這種方法能夠顯著縮小文件大小，同時又能保證圖像質量不會受到明顯影響。通過減少數據傳輸量，不僅可以加快上傳和下載速度，還能降低網絡帶寬的使用，提高整體系統的效率。

### 二、計算效率

為了提升系統的計算效率，我們採用多項優化策略：

- (一)並行處理：透過 Celery 實現並行處理，將大規模任務分配到多個計算節點同時執行，顯著提升整體運算速度。
- (二)GPU 加速：引入 GPU 加速技術，利用 CUDA 框架加速影像處理與深度學習推理，特別適用於處理大量圖像數據。
- (三)快取優化：採用 Redis 快取來存儲常用數據與中間結果，有效減少重複計算，進一步提升運算效率。
- (四)按需調度：實施資源按需調度策略，根據任務優先級分配資源，確保資源密集型任務得到最優化的處理。

這些優化措施相輔相成，使森林碳匯估算系統能高效處理大規模數據，為使用者提供快速準確的計算結果。

### 三、進度查詢

- (一)即時更新：任務進度儲存於 Redis，確保進度查詢的低延遲。
- (二)失敗恢復：若任務中途失敗，支持從最後的中間結果重新啟動計算，減少時間浪費。

## 第八節 系統安全性設計

### 一、資料傳輸安全

系統採用多層次的安全措施來保護資料傳輸和用戶操作。首先，所有數據傳輸都通過 HTTPS 加密，確保資訊在網路傳輸過程中的安全性。其次，系統會在文件上傳完成後進行 MD5 校驗，有效防止數據在傳輸過程中損壞或被篡改。最後，通過角色管理機制，系統為不同類型的用戶(如普通用戶、管理員)分配適當的操作權限，進一步加強系統的安全性和可控性。這些措施共同構建一個安全可靠的数据處理環境。

### 二、伺服器安全

在伺服器安全方面，本計畫採取多項措施來確保系統的安全性和穩定性。首先，實施嚴格的跨域資源共享(CORS)配置，有效限制跨域請求的來源，從而防止跨站請求偽造(CSRF)攻擊。這種配置能夠大大提高系統的安全性，保護用戶數據不被非法訪問或篡改。其次，建立統一的錯誤處理機制。通過標準化錯誤響應格式，不僅簡化系統調試過程，還提高錯誤記錄的效率和準確性。這種做法使得系統更快速地識別和解決潛在問題，從而確保系統的穩定運行和持續改進。

## 第九節 系統平台效益

### 一、技術層面

本系統具備多項技術優勢，確保其在實際應用中能夠發揮最大效能。首先，系統採用模組化設計，這種架構不僅支持未來新功能的順利添加，還大大提升系統的整體擴展性。其次，通過結合 GPU 加速技術和分布式任務處理機制，系統能夠顯著提高計算效率，處理大規模數據時表現尤為出色。最後，系統引入錯誤隔離機制，有效確保系統的穩定運行，即使在處理複雜任務時也能保持高度可靠性。這些技術優勢共同構建一個靈活、高效且穩定的森林碳匯估算系統。

### 二、業務層面

本森林碳匯估算系統在業務層面上帶來多方面的效益：

- (一)支持科學決策：系統通過提供多維度的碳匯估算結果，有效幫助政府與企業制定可持續發展策略。其模組化設計能快速集成最新的科學研究方法，進一步提升決策的科學性與準確性。
- (二)提升資源配置效率：系統內建的數據視覺化與報告功能，為森林資源的精細化管理提供強大支持，使管理者能更全面地掌握現有資源狀況，進行高效配置與合理利用。

(三)促進社會影響：系統為政府的碳中和政策提供可靠數據基礎，助力全球氣候目標的實現。不僅對環境保護產生直接貢獻，還促進社會各界對氣候變化議題的關注與行動，推動社會共同面對環境挑戰。

這些效益的實現，不僅提升系統在業務上的價值，還為推進環境保護與社會可持續發展注入強大動力。

## 第四章 圖資與影像估算森林碳匯結果分析

### 第一節 研究區域

研究區域主要是由林業署所提供之相關樣區資料，如圖 13 所示，總數為 1,600 個樣區，其中樣木樹為 86,559 筆資料，包含各森林樣區的詳細數據，包括基本資料、測量數據和分類標識。基本資料部分包括每個樣區的流水號、林區編號、樣本編號以及樣區面積、樣木數量與種類。測量數據部分涵蓋樣區的面積、材積、碳匯量、每公頃的樹木數量。此外，還包括調查日期和附加備註資訊。林型分類部分則提供林型的大類、中類和小類的分類資訊。這些詳細而全面的數據為精確的森林碳匯估算和數據分析提供堅實的基礎。

流水號	林區	SampleID	Area	樣木數	樣區BA	樣區Vol	CO2_plot	株_ha	SEA_ha	vol_ha	CO2_ha1	備註	基本圖圖號	樣點編號
1		1_96211005003	0.05	30	3.26	34.56	40.06	600	65.18	691.22	801.16		96211005	003
2		1_96211006014	0.05	26	0.81	4.89	7.66	520	16.23	97.83	153.16		96211006	014
3		1_96211009006	0.05	39	4.2	37.05	41.63	780	84.06	741.08	832.67		96211009	006
4		1_96211010003	0.05	19	3.07	30.6	33.9	380	61.32	611.93	678.07		96211010	003
5		1_96211014018	0.05	23	5.11	41.91	52.45	460	102.12	838.26	1049.02		96211014	018
6		1_96211015010	0.05	55	1.98	12.01	20.96	1100	39.52	240.23	419.24		96211015	010
7		1_96211017020	0.05	28	3.53	22.87	39.92	560	70.51	457.36	798.34		96211017	020
8		1_96211019017	0.05	53	2.25	12.84	14.43	1060	44.99	256.76	288.6		96211019	017
9		1_96211020007	0.05	67	1.52	7.35	8.93	1340	30.39	146.99	178.69		96211020	007
10		1_96211024023	0.05	20	0.67	4.99	8.48	400	13.39	99.8	169.61		96211024	023
11		1_96211026024	0.05	35	0.91	6.59	11.5	700	18.27	131.79	230.05		96211026	024
12		1_96211027025	0.05	57	3.15	19.21	33.54	1140	63.07	384.29	670.8		96211027	025
13		1_96211029022	0.05	48	2.07	11.89	19.22	960	41.37	237.76	384.35		96211029	022
14		1_96211030017	0.05	59	3.5	23.82	41.52	1180	69.96	476.36	830.45		96211030	017
15		1_96211034017	0.05	20	0.57	1.8	2.67	400	11.34	35.91	53.44		96211034	017
16		1_96211035020	0.05	49	1.09	5.93	10.34	980	21.82	118.58	206.8		96211035	020
17		1_96211036019	0.05	34	2.96	26.46	45.28	680	59.19	529.26	905.58		96211036	019
18		1_96211038026	0.05	28	5.73	52.4	59.07	560	114.52	1048.02	1181.43		96211038	026
19		1_96211039016	0.05	73	3.32	22.09	25.1	1460	66.37	441.81	501.99		96211039	016
20		1_96211040022	0.05	55	2.96	20.19	35.24	1100	59.24	403.75	704.76		96211040	022
21		1_96211045024	0.05	28	1.25	9.59	16.6	560	25	191.85	332.09		96211045	024
22		1_96211046035	0.05	43	5	48.56	55.69	860	100.09	971.23	1113.71		96211046	035
23		1_96211047025	0.05	23	0.78	3.4	3.83	460	15.68	68.01	76.66		96211047	025
24		1_96211049032	0.05	8	0.23	0.65	0.74	160	4.63	12.97	14.79		96211049	032
25		1_96211050032	0.05	39	2.17	10.74	14.65	780	43.34	214.83	292.96		96211050	032
26		1_96211050936	0.05	25	1.66	8.35	9.42	500	33.28	167.06	188.32		96211059	036
27		1_96211060037	0.05	23	7.55	58.96	66.47	460	150.93	1179.25	1329.37		96211060	037
28		1_96211070037	0.05	48	5.61	49.51	62.49	960	112.1	990.11	1249.8		96211070	037
29		1_96222039036	0.05	45	5.15	47.72	56.44	900	103.07	954.37	1128.86		96222039	036
30		1_96222040032	0.05	157	2.12	11.81	17.38	3140	42.36	236.11	347.61		96222040	032
31		1_96222049046	0.05	164	1.97	8.35	12.39	3280	39.33	167.01	247.88		96222049	046
32		1_96222050038	0.05	57	2.5	15.12	26.39	1140	49.9	302.32	527.72		96222050	038
33		1_96222057056	0.05	18	2.39	23.45	27.33	360	47.76	469.02	546.54		96222057	056

