

南華大學科技學院永續綠色科技碩士學位學程

碩士論文

Master Program of Green Technology for Sustainability

College of Science and Technology

Nanhua University

Master Thesis

應用遙測資料及空間資訊技術於南華大學

林木固碳效益之評估

Application of Remote Sensing Data and GIS Technology to

Estimate the Benefits of Forest Carbon Stock in Nanhua

University

楊懿蓓

Yi-Pei Yang

指導教授：林文賜 博士

Advisor: Wen-Tzu Lin, Ph.D.

中華民國 110 年 6 月

June 2021

南華大學
永續綠色科技碩士學位學程
碩士學位論文

應用遙測資料及空間資訊技術於南華大學林木固碳效益之評估
Application of Remote Sensing Data and GIS Technology to Estimate the
Benefits of Forest Carbon Stock in Nanhua University

研究生： 楊懿蓓

經考試合格特此證明

口試委員： 林昭遠
曹舜評
林訓

指導教授： 林訓

系主任(所長)： 曹文忠

口試日期：中華民國 110年 6月 4日

謝誌

幸蒙恩師 林文賜教授在研究期間的費心指導與提攜，才使本論文得以順利完成。同時並感謝老師在學業及日常生活上的關懷及鼓勵，當研究遇到瓶頸時，老師總是不厭其煩的解釋及開導，讓學生在修業期間獲益良多，在此致上最誠心的敬意與感謝。

文稿初成，承蒙口試委員林昭遠教授及曹舜評博士，提供許多寶貴的意見與建議，使得本論文更臻完善，在此謹致衷心的謝意。同時也感謝求學期間系上師長的指導。

一年半來的研究生活能如此充實、順利，慶幸身邊有許多對我無條件付出的朋友及貴人。謝謝同為研究生的秀禎姐一起並肩作戰、互相勉勵，謝謝文滄組長鼓勵我進修，並時常為我加油打氣，謝謝鈺婷、科宏、雅甯、涵茹、亮穎，抽空陪我吃美食紓壓，謝謝鴛鴦阿姨常煮好吃的大餐幫我進補，關心我的健康，覺得自己何等幸運，能得到大家的關愛，在此由衷地致上最深的感謝與祝福。

在求學期間感謝我的父母、妹妹及家裡的小搗蛋們席榛、秉衡、昶叡、昶諭與昶擘，在生活與精神上給予的支持，方能讓我無後顧之憂，如期完成學業，最後與我愛的你們一起分享這小小成果。

研究生 楊懿蓓

中文摘要

本研究目的在於探討環境永續議題及 RS、GIS 技術在林木固碳之應用，透過 ISODATA 影像分類、無人飛行載具航拍影像及 IPCC 林木固碳量之計算，評估南華大學校園內之植生綠覆率及林木種類與數量，並計算全區之林木固碳量，探討植樹造林在碳中和之減碳效益及貢獻。研究結果可知全區之植生綠覆率高達 75.9%，其中原始混合林的面積 32.65ha，換算之碳存量為 5569.2 ton；人工混合林的面積為 7.16 公頃，換算之碳存量為 828.1 ton；台灣肖楠的面積為 0.13 公頃，換算之碳存量為 2.5 ton。據此推估全區林木碳存量總計為 6399.8 ton，除以面積可得單位面積碳存量為 101.7 ton/ha，相較於 IPCC 的熱帶森林 120 ton/ha、或台灣地區之林班地 145 ton/ha 或都市計畫區 49 ton/ha 等區域之碳存量可知，由於校園林木植株高大及綠覆效果佳，整體固碳效益甚高。根據研究推估結果，建議南華大學校園未來需植樹管理時，以碳固量較多之樹種為考量，如台灣肖楠、相思樹、台灣欖及光蠟樹等，對全區無論於減碳節能及生態棲地均有甚大助益。

關鍵詞：植生綠覆率、林木固碳量、永續發展

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the environmental sustainability issues and the application of RS data and GIS technology in forest carbon storage. Through ISODATA image classification, aerial photography by unmanned aerial vehicles, and IPCC forest carbon storage calculation, this study evaluate the vegetation cover rate and tree species and quantity on the campus of Nanhua university (NHU), and calculate the forest carbon storage in the whole region to investigate the carbon reduction benefits and contributions of afforestation in carbon neutrality. The results of the study showed that the vegetation cover in the region was as high as 75.9%, including 32.65 ha of primary mixed forest, with a converted carbon stock of 5569.2 ton; 7.16 ha of planted mixed forest, with a converted carbon stock of 828.1 ton; and 0.13 ha of *Taiwan incense-cedar*, with a converted carbon stock of 2.5 ton. According to this estimate, the total carbon stock of forest trees in the region is 6,399.8 tons, divided by the area, the carbon stock per unit area is 101.7 ton/ha, compared with the carbon stock of tropical forests of 120 ton/ha by IPCC, 145 ton/ha in Taiwan or 49 ton/ha in urban planning areas. The overall carbon stock efficiency is very high due to the high woody plants and good vegetation cover effect of the campus forest. Based on the results of this study, it is suggested that the future tree planting management of the NHU campus should be based on species with higher carbon stock, such as *Taiwan incense-cedar*, *Taiwan acacia*, *Taiwan zelkova*, and *Formosan ash*, which will be beneficial for carbon reduction and energy conservation as well as ecological habitat.

Keywords: Vegetation cover rate, Forest carbon stock, Sustainable development

目錄

謝誌.....	I
中文摘要.....	II
ABSTRACT.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VII
第一章 緒論	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究架構.....	3
第二章 文獻回顧	6
2.1 植生綠覆率相關研究	6
2.2 林木固碳量評估相關研究	12
第三章 研究材料與方法	22
3.1 研究試區概述.....	22
3.2 試區 SPOT 6 衛星影像	27

3.3	植生綠覆率分析.....	30
3.4	無人飛行載具 (UAV) 航拍影像.....	35
3.5	林木固碳量計算.....	36
第四章 結果與討論		39
4.1	試區之 UAV 航拍影像成果	39
4.2	基地植生現狀調查	40
4.3	植生綠覆率分析.....	45
4.4	林木固碳效益分析	47
第五章 結論與建議		49
5.1	結論	49
5.2	建議	50
參考文獻.....		51

圖目錄

圖 1-1 研究架構圖	5
圖 3-1 南華大學地理位置圖	22
圖 3-2 地質圖 (資料來源：經濟部中央地質調查所)	27
圖 3-3 研究地區(南華大學) SPOT 6 衛星影像.....	30
圖 3-4 ISODATA 演算法之計算流程圖	31
圖 4-1 研究地區之 UAV 航拍影像.....	39
圖 4-2 生態複層 – 原生混合林(桉樹).....	40
圖 4-3 生態複層 – 先驅植物之混合林.....	41
圖 4-4 喬木 – 闊葉大喬木混合林 (竹林)	41
圖 4-5 喬木 – 闊葉大喬木混合林 (櫟木).....	42
圖 4-6 喬木 – 針葉喬木 (肖楠)	42
圖 4-7 人工草地	43
圖 4-8 試區內之主要植群空間分布	44
圖 4-9 試區植生綠覆率之空間分布	46

表目錄

表 3-1 大林降雨量測站(COM670)	25
表 3-2 嘉義地區氣候資料	25
表 3-3 雨水酸鹼值	26
表 3-5、SPOT 系列衛星資料空間解析度與感測器光譜模式	29
表 3-6 SPOT-6/7 與 SPOT-5 規格比較.....	29
表 3-7 台灣常見 24 種造林樹種之絕乾比重、碳含量百分比及轉換 係數.....	38
表 4-1 試區現有植物種類及名稱.....	44
表 4-2 植生綠覆率分析	45
表 4-3 全區林木碳存量推估.....	48

第一章 緒論

1.1 研究緣起

由於目前的世代正面臨著種種環境議題的挑戰，氣候變遷、地球暖化、環境污染、生態失衡、土壤退化、健康危害等，聯合國政府間氣候變遷專家委員會(IPCC)預估，若維持現有的「經濟發展模式」(Business as usual)，在 2030 年到 2052 年之間，地球暖化可能會使平均溫度上升 1.5°C，人類將面臨更嚴峻的氣候風險。過去我們總是用 GDP 來衡量成長，而忽略了成長背後所付出的代價，為了重新定義成長，聯合國在 2015 年提出 2030 年永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)，期望透過全球有高度共識的 17 項目標，兼顧經濟發展、社會進步與環境保護，邁向永續發展之路。

聯合國 17 項永續發展目標(SDGs)包括：消除貧窮、終止飢餓、良好健康與社會福利、良質教育、性別平等、清潔飲水和衛生設施、經濟適用的清潔能源、體面工作和經濟增長、產業、創新和基礎設施、減少國內及國家間不平等、永續發展的市鎮規劃、確保永續消費和生產模式、氣候行動、保育及維護海洋資源、保育及維護生態領地、和平、正義與健全的司法、促進目標實現的夥伴關係；此 17 項永續發展目標即是讓地球上每種生物能永續生存的指標。

回顧近幾十年來的經濟軌跡，工業化及科技產業的蓬勃發展，電

子產品生產所耗費石油能源及貴金屬物質，以及使用後的回收技術或發揮再利用價值而造成的環境污染問題，加上工廠及大眾交通運輸工具排放大量的二氧化碳，迫使生態環境不斷遭受破壞及惡化，全球平均溫度持續上升，各地極端氣候事件頻傳，如颶風及颱風強度不斷提升，驟降豪雨形成風災，又或者部分國家久旱不雨，造成乾旱，或者季節變化不再明顯，早晚溫差越來越大，地球上的生物逐漸無法適應驟變的天氣型態。

為能有效解決溫室效應問題，先進國家為降低空氣污染，紛紛簽署相關法案，積極推行減碳相關計畫，碳中和便是其一，碳中和是指國家、企業、產品、活動或個人在一定時間內直接或間接產生的二氧化碳或溫室氣體排放總量，通過使用低碳能源取代化石燃料、植樹造林、節能減排等形式，以抵消自身產生的二氧化碳或溫室氣體排放量，實現正負抵消，達到相對「零排放」。本研究即以林木固碳議題為出發點，透過遙感探測(Remote Sensing, RS)資料、空間資訊(Geographic Information Systems, GIS)分析技術、無人航空載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)航拍影像分析植生現況，並以 2003 聯合國氣候變化政府間專家委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的林木生物量固碳計算公式，分析南華大學校園內林木植生種類及數量，並計算樹木固碳量，透過校園內林木樹木固碳量之成效，探討植樹造林在碳中和之減碳效益

及貢獻，並以永續發展目標為精神指標。

1.2 研究目的

本研究係以南華大學校園為研究樣區，透過衛星影像及 ISODATA 演算法判釋植生狀況，並輔以現地調查及無人飛機(UAV)航拍試區的植生覆蓋現況，作為試區林木樹種及數量評估及計算之依據，以瞭解試區內林木之減碳效益。本論文之研究目的如下：

