

計畫編號：111 農再-1.1.1-1.1-保-003(2)

碳存量指標在農村再生社區營造效益評估
之應用

**Application of Carbon Storage Index in
Evaluating the Construction Benefits of
Rural Regeneration Communities**
成果報告

執行單位：國立中興大學

執行期間：111 年 1 月 18 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人：林昭遠 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 111 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

碳存量指標在農村再生社區營造效益評估之應用

摘要

為減緩氣候變遷，淨零碳排及低碳轉型成為共識，臺灣因應國際情勢制訂了「溫室氣體減量及管理法」，已明定 2050 年溫室氣體排放量得降為 2005 年排放量的二分之一，並逐步達到「淨零排放」的目標。環保署與農委會共同推行「農村低碳社區」之政策，透過農村設施低碳化與增加植栽綠化面積等營造，達到低碳營造的功效，採「減少碳排放」與「植樹造林」來降低二氧化碳排放並增加綠植行光合作用進行減碳。

碳存量評估研究大多以政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)溫室氣體清查準則為基礎，劃分氣候及生態區即可粗略進行碳存量估算，再以樣區調查數據得到的區域因素進行修正得到更精細的推估。然而在農村再生計畫之推動下，由於土地利用、建築與鋪面等大量改變，碳存量之變化甚鉅，對於減碳效益需要經合理的評估；若僅藉由人力調查，係無法即時反映全台農村碳存量之時空分佈。本研究以遙測影像結合數值高程模型來提取環境指標，利用常態化差異植生指標（NDVI）反映植物群落的光合作用能力；地形濕度指標（TWI）能反映土壤化育潛勢，樹冠高度模型（CHM）用於反映植體的材積，建立能即時反映集水區碳存量空間分布之概念模式。

農村社區因位在不同區位亦反應不同碳匯能力，依地形及功能區分，以碳存量為指標評估各社區在同類型中碳存量之良窳；透過時序分析可有效量化農村再生營造前、後碳存量之消長。研究成果可供相關單位於低碳綠環境投入時，營造優先順序及效益之有利參據。

關鍵詞：農村低碳社區、碳存量、碳通量、環境指標、樹冠高度模型

Application of Carbon Storage Index in Evaluating the Construction Benefits of Rural Regeneration Communities

Abstract

In order to mitigate climate change, net-zero carbon emissions and low-carbon transition have become a consensus. Taiwan has formulated the "Greenhouse Gas Reduction and Management Act" in response to the international situation. It has been determined that by 2050, greenhouse gas emissions must be reduced to half of 2005 emissions, and gradually achieve the goal of "net zero emissions". The Environmental Protection Administration and the Council of Agriculture jointly implement the policy of "low carbon community in rural areas", and achieve the effect of low-carbon creation, using "reducing carbon emissions" and "planting trees" to reduce carbon dioxide emissions and increase green plant photosynthesis for carbon reduction.

Most carbon stock assessment studies are based on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Greenhouse Gas Inventory Guidelines, which use climate and ecological regions to roughly estimate carbon stock, and then corrected by the regional factors obtained from the survey data of the sample area. However, under the promotion of the rural regeneration plan, due to the large changes in land use, buildings and pavements, the carbon stock has changed greatly, and the carbon reduction benefits have not been well evaluated. Human surveys alone

cannot reflect the spatial and temporal distribution of carbon stocks in rural Taiwan. In this study, the telemetry image combined with the Digital Elevation Model (DEM) was used to extract environmental indicators, and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used to reflect the photosynthetic capacity of plant communities; The Topographic Wetness Index (TWI) can reflect the potential of soil formation, and the Canopy Height Model (CHM) is used to reflect the volume of the plant, and a conceptual model that can instantly reflect the spatial distribution of carbon stocks in the watershed is established.

Rural communities also reflect different carbon sink capacities in different locations. According to the topography and function, the carbon stock index is used to evaluate the carbon stock of each community in the same type. Time series analysis can effectively quantify the changes in carbon stocks before and after rural regeneration. The research results can be used as a favorable reference for the priorities and benefits of the relevant departments when investing in a low-carbon green environment.

Keywords: Rural Regeneration Communities, Carbon Storage, Carbon flux, Environmental indicator, Canopy Height Model

目次

摘要	I
Abstract.....	III
目次	V
表次	VII
圖次	IX
第一章 緒論.....	1-1
第一節、前言	1-1
第二節、計畫工作項目及內容	1-2
第三節、計畫甘特圖	1-3
第二章 工作執行方法與流程	2-1
第三章 蒐集農村再生與碳存量相關文獻彙整	3-1
第一節、農村再生歷程	3-1
第二節、國際碳存量議題	3-5
第三節、農村再生與碳存量議題	3-6
第四章 國內、外碳存量相關推估文獻	4-1
第一節、碳存量估算方法	4-1
第二節、碳存量推估相關研究	4-3
第五章 萃取相關環境指標與碳存量層級估算方法	5-1
第一節、各機關產製之大數據彙整	5-1
第二節、碳存量層級估算方法	5-3
第六章 碳存量推估模式建置	6-1
第一節、模型建置樣區	6-1
第二節、模型建置基礎	6-5
第三節、模式建置及環境指標萃取	6-8

第四節、模式驗證	6-12
第五節、IPCC 層級一估算成果	6-13
第六節、IPCC 層級二估算成果	6-14
第七節、IPCC 層級三估算成果	6-16
第八節、模式在非林地之應用	6-21
第七章 碳存量推估模式之應用	7-1
第八章 結論.....	8-1
參考文獻.....	參-1
附錄	
附錄一、55 處農村社區探碳通量空間分布	附-1
附錄二、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附-9
附錄三、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附-11
附錄四、期末聯合審查意見暨回覆辦理情形	附-15

表次

表 1-1 工作進度時程表	1-3
表 1-2 計畫執行檢核表	1-4
表 4-1 碳存量推估相關研究	4-3
表 5-1 研究材料	5-1
表 5-2 內政部地政司衛星測量中心測繪成果資料	5-3
表 5-3 估算層級比較	5-4
表 5-4 亞洲地區森林碳庫組成之碳含量	5-5
表 5-5 陸地生態系之碳存量	5-6
表 5-6 林地地上部生物量(IPCC, 2019 ; IPCC, 2006)	5-7
表 5-7 地下部生物量與地上部生物量比例(IPCC, 2019 ; IPCC, 2006)	5-8
表 5-8 地上部生物量的碳轉化係數	5-9
表 5-9 層級一各生態區之森林生物量碳存量	5-10
表 5-10 各林型碳存量之估算係數	5-12
表 5-11 歷屆全國性森林資源調查表	5-13
表 5-12 歷屆森林資源調查地面樣區基本資料	5-14
表 5-13 森林資源調查地面樣區紀錄表	5-16
表 5-14 各主要林型及主要樹種單位面積蓄積	5-19
表 5-15 扣除樣區樹高差異之迴歸分析成果表	5-25
表 6-1 55 處農再社區發展功能類型統計表	6-3
表 6-2 濁水溪流域內的農再社區資訊	6-3
表 6-3 氣候區與生態區分區標準(FAO, 2001)	6-9
表 6-4 不同氣候生態區植體碳存量估算(層級 1)	6-14
表 6-5 林分樣區 2012 年之碳存量(層級 2)	6-15

表 6-6 林分樣區之碳通量	6-17
表 6-7 透過 CHM 和轉換因子估算之網格植體碳存量(2012)	6-18
表 6-8 樣點碳通量分布	6-20
表 7-1 農村再生社區營造效益評估成果	7-4
表 7-2 農村再生社區相關資訊與營造效益等級類別	7-5
表 7-3 典型判別分析結果	7-6
表 7-4 典型判別分析函數特徵值	7-7
表 7-5 典型判別分析結構矩陣	7-8
表 7-6 典型判別分析分類函數係數	7-8
表 7-7 標準化的典型區別函數係數	7-9