圖 13 林業署多光譜樣區資料

圖 14 是本計畫碳匯估算可選擇的測試區域，主要位置於六龜林試所集水區與高屏溪，挑選準則主要是樣區之衛星影像拍攝時較無雲層遮蔽的情況，確保影像的清晰度和準確性。在這些區域內，透過多光譜影像技術取得影像數據，並計算出植生指標和水分指標，這些指標數據可以作為碳匯估算方法使用，進行精確的碳匯估算。

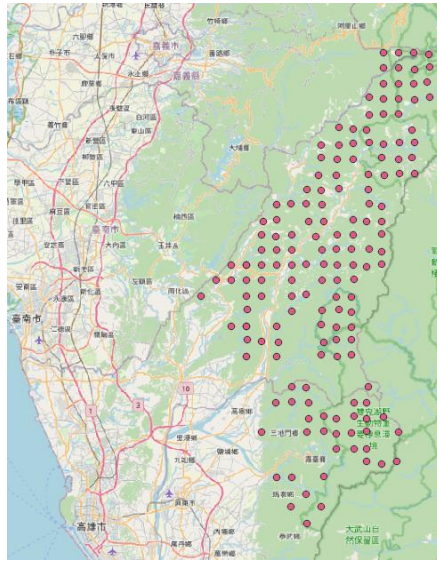


圖 14 碳匯估算測試區域

## 第二節 碳匯估算模組

本案所開發之平台主要以 Python 語言建構，主要有兩個碳匯估算模組，第一個模組是利用 RGB 影像計算影像中森林總碳匯量，第二個模組使用 DMC 多光譜航照影像計算 NPP。

### 一、地面調查資料分析

本計畫蒐集台灣多種樹種的相關資料，如表 8 所示，其中木材密度(D)來自水土保持樹種碳存量估算參數之資料庫(趙國容等, 2022)，生物量擴展係數(BEF)來自此研究(劉知好等, 2008)，根莖比(R)來自環境部造林與植林碳匯專案活動應用(環境部氣候變遷署, 2019)，碳含量來自研究(趙國容等, 2022; 林裕仁等, 2002)，本計畫將這些數據整合至系統資料庫中。系統內建的地面調查資料分析功能，旨在協助使用者快速計算森林碳匯量。使用者只需選擇樹種並輸入森林面積數據，系統即可透過碳匯量估算公式： $\text{森林面積(公頃)} * \text{年生長量} * (D * BEF * (1+R) * CF) * 44/12$ ，自動完成碳匯量的計算，有效提升計算效率與準確性。

表 8 台灣樹種地面調查數據

種類	針闊葉分類	木材密度(D)	生物量擴展係數(BEF)	根莖比(R)	碳含量(CF)	生物量轉換及擴展係數(BCEF)	年生長量(m3/公頃)
天然針葉林	針葉	0.41	1.27	0.22	0.4821	0.51	4.14
天然針闊葉混淆林	混淆	0.49	1.34	0.23	0.4756	0.72	10.05
天然闊葉林	闊葉	0.56	1.4	0.24	0.4691	0.92	3.58
人工針葉林	針葉	0.41	1.27	0.22	0.4821	0.51	8.11