- 一、 探討環境永續議題：藉由永續發展指標，透過經濟成長、社會進步與環境保護三個面向，探討林木在生態環境永續的重要性，尤其是地球暖化議題之固碳效益評估。
- 二、 RS 及 GIS 技術在林木固碳應用：透過 RS 蒐集大面積資料進行判釋及 GIS 技術推估林木數量，輔以 IPCC 生物量固碳計算研究地區的固碳量並探討其效益，作為該區後續林木管理之參考。

1.3 研究架構

本研究可分成五章，其內容如圖 1.1，各章簡述如下：

第一章為緒論，說明研究緣起及研究目的，並簡述論文架構。

第二章為文獻回顧，內容包含衛星影像判釋及林木固碳量評估之整理，綜合整理相關文獻及闡述衛星影像的應用，進一步分析林木固碳量

之評估。

第三章為研究方法與材料，以南華大學校區為例，應用衛星影像將校園之林木概分樹種，以校園常見植物之單株固碳量套用林務局之台灣地區 24 種常見造林樹種來推算，計算出校園區域林木之固碳量。

第四章為結果與討論，針對試區的林木植生現況進行現場調查，及運用前述文獻回顧、資料蒐集分析、ISODATA 演算法分析試區林木種類及數量，並結合 IPCC 的固碳量計算全區之林木固碳量及其效益，作為永續發展目標之探討。

第五章為結論與建議，主要將上述各章之結果綜合歸納，並提出研究過程中遭遇困難及解決方式，以作為未來研究之參考方向。

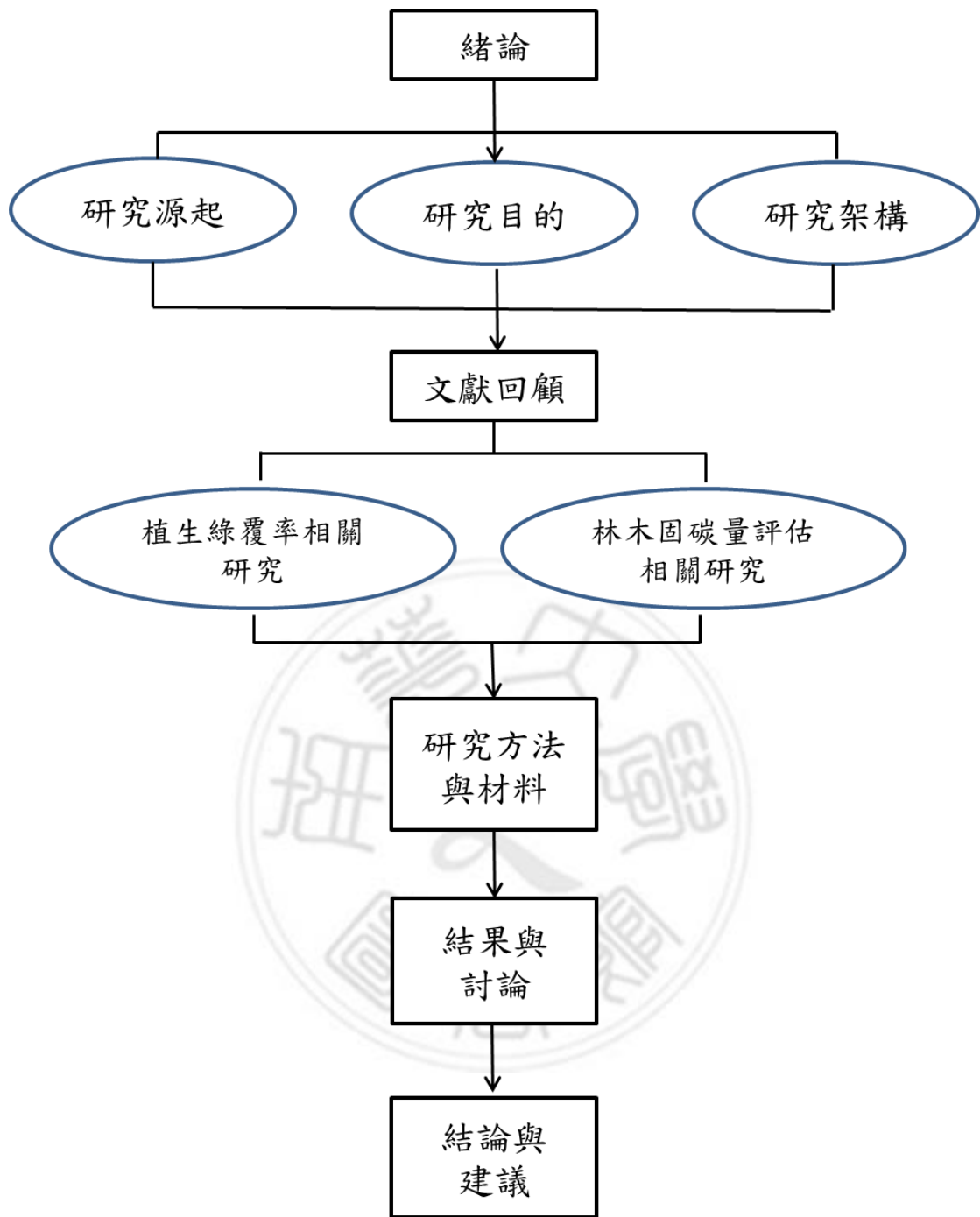


圖 1-1 研究架構圖

第二章 文獻回顧

本章節優先以「衛星影像判釋(Satellite Image Interpretation)」及「林木固碳量評估(Forest Carbon Stock Assessment)」之相關文獻為重點蒐集及彙整對象，進行統整歸納。

2.1 植生綠覆率相關研究

沈勝豐、陳明賢(2009)研究指出綠覆率定義係指研究試區範圍內所有由綠色植被覆蓋面積與試區面積百分比。

劉守恆(2010)研究指出衛星影像與航空照片皆屬遙測資料的一種。相較於航空照片而言，衛星影像提供了較廣泛面積的資料涵蓋範圍，有完整的時間序列資料，並可使用自動判釋程序輔助特定目的之分析進行。優點：分析速度快、操作成本低、準則較明確、時序涵蓋性佳。缺點：準確性較差、解析度受影像品質限制。

邱士瑄(2020)研究指出衛星影像在成本控制與圖資都具有優勢，且在解析度上也比主動式雷達來得高，因此在一般使用上較為普及。過去衛星影像判讀時，往往需要專業的人才，且大量判讀時，需要消耗大量的精力，有可能因人工作業產生疲勞疏失造成誤判的情形。隨著近年衛星遙測技術的發展，衛星影像的解析度持續提高，再結合電腦輔助判讀，降低人為疏失的可能，且運用的範疇也越來越廣泛。在農作物的應用，

像是近年國內推展的智慧農業，以衛星遙測監控國內主要概況，可作為農作產量評估、農作區域使用評估、農作生長狀況、農作面積評估等。

黃弘毅(2019)指出自從 1972 年美國發射第一顆地球觀測衛星 Landsat 1 以來，應用於遙感探測影像處理的各項技術即隨之迅速發展，包括影像辨識、傳輸技術、影像分類、影像壓縮、影像融合。隨著遙感探測技術不斷發展，利用航空影像或衛星影像獲取地表資訊，減少了傳統測量所帶來的需要人力資源與時間成本等缺點。其中，衛載的遙感探測資料有著涵蓋範圍廣泛，重訪率高等優點更能符合資料的即時性，也比較節省時間、人力及花費，衛載的遙感探測資料的廣泛應用為遙測領域奠定了重要的基礎。而遙感探測應用的目標是萃取資訊並辨識目標以完成影像理解，在這種技術不斷發展下有許多學者也開始致力於利用航測或衛星影像進行道路萃取 (Wang et al., 2016; Kirthika and Mookambiga, 2011)。

詹右任(2010)研究指出，目前國內環保單位對於裸露地逸散問題之處理方式，係採全面植生綠化加以防範，並未將裸露地依逸散之影響等級分類管制，如此，除浪費鉅額經費外，並無法有效達到防治目的。有鑑以此，研究係運用航測影像分類技術，期能有效辨識逸散之裸露地質，而所建置之航測影像地理資訊，若能進一步結合環境影響之相關推估模式分析，未來即可提供快速有效之裸露地逸散影響等級分類資訊，以作

為後續控管裸露地逸散防治之排序依據。

研究在路竹科學園區中選取五塊裸露地作為調查地質逸散程度之採樣地點，並以土質基本物性試驗結果，作為航測影像分類裸露地之現地環境地質資訊，再結合 ENVI 圖像處理工具進行影像分類。而研究結果顯示全彩航測影像結合現地環境地質資訊，可有效區分不同地質條件之裸露地，且其辨識精確度可達 80% 以上。

NDVI 值是基於健康的植物會強烈反射近紅外光、並強烈吸收紅光，利用這項特性而設計出來的植生指標，可看出植物、土壤以及水在各的波段的光譜反射率，水體的近紅外光反射率低於紅光，故計算出之 NDVI 值將為負值，通常為水體或雲霧；土壤或人為建築物的近紅外光反射值略高於紅光反射值，兩者相當接近，計算出之 NDVI 值通常為 0 以上之小幅度正值數字，約介於 0~0.2 至 0.4 之間；0.2~0.4 以上至 1 之間為植被覆蓋區域，NDVI 值越高，表示植物健康狀況越良好、生長濃度越密。

朱恩柔(2016)研究指出，綠覆率是都市綠地品質的重要指標之一，常以社區花園、公園、河濱綠地、行道樹、校園等為集成的範圍。公園及綠地除可調節微氣候，並可維護生態等多樣化的功能，更可提供都市生活當中的休閒活動空間，也帶來都市非常良好的景觀美質。研究以 2016 年 SPOT-6、7 衛星遙測影像匯入 ERDAS IMAGINE 軟體與 GIS 地理資

訊系統，透過監督式分類自動判釋，再將分類後之判釋影像及 NDVI 影像匯入地理資訊系統，藉以評估台北市行政區綠覆程度。結果顯示：依據監督分類計算之結果，整體精確度及整體 Kappa 係數皆有達到中高信賴區，表示分類之結果具有正確性。利用 GIS 軟體進行常態化植生指標 NDVI 計算，其中植生面積以北投區 54,947,817 m² 為最大，而大同區 1,836,954 m² 為最小。各行政區綠覆率介於 32% 至 98% 之間。超過 50% 的區域包括南港區、北投區、士林區、文山區及信義區。其中以南港區 98% 為最大，而大同區 32% 為最小。研究綠覆率估算結果與市政府之公園、河濱公園及綠地面積綠覆比之比較，兩者之間均有高的一致性。

綜合言之，台北市行政區中以鄰近山域密林區綠覆率程度較高，而綠覆率不佳者多為老舊城區。建議政府除進行都市更新外，制訂相關政策積極落實綠美化。改善方法包括空地植樹，增加行道樹，更可善用都市建築物的牆面及屋頂進行綠化。

趙奴儒(2015)研究指出，都市綠覆之量化，有助於探討都市綠環境之空間分布。研究以福衛二號 2006、2009 與 2014 年高雄影像為例，透過影像監督式分類，將土地利用型態分為植生與非植生兩大類別，並分別萃取三個年度植生覆蓋面積。影像分類完成後以誤差矩陣進行準確度評估，確保分類結果具有一定準確度，並以地理資訊系統估算研究區內植生分布面積與覆蓋率變化。分類流程包括輻射校正、訓練樣區圈選、監