圖次

圖 2-1 研究流程	2-1
圖 3-1 農村再生歷程	3-1
圖 3-2 全台農村再生社區範圍(109 年統計資料).....	3-3
圖 3-3 農村發展與減碳取得平衡	3-4
圖 5-1 濁水河流域系統樣區點位(具有調查資料 97 年至 106 年)	5-15
圖 5-2 各樣點森林蓄積量分布	5-18
圖 5-3 地面樣區及蓄積量分布圖	5-19
圖 5-4 濁水河流域永久樣區分布	5-21
圖 5-5 樹高與林分蓄積量迴歸推估模式	5-23
圖 5-6 平均樹高與林分蓄積量迴歸推估模式(10 公尺內).....	5-24
圖 6-1 濁水河流域內的農再社區之空間分布	6-1
圖 6-2 農再社區之功能類型成果	6-2
圖 6-3 各類指標正規化之空間分布	6-7
圖 6-4 碳存量推估模式流程圖	6-7
圖 6-5 流域周遭氣象站及海拔	6-10
圖 6-6 流域氣候及生態區劃分結果	6-10
圖 6-7 地形濕度指標概念	6-12
圖 6-8 模式驗證之基礎單元	6-13
圖 6-9 林分樣區碳存量指標與植體碳存量之關係	6-16
圖 6-10 林分樣區碳通量指標與碳通量之關係	6-18
圖 6-11 CSI_{st} 與層級 2 植體碳存量的關係	6-19
圖 6-12 CSI_{fx} 與碳通量的關係	6-21
圖 7-1 2003 年 55 個農村再生社區平均碳存量	7-1

圖次

圖 7-2 2012 年 55 個農村再生社區平均碳存量.....	7-2
圖 7-3 2003 年至 2012 年農村再生社區碳通量.....	7-2
圖 7-4 典型判別分析散佈圖	7-7

第一章 緒論

第一節、前言

溫室氣體是現今全球暖化的主要原因。十八世紀工業革命發展以來，在經濟及科技成長下，人類活動使二氧化碳及其他溫室氣體，大量排放至大氣層中，二氧化碳濃度逐年升高，導致暖化的問題接踵而至。根據政府間氣候變化專門委員會（IPCC）的報告，全球暖化已導致全球乾旱和洪水，冰川融化，導致洪水、海平面上升和極端氣候。

為解決全球暖化的持續蔓延，各國先後於 1992 年通過《聯合國氣候變遷綱要公約》和 1997 年通過《京都議定書》，規範成員國減少溫室氣體的產生。其中，森林固定的主要溫室氣體減緩了全球變暖，這在上述兩項法規中得到了高度認可。2015 年聯合國提出「永續發展目標(SDGs)」之目標十五即針對陸域生態系部分，世界各國為人類永續發展，也因而逐漸重視碳吸存、碳排放等管理工作。

碳循環(Carbon cycle)為碳源在大氣層、海洋、地殼以及生物體之間，透過生物地質化學循環(Biogeochemical Cycle)將碳轉換及移動的過程；碳吸存 (Carbon sequestration，或 Carbon dioxide sink)，是將二氧化碳以各種形態儲存起來。森林、草原及濕地等為陸域生態系中重要的碳庫(Carbon stock)，具備不同的固碳能力，可由不同土地利用類型的碳量加總得出(IPCC, 2006)。其中森林為陸域生態系中最大的碳

庫，每年可自大氣中吸收約 24 億噸的碳(Pan et al., 2011)。

因應全球碳循環平衡失調，溫室效應所引發的一連串之環境衝擊，更加深農村社區在節能減碳上必須性與推動發展，近年來政府提倡節能減碳，期望透過完善的低碳概念作為臺灣農村社區低碳評估發展策略之研擬，將低碳評估策略的概念由城市深植入農村，以建構出低碳評估指標，作為臺灣農村低碳社區發展策略之建議(張瑞峯，2012)。

本研究盼以較簡易且快速之方法進行分析，利用大數據萃取環境指標，建置碳存量推估模式，期可供農村再生效益評估上之參考，並提出後續業務上之精進及應用。

第二節、計畫工作項目及內容

(一)、農村再生推動之歷程與國內外碳存量相關研究文獻蒐集

農村再生推動發展之相關政策、法條和計畫、以及碳相關議題探討，提出簡易且可行的碳存量評估指標，供農村再生營造效益量化評估之用。

(二)、擴增基礎圖資並萃取環境指標與研擬碳存量估算方法

透過各機關所產製之多尺度空間資訊，萃取相關環境指標，作為建模之基礎資料；結合調查資料及過去碳存量推估之研究方法，具體瞭解影響碳循環(Carbon cycle)之綜合因子，進行模式間之比較，進而研擬碳存量推估模式建置之基礎。

(三)、建置流域碳存量推估模式及準確性評估

以環境指標為基礎，建置具可評估時空變異之碳存量推估概念模式，針對不同土地類型(林班地、山坡地、原住民保留地、海岸地區)

進行碳存量評估；配合實測資料進行模式檢核。

(四)、農再社區碳存量圖資產製及社區營造對碳存提升效益評估

透過碳存量推估模式建置成果，產製具水土保持特色之農村再生社區碳存量圖資及營造對碳存提升效益之評估，供後續農村低碳社區轉型相關業務之精進及加值應用。

第三節、計畫甘特圖

本計畫之工作進度與時程(表 1-1)，自一百一十一年一月十八日至一百一十一年十二月三十一日止（星期日、國定假日或其他休息日均計入）完成，據此擬定工作進度及目前計畫執行檢核表(表 1-2)，並依契約規定建立查核管制點，本計畫團隊將確實管控品質與進度，圓滿達成本計畫內容。

表 1-1 工作進度時程表

計畫內容 \ 時程	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1.農村再生推動之歷程與國內外碳存量相關研究文獻蒐集												
2.擴增基礎圖資並萃取環境指標與研擬碳存量估算方法												
3.建置流域碳存量推估模式及準確性評估												
4.農再社區碳存量圖資產製及社區營造對碳存提升效益評估												
報告撰寫												
期中考評												
期末考評												
成果報告												
預訂進度累計百分比(%)	10	15	25	35	40	60	70	80	90	95	100	
查核點	預定完成時間											
計畫修正書	111/3											
期中報告	111/8											
期末簡報	111/11											

表 1-2 計畫執行檢核表

項次	工作項目	對應章節	期末 查核點	總計畫 進度
壹	農村再生推動之歷程 與國內外碳存量相關 研究文獻蒐集	第三章及第四章	100%	100%
貳	擴增基礎圖資並萃取 環境指標與研擬碳存 量估算方法	第五章	100%	100%
參	建置流域碳存量推估 模式及準確性評估	第六章	100%	100%
肆	農再社區碳存量圖資 產製及社區營造對碳 存提升效益評估	第七章及第八章	100%	100%

第二章 工作執行方法與流程

本研究首先針對過去碳存量度推估之相關研究及環境指標萃取進行文獻回顧，盤點相關環境指標萃取方法及產製模式所需之基本圖資。透過碳存量推估模式，針對不同土地利用，探討模式推估準確性及精進。最後產出具水土保持特色之農村再生碳存量分布之圖資，提出後續農村再生規劃業務上之精進及應用，計畫流程如圖 2-1 所示。