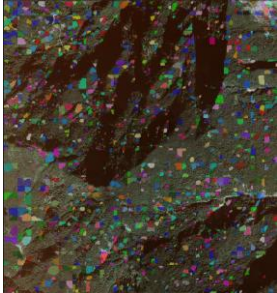

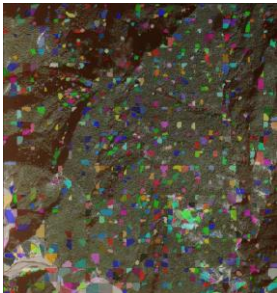
人工針闊葉 混淆林	混淆	0.49	1.34	0.23	0.4756	0.72	10.37
人工闊葉林	闊葉	0.56	1.4	0.24	0.4691	0.92	4.34
九芎	闊葉	0.6	1.4	0.24	0.4505	0.84	4.34
土肉桂	闊葉	0.55	1.2	0.234	0.4655	0.66	4.34
大葉楠	闊葉	0.51	1.2	0.234	0.448	0.612	4.34
小葉欖仁	闊葉	0.57	1.4	0.24	0.4838	0.798	4.34
毛柿	闊葉	0.68	1.4	0.24	0.4616	0.952	4.34
印度紫檀	闊葉	0.58	1.2	0.234	0.4702	0.696	4.34
火焰木	闊葉	0.35	1.4	0.24	0.491	0.49	4.34
水黃皮	闊葉	0.7	1.4	0.24	0.4953	0.98	4.34
白千層	闊葉	0.5	1.5	0.234	0.4691	0.75	4.34
台灣海桐	闊葉	0.56	1.4	0.24	0.4691	0.784	4.34
台灣欒樹	闊葉	0.55	1.4	0.24	0.4691	0.77	4.34
台灣檫	闊葉	0.73	1.2	0.23	0.4766	0.876	4.34
竹柏	闊葉	0.49	1.4	0.24	0.4767	0.686	4.34
光蠟樹	闊葉	0.73	1.4	0.234	0.4683	1.022	4.34
阿勃勒	闊葉	0.8	1.4	0.24	0.4844	1.12	4.34
赤桉	闊葉	0.68	1.5	0.234	0.4817	1.02	4.34
肖楠	針葉	0.54	1.23	0.28	0.4857	0.6642	8.11
青岡櫟	闊葉	0.73	1.4	0.24	0.4768	1.022	4.34
刺桐	闊葉	0.28	1.4	0.24	0.4844	0.392	4.34
茄苳	闊葉	0.58	1.4	0.24	0.4472	0.812	4.34
南洋杉	針葉	0.41	1.27	0.22	0.4821	0.5207	8.11
相思樹	闊葉	0.55	1.3	0.24	0.483	0.715	4.34
風鈴木	闊葉	0.56	1.4	0.24	0.4691	0.784	4.34
香楠	闊葉	0.48	1.2	0.23	0.4464	0.576	4.34
烏心石	闊葉	0.55	1.369	0.24	0.468	0.75295	4.34
烏柏	闊葉	0.57	1.2	0.234	0.4642	0.684	4.34
厚殼桂	闊葉	0.58	1.4	0.24	0.4628	0.812	4.34
苦楝	闊葉	0.54	1.2	0.234	0.4663	0.648	4.34
楓香	闊葉	0.56	1.35	0.22	0.488	0.756	4.34
桃花心木	闊葉	0.509	1.44	0.2	0.4726	0.73296	4.34
陰香	闊葉	0.49	1.4	0.24	0.4665	0.686	4.34
黃連木	闊葉	0.68	1.4	0.24	0.4474	0.952	4.34
無患子	闊葉	0.7	1.2	0.234	0.4388	0.84	4.34
樟樹	闊葉	0.51	1.4	0.24	0.4699	0.714	4.34

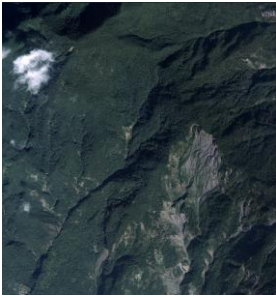
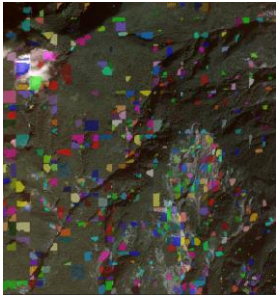

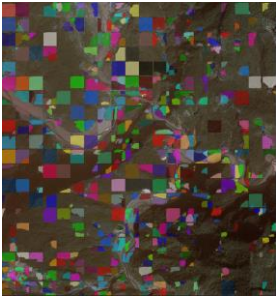

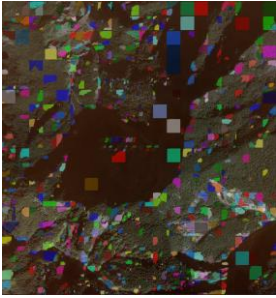
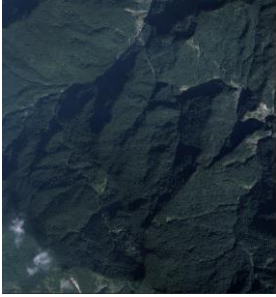
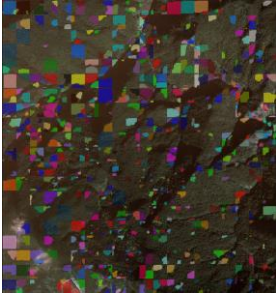
瓊崖海棠	闊葉	0.56	1.4	0.24	0.4691	0.784	4.34
檸檬桉	闊葉	0.83	1.4	0.24	0.462	1.162	4.34
羅漢松	針葉	0.56	1.4	0.24	0.4691	0.784	8.11
鐵刀木	闊葉	0.66	1.4	0.24	0.4844	0.924	4.34
蘭花楹	闊葉	0.56	1.4	0.24	0.4691	0.784	4.34
蘭嶼烏心石	闊葉	0.56	1.4	0.24	0.4691	0.784	4.34
欖仁	闊葉	0.48	1.4	0.24	0.4838	0.672	4.34

## 二、圖資影像碳匯估算方法

圖資影像碳匯估算模組主要是使用林業署航測及遙測分署多光譜影像，將多光譜影像輸入系統後，系統會將影像轉成 RGB 影像進行總碳匯量估算，本計畫透過地面調查資料與系統計算後的結果進行比較，RGB 影像對應的地面調查資料如表 9 所示。

表 9 地面調查與圖資影像碳匯估算比較結果

類型	地面調查	圖資影像碳匯估算模組
圖幅號	95183018_221211e_28.tif	95183018_221211e_28.tif
RGB 影像		
總碳匯量	138.415 tCO <sub>2</sub> e	146.805 tCO <sub>2</sub> e
圖幅號	95183020_221120f_30.tif	95183020_221120f_30.tif
RGB 影像		
總碳匯量	190.535 tCO <sub>2</sub> e	193.333 tCO <sub>2</sub> e
圖幅號	95183029_221120f_29.tif	95183029_221120f_29.tif

RGB 影像		
總碳匯量	118.630 tCO <sub>2</sub> e	112.638 tCO <sub>2</sub> e
圖幅號	95183038_221211e_28.tif	95183038_221211e_28.tif
RGB 影像		
總碳匯量	57.310 tCO <sub>2</sub> e	41.917 tCO <sub>2</sub> e
圖幅號	95183040_221120f_30.tif	95183040_221120f_30.tif
RGB 影像		
總碳匯量	215.575 tCO <sub>2</sub> e	162.406 tCO <sub>2</sub> e
圖幅號	95183049_221120f_29.tif	95183049_221120f_29.tif
RGB 影像		
總碳匯量	339.585 tCO <sub>2</sub> e	191.826 tCO <sub>2</sub> e

## 二、DMC 多光譜影像估算方法

本案所開發之平台主要以 Python 語言建構，為確保平台成果能夠正確的執行 CASA 的 NPP 計算，本案主要選取六幅 DMC 多光譜航照影像作為示範區，嘗試開發 CASA NPP 計算平台。六幅影像分別為：

1. 95183018\_221211e\_28.tif
2. 95183020\_221120f\_30.tif
3. 95183029\_221120f\_29.tif
4. 95183038\_221211e\_28.tif
5. 95183040\_221120f\_30.tif
6. 95183049\_221120f\_29.tif

六幅影像之 NPP 平均值為  $73.19 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$  至  $108.09 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$ ，根據六幅影像中地面樣區之調查資料換算之每平方公尺 NPP。