督式分類與準確度評估等步驟，以求得較佳的初始分類成果。

陳逸蓁(2015)研究指出，恆春半島位於台灣最南端，氣候溫暖宜人，擁有台灣第一座國家公園與重要的熱帶森林資源，因鄰近大都會區，近十年來觀光遊憩人數倍增，土地利用強度提高，建成地、與植生綠地之間的消長受到關注，人造系統的增加將迫使林地與農地等植生生態系統面臨破碎化的威脅，造成景觀破碎化。

景觀變遷的研究多以景觀生態學作為理論基礎，輔以遙測與地理資訊系統技術進行資料搜集與分析。遙測影像之多光譜特性對於大範圍植生覆蓋情形變遷調查，兼顧時效性、全面性、週期性，可快速掌握地表土地利用現況，亦可提升資料獲取精確度，提供決策者更有效的空間屬性資料。

研究利用美國太空總署開放下載的 MODIS 衛星影像進行常態化差異植生指標 (NDVI) 運算，並以綠覆率、綠覆面積變遷百分比等指標，分析探討 2006 年~2015 年近十年間，恆春半島全區與鄉鎮級、村里級行政區之綠覆率變遷。

在恆春半島整體 NDVI 分析中，利用不同年段乾季影像與濕季影像分別計算 NDVI 差值後，發現降雨量、降雨季節與迎背風條件對恆春半島東西兩半區之植被生長影響顯著。

在綠覆率分析中，十年來恆春半島的綠覆率維持在 93%~94% 之間，

變化極少。鄉鎮級行政區與村里級行政區皆在恆春鎮、車城鄉、滿州鄉等人口與產業集中區出現綠覆率衰退趨勢；人口與產業發展強度較低的獅子鄉則呈現十年間穩定成長。觀光遊憩業與農業的發展進一步改變以森林為主的景觀結構變化與景觀功能改變。在經濟開發與生態保育的景觀塑造過程中，管理規劃者須事先通盤了解土地利用變遷的過程，透過地表景觀結構與景觀功能的釐清，確立欲追求的價值後，訂定更適宜的計劃

蔡瑋軒(2014)研究指出，隨著人類的發展活動，以及經濟政策的發展，土地利用的型態從過去的農牧使用改變為現今工商使用，各地區也有不同的區位發展，進而產生不同的都市景觀。研究以臺北市為研究對象，並依照臺北市的十二個行政分區作為樣區的劃分。在不同的都市景觀結構下，各種土地使用類型分佈不同，產生不同都市溫度的溫差，針對臺北市的十二個行政分區做土地使用類別、土地覆蓋及地表熱演算的方式，作為景觀分類的依據，計算景觀指數。藉由景觀指數統計分析其相關的關係後，探討土地覆蓋的分佈形式與熱環境的結構型態有何種關聯。

利用遙測監視判釋方式分類土地覆蓋種類，並利用 LANDSAT 地表熱演算計算出地表溫度之後，依照人體舒適度間距做溫度分級，個別計算出景觀指數後，利用統計分析方式來探討地表覆蓋及熱環境之間的相

互關係。

經統計分析及疊圖分析後，確認土地覆蓋的種類、分佈密度、大小、形狀及占總面積比例，均對熱環境會有一定強度的影響。而土地利用的型態不同所也會對環境產生不同的熱環境強度。研究成果可提供未來規畫特定的土地利用區域，藉由調整土地覆蓋的型態減緩都市熱環境的產生。

2.2 林木固碳量評估相關研究

林木固碳量：間植林木之碳吸存量估算是根據 IPCC 估算林業部門碳吸存量之原則，將林木材積藉由木材密度換算出林木生物量，再利用林木生物量與地上部、地下部生物量的擴展係數與碳含量等轉換係數，估算出碳吸存量。

林庭玉(2017)研究指出葉綠素經過光合作用之後，一部分的二氧化碳會消耗掉或排出體外回到大氣中，一部分為養分以有機碳的形式在植物體內儲存並分配到各個部位，包含活立木的根莖部、枝葉以及枯落物、土壤有機物質與森林製品中都存有二氧化碳。張顯通(1997)指出評估植物之碳素固定量有「二氧化碳總固定量」、「碳總固定量」、「碳總淨固定量」三種計算單位與方法，其原理與意義如下：

二氧化碳總固定量：指植物葉片中之葉綠素經過光合作用，吸收大

氣中之二氧化碳及水分，製造出葡萄糖及純氧，在製造出葡萄糖之前暫存在植物體內的二氧化碳就為「二氧化碳總固定量」，此為一種氣體之重量。

碳總固定量：植物吸收二氧化碳後，經過光合作用產生葡萄糖，葡萄糖經過烴基結合成木材纖維儲存在體內成為樹體的一部份，其中所含之碳素總量 C6 就稱之為「碳總固定量」，是一種固體之重量。

碳總淨固定量：指植物之碳總固定量，扣除生長期間修剪、落葉、樹皮掉落、枯萎等重量所得之淨值，此「碳總淨固定量」為林業上估算成長與收穫材積常用。

李泓儒(2019)研究指出，柳杉是台灣造林歷史中，中海拔地區重要的造林樹種之一，根據林務局第四次森林資源調查統計報告，全台灣柳杉林的材積蓄積量已佔全人工林總材積蓄積量的 18.4%，但隨著林業政策變遷，如今的柳杉林已少有伐採和林分更新。因此，研究選擇溪頭地區 6 個林齡介於 46~97 年生之老齡柳杉造林林分及 1 個林齡 88 年生的老齡紅檜造林林分，藉由老齡人工林樣區之試驗調查，用以了解現有老齡林分之林分現況和於 2017 至 2019 年間之林分生長變化。研究目的主要為 (1)調查溪頭這些不同林齡的老齡柳杉造林地林分之林分特性及生長動態 (2)了解老齡柳杉與紅檜人工林之連年生長量、枯落物量與生態系統碳儲存量。研究結果顯示，林木碳量與土壤有機碳量兩者合計佔生態

系統碳儲存量 95% 以上。

連年生長量之結果顯示溪頭老齡柳杉仍然在持續生長吸存二氧化碳，即使是林齡 97 年生的老齡柳杉林分，其生長量也並非停滯，甚至高過一些林齡較為年輕的老齡林分。雖然各林分樹高已接近樹高生長上限，但胸高直徑仍持續增加，使得林分蓄積量隨著胸高直徑的成長增加，這些老齡林分仍可繼續累積碳儲存量。老齡森林也代表了一個巨大的碳庫，將來這些林分如不進行伐採或遭受擾動損毀，仍然可持續吸存大氣中的二氧化碳固定於林木之中，對於減少碳排放有其貢獻存在。

森林具有 CO₂ 吸收、儲存與釋放的機制，茲因森林中的林木與其他植被層經由自身生理特性進行光合作用，吸收大氣中的 CO₂ 並轉為有機碳形式貯存於植物體(含地上、地下)及森林土壤中。栽植密度較低之樣區具較大之胸徑，又因碳儲存量主要還是隨著株數的增加，即栽植密度較高的樣區而增加，Nowak and Crane (2002) 於研究中指出碳儲存量會隨著株數密度增加以及具有大直徑的立木多寡而增加。此外，地上部生物量在估算時，主要還是以幹部的材積所佔比例最大，從游漢明(1981)的結果報告中可以得知，每個部位的生物量分布為幹部最大且會隨著林齡上升而增加，枝條雖會隨林齡增加而生物量上升，不過到達成熟林之後則持平甚至往下，而葉部則是在林分鬱閉時為最大值，約為 20-25 年之間，再往後便維持一定或與林齡成反比關係，林齡愈大葉部生物量愈

下降，其原因估計為天然修枝有關。

整體來看，單木生物量基本上從一開始的高生長至達到成熟齡後的徑生長會隨著林齡增大而增加。游漢明(1981)在試驗中亦有說明以全林分之生物量而言，在達到一定林齡後，林分生物量應隨林木株數及葉量減少，該試驗中 35 年生之生物量雖為最大值，但與 25 年生相差不大，而 30 或 40 年生之林分生物量有逐漸下降之現象。從文獻中可知，柳杉成熟齡約為 30 年生，而研究區域林齡已超過，雖然樣木徑級不斷加大，碳儲存量有緩慢上升趨勢，但於吸存量上的效益則非常小，楊盛行(1997)提到人工林及未熟林木吸收 CO₂ 能力較高，而老齡之林木則因光合作用與呼吸作用平衡而其淨生長量或碳吸存量幾乎為零，李國忠、林俊成(2000)同樣地指出成熟林雖可維持高蓄積的碳量，但對碳吸存的能力卻下降，此時所增加和固定的碳量是相當少的。柳杉為全國造林面積最多之樹種，自造林以來皆達成熟甚至為過熟林，如果以森林碳吸存之能力作為減碳的辦法為目的，實應採取其他經營政策與育林手段使林地利用達最大效益。

王瑞閔(2006)研究指出，上個世紀末起，全球暖化現象成為舉世注目的焦點。世界各國為解決此問題，於 1992 年通過氣候變化綱要公約。而後又通過具法律約束力的京都議定書，並於 2005 年生效。氣候變化綱要公約與京都議定書中皆肯定森林碳吸存可減緩氣候變遷，並規定各締約

國每年需依 IPCC 溫室氣體統計指南估算並提交溫室氣體國家清冊。然而，台灣地區的森林調查資料與 IPCC 規定不全然相符，無法套用 IPCC 的模式估算台灣森林碳吸存。不過，自京都議定書通過後，國內仍有不少學者曾估算台灣的森林碳吸存，其結果約每年 4.56 至 9.62 百萬公噸。個別樹種也陸續有學者進行研究。研究藉由森林調查簿主、副檔、檢定調查圖層、森林永久樣區資料、氣候區圖層，建立符合溫室氣體國家清冊要求的國有林碳吸存估算系統，並估算 2006 年一年國有林地各林型碳吸存量。研究結果，利用調查簿原有資料重新劃分 71 種樹種林型。依 IPCC 規範，本島則可區分 8 類生態區。此外，研究還利用永久樣區資料推估各林型單位面積蓄積量、林木生長率與枯死率。藉此，配合調查簿，估算 2006 年全島國有林總蓄積量達 617,699 千立方公尺。再加上生態區圖層以及 IPCC 的轉換係數與估算模式，估算 2006 年國有林地碳貯存量 137.27 百萬公噸，碳吸存一年約 4.70 百萬公噸；單位面積平均碳貯存每公頃 99.52 公噸，碳吸存每年每公頃 3.41 公噸。不過，永久樣區設置與資料仍有許多不足，用來估算國有林地蓄積量與碳吸存量容易有高估的情況發生。另外，各樹種的本土轉換係數尚未建立，台灣的調查技術雖好，仍舊只能依賴 IPCC 建議的轉換係數，以上這些碳吸存估算的相關問題都有待解決。