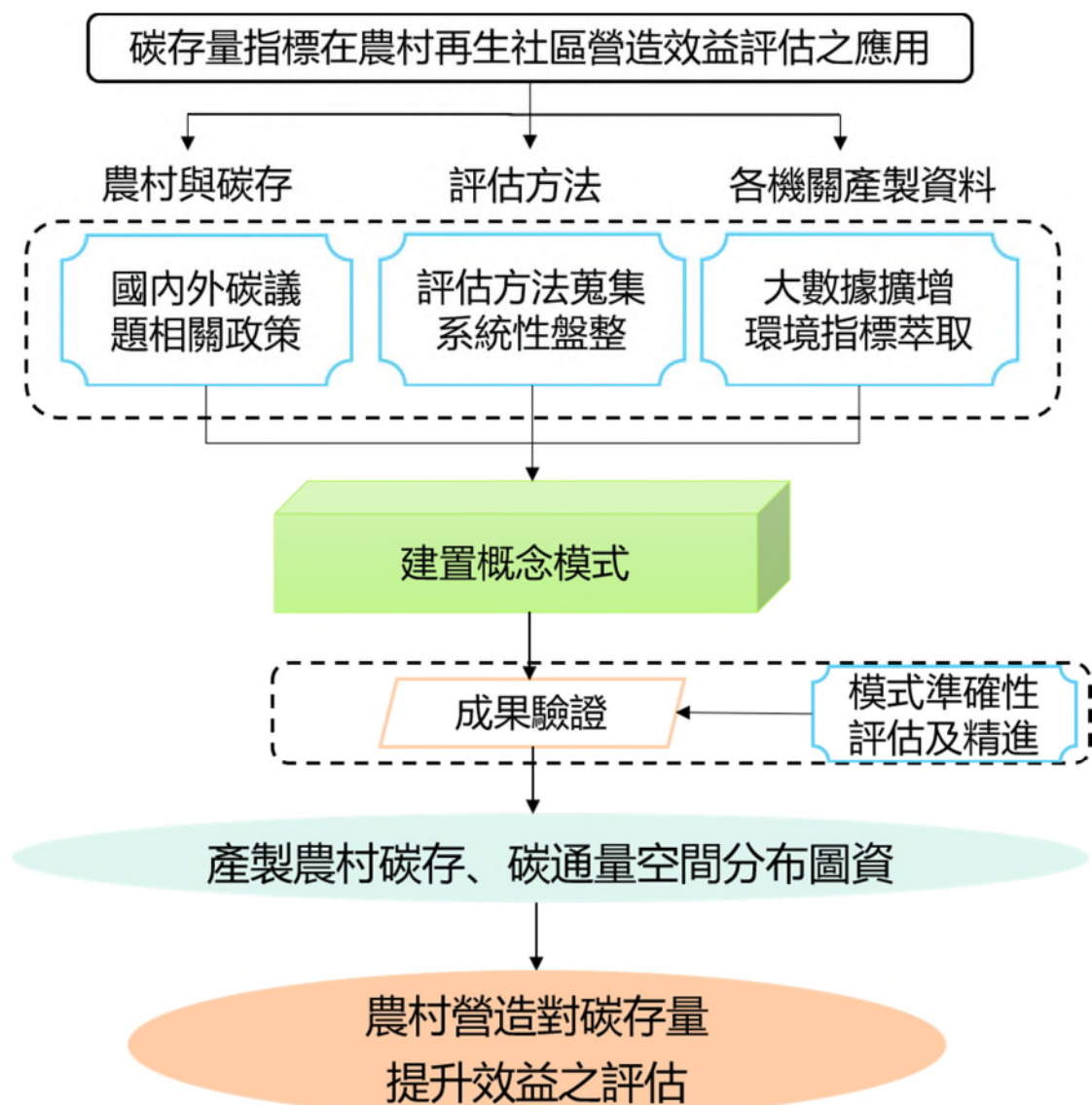


圖 2-1 研究流程

第三章 蒐集農村再生與碳存量相關文獻彙整

第一節、農村再生歷程

農村再生條例為政府在民國 99 年鑒於臺灣農村長期缺乏計畫及系統性來協助整體發展，且因 60、70 年代都市化風潮所致之農村人口外移嚴重，為以有秩序、有計畫地推動農村活化再生，照顧全臺灣 4,000 餘個農漁村及 60 萬戶農漁民所制定。

農委會自 99 年農村再生條例通過後，以提升農村人口質量、創造農村就業機會、提高農村居民所得、改善農村整體環境為主要目標，並執行由下而上、計畫導向、社區自治、軟硬兼顧四大執行策略，結合農村再生跨域合作示範計畫，整合相關部會資源，在時間、空間面向共同投入，推廣農村再生建設歷程如圖 3-1。



圖 3-1 農村再生歷程

1. 第一期計畫

藉由農村再生條例相關法令，有計畫及系統性的推動農村整體再生發展，行政院農委會推動農村再生第一期（101 至 104 年度）計畫以全台灣現有的農村社區為核心，融合「健康、效率、永續經營」農業施政理念，促進農業產業發展，美化農村景觀，維護農村生態與產業文化，提升農村居住與人文品質，活絡在地經濟活動，以期打造「活力、健康、幸福」的希望農村。

計畫執行中陸續推動「農村再生青年回鄉築夢計畫」、「農村再生

永續陪伴」計畫與「大專生洄游農村競賽」等，透過全方位計畫與具教育性論壇、競賽和跨界合作將農村再生推入生活，推動農村活化再生成果豐碩，成為國際農村政策交流重點，吸引多國相關單位相繼來臺，參訪農村社區及考察農村再生機制及做法。

2. 第二期計畫

配合行政院新興重大施政目標與方針，105 年實施第二期計畫，針對農村再生規劃及人力培育與農村產業條件與生活機能改善有更進一步之計畫，並於 106 年轉型為農村再生 2.0，滾動檢討農村再生整體法制體系與執行機制，目的打造「全民共創人、自然與社會和諧共榮的新農村」之發展願景，針對農村再生規劃及人力培育、農糧產業活化、發展特色農糧產業加值鍊與農村休閒產業發展與活化，強化農村再生與農業發展計畫，創造漣漪與共振效應，帶動農村發展綜效。

第二期執行計畫 105 至 108 年累計核定辦理 4,620 件農村社區整體環境改善、公共設施建設、產業活化、文化保存與活用及生態保育等項目。在原第一期基礎上加強了跨域與擴大發展，將農村再生計畫擴及地方政府及民間組織等全民參與，由地方政府整合自身資源與規劃政策重點，對社區產生加值發展效果，協助 22 縣市推動農村旅遊、食農教育、里山、培育農村人才及產業輔導加值，並帶動年度農業及農村休閒旅遊 200 多萬人次。

除此之外還推動臺灣里山生態與農村再生新農業示範計畫，透過加入國際里山倡議夥伴網絡，將具有厚實生態底蘊及極具產業發展潛力的臺灣農村推向國際舞臺，在新農業示範計畫方面，以創新和合作為基調，著眼資源保育及友善環境生產的重要性，期許能使新視野活化農村。

3. 第三期計畫

109 年提出農村再生第三期實施計畫 6 項主要績效指標，透過農村整體性規劃建設，提升農村生產、生活及生態品質，促進農村再生活化，提升農村整體發展，以在地經濟與競爭活力、生產環境與生活空間、文化襲產與知識創新及社會資本與夥伴關係等 4 大核心策略，更大的提倡生態環境與農村經濟的平衡策略，以降低氣候變遷之衝擊。截至 109 年度全台農村再生社區，共計 926 處，分布範圍如圖 3-2。