### 第三節 森林碳匯估算系統網站

本系統採用三層式功能架構，從首頁(IndexPage)開始分流至三大主要功能模組：

一、**首頁設計(圖 15)**：首頁包含系統介紹和三大功能(多光譜影像分析、RGB 圖資分析與地面資料分析)，讓使用者能快速理解系統功能並進行導航。



圖 15 系統首頁

二、**碳匯估算分析模組**：提供上傳介面(圖 16)，支援 TIF 格式檔案上傳，並當檔案上傳完畢自動顯示拍攝日期輸入介面。在分析過程中，平台設計一個任務進度頁面(圖 17)，它能即時顯示分析的進度，讓用戶清楚地了解他們的分析任務進行到哪個階段。這不僅提高透明度，也增加用戶的信心。分析完成後，結果頁面(圖 18)會全面展示分析的成果。這包括原始的 RGB 圖像，以及兩個關鍵的熱圖：FPAR(光合有效輻射吸收比)熱圖和 NPP(淨初級生產力)熱圖。這些視覺化的結果能直觀地展示植被的健康狀況和生產力。除了圖像結果，還提供詳細的計算參數和統計結果。RGB 分析模組(圖 19)也遵照相同設計。

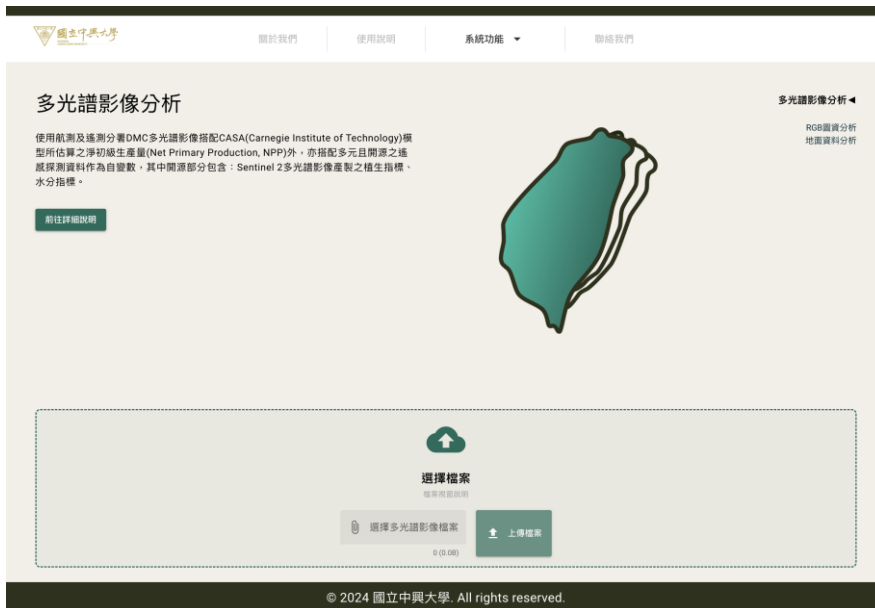


圖 16 多光譜影像任務上傳頁面

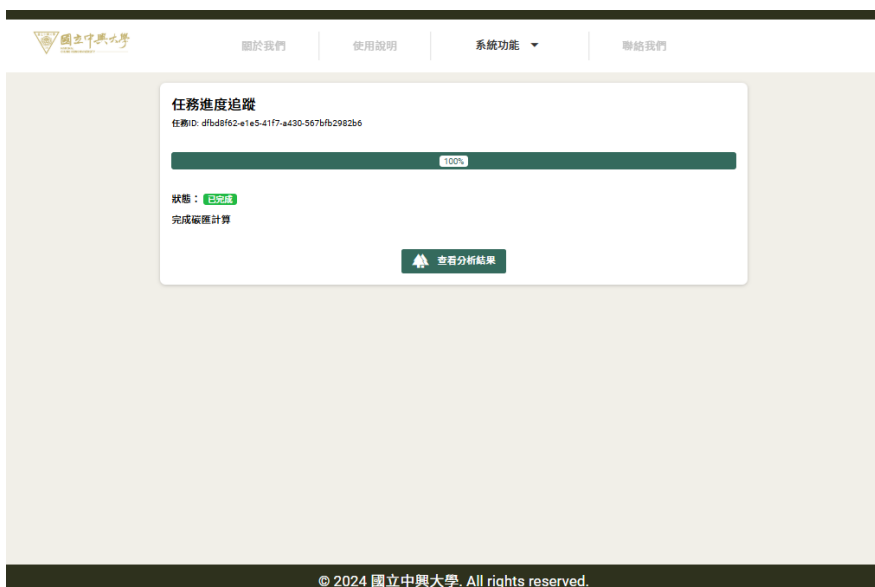


圖 17 任務進度頁面

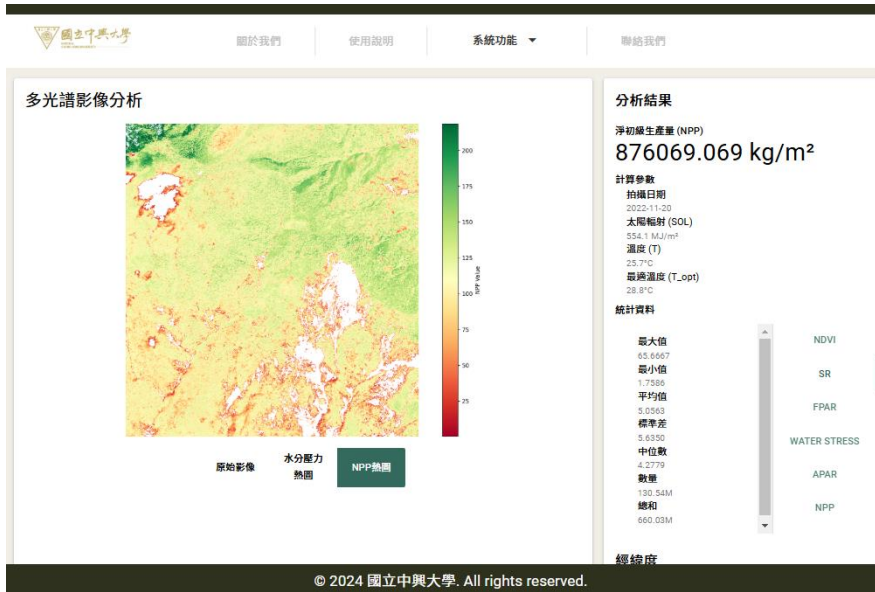


圖 18 多光譜影像任務結果頁

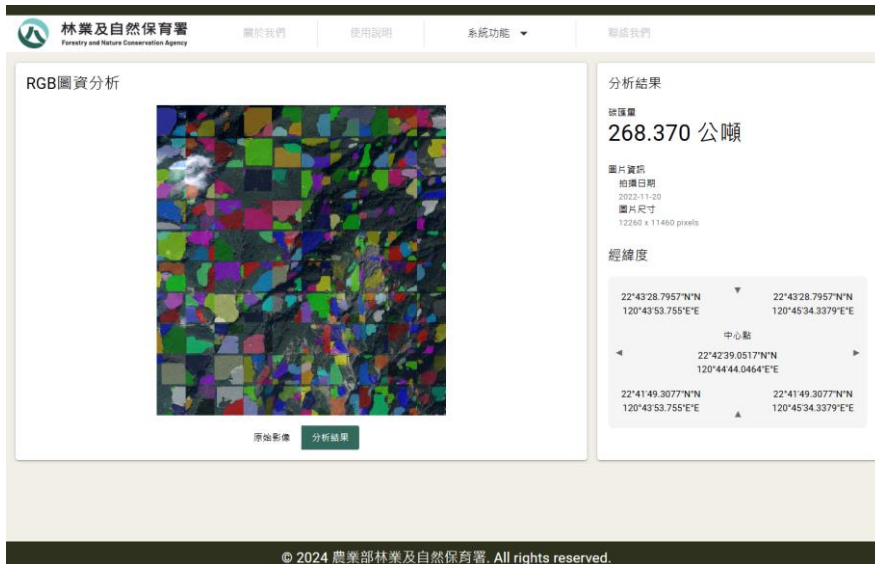


圖 19 RGB 影像任務結果頁面

三、地面資料計算頁面：可以選擇林相或樹種，系統自動帶入相關參數，輸入森林面積，可即時得到年碳吸收量，如圖 20 所示。

林業及自然保育署  
Forestry and Nature Conservation Agency

關於我們 使用說明 系統功能 聯絡我們

### 地面調查資料分析

地面調查資料分析功能旨在協助調查人員快速計算森林碳匯量。透過輸入實地測量的數據，系統將自動進行碳匯量估算。

前往詳細說明

地面調查資料分析 ◀

RGB圖資分析  
DMC多光谱影像分析

#### 輸入地面資料

林相(樹種) 類型 \* 落葉

選擇森林類型

基本土壤(D)	0.58	樹種(D)	0.24
空竹量標準係數(KF)	1.4	碳含量(CF)	0.4472
空竹量標準係數係數(KCF)	0.812	年生長量(公噸/公頃)	4.34

面積 \*

輸入調查區域

公頃

10

#### 年增碳匯量

71.654  
tCO<sub>2</sub>e/年

© 2024 農業部林業及自然保育署. All rights reserved.

圖 20 地面資料計算頁面

## 第五章 結論

本計畫整合林務局提供的多光譜圖資與衛星影像數據，提出兩種碳匯估算模型。第一種模型結合影像辨識技術，從影像中分割出樹冠層，並利用樹冠層面積推算 DBH 與 H，進一步計算植株總數量，最終將這些數據輸入碳匯計算模型，得出森林總碳匯量。第二種模型是基於植物光譜反射特性，透過植物 NPP 與光譜植生指標間的線性正相關性，推估植物的光合作用效率。