行政院農業委員會(2000)指出，大氣中二氧化碳濃度增加，促進「溫

室效應」，如何降低二氧化碳濃度以減緩氣候變遷的衝擊，已為世界各國所共同關注的議題與努力的目標，其方法可由二氧化碳減量（mitigation）及環境適應（adaptation）著手。在減量方法上，可從調整產業結構，積極增加能源使用效率，抑制能源消耗來進行，但此種方法將可能對國家整體經濟產生較大的衝擊，同時減量所需成本也較高。因此，促進可持續的森林管理策略，加強造林和再造林以吸存大氣二氧化碳之環境適應方法，便成為一個值得重視的課題。在京都議定書內容中即肯定森林資源對吸收溫室氣體的效果，明定 1990 年以後所進行之造林、再造林及森林採伐之二氧化碳吸收或排放之淨值，可併入排放減量值計算。

台灣森林面積占全島面積的 59%，對吸存大氣二氧化碳具有相當大的貢獻，森林資源減緩大氣二氧化碳的方法，可由「開源」與「節流」兩方面進行，「開源」即增加森林對二氧化碳的吸存，乃將森林合理經營管理及擴大造林面積，「節流」即減少所固定二氧化碳的釋放，可以減少林地破壞衝擊、增加林木收穫與林產品使用效率及林產品替代性經營來達成。

紀怡嘉(2007)研究指出，研究旨在探討桂竹林之生物量及碳貯存量，研究之試驗地位於南投縣竹山地區之桂竹純林。藉由分層割取法所建立之樣竹各項屬性資料，配置合適之迴歸式，以推估桂竹林之材積量、葉面積量、生物量與碳貯存量。研究主要研究結果分述如下：

由林分樣區調查結果顯示，林分密度為 21,175 culm/ha，其中以 3 年生為最多，佔全林之 29.03%，5 年生(含 5 年生以上)為最少，僅佔全林之 12%，平均胸徑為 4.44 cm，由迴歸式推估林分之材積量為 81.91 m³/ha。

有關生物量之調查方面，樣竹之胸徑與各部位生物量具正相關，利用所建立之迴歸式推估全林分地上部生物量約為 75.75 ton/ha，其中稈部：枝部：葉部之比例約為 77：15：8。而地下部生物量試驗則將地下莖部與根部整株掘起，再依據調查之立竹資料計算，推估試驗林分之地下部生物量約為 49.34 ton/ha，佔全林分總生物量的 39.44%。另由林分葉面積資料分析結果，推估林分之總葉面積量為 93,742.13 m²/ha，葉面積指數(LAI)為 9.37。

在林分碳貯存量之推估中，各部位之平均碳濃度為葉部 40.08%，枝部 46.06%，稈部 47.65%，地下莖 45.91%，根部 45.74%，不同部位碳濃度順序為稈部 > 枝部 > 地下莖 > 根部 > 葉部。研究結果顯示，桂竹全林分之碳貯存量為 58.15 ton/ha，其中地上部碳貯存量為 35.54 ton/ha，地下部碳貯存量為 22.61 ton/ha。

另外，為比較桂竹與其他五種臺灣經濟竹類在碳濃度的差異，分別分析其稈部之碳濃度，所得結果為孟宗竹 48.29%、桂竹 47.38%、長枝竹 46.64%、綠竹 46.23%、蔴竹 45.83%、蔴竹 45.79%。以上研究所得

結果，可提供桂竹林之相關經營資訊，做為將來桂竹林經營之參考。

陳冠福(2009)研究指出，地球大氣對流層中的化學組成在人類工業革命後改變了許多，而人類活動造成的氣候變遷，可由南極、北美洲的冰山變化情況看出。根據大氣測定結果顯示，近數十年來溫室氣體濃度日益上升，這些氣體包含了二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)等。溫室氣體影響地球輻射之效應，受到人為活動直接影響的溫室氣體中，二氧化碳(CO₂)為最重要的氣體。近年來氣候變遷對於生態環境影響日漸顯著，根據政府間氣候變遷小組 IPCC 資料顯示，21 世紀末全球平均地表溫度將增加 1.4 至 5.8°C，對於生態影響甚大，而二氧化碳濃度增加引起溫室效應造成全球溫度上升，如何減緩二氧化碳濃度增加是目前國際間關注之焦點。碳貯存量為特定時間貯存於林木中的碳總量，單位為公噸(ton)。研究以土地利用型態資料庫(Landuse dataset)為基礎，並收集推估碳貯存量時所需的本土資料，如材積式、轉換係數、林相面積、生態區資料、土地利用資訊等等，以 IPCC(2006)之規範與建議(如劃分生態區與細分林相樹種)建置一套台灣森林碳貯存量推估模式，模擬 2006 年台灣地區森林碳貯存量以及空間分佈情形，再與相關研究結果相互比較。研究推估之全台森林(包含竹林共 51 種林相)碳貯存總量約為 165.65 百萬公噸，單位面積碳貯存量為每公頃 71.58 公噸，此結果與聯合國農糧組織(UN Food and Agriculture Organization, FAO)2006 年公佈之森林調

查報告，碳貯存量之世界平均值每公頃 71.5 公噸相近。碳吸存量(carbon sequestration)方面，研究推估之碳吸存總量為每年 5.23 百萬公噸，單位面積碳吸存量為每年每公頃 2.26 公噸，與其他相關研究相比，在合理範圍之內。

林郁評(2010)研究指出，此研究之目的旨在探討平地造林樹種臺灣檫及光臘樹兩樹種單木與林分特性，並瞭解兩樹種於不同齡級時單木各性態值之變化。研究區域位於雲林縣古坑地區，屬於臺糖公司之造林地，分別對兩樹種進行取樣設計。所得結果顯示兩樹種各齡級間栽植密度差異性大，就同齡級林分平均胸高直徑(DBH)，光臘樹較臺灣檫大。在生物量及碳貯存量方面之趨勢一致，於齡級 II 及 III 中皆以光臘樹較高，而林齡 I 中則以臺灣檫較高。而兩樹種各齡級樹冠參數（枝下高、活樹冠長、活樹冠比、枝下高比、枝下高與胸高直徑比及樹冠形狀比）皆呈顯著差異。此外，臺灣檫樹冠參數可分兩種型態，(一)為隨齡級增加而後再行遞減者，(二)為隨齡級遞減加而後再行遞增者。以上結果可以提供平地造林經營撫育上之參考。

李宣德、馮豐隆(2008)研究指出，在執行生態系經營與京都議定書中，推估國家層級的森林與土地利用部門的碳吸存、碳貯存和碳取代是非常重要的。首先要建立一個包含單株、林分、森林等多層級的地理資料庫，更而推估碳吸存及碳貯存量。並利用此資料建構機制與實證模式，

來瞭解森林的狀況、功能和變遷。研究乃研擬一套台灣森林碳吸存資源調查推估模式系統，也就是說整合國家資源調查、永久樣區及實證研究之調查資料，在時間、空間的考量下建構國家層級森林碳吸存資源的調查推估系統，可提供台灣每年某一林型、樹種的森林碳吸存與碳貯存量之推估。研究中以樟樹為例子，整合單株、林分、森林三個層級的資料，來推估樟樹的碳貯存量與碳吸存量。在森林層級方面，利用遙航測資料繪製台灣的土地利用型圖及林型圖，並分析台灣樟樹的分布狀況。在林分層級方面，利用林務局設定之 84 個樟樹永久樣區兩次調查的資料來瞭解林分結構、林分組成及林分生長狀況。在單株層級方面則由 99 株樟樹根、莖、葉生物量調查資料及 84 個永久樣區在不同時間點調查的每木生長資料來獲得林木不同部位的生物量比例及生長模式。而其結果顯示地上部的枝葉重在全株生物量所佔比例 = $0.2002 [DBH/5+1]-0.8694$ (高斯符號)，地下部的根生物量在全株生物量所佔的比例，大約維持在 28.95% 左右，樟樹推估的結果顯示台灣樟樹國有林班人工林約有 7722.66 ha，每公頃主幹生物量約 69.86 tons ha⁻¹，含碳量約 32.84 tons ha⁻¹；每公頃全株生物量平均約 92.52 tons ha⁻¹，含碳量約 43.48 tons ha⁻¹；而其碳量年增長率約為 6%。並利用樟樹的碳推估結果製作每年的碳貯存量分布圖。未來各種林型的碳吸存及碳貯存量，皆可利用此理念、方法及步驟再進行推估。

第三章 研究材料與方法

3.1 研究試區概述

一、地理位置

本研究係以南華大學為研究地區，南華大學位處於大林鎮，約在台灣南部的嘉義縣北部，南接民雄鄉，西鄰溪口鄉，東鄰梅山鄉，北鄰雲林縣大埤鄉、斗南鎮、古坑鄉，面積約 64 平方公里，為嘉義縣北方的門戶及地方中心，主要吸引溪口及梅山兩鄉為主(圖 3-1)。近年開始興建大埔美精密機械園區對於地方發展及人口成長，有相當大的影響。由於當地設有大林慈濟醫院提供醫療服務，鎮上平日流動人數比例逐漸成長，並與緊臨之嘉義都會區屬同一生活圈，鎮內往嘉義都會區內之通勤比例相當高。



圖 3-1 南華大學地理位置圖

二、植生概況

本研究係以南華大學為研究地區，南華大學位於嘉義縣大林鎮，校地面積約 63 公頃，遼闊的草原、高聳的樹林，校舍依山建築，道路環山圍繞，漸層有次。幽靜典雅的校園，綠意盎然，鳥語花香，其得天獨厚的自然環境，有「森林大學」之美名。

南華大學校地綠覆率高達 73%，而校內植被相呈現次生林、植栽地與草地的複合式多層次結構，次生林仍以先驅樹種為主要構成樹種，草地中亦可發現先驅樹種的幼苗，顯示演替仍持續進行中。

校區規劃除保留原有約 10 公頃的桉樹林外，並延續現有校區之綠化成果，種植多種原生種、誘蝶、誘鳥之植物，並以複層綠化方式達到最大的綠化效果，使校園成為觀察生物多樣性之最佳場所校園內總計原生種植物 52 種；具誘鳥與誘蝶植物種數 81 種；校內植栽物種總數 158 種。

三、地形地勢及土地利用現況

研究地區為緩坡地，根據內政部 20 公尺網格數值地形模型，全區的高程在海拔 40-70m 之間，地勢則由西南側向(南華市集)東北側(學校大門口)下斜，而試區上側有葉子寮溪經過為較最低窪之處，葉子寮溪為北港溪上游的支流之一，加上試區位處於較平緩的山坡地之上，在颱風豪雨期

間，易發生小規模的水土災害。由高程可推估整體的坡向為西北及北方為主。另依據國土測繪中心提供圖資服務雲，區內的坡度大部份為 1 級坡（坡度 $<5\%$ ）、少部份為 2 級坡(坡度在 $5\sim 15\%$)及 3 級坡(坡度在 $15\sim 30\%$)，屬於較平緩的坡地地形。由於試區為校園用地，校內土地利用除建物用地外，以原始次生林、人工種植行道樹、灌木或人工草地為主，鄰近的土地利用為農田，主要農作物以鳳梨、甘蔗及水稻為主，尤以鳳梨作物面積最多。