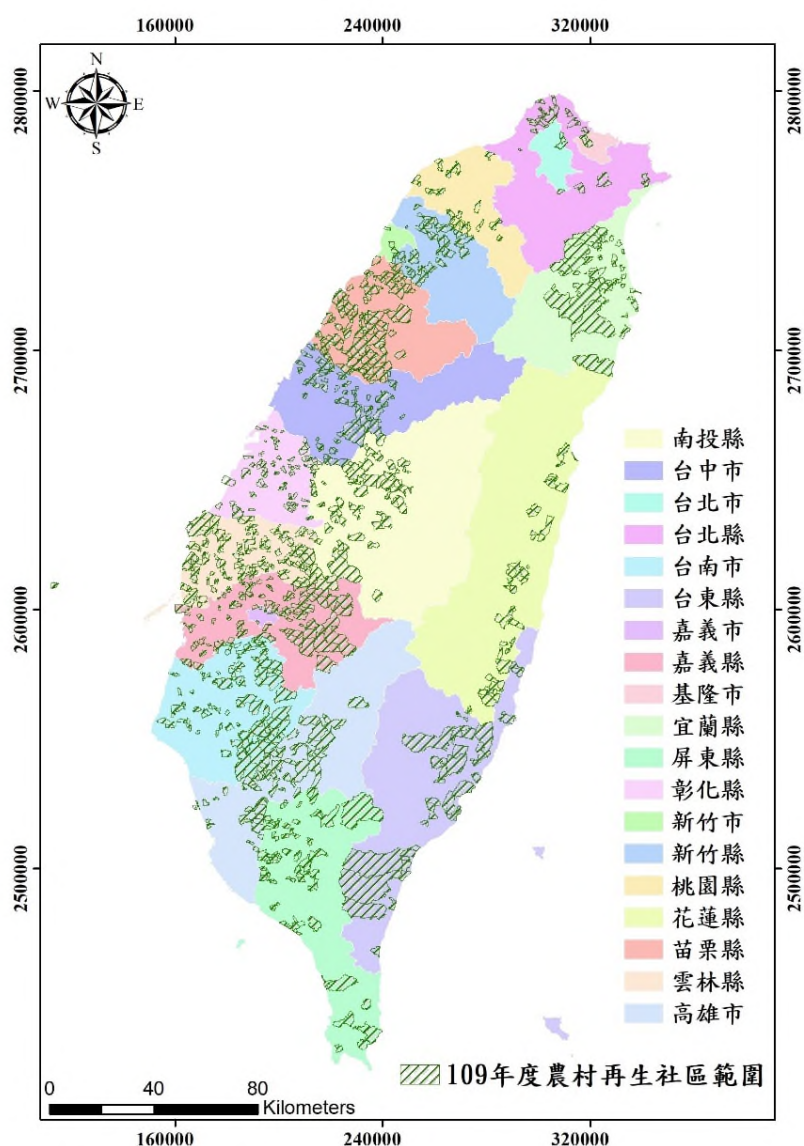


圖 3-2 全台農村再生社區範圍(109 年統計資料)

過去農再社區以促進農村土地活化、青年回鄉，改善農村生活空間及品質，保存在地特色文化及景觀，強調建構農村產業、生態與生活為主。

在面對減緩氣候暖化上，應擬訂積極之節能減碳政策，在評估方面卻缺少可統一實質量化的指標，推行方面也缺少策略方針，若能以碳吸存與碳固存觀念建構完善評估模式，配合農村再生條例，不但可將碳中和與碳權概念帶入農村，也可建構低碳農村發展策略並達成減碳效益之目標(圖 3-3)。

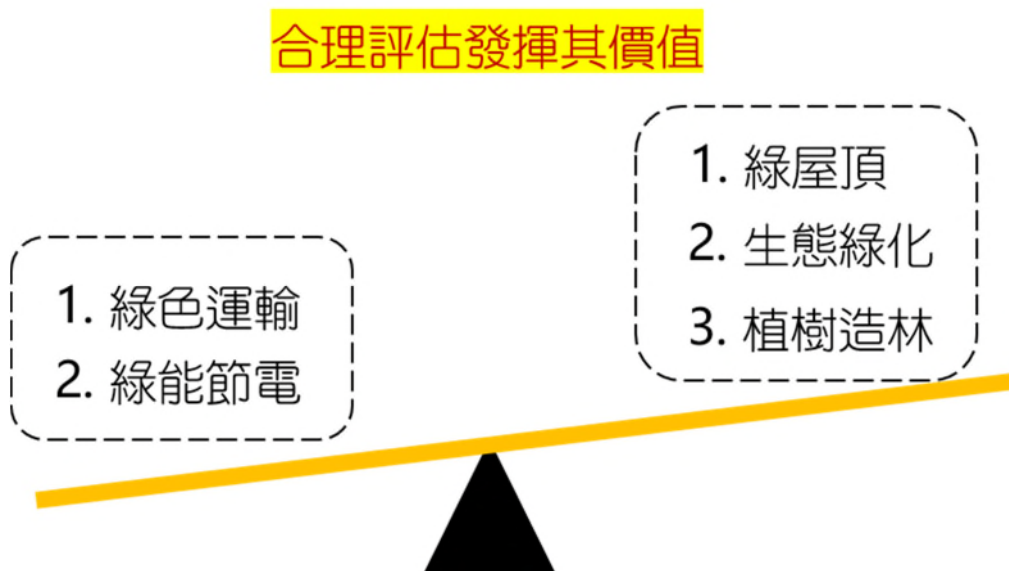


圖 3-3 農村發展與減碳取得平衡

4. 農村再生社區定位

台灣目前約計有 4,232 個農村(農再社區 926 處)，而以個別農村的發展屬性來看，台灣農村可概括劃分為「一般型、原民型、山村型、漁村型、離島型」等五種發展功能類型。在地形分區上又可以分為平原、濱海、近山、高山地區等不同類型，依其功能又可原住民、漁村、國家公園、休閒農業、農產業、都市計畫及客家發展區，不同區位上亦反應不同碳匯能力，透過參照水土保持局提供之農村再生分類資料

或依其主要地形、功能分區及農村發展願景等進行分類。

第二節、國際碳存量議題

1987 年聯合國世界環境與發展委員會(World Commission on Environment and Development, WCED)在「我們共同的未來」一書中，提出了後來受到廣泛認可和引用的永續發展定義為：「既能滿足當代的需要，同時又不損及後代追求其本身需要的能力之發展。」在自然環境體系可持續的前提下，強調成長的基礎應建立在自然資源的保護及改善上，以合理的資源利用而不使資源枯竭，人類的生活才得以實現與發展。

全球暖化觸發的極端氣候對環境、經濟及社會造成的影響日益嚴重，肇因化石燃料燃燒與不當的土地使用方式，致使大氣中的二氧化碳濃度逐年攀升，為針對氣候變遷狀況提出完整評估報告，聯合國政府間氣候變遷專門委員會（IPCC）於 1988 年由聯合國環境署(United Nations Environment Programme)與世界氣象組織(World Meteorological Organization)組成，在 1992 年發布第一次氣候科學評估報告（First Assessment Report, FAR）後，啟動研究循環機制，在每次評估報告發布後，就啟動下一循環的科研結果統整，並於適當時機發布特別報告。第六循環於 2015 年啟動，於今年 2021 年 8 月公布第六次氣候變遷評估報告(IPCC AR6)，統整了氣候科研團隊自 2013 年發布的第五次報告（Fifth Assessment Report, AR5），此外在 2015 到 2021 年間，IPCC 還發布了 1.5°C 全球暖化特別報告（Global Warming of 1.5°C, 2018）、氣候與陸地特別報告（Climate and Land, 2019），以及變遷氣候中的海洋與冰雪圈特別報告（The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, 2019）。這 3 份報告，再加上最新的研究成果，成為 AR6 的主要內容。

IPCC-AR6 報告指出，溫室氣體排放與暖化不斷加速，使得全球升溫 1.5°C 的情況提前到來，即使全球成功守住 1.5°C 臨界值，仍可能發生前所未見的極端天氣事件，也就是說無論哪種排放情境，升溫 1.5°C 已經無法避免。若要在 21 世紀末之前限制升溫程度，經濟發展與能源使用需要徹底轉型，而唯一可能的路徑為「2050 年溫室氣體淨零排放」，從大氣中捕捉二氧化碳，並將它儲存於森林、土壤、地層、海洋；去碳行動包括復林與植林、改造土壤增加吸碳量、發展生質能捕集二氧化碳，並封存於地下、強化海洋生物吸碳能力、從空氣直接捕捉並封存等(許晃雄，2021)。

即使達到淨零排放，溫度還是會持續上升，這是因為減少碳排的同時，也降低了氣膠排放，而氣膠整體而言有降低地表溫度的作用。亦即，減少碳排的降溫效果，有一部分會被氣膠濃度下降的增溫所抵銷。唯有在 2020 年代，讓所有溫室氣體的排放量迅速減少，而且在 2050 年達到淨零排放，方能讓全球溫度在 21 世紀末不超過 1.5°C (許晃雄，2021)。

第三節、農村再生與碳存量議題

行政院農業委員會水土保持局在 2008 年提出「農村再生條例」，由公部門協助社區團體，藉由法令進行由下而上的在地居民自主行動，建立共同參與制度及精神，促進農村土地活化吸引年輕的農家子弟回鄉，並改造農村生活空間，以提升農村生活品質，改善農村的雜亂意象，保存在地的特色文化與景觀，並強調農村產業、自然生態與生活環境之整體規劃，創造的富麗農村。

農村再生條例主要特色如下：

- 有秩序、計畫推動農村再生工作，發揮在地特色，創造社區整體風貌。

- 強化社區自主管理，透過社區公約，維護環境與景觀。
- 打造具低碳精神之社區，加強綠建築及再生能源設施。
- 基金用途明確且專款專用，兼顧生活、生產、生態之永續發展。
- 培育在地人力，居民共同參與，提送農村再生計畫前須先上培根計畫訓練課程，建立共識。
- 創造符合三生概念(生產、生活、生態)與農村 5 項美好價值(遠離塵囂、土地儲備、資源生產、休憩娛樂、身心安頓)