在這個部份，本案基於多元遙感探測資料框架，整合 DMC 多光譜影像、Sentinel-2 多光譜影像及 CoDIS 氣象數據，藉由 CASA 模型計算 DMC 影像範圍內綠地之 NPP，並透過 Python 語言，建構出 NPP 計算平台。本平台具備操作快速、介面友善且使用便捷的特性，其中第一種模型能迅速提供森林碳匯量的估算結果。此平台能以極低成本快速提供綠地 NPP 的估算成果，具備高度的推廣及應用價值。未來展望可分為圖資影像碳匯估算方法與 DMC 多光譜影像森林碳匯估算方法兩大方向。在圖資影像碳匯估算方面，將優化森林圖像拼湊模組與碳匯儲存量估算模組，提升森林圖資辨識的準確性與效率，結合更多高質量的 DMC 多光譜影像與半自動化標記技術，加強模型訓練與數據擴充。同時，運用遷移學習與數據增強技術，進一步提升模型的泛化能力與穩定性。在碳匯儲存量估算上，將引入多角度影像的多尺度分析技術，改進樹冠層面積與胸高直徑、樹高之間的轉換模型，並結合激光雷達數據進行校正，確保估算結果的精準性與可靠性。針對 DMC 多光譜影像森林碳匯估算方法，擴大地面樣區數量，整合多種遙測資料(如 Sentinel 2、Sentinel 1、NASA GEDI)與演算法(如隨機森林、梯度提升)，提升模型泛化能力與資料涵蓋範圍。同時優化超參數並探索模型融合策略(如加權平均、投票法)，增強模型準確性與穩定性。考量台灣地形影響，建議優化 CASA 模型，並利用遙測資料進行植被分類，依植被特性進一步調整光能利用率。

## 第六章 未來展望

在未來展望，主要可以分為兩個部分，第一部分是圖資影像碳匯估算方法，第二部分是 DMC 多光譜影像森林碳匯估算方法，下面將介紹這兩個方法是如何進行優化。

### 一、圖資影像碳匯估算方法

圖資影像碳匯估算方法主要分為三個模組，森林圖像拼湊模組、森林圖資辨識模組、碳匯儲存量估算模組。針對未來的優化方向，可對於森林圖像拼湊模組與碳匯儲存量估算模組進行優化。

#### (一) 森林圖資辨識模組

為了提升影像辨識模組對於林木樹冠層的辨識準確度，本計畫將引入更多 DMC 多光譜影像進行模型訓練。首先，需針對大量多光譜影像進行樹冠層的精準標記，並結合地面調查資料與專業遙測影像標記工具(如 QGIS 或 ArcGIS)進行作業，確保標記數據的高準確度與可靠性。為提升效率，可採用半自動化標記技術，結合初步模型預測結果進行人工校正，減少人工全手動標記的負擔。完成標記後，將標記好的數據匯入深度學習模型進行訓練。模型訓練過程中將引入數據增強技術(例如旋轉、縮放與隨機裁剪)，以提高模型的泛化能力。同時，採用遷移學習技術，以既有的預訓練模型作為基礎，縮短訓練時間並提升模型效能

此外，可定期擴充 DMC 多光譜影像數據量，進行模型再訓練與優化，並透過交叉驗證方法評估模型表現，確保其在不同環境與數據條件下的穩定性與準確性。隨著更多高質量圖資的加入，影像辨識模組將具備更高的準確度與適應性，能有效捕捉林木樹冠層結構，進一步支援森林結構分析及碳匯估算應用。

#### (二) 碳匯儲存量估算模組

目前碳匯儲存量估算模組主要透過影像辨識所獲得的樹冠層面積結果進行碳匯量估算，並以樹冠層面積推算胸高直徑與樹高(H)，進而計算每株樹木的碳匯儲存量。為提升估算的準確性，未來可針對不同拍攝高度的影像進行優化，透過多角度與多尺度的數據分析，改進樹冠層面積比例推算方式。