四、氣候

嘉義縣大林鎮之氣候型態為亞熱帶氣候，而位於台灣的南部西部平原一帶，該區主要受季風及地形二個因素影響，在一年四季之中乾濕明顯亦即夏季多雨、冬季乾旱，通常雨量分布大多集中於夏季，整年降雨型態主要集中在二個時段，第一為 5、6 月之梅雨季節；另一為 7、8、9 月之颱風季節，依據近 5 年的氣象資料年降雨量在 1100mm 至 2000mm 之間，平均值約為 1755mm 略低於台灣全區的年降雨量，如表 3-1。

通常台灣地區的蒸發量中南部較北部地區為高，試區鄰近之嘉義地區的蒸發量係以 7 月最高，2 月最低；且每年自 10 月開始蒸發量會有降雨量之趨勢，並且持續至隔年 3 月，因此在春季及冬季通常會面臨缺水問題。而試區之相對濕度全年皆在 70% 以上，年平均雨水酸鹼度值約

在 5.5 至 6.0 之間(如表 3-2、表 3-3)。總結試區的氣候為氣溫較高，濕度較小，蒸發量及風速較大，年雨量較少，雨量以夏季較集中，冬季乾旱，而地形平坦區，日照較充足。

表 3-1 大林降雨量測站(COM670)

降水量(mm)					
年/月	2016	2017	2018	2019	2020
1	148	3	97	6	17
2	29	3	31	10	3
3	154	29	39	128	105
4	206	97	21	57	40
5	73	74	28	198	314
6	335	835	304	359	146
7	202	494	462	300	202
8	103	210	791	674	103
9	527	136	90	40	527
10	23	71	3	3	23
11	55	8	19	-	55
12	15	6	-	165	15
總計	1868	1963	1883	1938	1125

資料來源：交通部中央氣象局

表 3-2 嘉義地區氣候資料

年	平均溫度	最高溫	最低溫	相對溼度	日照時數
2016	24.3	36.8	4.9	80.1	163
2017	24.5	36.7	9.8	76.2	175
2018	24.2	36.7	4.7	78.0	179
2019	24.3	35.7	10.1	75.6	172
2020	24.7	37.2	5.8	74.5	196

資料來源：交通部中央氣象局

表 3-3 雨水酸鹼值

年度	pH 值	年度	pH 值	年度	pH 值	年度	pH 值	年度	pH 值
1989	6.6	1996	5.9	2003	5.9	2010	5.8	2017	6.1
1990	6.5	1997	5.6	2004	5.8	2011	5.7	2018	6.3
1991	6.6	1998	5.5	2005	5.7	2012	6.0	2019	6.1
1992	6.5	1999	5.7	2006	5.7	2013	6.1	2020	6.2
1993	6.4	2000	5.7	2007	5.8	2014	5.9		
1994	6.2	2001	5.6	2008	5.8	2015	6.1		
1995	5.7	2002	5.7	2009	5.7	2016	6.2		

*資料來源：交通部中央氣象局

*累年年平均雨水酸鹼度值資料平均值：6.0 最大值：6.6 最小值：5.5

五、土壤及地質

依據詢經濟部中央地質調查所之資料，研究地區之地質屬沖積層(6022)全新世，其組成以礫石、砂及泥土為主，故內部膠結疏鬆。經查詢嘉義縣農地利用綜合規劃報告(1981)，基地應屬砂岩頁岩非石灰性新沖積土，本類土壤一般為中性。本類土壤與含石灰結核新沖積土，在一般農業應用上，無顯著差異，但對於石灰需要量較大之作物會發生差異。

本研究區緊鄰梅山斷層，其斷層包括主斷層—梅子坑斷層及支斷層—陳厝寮斷層兩部分。而梅山斷層地震被認為係舊有斷裂，其有可能在下次大地震時再次滑動，如圖 3-2。依據中央氣象區的資料，該區受梅山斷層影響，其地震相關資料在地震時間 2016-1-1~2020-12-31 之間，查詢嘉義縣民雄測站，該區的地震合計 153 個，顯著有感地震 97 個，小區域

地震 56 個。

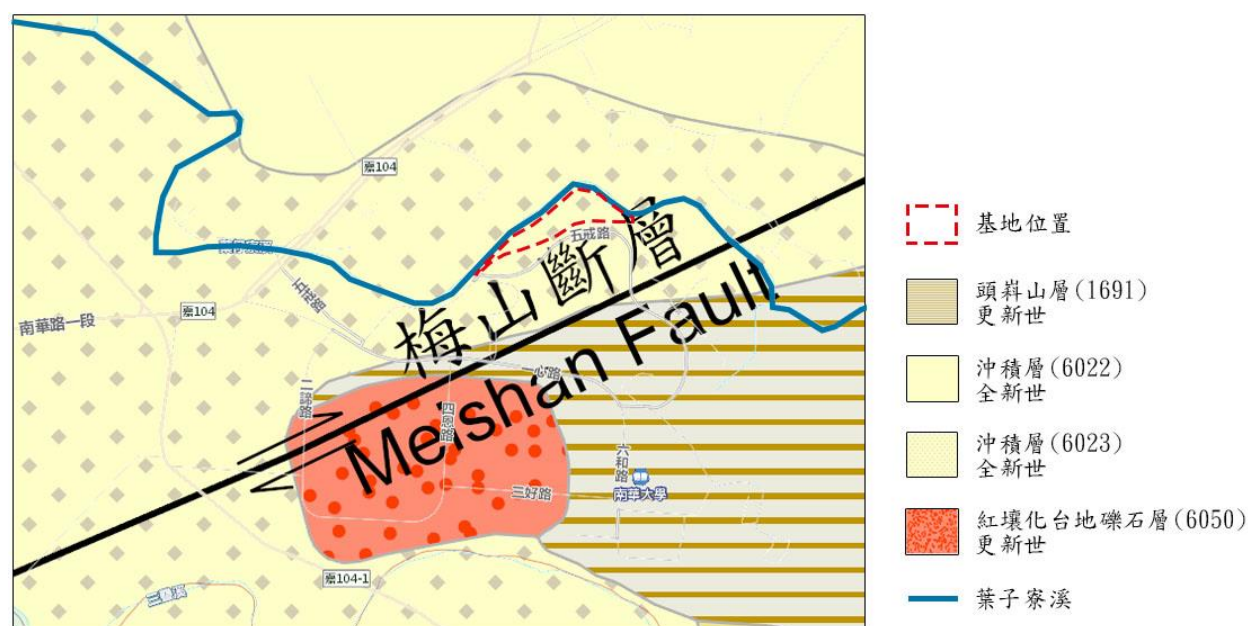


圖 3-2 地質圖 (資料來源：經濟部中央地質調查所)

3.2 試區 SPOT 6 衛星影像

1986 年 2 月法國成功的發射第一顆 SPOT 衛星 (SPOT-1)展開 SPOT 序列衛星觀測任務，1990 年 1 月再發射第二顆 SPOT-2。1993 年 8 月 SPOT-1 停止使用，9 月底再次成功的發射 SPOT-3 衛星，但不幸於 1996 年 11 月失去聯絡，隨後 SPOT-1 重新啟用。SPOT-4 衛星，於 1998 年 3 月發射，SPOT-5 號衛星於 2002 年 5 月發射升空。SPOT 1-4 衛星已停止運作，SPOT 系列後續衛星 SPOT-6 於 2012 年 9 月發射成功，而同型衛星 SPOT-7 於 2014 年升空運作，SPOT-6 及-7 與兩顆 Pleiades 衛星將組成一星系進行運轉，可達成每日再返之能力。

SPOT 系列後續衛星 SPOT-6 於 2012 年 9 月發射成功。SPOT-6 承續 SPOT 系列衛星之傳統，具備 60 公里之幅寬，可提供大範圍土地利用監測、災害監測及相關應用。相較於 SPOT-5，有數點改進，包括(1)解析度由 2.5 公尺提升至 1.5 公尺，可提供細緻之地物細節，(2)衛星姿態控制方式改為本體旋轉，影像拍攝便利性增加，更可拍攝同軌立體對影像，(3)灰度值取樣增加為 12bit，可保留更多灰度值之細節，及(4)未使用控制點之定位精度提升至 35 公尺。SPOT-6 感測器擁有多光譜態 (XS) 及全色態 (PAN) 兩種模式。多光譜之四個波段分別為藍光段 ($0.455 \mu\text{m} - 0.525 \mu\text{m}$)，綠光段 ($0.53 \mu\text{m} - 0.59 \mu\text{m}$)，紅光段 ($0.625 \mu\text{m} - 0.695 \mu\text{m}$) 與近紅外光段 ($0.76 \mu\text{m} - 0.89 \mu\text{m}$)，而全色態的波長範圍則在 $0.455 \mu\text{m} - 0.745 \mu\text{m}$ 。相較於 SPOT-5，研究室之多光譜感測器增加之藍色波段，可與紅色及綠色波段組成自然光影像。SPOT-6/7 與 SPOT-5 衛星規格比對如表 3-6。

表 3-5 SPOT 系列衛星資料空間解析度與感測器光譜模式

衛星代號	感測器	光譜模式	空間解析度
SPOT-1~3	HRV	PAN	10 m
		多光譜態 XS	20 m
SPOT-4	HRV	全色態 M	10 m
		多光譜 XI	20 m
SPOT-5	HRG	全色態 HM	5 m
		超解像模式 TH	2.5 m
		多光譜態 HI	10 m

表 3-6 SPOT-6/7 與 SPOT-5 規格比較

	Spot 5	Spot 6 & Spot 7
Launch mass	3 000 kg	712 kg
Size	Body: 3.1 x 3.1 x 5.7 m Solar array wingspan 8 m	Body: ~ 1.55 x 1.75 x 2.7 m Solar array wingspan 5,4 m2
Design Lifetime	5 years	10 years
Product resolution / swath	2.5 m / 2 x 60 km	1.5 m / 60 km
Daily image acquisition capability in HR mode (i.e. HRG only)	up to 3 Mkm ² / day in operation 2 Mkm ² / day average	up to 3 Mkm ² / day in operation/sat 2.2 Mkm ² / day average/sat
Agility	Roll only (mirrors)	All axes (platform)
Single pass stereo capability	Only through HRS	Single pass stereo and tri-stereo
Geolocation	50 m without GCP	35 m without GCP
System tasking reactivity	1 mission plan / day	up to 6 missions plans / day
Additional payloads	HRS, Vegetation 2, Doris	None

為判釋研究樣區南華大學之植生現況及計算林木固碳量，因此所選用 SPOT 6 的衛星影像，拍攝日期: 2020/1/8，影像座標： $x_{\min}=192097$ 、 $x_{\max}=204109$ 、 $y_{\min}=2601633$ 、 $y_{\max}=2613645$ ，並採用融合後影像其解析度為 1.5m，而選用的衛星資料考慮其影像品質，試區影像雲覆蓋量皆要求在 10% 以下及視角 ± 10 度以下所做決定，如圖 3-3 所示。