農業委員會與環保署推行「農村低碳社區」之政策，以全面向及由下而上輔導方式推動，農村設施單元的低碳化可提高生態環境效益，而農村綠美化、環境營造、截蓄保水設施與棲地保育等營造工作，可增加及促進綠色植物覆蓋與生長進行碳固定或儲存，促使農村社區具防災、水資源利用、景觀遊憩、生態保育、與節能減碳等多目標之功能；亦可利用在各類水土保持工程項目或是農地水土保持處理方法的節能減碳，作為設計初期之碳效益評估，達成碳平衡及水土資源保育目的，目前將低碳之觀念導入農村社區營造。

研擬農業生產的調適策略外，亦會針對農地資源空間規劃展開盤查，依各地區狀況研擬調適對策，同時加強水資源調適能力，有效利用水資源；也會從法規面、生產面及消費面著手發展永續有機農業，嘗試從中育種找出適合抗逆境的作物(李蘇竣，2021)。

然而現行在企業上臺灣已起步實行碳中和與碳權交易，城市推行低碳永續城市也有較完善的條例與評估方式，唯有針對農村，雖有政策推動，在評估方面卻缺少可統一實質量化的指標，推行方面也缺少策略方針，若能以碳吸存與碳固存觀念建構完善評估模式，配合農村再生條例，不但可將碳中和與碳權概念帶入農村，也可建構低碳農村發展策略，在生活、生產、生態方面達成減碳效益，以符合生態農村

蒐集農村再生與碳存量相關文獻彙整

理念及環境永續利用之目標。

第四章 國內、外碳存量相關推估文獻

第一節、碳存量估算方法

1. 生物量法

生物量法為依據林木生物量在各部位之中(根、莖、葉、枝)的比例分配，透過元素分析儀測量後，得知各部位的碳含量，再代入森林面積大小，即可得知此區碳存量多寡。經許多結果研究顯示，不同樹種各部位碳含量濃度會有相異(Gifford, 2000；林世宗等，2005；顏添明等，2005)。

生物量法所估算結果較為精確，但以生物量法取得林木各部位數據，需花費大量的人力及時間，因而不適用於大面積的調查，較適合用在小面積以及樹種及立木結構單純的林分推估碳存量(吳政達，2017)。一般國內常用的生物量估算方法有平均木法、全林伐倒法及迴歸推定法，平均木法採用林木平均胸徑的中央木當作重量估算的依據，以此決定全林之平均乾物重(呂錦明等，1984)；全林伐倒法則是將所有立木砍伐，直接量測後取得其重量及生長量；迴歸推定法採隨機取樣林木，利用林木各組成之乾重與形態生長參數，配置相關性最高之關係式，使用此關係式推導全區之生物量，多數學者多使用此法求得碳含量(呂錦明等，1992；游麗玉，1995；Parresol, 1999；黃凱洛，2003；王義仲，2004)。

2. 蓄積量法

蓄積量法是利用森林蓄積量間接推估碳存量(林裕仁等，2002)。而蓄積量法是應用林木材積和林木生物量之間的轉換，將林木主幹材積以擴展係數取得全株材積(哀力頤，2006)。再以基礎密度求得為林木主幹生物量，經由擴展係數，將主幹生物量轉換成全株生物量，其

生物量可分為地上部(莖、葉、枝條)及地下部(根)兩類，最終將以整株生物量依碳含量比例轉化碳存量。

林木材積可經由森林資源調查取得之胸高直徑及樹高等相關資料予以推求，相較於生物量法較為方便，且能調查林地面積較為開闊完整，以至於目前多數國家皆傾向用蓄積量法估算森林碳存量 (Brown et al., 1986; Fang et al., 2001)。

3. 光合作用法

光合作用法是以植物的生理面進行推估，以量測單位面積葉片的光合作用率，搭配光學儀器測量出整株植物的總葉面積，即可得知整株葉片的碳同化量，最終將日照時行光合作用所固存的碳量合計，即能得知林木一日的碳吸存量(王亞男等，2005)，而此方法常會受到氣象因子影響，既使相同樹種，不同的單株及葉片光合作用能力仍有差異，若長時間的推估，則需將觀測日是否納入代表性等問題。因此適用於推估小面積林木碳存量，不過實驗過程較費力且耗時亦受光日照時間所影響為其問題。

4. 通量法

通量法是於監測點設置一高於周圍林木高度的觀測塔，而監測地區需符合大氣環境穩定、地表平坦及水平均質的碳源與碳匯這三樣假設，即可依據大氣渦流原理，藉由觀測塔上二氧化碳濃度分析儀、輻射計等儀器及三維風速風向儀取得各項數據結果，進而取得森林二氧化碳的進出量(Tsai et al., 2008)。此法雖然精度較高且可以持續的觀測，其空間尺度也較大，但觀測塔的建置成本高且機動性較低，而最後所得到數據為全生態系，包括植物、土壤及微生物等，若想單獨取得林木的碳存量得需另行監測。

第二節、碳存量推估相關研究

林務局第四次森林資源調查報告統計，臺灣地區森林面積約有 2,197,090 公頃，約為臺灣土地總面積的 60.71%，以 104 年臺灣總人口數 23,492,074 人計算，平均每人可得森林面積約為 0.092 公頃。另外森林總蓄積量多達 5 億 2 百萬立方公尺，而森林對於碳的儲存具有相當的影響，故許多專家學者針對森林的固碳效益進行研究，相關研究彙整如表 4-1。

表 4-1 碳存量推估相關研究

作者	推估方法	推估指標
王立志(1996)	蓄積量法	每年吸收的二氧化碳量
謝漢欽(1998)	遙測應用、地文資料之應用、 線性回歸	材積量
林裕仁等(2002)	蓄積量法	碳存量
哀力頤(2006)	蓄積量法	碳存量
顏添明等(2006)	數學式	碳存量
林國銓等(2007)	線性回歸	碳吸存量
林俊成(2007)	蓄積量法	國有林碳存量與碳吸存量
王瑞閔(2007)	蓄積量法 IPCC 估算模式	林地碳存量、碳吸存量
林世宗等(2008)	林地調查、線性回歸	碳存量、碳吸存量
賴爽云(2008)	遙測應用	碳吸存量
王兆桓等(2008)	IPCC 估算模式	碳吸存量
林昭遠等(2010)	遙測應用、線性回歸	碳存量
王亞男等(2010)	林地調查、平均木法、形數法	碳存量
陳信宏(2011)	遙測應用	碳吸存量
廖宜緯等(2011)	遙測應用	碳存量
邱祈榮等(2012)	林地調查、線性回歸	碳存量
孫百寬等(2013)	生物量法	碳存量
林務局(2014)	IPCC 估算模式	碳存量
鄭祈全(2014)	遙測應用、線性回歸	碳吸存量
吳政達(2017)	生物量法、統計分析	碳存量、碳吸存量
李雅婷(2019)	遙測應用、地文資料之應用、 線性回歸	碳存量

第五章 萃取相關環境指標與碳存量層級估算方法

第一節、各機關產製之大數據彙整

大數據之尺度可從全球到台灣、各流域、次集水區、網格單元等多尺度之空間資訊，本研究主要是建立林地碳存量估算模型，以準確、即時、經濟地估算碳存量及碳通量空間分佈。研究資料分為數值地表模型（Digital Surface Model, DSM）、數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM）、衛星圖像和林業單位等相關機構之調查數據(表 5-1)。

本研究基於統計方法及風險評估概念，提出了一種創新的碳存量評估方法，提取相關環境指標建置碳存量指標，利用相關模型建立碳存量指標與通量之間的關係。同期拍攝所產製的 DSM 與 DEM 之間的差值，可用於獲得樹冠高度模型(Canopy Height Model, CHM)。以中央大學太空及遙測中心所提供 SPOT 系列衛星影像用於大規模環境監測和環境指標萃取。本研究使用地理資訊系統（ArcGIS）、遙感影像處理軟體（Erdas Imagine）和統計軟體 SPSS 作為主要分析及統計工具。