##### 1. 引入不同拍攝高度影像的多尺度分析

- (1) 建立拍攝高度與樹冠層面積比例校正模型：結合遙測影像數據與地面調查資料，分析不同拍攝高度影像中的樹冠層面積特徵，建立拍攝高度與實際樹冠層面積之間的校正模型，以提升推算精度。
- (2) 結合高空與低空影像：整合高空拍攝的廣域影像與低空拍攝的精細影像，運用多源數據融合技術，提升樹冠層邊界辨識與面積計算的準確性。

## 2. 改進基於樹冠層面積的胸高直徑與樹高推算方法

(1) 因地制宜建立推算模型：依據不同樹種及地區特性，調整樹冠層面積與胸高直徑與樹高之間的轉換公式，避免使用單一固定模型，確保推算結果更貼近實際情況。

(2) 引入多變量分析模型：在推算胸高直徑與樹高時，納入樹冠形狀、植被密度與健康狀況等多項變數，並採用機器學習技術(如隨機森林或梯度提升樹)建構更精準的推算模型。

## 3. 數據校正與模型驗證

(1) 結合激光雷達(LiDAR)數據校正：透過 LiDAR 獲得的樹高與樹冠層真實面積，對多光譜影像的推算結果進行校正，進一步提升胸高直徑與樹高的推估準確性。

(2) 長期數據累積與模型更新：建立長期觀測計畫，累積多時期影像與實測數據，持續優化樹冠層面積、胸高直徑、樹高之間的轉換模型，確保估算結果具穩定性與可靠性。

## 二、DMC 多光譜影像森林碳匯估算方法

本研究碳匯估算方法結合多種遙測資料與機器學習技術，具備一定的準確性與創新性。然而，為進一步提升模型效能與適用性，可從以下幾個方向進行改進：首先，建議擴大地面樣區數量及主、被動式多元化遙測資料來源，例如整合 Sentinel 2 多光譜影像、Sentinel 1 SAR C Band 以及 NASA GEDI 衛星光達等資訊，搭配不同機械學習演算法，提升模型的泛化能力及資料涵蓋範圍。此外，可進一步優化隨機森林與梯度提升等演算法的超參數，並探索其他模型融合策略(如加權平均或投票法)，以提升集成模型的準確性與穩定性。在碳吸存估算方面，由於台灣地區地形起伏變化劇烈，建議針對 CASA 模型進行地形影響之改正；除此之外，亦可將前述之相關遙感探測資訊透過機械學習分類法進行植被分類，以考量植被特性，並依不同植被之最大光能利用率進行進一步的優化。成果驗證上，就植被分類部分，可透過 F1、KAPPA、Overall Accuracy 進行分類成果之驗證；碳匯估算模型驗證部分，則可增加外部驗證樣區數量，並引入更多元的評估指標，如平均絕對誤差(Mean Absolute Error, MAE)以及平均絕對百分比誤差(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)，以全面檢視模型成果與地面樣區間之相關性與差異性，確保成果的正確性。此外，在資料前處理與特徵工程層面，亦建議整合更多元的環境及氣象資訊，並嘗試考量植被物候、降水量及土壤性質等潛在影響因子之交互作用，發掘更細緻的模型特徵，從而進一步提升整體預測精度與穩定性。

## 參考文獻

- 朱文泉、潘耀忠、張錦水，2007，中國陸地植被淨初級生產力遙感估算。植物生態學報，31(3)：413-424。
- 王素芬、王元弘、洪靖潔、曾楷程、宋承恩，2020，以地形校正改善遙測技術估算崩塌地淨生產力之損失，科技部補助專題研究計畫成果報告期末報告。
- 趙國容、李侑儒、宋國彰、趙偉村、張楊家豪、江智民，2022，水土保持樹種碳存量估算參數之資料庫。中華水土保持學報，53(2)，100-110。  
[https://doi.org/10.29417/JCSWC.202206\\_53\(2\).0003](https://doi.org/10.29417/JCSWC.202206_53(2).0003)
- 謝漢欽、汪大雄、王慈憶、張鈞媛、邱志明，2011，應用福衛二號影像與地面樣區資料於光蠟樹平地造林地之碳吸存推估。航測及遙測學刊，16(2)，79-99。  
[https://doi.org/10.6574/JPRS.2011.16\(2\).1](https://doi.org/10.6574/JPRS.2011.16(2).1)
- 劉知好、王兆桓，2008，以林齡－蓄積量模式估算柳杉級檜木人工林的碳吸存量。宜蘭大學生物資源學刊，4(1)，35-45。
- 環境部氣候變遷署，2019，AR-TMS0001 造林與植林碳匯專案活動應用範例。林裕仁、劉瓊霖、林俊成，2002，台灣地區主要用材比重與碳含量測定。台灣林業科學，17(3)，291-299。  
<https://doi.org/10.7075/TJFS.200209.0291>
- Potter, C. S., Randerson, J. T., Field, C. B., Matson, P. A., Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Klooster, S. A. (1993). Terrestrial Ecosystem Production: A Process Model Based on Global Satellite and Surface Data. *Glob. Biogeochem. Cycle.* 7(4), 811-841. <https://doi.org/10.1029/93GB02725>
- Field, C. B., Randerson, J. T., Malmström, C. M. (1995). Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing. *Remote Sens. Environ.* 51, 74-88. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00066-V](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00066-V)
- Yan, Y., Wu, C., & Wen, Y. (2021). Determining the impacts of climate change and urban expansion on net primary productivity using the spatio-temporal fusion of remote sensing data. *Ecol. Indic.* 127, 107737.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107737>
- Wu, C., Chen, K., E, C., You, X., He, D., Hu, L., Liu, B., Wang, R., Shi, Y., Li, C., Liu, F. (2022) Improved CASA model based on satellite remote sensing data: simulating net primary productivity of Qinghai Lake basin alpine grassland. *Geosci. Model Dev.* 15(17). 6919-6933. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-6919-2022>
- Los, S. O., 1998: Linkages between global vegetation and climate: An analysis based on NOAA advanced very high resolution radiometer data. Ph.D. dissertation, Vrije Universiteit.