圖 3-3 研究地區(南華大學) SPOT 6 衛星影像

3.3 植生綠覆率分析

綠覆率(Vegetation Coverage Ratio)定義係指基地範圍內所有由綠色植被覆蓋面積與基地面積百分比。通常小面積地區係以現場調查方式進行計算與評估，而大面積區域可藉由衛星影像資料結合植生指標如 NDVI 或影像分類或分群法如 K-mean、最大概似法及 ISODATA 分類法等進行植生狀況判釋，藉以計算試區之植生綠覆率。

本研究係採用非監督分類之 ISODATA 演算法分析研究地區的綠覆率，而 ISODATA 演算法與 K-mean 演算法相似，其聚類中心係透過樣本均值進行反覆計算決定，茲將其演算法及步驟說明如下：

有關 ISODATA 演算法之計算流程如圖 3-4，其步驟說明如下：

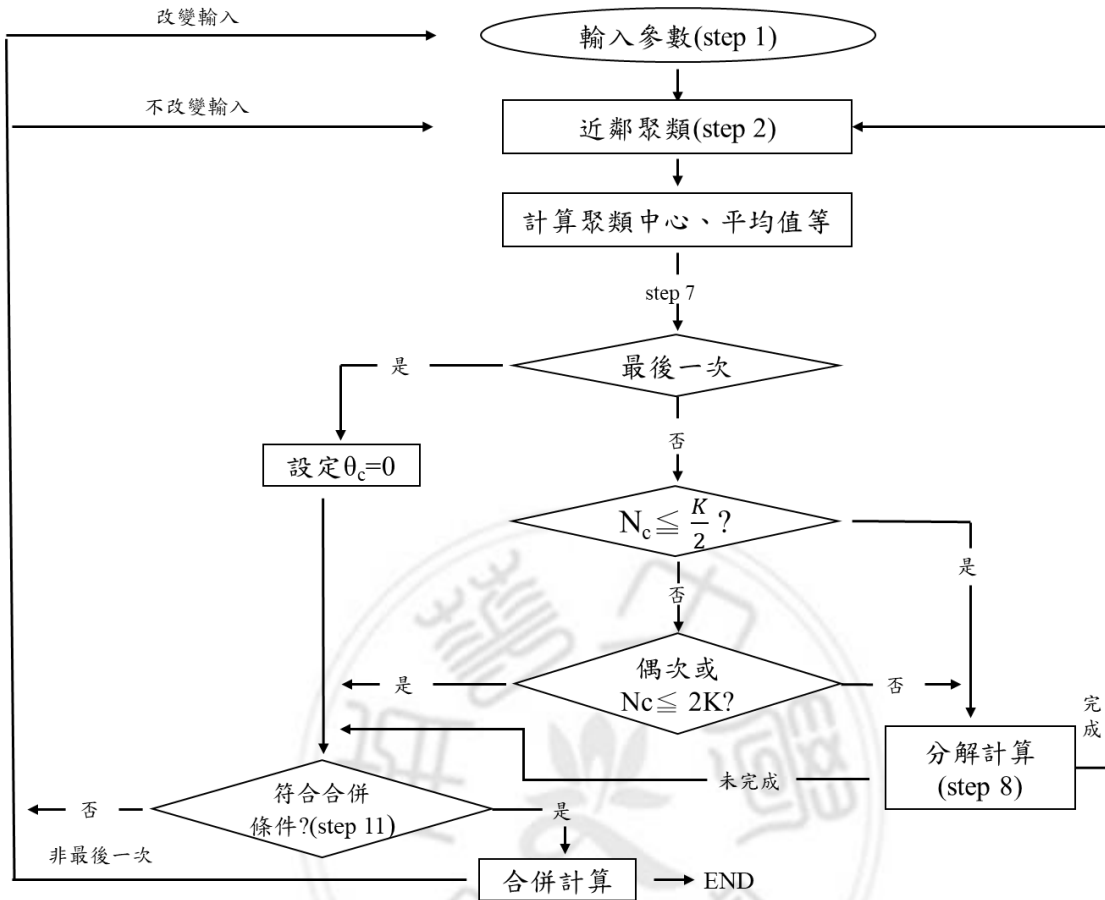


圖 3-4 ISODATA 演算法之計算流程圖

1. ISODATA 演算法的基本步驟

- (1) 設定初始值，並將 N 個模式樣本按照指標分配到各個類聚中心。
- (2) 計算各類別之各樣本的距離指標函數。
- (3)~(5) 將前一次獲得的聚類集進行分裂及合併處理，其中(4)為分裂處理、(5)為合併處理，從而獲得新的聚類中心。
- (6) 重新進行反覆計算，並計算各項指標，判斷聚類結果是否符合要

求。經過多次反覆計算後，若結果收斂則運算結束。

Step 1：輸入 N 個模式樣本 $\{x_i, i=1,2,\dots,N\}$

預選 N_c 個初始聚類中心 $\{z_1, z_2, \dots, z_{N_c}\}$ ，它可以不等於自訂聚類中心的數目，其初始位置可從樣本中任意選取。

預選： K =預期的聚類中心數目；

θ_N =每一聚類中心範圍中最少的樣本數目，若少於此數即不作為一個獨立的聚類；

θ_S =一個聚類範圍中樣本距離分布的標準差；

θ_c =兩個聚類中心間的最小距離，若小於此數，兩個聚類需進行合併；

L =在一次反覆運算中可以合併的聚類中心的最多對數；

I =反覆運算的次數。

Step 2：將 N 個模式樣本分給距離最近的聚類 S_j ，假設 $D_j = \min \{ \|x - z_i\|, i=1, 2, N_c \}$ ，即 $\|x - z_j\|$ 的距離最小，則 $x \in S_j$ 。

Step 3：如果 S_j 中的樣本數目 $S_j < \theta_N$ ，則取消該聚類，此時 $N_c - 1$ 。(以上各步驟對應 Step 1)

Step 4：修正各聚類中心 $Z_j = \frac{1}{N_j} \sum_{x \in S_j} x, j=1, 2, \dots, N_c$

Step 5：計算各聚類範圍中模式樣本與各聚類中心間的平均距離 D_j

$$= \frac{1}{N_j} \sum_{x \in S_j} \|x - z_j\|, j=1, 2, \dots, N_c$$

Step 6：計算全部模式樣本和其對應聚類中心的總平均距離 $D =$

$$\frac{1}{N_j} \sum_{j=1}^{N_c} N_j D_j \quad (\text{以上各步對應基本步驟(2)})$$

Step 7：判斷分裂、合併及反覆運算

1. 若反覆運算次數已達到 1 次，即最後一次反覆運算，則置 $\theta_c = 0$ ，到 Step 11。
2. 若 $N_c \leq K/2$ ，即聚類中心的數目小於或等於規定值的一半，則到 Step 8，對已有聚類進行分裂處理。
3. 若反覆運算的次數是偶數次，或 $N_c \leq 2K$ ，不進行分裂處理，到 Step 11；否則(即既不是偶數次反覆運算，又不滿足 $N_c \leq 2K$)，到 Step 8，進行分裂處理。(以上對應基本步驟(3))

Step 8：計算每個聚類中樣本距離的標準差向量

$$\sigma_j = (\sigma_{1j}, \sigma_{2j}, \dots, \sigma_{nj})^T$$

$$\sigma_j = (\sigma_{1j}, \sigma_{2j}, \dots, \sigma_{nj})^T$$

其中向量的各個分量為

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} (x_{jk} - z_{ij})^2}$$

式中， $i=1, 2, \dots, n$ 為樣本特徵向量的維數， $j=1, 2, \dots, N_c$ 為聚類數， N_j 為 S_j 中的樣本個數。

Step 9：求每一標準差向量 $\{\sigma_j, j=1, 2, \dots, N_c\}$ 中的最大分量，以 $\{\sigma$

$_{jmax}, j=1,2,\dots,N_c\}$ 代表。

Step 10：在任一最大分量集 $\{\sigma_j, j=1,2,\dots,N_c\}$ 中若有 $\sigma_{jmax} > \theta_s$ ，同時又滿足以下兩個條件之一：

1. $D_j > \bar{D}$ 和 $N_j > 2(\theta_{N+1})$ ，即 S_j 中樣本總數超過規定值一倍以上，
2. $N_c \leq K/2$

則將 z_j 分解為兩個新的聚類中心，且 N_c 加 1。對應於 σ_{jmax} 的分量加上 σ_{jmax} 其中，對應於 σ_{jmax} 的分量減去 $k\sigma_{jmax}$ 。

如果本步驟完成分裂運算，則到 Step 2，否則繼續。(以上對應基本步驟(4)進行分裂處理)

Step 11：計算全部聚類中心的距離

$$D_{ij} = \|z_i - z_j\|$$

$$i = 1, 2, \dots, N_c - 1; j = i + 1, \dots, N_c$$

Step 12：比較 D_{ij} 與 θ_c 的值，將 $D_{ij} < \theta_c$ 的值按照最小距離次序遞增排列，

$$\text{即 } \{D_{i_1j_1}, D_{i_2j_2}, \dots, D_{i_Lj_L}\}$$

式中 $D_{i_1j_1} < D_{i_2j_2} < \dots < D_{i_Lj_L}$ 。

Step 13：將距離為 D_{ikjk} 的兩個聚類中心 Z_{ik} 和 Z_{jk} 合併，得新的中心為：

$$Z_k^* = \frac{1}{N_{ik} + N_{jk}} [N_{ik}Z_{ik} + N_{jk}Z_{jk}], k = 1, 2, \dots, L$$

式中，被合併的兩個聚類中心向量分別以其聚類範圍內的樣本數加權，使 Z_k^* 為真正的平均向量。(以上對應基本步驟(5)並行合併處

理)

Step 14：如果是最後一次反覆運算(即第 1 次)，即算法結束；否則，若需要操作者改變輸入參數，則到 Step 1；若輸入參數不變，轉至 Step 2。在本步驟運算中，反覆運算的次數每次應加 1。

3.4 無人飛行載具 (UAV) 航拍影像

航空攝影測量技術目前已廣泛應用各種領域，如建築考古、2D/3D 製圖、工程建地、生產製造、犯罪地點偵察和環境地質學、坡地災害、農業資源調查等方面。而近年來飛行載具結合攝影系統及測量理論之航空攝影測量技術也甚為成熟(何維信，1995；Wolf and Dewitt, 2000)，尤其以無人飛行載具 (UAV) 在航測及遙測領域快速蓬勃發展最快速，由於 UAV 係搭配小型高解析度相機或攝影系統，能以較低高度進行空拍(通常<500 m 的高度)，應用製圖技術能夠滿足大比例尺成圖的精度要求，不僅可快速作業，且同時能降低成本。

由於 UAV 隨著技術進步已經越來越便宜，空拍的解析度非常高，亦可在自行設定的時間及地點進行拍攝，加上對拍攝者亦甚為安全，雖然拍攝時會受到氣候影響，但作業方便成本便宜為其相對優勢，作為災害即時影像取得或不易進出區域基本資料調查非常適合，而 UAV 的航拍影像可透過專業航拍影像製作軟體如 Pix4Dmapper 生成正射影像及高精度數值