表 5-1 研究材料

材料	來源	解析度	年分
數值地表模型（DSM）	林業試驗所	5m, 1m	2003-2005, 2010-2012
數值高程模型（DEM）	林業試驗所	5m, 1m	2003-2005, 2010-2012
SPOT 系列衛星	中央大學太空及 遙測中心	6-20m	2003-2005, 2010-2012
Landsat 系列衛星	美國地質調查局	30m	1982-2022
氣象資料	中央氣象局、 水利署	-	2011-2020
第三次森林資源調查	林務局	-	1990-1994
第四次森林資源調查	林務局	-	2008-2014

永久樣區資料	各林管處		2002-2017
碳存量表	IPCC	-	2006
森林類型	林務局	-	2007-2013

林木生長高度為監測森林生長情形重要基本資訊之一，常見量測方法可以分為現地量測及遙測方法。現地調查工作需耗費大量人力，費時且難以短時間獲取大面積資料，現地調查常配合遙測作為地面資料點的驗證。近年隨著地理資訊系統 (Geographic Information System, GIS) 與全球定位系統 (Global Positioning System, GPS)、遙感 (Remote Sensing, RS) 合稱「3S」的技術發展與精進，已廣泛應用於大尺度調查及監測，空載光達 (Light Detection and Ranging, Lidar) 能提供精確的三維空間資料，透過雷射測距方法，主動發射雷射光波至測物表面後反射回波計算距離。透過雷射多重回波特性的特性，可以獲得地表最上層覆蓋物的點雲資料(第一回波)，雷射光具有穿透樹葉縫隙的特性亦可獲得地形的點雲資料(最後回波)。透過點雲資料過濾分別生產數值高程模型(DEM)與數值地表模型(DSM)。透過光達之點雲資料產製 DSM 減 DEM 之差值即可得到樹冠高程模型(CHM)。

內政部為國家測量主管機關，為建全國家基本控制測量系統，內政部規劃兼顧延續性及發展性的一系列基本控制測量計畫。內政部於民國 93 年辦理全國「高精度高解析數值地形模型建置計畫」及民國 95 年辦理「高精度高解析數值地形模型後續計畫」，建置全國 5 公尺網格之數值地形模型及 1/5000 彩色正射影像等，並引進光達測繪技術等新技術，將數值地形模型之解析度提升至 1 公尺。隨著空載雷射精度及解析度提升，相較於過去傳統量測方法，透過三維資訊具有定量且經濟快速的大尺度評估方法，以下整理內政部過去至今國內產製數值地形模型成果圖資彙整，請參見表 5-2，其中以 2003-2005 及

2010-2012 兩個測製時間之產製圖資範圍涵蓋全島，因此，本案以此二期進行碳存量評估。

表 5-2 內政部地政司衛星測量中心測繪成果資料

專案名稱	解析度	測製時間	產製機關	備註
高精度及高解析度數值地形模型測製工作	5公尺	2003-2005	內政部	涵蓋全島
以空載光達技術辦理河川及洪氾溢淹地區及中高海拔山區數值地形測製與研究	1公尺	2007	內政部	特定區域
非莫拉克/莫拉克災區 LiDAR 高解析度數值地形製作	1公尺	2010-2012	中央地質調查所	涵蓋全島
特定事件數值地形模型製作	1公尺	2012-2015	中央地質調查所	特定區域
LiDAR 技術更新數值地形模型成果檢核與監審工作案	1公尺	2016-2017	內政部	特定區域
107/108年度 LiDAR 技術更新數值地形模型成果檢核與監審工作案	1公尺、5公尺	2018-2019	內政部地政司、 內政部國土測繪中心	特定區域

第二節、碳存量層級估算方法

在估算森林碳存量時，根據提供的資料、數據和模式，估計水準將分為三個層級(表 5-3)。較高級別通常使用更詳細之方法和排放因子來處理特定來源、特定技術和特定區域或國家，這些方法和排放因子通常基於測量結果，通常需要非常詳細的活動數據 (UNFCCC，2009；王瑞閔，2007)。

層級一：可直接使用 IPCC 指南所提供的基本方法、函數及係數預設值 (default value)。國家特定的活動資料可直接使用經常性全球的活動資料，如全球的毀林率、全球植被圖等。其活動資料較粗略。

層級二：可使用與層級一相同的估算方法，但所採用的相關係數則為本國或區域調查的數據。另外，層級二所使用的活動數據亦較

為精細，以便與該國的氣候區、土地利用圖，和專門土地類別的係數配合。

層級三：能以 GIS 為基礎，結合林齡、林地分類，以及生產調查和土壤調查，使用並整合數種適合國家情況的模式、調查系統與監測系統，以分析不同時間國家的土地利用與碳量變化。層級三所需的品質管控、檢核及驗證更加嚴格。

表 5-3 估算層級比較

層級	估算方法	相關係數	活動數據
一	IPCC 提供	IPCC 提供	IPCC 提供全球概略數值
二	IPCC 提供	本土數據	高解析度的本土調查數據
三	自行建立	本土數據	以地理資訊系統等新興科技為基礎，強化高解析度的本土數據應用

IPCC 提供林地生物量通用碳存量計算式，然林地碳庫由為地上部及地下部生物量、枯枝落葉層和土壤組成。地上部生物量可以通過使用林木胸高直徑與樹高，透過生物量表轉換為生物量來估算 (IPCC, 1996)。它也可以由森林材積量轉換 (林俊成等, 2005)。對於地下生物量調查，如果經濟條件和時間允許，可直接挖掘根系來測量生物量以獲得更準確的數據。由於獲取地下部成本較高，目前大多數方法都依地上生物量與地下生物量的比例進行推估，而地下生物量的比率又因樹種而異，比例約為 5：1 左右，或地下部生物量佔地上部生物量的 10%至 15% (林俊成, 2005)。估計公式基於 IPCC 準則 (IPCC, 2006)，以估計每公頃森林碳存量，並使用 IPCC 和各國內部調查數據的轉化係數，使用以下公式(1)轉換碳存量：

$$Cs = A \times V \times BCEFs \times (1 + R) \times CF \quad (1)$$

式中：Cs 為林木碳儲存量(ton)；A 為森林面積(ha)；V 為林木材積(m³/ha)；BCEFs 為生物量轉換與擴展係數，將樹幹材積轉換為地上部生物量(ton/m³)；R 為地下部生物量與地上部生物量之比值；CF 為碳轉換係數。

林地總碳匯除了立木生長之地上部與地下部總合的碳存量外，亦包含土地之枯有機質與土壤中的碳；林地土地中的碳含量可以藉由現地採樣及分析，來推算碳存量，透過野外土壤採樣方式，須再配合野外調查時採取適當土壤樣本，送至特定的土壤分析實驗室，過程耗時費工；根據全球森林資源評估報告 (FAO, 2020)，森地的總碳含量在生物量、枯有機質及土壤中亦呈現一定的比例關係，其中地上部和地下部碳含量約為 44.3%，枯有機物佔 7.6%，土壤占 48.1% (表 5-4)；因此林地碳存量之推估，首先估計生物量之碳存量，透過比例關係估算整體林地的碳存量。

表 5-4 亞洲地區森林碳庫組成之碳含量

項目	碳含量比例(%)	
生物量 (Biomass)	地上部生物量 (Aboveground Biomass)	44.3%
	地下部生物量 (Belowground Biomass)	
枯有機質 (Dead organic matter)	枯死木 (Dead Wood)	7.6%
	枯落物 (Litter)	
土壤 (Soil)	土壤有機質 (Soil Organic Matter)	48.1%

資料來源：FAO (2020)

IPCC(2000)公布全球陸地生態系之平均碳存量，統計如表 5-5，全球碳存量在植物及土壤碳庫中(至地下 1 公尺)每公頃的碳存量。碳存量推估表在森林群落僅分為三個熱帶、溫帶及極地氣候區的資料，相較推估值較為粗略，台灣本島主要位處亞熱帶氣候區，南部屬於熱帶地區。然而，此表缺少亞熱帶植群及聚居地等基礎參據，參照 IPCC 國家溫室氣體清冊指南更新版(2019)提供更完整的參考值加以彙整。