- Yang, F., He, P., Ding, H., Shi, Y. 2023. A Monthly High-Resolution Net Primary Productivity Dataset (30 m) of Qinghai Plateau From 1987 to 2021. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.* 16, 8262-8273.  
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3312518>
- Yuan, Y., Tang, S., Zhang, J., Guo, W. Quantifying the relationship between urban blue-green landscape spatial pattern and carbon sequestration: A case study of Nanjing's central city. *Ecol. Indic.* 154, 110483.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110483>
- Xiao, X., Hollinger, D., Aber, J., Goltz, M., Davidson, E. A., Zhang, Q., Moore III, B. (2004). Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sens. Environ.* 89, 519-534.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.008>
- Zhang, Y., Xiao, X., Jin, C., Dong, J., Zhou, S., Wagle, P., Joiner, J., Guanter, L., Zhang, Y., Zhanga, G., Qin, Y., Wang, J., Moore III, B. 2016. Consistency between sun-induced chlorophyll fluorescence and gross primary production of vegetation in North America. *Remote Sens. Environ.* 183, 154–169.
- Ma, J., Xiao, X., Zhang, Y., Doughty, R., Chenc, B., Zhao, B. (2018) Spatial-temporal consistency between gross primary productivity and solar-induced chlorophyll fluorescence of vegetation in China during 2007–2014. *Sci. Total Environ.* 639, 1241-1253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.245>
- Huang, X., He, L., He, Z., Nan, X., Lyu, P., Ye, H. 2022. An improved Carnegie-Ames-Stanford Approach model for estimating ecological carbon sequestration in mountain vegetation. *Front. Ecol. Evol.* 10, 1048607.  
<https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1048607>
- Shi, X., Shi, M., Zhang, N., Wu, M., Ding, H., Li, Y., Chen, F. (2023). Effects of climate change and human activities on gross primary productivity in the Heihe River Ba. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30,4230-4244.
- Lambers, H., Chapin, F.S., Pons, T.L. 2008. Ecosystem and Global Processes: Ecophysiological Controls. In: *Plant Physiological Ecology*. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3\\_19](https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3_19)
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B.C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W., Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Pélissier, R., Ploton, P., Ryan, C.M., Saldarriaga, J.G., Vieilledent, G. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob. Change Biol.* 20, 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>

- IPCC (2006). Chapter 4: Forest lands In: 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol 4: Agriculture, Forestry, and Other Land Use. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan on behalf of the IPCC, 83.
- Chen, C., Ma, Y., Ren, G., & Wang, J. (2022). Aboveground biomass of salt-marsh vegetation in coastal wetlands: Sample expansion of in situ hyperspectral and Sentinel-2 data using a generative adversarial network. *Remote Sensing of Environment*, 270, 112885. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112885>
- Miranda Verly, O., Vieira Leite, R., daSilva Tavares-Junior, I., José Silva Soares da Rocha, S., Garcia Leite, H., Marinaldo Gleriani, J., Paula Miranda Xavier Rufino, M., deFatima Silva, V., Moreira Miquelino Eleto Torres, C., Plata-Rueda, A., Monteiro de Castro e Castro, B., Cola Zanuncio, J., & Antônio Gonçalves Javocine, L. (2023). Atlantic forest woody carbon stock estimation for different successional stages using Sentinel-2 data. *Ecological Indicators*, 146, 109870. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109870>
- Silva, C. A., Duncanson, L., Hancock, S., Neuenschwander, A., Thomas, N., Hofton, M., Fatoyinbo, L., Simard, M., Marshak, C. Z., Armston, J., Lutchke, S., & Dubayah, R. (2021). Fusing simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR data for regional aboveground biomass mapping. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112234. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112234>
- Lang, N., Jetz, W., Schindler, K., & Wegner, J. D. (2023). A high-resolution canopy height model of the Earth. *Nature Ecology & Evolution*, 1-1. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02206-6>
- Tolan, J., Yang, H.I., Nosarzewski, B., Couairon, G., Vo, H.V., Brandt, J., Spore, J., Majumdar, S., Haziza, D., Vamaraju, J. and Moutakanni, T., 2024. Very high resolution canopy height maps from RGB imagery using self-supervised vision transformer and convolutional decoder trained on aerial lidar. *Remote Sensing of Environment*, 300, p.113888. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113888>
- Torre-Tojal, L., Bastarrika, A., Boyano, A., Lopez-Guede, J. M., & Graña, M. (2022). Above-ground biomass estimation from LiDAR data using random forest algorithms. *Journal of Computational Science*, 58, 101517. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2021.101517>.
- Li, Y., Wang, R., Shi, W., Yu, Q., Li, X., & Chen, X. (2022). Research on Accurate Estimation Method of Eucalyptus Biomass Based on Airborne LiDAR Data and Aerial Images. *Sustainability (Switzerland)*, 14, 10576. <https://doi.org/10.3390/su141710576>
- Tian, Y., Huang, H., Zhou, G., Zhang, Q., Tao, J., Zhang, Y., & Lin, J. (2021). Aboveground mangrove biomass estimation in Beibu Gulf using machine

- learning and UAV remote sensing. *Science of the Total Environment*, 781, 146816. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146816>
- Tian, Y., Zhang, Q., Huang, H., Huang, Y., Tao, J., Zhou, G., Zhang, Y., Yang, Y., & Lin, J. (2022). Aboveground biomass of typical invasive mangroves and its distribution patterns using UAV-LiDAR data in a subtropical estuary: Maoling River estuary, Guangxi, China. *Ecological Indicators*, 136, 108694. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108694>
- Peng, M., Han, W., Li, C., Yao, X., & Shao, G. (2022). Modeling the daytime net primary productivity of maize at the canopy scale based on UAV multispectral imagery and machine learning. *Journal of Cleaner Production*, 367, 133041. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133041>
- Togeirote Alckmin, G., Lucieer, A., Rawnsley, R., & Kooistra, L. (2022). Perennial ryegrass biomass retrieval through multispectral UAV data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193, 106574. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106574>
- Wang, Z., & Yang, Z. (2020). Review on image-stitching techniques. *Multimedia Systems*, 26(4), 413-430.
- Megha, V., & Rajkumar, K. K. (2022). A comparative study on different image stitching techniques. *Int. J. Eng. Trends Technol*, 70(4), 44-58.
- Jagadeeswari, M., Manikandababu, C. S., Dhviya, M. S., & Meenakshi, J. V. (2021, August). A comparative study based on video stitching methods. In *2021 Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)* (pp. 1157-1163). IEEE.
- Chen, J., Li, Z., Peng, C., Wang, Y., & Gong, W. (2022). UAV image stitching based on optimal seam and half-projective warp. *Remote Sensing*, 14(5), 1068.
- Gómez-Reyes, J. K., Benítez-Rangel, J. P., Morales-Hernández, L. A., Resendiz-Ochoa, E., & Camarillo-Gomez, K. A. (2022). Image mosaicing applied on UAVs survey. *Applied Sciences*, 12(5), 2729.
- Wei, L. Y. U., Zhong, Z., Lang, C., & Yi, Z. H. O. U. (2019). A survey on image and video stitching. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 1(1), 55-83.
- Wu, T., Hung, I. K., Xu, H., Yang, L., Wang, Y., Fang, L., & Lou, X. (2022). An Optimized SIFT-OCT Algorithm for Stitching Aerial Images of a Loblolly Pine Plantation. *Forests*, 13(9), 1475.
- Yang, C., Liu, X., Zhou, H., Ke, Y., & See, J. (2023). Towards accurate image stitching for drone-based wind turbine blade inspection. *Renewable Energy*, 203, 267-279.
- Zhang, Z., Xue, W., Huang, W., & Chen, S. (2020). Effective video frame acquisition for image stitching. *IEEE access*, 8, 217086-217097.