高程模型。

3.5 林木固碳量計算

本研究之林木固碳量計算，係先以 SPOT 衛星影像結合 ISODATA 演算法分析試區之植生綠覆率，輔以 UAV 試區航拍影像及現地調查結合空間資訊技術，分類出試區之林木種類及數量，再以 IPCC 計算林木固碳量。

對於林木固定碳素效益之估算，自 1990 年初期國際間各國之林業部門即已掀起估算森林資源碳量貯存與吸存能力之工作，以期獲得較準確估算結果，作為未來進行碳交易機制之計量基礎。林木從根、莖、枝及葉均有固定碳素之功能，然在歷經數年、數十年，甚至數百年生長後，其樹幹之木材部分會愈來愈高，愈來愈粗大，其佔全株之比例也將愈來愈大，根、葉所佔比例相較之下將愈來愈小。對於單株林木所固定之碳素量是以林木生物量(Biomass)進行轉換。

根據 IPCC 所建議之估算原則，林木之生物量(B_f)係利用林木平均比重(S_0)乘以林木樹幹部分之木材材積(V_f)，再乘以全株材積與幹材材積之比例($F_{w/v}$)轉換而得，而林木生物量最後再乘以林木之碳含量百分比(C)，即為林木所固定之碳素量。其公式如下：

$$B_f = S_0 * C * V_f * F_{w/v}$$

其中， S_0 ：林木平均比重

C ：林木之碳含量百分比

V_f ：林木樹幹部分之木材材積

$F_{w/v}$ ：全株材積與幹材材積之比例

而農委會林業試驗所針對台灣地區 24 種常見造林樹種之平均絕乾比重、碳含量百分比與轉換係數值整理如表 3-7。將其分成針葉樹材與闊葉樹材兩大類，針葉樹材之絕乾比重在 0.31~0.55 間，闊葉樹材在 0.37~0.77 間，最重者屬相思樹材。在碳含量方面，針葉樹材介於 46.91~49.03% 間，平均值為 48.21%；闊葉樹材介於 45.69~47.66% 之間，平均值為 46.91%。木材碳含量之理論值為 50%，台灣地區常見造林樹種之碳含量均低於該理論值，其中闊葉樹材之碳含量平均值低於針葉樹材，且低於理論值達 3%，闊葉樹材中碳含量較高者為台灣欒(47.66%)。

表 3-7 台灣常見 24 種造林樹種之絕乾比重、碳含量百分比及轉換係數

商品名 (Common name)	學 名 (Species name)	S ₀ ¹⁾	C ²⁾ (%)	Conversion factor ³⁾
針葉樹 (Softwoods)				
台灣肖楠 (Taiwan incense-cedar)	<i>Calocedrus formosana</i>	0.54	48.57	0.262
紅檜 (Taiwan red falsecypress)	<i>Chamaecyparis formosensis</i>	0.42	48.64	0.204
台灣扁柏 (Taiwan Hinoki falsecypress)	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	0.42	48.22	0.203
柳杉 (Cryptomeria)	<i>Cryptomeria japonica</i>	0.36	49.03	0.177
福州杉 (Large-leaved China-fir)	<i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.31	48.32	0.150
台灣雲杉 (Morrison spruce)	<i>Picea morrisonicola</i>	0.47	46.91	0.221
台灣二葉松 (Taiwan red pine)	<i>Pinus taiwanensis</i>	0.55	47.04	0.259
台灣杉 (Taiwania)	<i>Tawania cryptomerioides</i>	0.32	48.32	0.155
台灣鐵杉 (Chinese hemlock)	<i>Tsuga chinensis</i>	0.42	48.82	0.205
闊葉樹 (Hardwoods)				
相思樹 (Taiwan acacia)	<i>Acacia confusa</i>	0.77	47.17	0.363
台灣赤楊 (Formosan alder)	<i>Alnus japonica</i>	0.47	46.20	0.217
茄冬 (Autumn maple tree)	<i>Bischofia javanica</i>	0.65	46.78	0.304
木麻黃 (Polyesian iron wood)	<i>Casuarina equisetifolia</i>	0.67	46.61	0.312
樟木 (Camphor tree)	<i>Cinnamomum camphora</i>	0.37	47.00	0.174
牛樟 (Stout camphor tree)	<i>Cinnamomum micranthum</i>	0.39	45.69	0.178
光蠟樹 (Formosan ash)	<i>Fraxinus formosana</i>	0.73	46.83	0.342
大葉楠 (Large-leaved nanmu)	<i>Machilus kusanoi</i>	0.46	47.45	0.218
香楠 (Incense machilus)	<i>Machilus zuihoensis</i>	0.47	46.93	0.221
棟樹 (China berry-tree)	<i>Melia azedarach</i>	0.54	46.63	0.252
烏心石 (Formosan michelia)	<i>Michelia compressa</i>	0.52	47.51	0.247
印度紫檀 (Paudauk)	<i>Pterocarpus indicus</i>	0.58	47.02	0.273
木荷 (Chinese guger-tree)	<i>Schima superba</i>	0.61	46.87	0.286
大葉桃花心木 (Honduras mahogany)	<i>Swietenia macrophylla</i>	0.50	47.26	0.236
台灣欖 (Taiwan zelkova)	<i>Zelkova serrata</i>	0.73	47.66	0.348

¹⁾ S₀：絕乾比重：Oven-dried specific gravity.

²⁾ C：碳含量：Carbon content.

³⁾ Conversion factor：轉換係數= S₀*C/100.

*摘自林裕仁(1998)之「森林減碳能力之推算方法」

第四章 結果與討論

4.1 試區之 UAV 航拍影像成果

本研究係以 DJI Mavic 2 Pro 之 UAV 拍攝試區之影像，透過 DJI GS Pro 軟體規劃試區之飛行路線，考量試區面積不小(大於 60 公頃)且每顆電池僅能飛行在 25 分鐘以內，因此設定飛行高度在 150 公尺，每幅影像間之重疊率為前後 60%、左右 60%，期能在一天之內迅速拍攝全區影像，若有不足的拍攝區域再進行補拍作業，全區拍攝影像約 250 張左右，並以 Pix4Dmapper 軟體生成全區正射影像如圖 4-1，正射影像每個像點之空間解析度為 3.626 公分，高精度的影像可作為研究地區之現地植生調查參考依據。



圖 4-1 研究地區之 UAV 航拍影像

4.2 基地植生現狀調查

南華大學校園植群在經過 20 多年之生長，其植群現況如圖 4-2~圖 4-7，主要植群結構主要為 4 類，如下：

- (1)生態複層 - 原生混合林(桉樹)及先驅植物之混合林 (佔大部分)；
- (2)喬木 - 闊葉大喬木混合林；
- (3)喬木 - 針葉喬木 (肖楠)；
- (4)人工草地。

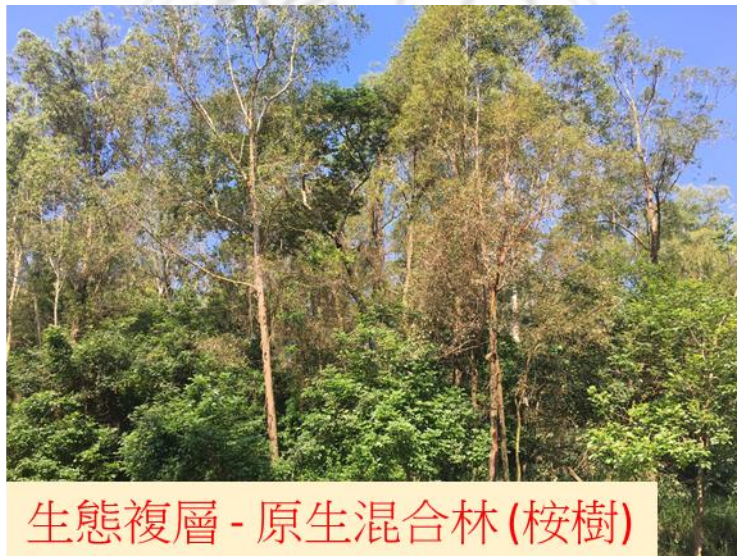


圖 4-2 生態複層 - 原生混合林(桉樹)



圖 4-3 生態複層 - 先驅植物之混合林



圖 4-4 喬木 - 闊葉大喬木混合林 (竹林)



圖 4-5 喬木 - 闊葉大喬木混合林 (櫟木)



圖 4-6 喬木 - 針葉喬木 (肖楠)



圖 4-7 人工草地

針對試區之植生現況初步調查，其植物種類及名稱如表 4-1，大致可分為 4 類，分別為闊葉林、針葉林、灌木及地被植物等。而試區之植物主要分布如圖 4-8，將現有的植群套疊 UAV 拍攝試區的航照影像，顯示在上坡地的部分(包括沿著試區的外側)，主要為植群為闊葉及針葉混合林，而試區中間則保有原始的桉樹林，而有一小片肖楠林在右側建築群(南華大學的行政大樓及圖書館)的後方，而在下坡地的部份(即運動場週遭)主要為人工草地。

表 4-1 試區現有植物種類及名稱

植群種類	植物名稱
闊葉林	台灣檫、山鹽菁、相思樹、竹林、構樹、桉樹、黑板樹、樟樹、桃花心木、大葉欖仁、小葉欖仁、台灣欒樹、阿勃勒、茄苳、鳳凰木、黃連木、陰香、水黃皮
針葉林	台灣肖楠、肯氏南洋杉、小葉南洋杉
灌木	金露花、朱槿、紅仙丹、龍柏、桂花、鵝掌藤、七里香
地被植物	澎湖菊、類地毯草、假儉草、五節芒



圖 4-8 試區內之主要植群空間分布

4.3 植生綠覆率分析

本研究以 2020/1 之 SPOT 6 衛星影像進行 ISODATA 演算法分類，ISODATA 是一種非監督性分類法，依其概念先將影像進行大概分類 100 類，再將各類與試區之植生及 UAV 航照影像進行比對，依照試區之植群結構重新將其歸為 5 類如表 4-2，分別為(1)原始混合林：自然演替之桉樹、相思樹、光臘樹等、(2)人工混合林：茄苳、樟樹、大葉桃花心木等、(3)台灣肖楠：人工種植台灣肖楠林、(4)草地：人工草地及(5)非植生區：不透水鋪面、水體或裸露地。

表 4-2 植生綠覆率分析

地覆	型態	面積(ha)	比例
原始混合林	桉樹、相思樹、光臘樹等	32.65	51.9%
人工混合林	茄苳、樟樹、大葉桃花心木等	7.16	11.4%
台灣肖楠		0.13	0.2%
草地	人工草地	7.82	12.4%
非植生區	不透水鋪面、水體或裸露地	15.16	24.1%
小計		62.92	100.0%

試區植生綠覆率之空間分布如圖 4-9，全區的地覆分為原始混合林之

面積為 32.65 公頃佔全區的 51.9%、人工混合林之面積為 7.16 公頃佔全區的 11.4%、台灣肖楠之面積為 0.13 公頃佔全區的佔 0.2%、草地之面積為 7.82 公頃佔全區的佔 12.4%及非植生區之面積為 15.16 公頃佔全區的佔 24.1%，其中以原始混合林佔比超過全區的一半為主，全區之植生區(原始混合林+人工混合林+台灣肖楠+草地)面積為 47.76 公頃，而全區面積為 62.92 公頃，推估全區之植生綠覆率高達 75.9%，顯示該區之開發原則儘可能保留自然原有自然生態景觀為主，採取低密度開發，南華大學被稱為森林大學之名實至名歸，而且符合聯合國目前所推行之環境永續的理念及目標。