表 5-5 陸地生態系之碳存量

植物群落	碳存量(ton/ha)		
	植物	土壤	總計
熱帶森林	120	123	243
溫帶森林	57	96	153
極地森林	64	344	408
熱帶草原	29	117	147
溫帶草原	7	236	243
沙漠	2	42	44
凍原	6	127	134
濕地	43	643	686
耕地	2	80	82

資料來源：IPCC (2000)

1. 層級一 (Tier 1)

層級一估算可以直接使用 IPCC 所提供的計算公式(1)及預設值 (default value)，不加以細分活動數據。根據氣候和生態區劃分結果，可以將其對應所屬生態區之區域得森林地上部生物量，根據王瑞閔(2007)將台灣本島區分為 8 類型生態氣候區為基準(熱帶雨林、熱帶潮濕落葉林、熱帶乾燥林、亞熱帶潮濕林、亞熱帶山地系統、溫帶山地系統及寒帶山地系統)；IPCC 於 2019 年針對 2006 年估算指南進行精

進，並將森林區分為天然林及人工林，天然林再細分為原生林及 20 年以上及以下樹齡的次生林；人工林則依樹齡加以區分，表 5-6 為 IPCC（2019）所提供台灣主要氣候及生態區之林地上部生物量。

表 5-6 林地地上部生物量(IPCC, 2019；IPCC, 2006)

氣候區	生態區	地域	狀態/條件	天然林地上部 生物量 (ton/ha)	人工林地上部 生物量 (ton/ha)
熱帶	熱帶雨林	亞洲	原生	413.1	-
			次生(>20y)	131.6	48.5-512.8
			次生(≤20y)	45.6	13.5-161
	熱帶潮濕 落葉林	亞洲	原生	-	-
			次生(>20y)	67.7	93.7-260
			次生(≤20y)	-	5.7-202
	熱帶乾燥 林	亞洲	原生	-	-
			次生(>20y)	184.6	45.5-88.8
			次生(≤20y)	-	3.56-125.5
亞熱帶	亞熱帶潮 濕林	亞洲	原生	323.0	-
			次生(>20y)	258.4	100-180
			次生(≤20y)	-	100-180
	亞熱帶山 地系統	亞洲	原生	250.2	---
			次生(>20y)	155.2	155.2
			次生(≤20y)	-	155.2
溫帶	溫帶山地 系統	亞洲	原生	-	-
			次生(>20y)	170.4	185.9
			次生(≤20y)	-	-
寒帶	寒帶山地 系統	亞洲	原生	-	-
			次生(>20y)	40*	40-50
			次生(≤20y)	-	5.0-50
極地	極地	-	-	15*	-

*: IPCC(2006)

表 5-7 為地下部生物量與地面生物量之比例。該地區的森林主要植物的生物量可透過提供的預設值得以概略估算而得，最後乘上所屬

氣候區之碳轉化係數(CF 通用值可採用 0.47)，表 5-8 為地上部生物量的碳轉化係數。最後將林地整體碳存量透過生物量、枯有機質及土壤碳含量，得以獲得該地區的森林整體碳存量。

表 5-7 地下部生物量與地上部生物量比例(IPCC, 2019；IPCC, 2006)

地下部生物量與地上部生物量比例 (R)			
氣候區	生態區	狀態/條件	R
熱帶	熱帶雨林	天然(地上部生物量 $\leq 125 \text{ ton/ha}$)	0.207
		天然(地上部生物量 $> 125 \text{ ton/ha}$)	0.212
		人工(地上部生物量 $\leq 125 \text{ ton/ha}$)	0.325
	熱帶潮濕落葉林	天然(地上部生物量 $\leq 125 \text{ ton/ha}$)	0.323
		天然(地上部生物量 $> 125 \text{ ton/ha}$)	0.246
		天然(地上部生物量 $\leq 125 \text{ ton/ha}$)	0.440
	熱帶乾燥林	天然(地上部生物量 $> 125 \text{ ton/ha}$)	0.379
		天然(地上部生物量 $\leq 125 \text{ ton/ha}$)	0.230($\pm 90\%$)
亞熱帶	亞熱帶潮濕林	天然(地上部生物量 $> 125 \text{ ton/ha}$)	0.246($\pm 90\%$)
		天然(地上部生物量 $> 125 \text{ ton/ha}$)	0.24*
	亞熱帶山地系統	天然針葉樹(地上部生物量 $\leq 125 \text{ ton/ha}$)	0.243($\pm 90\%$)
		天然針葉樹(地上部生物量 $> 125 \text{ ton/ha}$)	0.262($\pm 90\%$)
溫帶	溫帶山地系統	天然闊葉樹(地上部生物量 $\leq 125 \text{ ton/ha}$)	0.225($\pm 90\%$)
		天然闊葉樹(地上部生物量 $> 125 \text{ ton/ha}$)	0.229($\pm 90\%$)
		人工針葉樹(地上部生物量 $\leq 125 \text{ ton/ha}$)	0.224($\pm 90\%$)
		人工針葉樹(地上部生物量 $> 125 \text{ ton/ha}$)	0.232

		125 ton/ha)	(±90%)
		人工闊葉樹(地上部生物量 ≤ 125 噸/ha)	0.307 (±90%)
		人工闊葉樹(地上部生物量 > 125 噸/ha)	0.248 (±90%)
寒帶	寒帶山地系統	地上部生物量 ≤ 75 噸/ha	0.39
		地上部生物量 > 75 噸/ha	0.24
極地	極地	-	0.39*

*: IPCC(2006)

表 5-8 地上部生物量的碳轉化係數

氣候區	狀態/條件	碳轉化係數(CF)
通用	通用	0.47
	通用	0.47(0.44-0.49)
	木材	0.49
	木材，胸高直徑<10cm	0.46
熱帶及亞熱帶	木材，胸高直徑≥10cm	0.49
	樹	0.47
	樹葉，胸高直徑<10cm	0.43
	樹葉，胸高直徑≥10cm	0.46
溫帶及寒帶	通用	0.47(0.47-0.49)
	闊葉樹	0.48(0.46-0.50)
	針葉樹	0.51(0.47-0.55)

資料來源: IPCC(2006)

透過 IPCC 所提供各生態區生物量表(表 5-6)、地下部生物量與地上部生物量比例(R)(表 5-7)及地上部生物量的碳轉化係數(CF)(表

5-8)資料彙整後，以碳存量估計公式(1)，則可以推估各生態區之森林碳存量(ton/ha)，表 5-9 為層級一各生態區之森林碳存量推估成果。

表 5-9 層級一各生態區之森林生物量碳存量

氣候區	生態區	狀態/條件	天然林生物量 碳存量 (ton/ha)	人工林生物量 碳存量 (ton/ha)
熱帶	熱帶雨林	原生	235	-
		次生(>20y)	75	30-319
		次生(≤20y)	26	8-100
	熱帶潮濕 落葉林	原生		-
		次生(>20y)	42	55-152
		次生(≤20y)		4-78
	熱帶乾燥 林	原生		-
		次生(>20y)	120	31-60
		次生(≤20y)		2-81
亞熱帶	亞熱帶潮 濕林	原生	189	-
		次生(>20y)	151	59-105
		次生(≤20y)		59-105
	亞熱帶山 地系統	原生	147	-
		次生(>20y)	91	91
		次生(≤20y)		91
溫帶	溫帶山地 系統	原生	-	-
		次生(>20y)	100	108
		次生(≤20y)	-	-
寒帶	寒帶山地 系統	原生	-	-
		次生(>20y)	-	26-33
		次生(≤20y)	1	3-33
極地	極地	-	9.8	-

本研究計算值

2. 層級二 (Tier 2)

估算方法與層級一類似，但其土地使用、土地活動的排放因子與活動資料，則以國家內專家及學者所調查或蒐集的數據為主。台灣林地之林型可概分為針葉林、闊葉樹、針闊葉樹混淆林、竹林及木竹混淆林，再依造經營使用分為天然林及人工林。蒐集國內相關研究文獻為整理本土碳存量估算係數，提升推估值之精細度，如有缺乏國內研究係數，則將使用 IPCC 的預設值。目前台灣沒有對混合林進行相關研究，因此，闊葉樹和針葉樹的平均值被作為混合林的估算係數。