- Yu, Q., Wang, R., Liu, F., Xiao, J., An, J., & Liu, J. (2023). High Precision Mesh-Based Drone Image Stitching Based on Salient Structure Preservation and Regular Boundaries. *Drones*, 7(4), 230.
- Nevalainen, O., Honkavaara, E., Tuominen, S., Viljanen, N., Hakala, T., Yu, X., ... & Tommaselli, A. M. (2017). Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging. *Remote sensing*, 9(3), 185.
- Sothe, C., Dalponte, M., Almeida, C. M. D., Schimalski, M. B., Lima, C. L., Liesenberg, V., ... & Tommaselli, A. M. G. (2019). Tree species classification in a highly diverse subtropical forest integrating UAV-based photogrammetric point cloud and hyperspectral data. *Remote Sensing*, 11(11), 1338.
- Sun, C., Huang, C., Zhang, H., Chen, B., An, F., Wang, L., & Yun, T. (2022). Individual tree crown segmentation and crown width extraction from a heightmap derived from aerial laser scanning data using a deep learning framework. *Frontiers in plant science*, 13, 914974.
- Onishi, M., & Ise, T. (2021). Explainable identification and mapping of trees using UAV RGB image and deep learning. *Scientific reports*, 11(1), 903.
- Onishi, M., Watanabe, S., Nakashima, T., & Ise, T. (2022). Practicality and robustness of tree species identification using UAV RGB image and deep learning in temperate forest in Japan. *Remote Sensing*, 14(7), 1710.
- Su, R., Wu, Q., Yang, Y., & Hu, T. (2021). Relationship between diameter at breast height and tree age in populations of a rare and endangered plant, *Davidia involucrata*. *Polish Journal of Ecology*, 69(2), 84-95.
- Zhang, Y., Li, H., Zhang, X., Lei, Y., Huang, J., & Liu, X. (2022). An Approach to Estimate Individual Tree Ages Based on Time Series Diameter Data—A Test Case for Three Subtropical Tree Species in China. *Forests*, 13(4), 614.
- Sumida, A., Miyaura, T., & Torii, H. (2013). Relationships of tree height and diameter at breast height revisited: analyses of stem growth using 20-year data of an even-aged *Chamaecyparis obtusa* stand. *Tree physiology*, 33(1), 106-118.
- Tang, C. Q., Shen, L. Q., Han, P. B., Huang, D. S., Li, S., Li, Y. F., ... & Xu, H. M. (2020). Forest characteristics, population structure and growth trends of *Pinus yunnanensis* in Tianchi National Nature Reserve of Yunnan, southwestern China. *Vegetation Classification and Survey*, 1, 7-20.
- Chen, J., Shao, Z., Huang, X., Hu, B., 2024. Multi-source data-driven estimation of urban net primary productivity: A case study of Wuhan. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 127, 103638. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103638>.
- Peng, M., Han, W., Li, C., Yao, X., Shao, G., 2022. Modeling the daytime net primary productivity of maize at the canopy scale based on UAV multispectral imagery

- and machine learning. *J Clean Prod* 367, 133041.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133041>.
- Yan, Y., Wu, C., Wen, Y., 2021. Determining the impacts of climate change and urban expansion on net primary productivity using the spatio-temporal fusion of remote sensing data. *Ecol Indic* 127, 107737.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107737>.
- Yang, F., He, P., Ding, H., Shi, Y., 2023. A Monthly High-Resolution Net Primary Productivity Dataset (30 m) of Qinghai Plateau From 1987 to 2021. *IEEE J Sel Top Appl Earth Observ Remote Sens* 16, 8262-8273.  
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3312518>.
- Yuan, Y., Tang, S., Zhang, J., Guo, W., 2023. Quantifying the relationship between urban blue-green landscape spatial pattern and carbon sequestration: A case study of Nanjing's central city. *Ecol Indic* 154, 110483.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110483>.
- Wu, C., Chen, K., E, C., You, X., He, D., Hu, L., Liu, B., Wang, R., Shi, Y., Li, C., Liu, F., 2022. Improved CASA model based on satellite remote sensing data: simulating net primary productivity of Qinghai Lake basin alpine grassland. *Geosci. Model Dev.* 15, 6919-6933. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-6919-2022>.
- Zhang, Y., Xiao, X., Jin, C., Dong, J., Zhou, S., Wagle, P., Joiner, J., Guanter, L., Zhang, Y., Zhang, G., Qin, Y., Wang, J., Moore, B., 2016. Consistency between sun-induced chlorophyll fluorescence and gross primary production of vegetation in North America. *Remote Sens Environ* 183, 154-169.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.015>.
- Ma, J., Xiao, X., Zhang, Y., Doughty, R., Chen, B., Zhao, B., 2018. Spatial-temporal consistency between gross primary productivity and solar-induced chlorophyll fluorescence of vegetation in China during 2007–2014. *Sci Total Environ* 639, 1241-1253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.245>.
- Huang, X., He, L., He, Z., Nan, X., Lyu, P., Ye, H., 2022. An improved Carnegie-Ames-Stanford Approach model for estimating ecological carbon sequestration in mountain vegetation. *Front Ecol Evol* 10.  
<https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1048607>.
- Shi, X., Shi, M., Zhang, N., Wu, M., Ding, H., Li, Y., Chen, F., 2023. Effects of climate change and human activities on gross primary productivity in the Heihe River Basin, China. *Environ Sci Pollut Res* 30, 4230-4244.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-22505-y>.
- Liu, Y. H., X. Z. Han, F. Z. Weng, et al., 2022: Estimation of terrestrial net primary productivity in China from satellite data. *J. Meteor. Res.*, 36(3), 401-416, doi:

10.1007/s13351-022-1183-6

- Wang, N., Hou, W., Zhang, X., Wang, Z., Yang, L., 2022. Quantifying the effects of the ‘Internet plus Ecology’ framework on carbon sink in the digital age: a representative study of Ant Forest in China. *Environ Res Lett* 17, 124005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca2bf>.
- Gan, Y., Wang, Q., & Iio, A. (2023). Tree crown detection and delineation in a temperate deciduous forest from UAV RGB imagery using deep learning approaches: Effects of spatial resolution and species characteristics. *Remote Sensing*, 15(3), 778.
- Sačkov, I., Hlasny, T., Bucha, T., & Juriš, M. (2017). Integration of tree allometry rules to treetops detection and tree crowns delineation using airborne lidar data. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 10(2), 459.