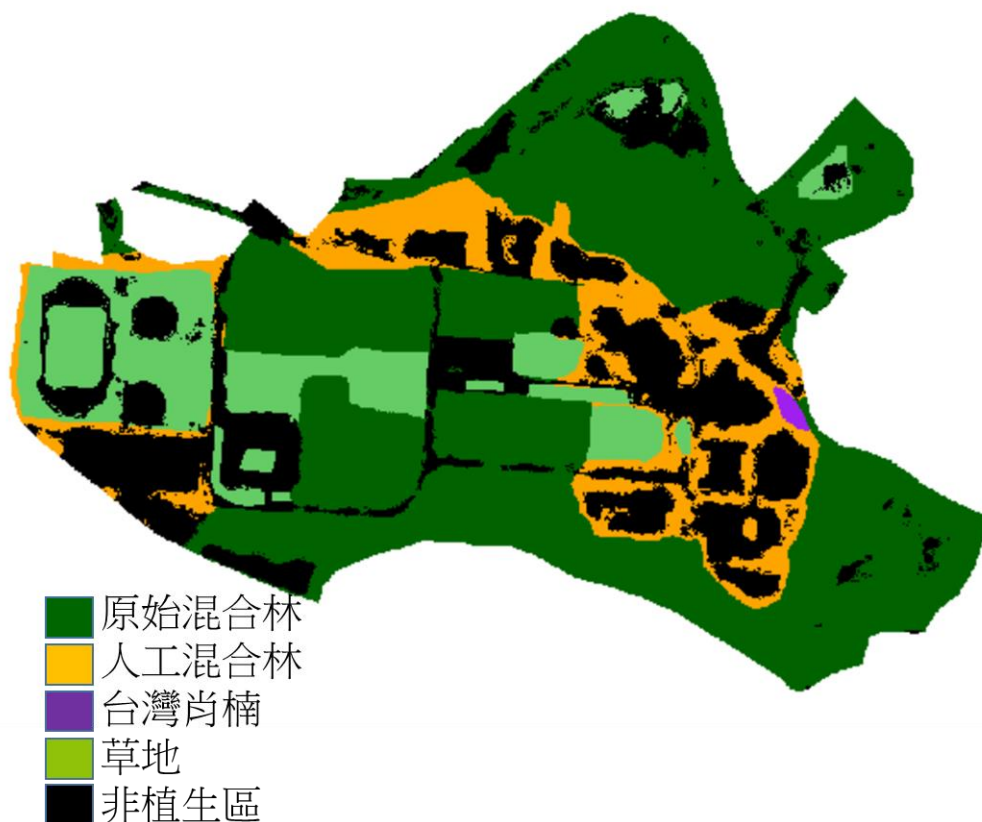


圖 4-9 試區植生綠覆率之空間分布

4.4 林木固碳效益分析

根據 IPCC 所建議之估算原則，林木之生物量係利用林木平均比重乘以林木樹幹部分之木材材積，再乘以全株材積與幹材材積之比例轉換而得，林木生物量最後再乘以林木之碳含量百分比，即為林木所固定之碳素量。而全區之固碳量即以衛星影像資料進行植生分類判釋再以空間資訊技術推估各植生區面積及林木數量，據此計算植生區域之林木固碳量。

南華大學校園植群在經過 20 多年之生長，植群以原始混合林、人工混合林及台灣肖楠為主，校園常見林木之單株固碳量係以林務局之台灣地區 24 種常見造林樹種來推算，將校園林木與林務局樹種比較後，其中原始混合林係採用相思樹、光蠟樹、台灣檫之平均值，人工混合林採用茄苳、樟樹、大葉桃花心木之平均值，草地則暫不採計，而校園內植株皆已成林，依現場測量結果採平均值每株以 $5 \times 5 \text{ m}^2$ 樹冠面積換算，其結果如表 4-3。

本研究僅考量木本植物之碳存量，因此由表 4-3 中可知原始混合林的面積 32.65ha、株數為 13060 棵、單株碳存量為 426.4kg，換算之碳存量為 5569.2 ton；人工混合林的面積為 7.16 公頃、株數為 2863 棵、單株碳存量為 289.3 kg，換算之碳存量為 828.1 ton；台灣肖楠的面積為 0.13 公頃、株數為 52 棵、單株碳存量為 47.8 kg，換算之碳存量為 2.5 ton。由上述的植生區域可推估全區林木碳存量總計為 6399.8 ton，除以面積可得單位面

積碳存量為 101.7 ton/ha。

全區的碳存量以 IPCC 方法推估為 6399.8 ton，單位面積碳存量為 101.7 ton/ha，相較於 IPCC 的熱帶森林 120 ton/ha、或台灣地區之林班地 145 ton/ha 或都市計畫區 49 ton/ha 等區域之碳存量可知，由於校園林木植株已高大成林及綠覆效果佳，整體固碳效益甚高。

根據本研究推估結果，建議南華大學校園需進行植樹管理時，以碳固量較量之樹種為考量，如台灣肖楠、相思樹、台灣檫及光蠟樹等，對全區無論於減碳節能及生態棲地均有助益，本研究以遙測資料結合 GIS 技術及 IPCC 方法推估林木固碳量，可做為大面積尺度試區推估固碳量及後續林木經營管理之參考。

表 4-3 全區林木碳存量推估

植生型態	面積(ha)	平均株數	單株碳存量 kg	碳存量(ton)
原始混合林	32.65	13060	426.4	5569.2
人工混合林	7.16	2863	289.3	828.1
台灣肖楠	0.13	52	47.8	2.5
草地	7.82			
非植生區	15.16			
總計	62.92			6399.8
單位面積碳存量 (ton/ha)				101.7

第五章 結論與建議

5.1 結論

隨著科技的迅速發展，目前臺灣應用無人機載具之技術已越趨成熟，測繪的方式也越來越多樣化，從傳統的地面測量精進至現在的各式載具測量，並陸續的發展中，由載具的拍攝距離大致可分為重力測量與由較遠處的衛星進行定位，近程由測繪車於巷道中進行資料的蒐集與測量；中程的則利用有人機或無人機航拍後進行攝影測量；或是遠程在衛星上裝載高光譜相機進行遙感探測。這些載具都被廣泛應用，以獲得空間資訊作為國土規劃、環境監測、導航定位等之應用，以下就本研究過程中所產生之研究結果進行結論歸納。

本研究僅考量木本植物之碳存量，概估原始混合林的面積 32.65 ha，換算之碳存量為 5569.2 ton；人工混合林的面積為 7.16 ha，換算之碳存量為 828.1 ton；台灣肖楠的面積為 0.13 ha，換算原始混合林的碳存量為 2.5 ton。由上述的植生區域可推估全區林木碳存量總計為 6399.8 ton，除以面積可得單位面積碳存量：101.7 ton/ha。其結果相較於 IPCC 的熱帶森林 120 ton/ha、或台灣地區之林班地 145 ton/ha 或都市計畫區 49 ton/ha 等區域之碳存量可知，由於校園林木植株已高大成林及綠覆效果佳，整體固碳效益甚高。

5.2 建議

根據本研究推估結果，建議南華大學校園未來需進行植樹管理時，以碳固量較多之樹種為考量，如台灣肖楠、相思樹、台灣欖及光蠟樹等，對全區無論於減碳節能及生態棲地均有助益。本研究以遙測資料結合 GIS 技術及 IPCC 方法推估林木固碳量，可做為大面積尺度試區推估固碳量及後續林木經營管理之參考。此外，目前台灣已有相關研究針對個別樹種固碳量進行量化分析，建議未來之林木碳固量可依單株固碳量數據進行評估，可獲得更為精確之結果。



參考文獻

1. Wolf, P. R. and B. A. Dewitt, (2000), Elements of Photogrammetry with Application in GIS, 3rd Ed., McGraw Hill.
2. https://www2.chcg.gov.tw/main/files/%E6%B7%BA%E8%AB%87%E7%84%A1%E4%BA%BA%E9%A3%9B%E8%A1%8C%E8%BC%89%E5%85%B7%E6%96%BC%E6%B8%AC%E7%B9%AA%E4%B9%8B%E6%87%89%E7%94%A8_32_1070128.pdf
3. 王瑞閔，(2006)，「台灣國有林地森林碳吸存估算方法之探討」，國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
4. 朱恩柔，(2016)，「以遙測影像及綠覆率探討台北市綠色休閒空間之研究」，中華大學休閒遊憩規劃與管理學系碩士論文。
5. 李宣德、馮豐隆。(2008)。森林碳吸存資源調查推估模式系統—以台灣樟樹為例。台灣林業科學 23(Supplement):S11-22。
6. 李泓儒，(2019)「溪頭柳杉及紅檜老齡人工林之林木生長量、枯落物量與生態系統碳儲存量」，國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
7. 林庭玉，(2017)，「都市公園喬木樹種二氧化碳吸存量與維護管理經費之探討—以惠來公園與潮洋環保公園為例」，逢甲大學建築碩士學位學程碩士論文。
8. 邱士瑄，(2020)，「特定目標之衛星影像偵測辨識技術」國防大學理工學院電機電子工程學系電子工程碩士學位論文。
9. 李國忠、林俊成，(2020)，「森林經營與大氣碳吸存」行政院農業委員

- 會，89年8月（第98期）(<https://www.coa.gov.tw/ws.php?id=2430>)
10. 陳逸蓁，(2016)，「運用 MODIS 衛星影像於恆春半島之綠覆率研究」，國立高雄師範大學地理學系碩士論文。
 11. 國立中央大學太空及遙測研究中心網站 - SPOT 衛星介紹，
<https://www.csrnr.ncu.edu.tw/rsrs/satellite/SPOT.php>
 12. 黃冠理，(2010)，「以空載光達資料推估森林生物量與碳儲存量」，國立屏東科技大學森林系碩士學位論文。
 13. 黃弘毅，(2019)，「利用高解析衛星影像萃取及重建道路路網」，國立中央大學土木工程學系碩士論文
 14. 鄒博堯，(2017)，「多光譜衛星影像之雲成分移除及水深反演」，國立交通大學土木工程學碩士論文
 15. 趙姣儒，(2015)，「綠覆蓋變遷之研究—以高雄研究區為例」，國立高雄師範大學地理學系碩士論文。
 16. 蔡瑋軒，(2014)，「從都市景觀格局探討綠覆率與地表溫度的關係」中國文化大學碩士論文。
 17. 鄭欽龍教授，行政院農業委員會林務局暨所屬機關九十八年度委託研究計畫，國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃期末報告。
 18. 劉守恆，(2010)「衛星影像於崩塌地自動分類組合之研究」國立成功大學地球科學研究所碩士論文。
 19. 何維信，(1995)，航空攝影測量學，大中國圖書公司。