基本密度 (D)：針葉林型的採用王兆桓等 (2008) 對 6 種針葉樹種的研究數據，依各樹種面積加權平均值，其值為 0.41。根據林裕仁等人在 2002 年研究 15 種闊葉樹種的平均結果，闊葉林型的基本密度為 0.56。而針闊葉混淆林型則為兩者的平均值 0.49。竹林採用王義仲與陳周宏 (1995)、王義仲 (2006) 及林裕仁等 (2011) 3 篇研究，共 6 種竹種，取其中位數 0.62。木竹混淆林以針葉林、闊葉林及竹林之平均值 0.53 為代表。

生物量轉換與擴展係數 (BCEFs)：針葉林型的採用劉知好等 (2008) 取其平均值為 0.51。闊葉林型取自林國銓等 (2005)、許原瑞等 (2006)、林國銓等 (2007 年)、劉知好等 (2008)，各文獻統計取中位數為 0.92。對於混合針葉林和闊葉林，兩者的平均值為 0.72。

地上部生物量和地下部生物量比例 (R)：國內缺乏針葉林型相關研究，僅對柳杉有較深入的探討。如將單一物種套用至所有林型之數據，則其代表性較低，因此 IPCC 提供亞熱帶濕潤林數據 0.22 作為針葉樹的 R 值。闊葉樹則採用李宣德與馮豐隆 (2008)、林國銓等 (2006)、林國銓等 (2007)、林國銓等 (2008)、林國銓等 (2009)、林國銓等 (2010)、林國銓等 (2005)、柯淑惠 (2005)、陳財輝等 (1998) 及陳

財輝與呂錦明（1988）共 10 篇文獻，7 種樹種，取其之中位數 0.24 為代表。對於混合針闊葉林，兩者的平均值為 0.23。竹林以呂錦明與陳財輝（1992）對桂竹林分生物量的研究結果，其 0.46 為代表。木竹混淆林，以闊葉林與竹林，兩者的平均值為 0.35。

碳含量比率（CF）：以林裕仁等（2002）為基礎，將臺灣 24 種針葉樹與闊葉樹的主要木材分別進行研究，針葉樹的碳含量比例為 0.4821，闊葉樹的碳含量比例為 0.4691，對於混合針闊葉林，兩者的平均值為 0.4756。

根據統整台灣專家及學者所調查各林型之碳存量之估算係數（表 5-10），以 IPCC 碳存量估算公式，以獲得第二層級之森林生物碳存量。

表 5-10 各林型碳存量之估算係數

林型 \ 係數	基本比重 (D)	生物量轉換與擴 展係數 (BCEF)	根莖比 (R)	碳含量比例 (CF)
天然針葉林	0.41	0.51	0.22	0.4821
天然針闊葉混淆林	0.49*	0.72*	0.23*	0.4756*
天然闊葉林	0.56	0.92	0.24	0.4691
人工針葉林	0.41	0.51	0.22	0.4821
人工針闊葉混淆林	0.49*	0.72*	0.23*	0.4756*
人工闊葉林	0.56	0.92	0.24	0.4691
木竹混淆林	0.53*	-	0.35*	0.4756
竹林	0.62	-	0.46	0.4732

*：混淆林以純林之平均值作為代表。

林木材積量可以透過森林資源調查或造林清查資料獲得，台灣具有豐富的森林資源，林木本身除了具有經濟價值外，對於國土保安、水源涵養、育樂遊憩以及生物多樣性的維護，身具重要角色。隨著社會經濟環境的演變，在人為或自然的土地使用狀態變遷下，為能掌握全島尺度的森林資源現況，林務局承接過去森林資源調查結果，針對國有林定期進行檢訂調查，截至目前共計四次全國性森林資源調查

(表 5-11)，「地面樣區」調查是森林資源調查的核心工作，為避免人為主觀取樣所可能導致的偏誤，森林資源調查必須採取系統性的取樣；國有林事業區內每間隔 3 公里，區外更加密為每 1.5 公里必須設置一處樣區，共計 3,648 個地面樣區(第四次森林資源調查成果)，配合歷屆調查結果，建立森林資源之長期監測體系。

表 5-11 歷屆全國性森林資源調查表

項目	第一次	第二次	第三次	第四次
調查時間	1954~1956 年	1972~1977 年	1990~1993 年	2008~2014 年
主辦單位	農復會	林務局	林務局	林務局
涵蓋範圍	未覆蓋全國	覆蓋全國	覆蓋全國	覆蓋全國
地面樣區	545	4132	3966	3648
調查項目	1. 林木面積、材積；生長量、枯死量。 2. 土地利用情況。	1. 森林資源現況、土地利用情況。 2. 勘測農牧開發潛能之區域。 3. 蒐集森林經營及山坡地開發所需基本資料。 4. 集水區、森林遊樂區、自然生態保育區、濫墾或超限利用地區等研究與劃定。	1. 全島土地利用狀況、森林資源面積及蓄積量資料。 2. 全島造林清查，瞭解林木生育狀況。 3. 林地分類 4. 全島森林遊樂資源勘查。 5. 建立森林地理資訊系統。 6. 全島野生動植物資源分佈狀況，建立基礎資料庫。	1. 全國森林分佈及林地土地利用現況。 2. 主要林型之分佈面積、森林碳匯評估、野生動物等資源調查。 3. 建立森林資源之長期監測體系。

資料來源：第四次全國森林資源調查工作總檢討會

(1)地面樣區

「地面樣區」調查是森林資源調查的核心工作，無論航照或衛星遙測技術發展精進下，仍有賴地面調查獲得之「地真」資訊作為驗證(黃群修，2009)。取樣密度依林型分布與地形條件而有不同，惟「系統取樣」與「連續複查」幾乎已成為森林調查一致採行的標準作業方式。由歷屆森林資源調查之地面樣區基本資料顯示(表 5-12)，由第二、三次森林資源調查即採用系統取樣方式，因取樣設計的差異，地面樣點兩期之間分布位置仍不同，使其成果僅能反應各期調查當時整體森林資源的現況，無法進一步掌握林型之生長量及枯死等變異資訊。第四次森林資源調查之取樣位置係以建立在過去調查結果的一致，以利長期森林監測。

表 5-12 歷屆森林資源調查地面樣區基本資料

項目	第一次	第二次	第三次	第四次
地面樣點數	545	4,132	3,966	3,648
取樣方法	逢機取樣	採間隔 3 公里之系統取樣	採間隔 3 公里之系統取樣	國有林事業區內採間隔 3 公里，事業區外則因林地零星分散，將其取樣間隔 1.5 公里
成果比例尺	1/50000	1/25000	1/5000	1/2000

森林資源調查依據聯合國糧農組織(FAO)每 5 年定期發布之「全球森林資源評估報告」，對於森林之定義為：「面積大於 0.5 公頃，樹高 5 公尺以上，樹冠覆蓋率 10%以上，或於原生育地之林木成熟後符合前述條件，但不包括主要為供農作與都市使用之土地」。FAO 對於森林資源的評價方式包含森林面積、立木蓄積、森林碳儲存量等項目，本次調查依據 FAO 之標準，以林木資源現況為主軸，調查森林

各林型面積、蓄積與碳匯量。

地面樣區樣區大小除竹林取 0.01 公頃外，均以 0.05 公頃為原則，惟樣區範圍內如出現 3 株胸徑大於 100 公分樣木時，必須將面積擴增至 0.1 公頃，以避免大徑林木造成單位面積蓄積之高估，濁水溪流域系統樣區點位可參圖 5-1。調查項目表(表 5-13)包括樣區基礎資料：海拔、坡度、方位角、地形、含石率、樹冠密度、地被型態、地被密度、地被高度、主要及次要地被種類、腐植層厚度、腐植層型態。(二) 林木資料：「胸徑大於 6 公分以上的活存林木」必須逐一記錄其樹種、胸高直徑、樹高、枝下高、樹冠級。(三) 枯立木及倒木之直徑、幹長及腐爛程度。(四) 附帶調查：野生動物資源及部落遺址、溫泉地熱、水源地等等。

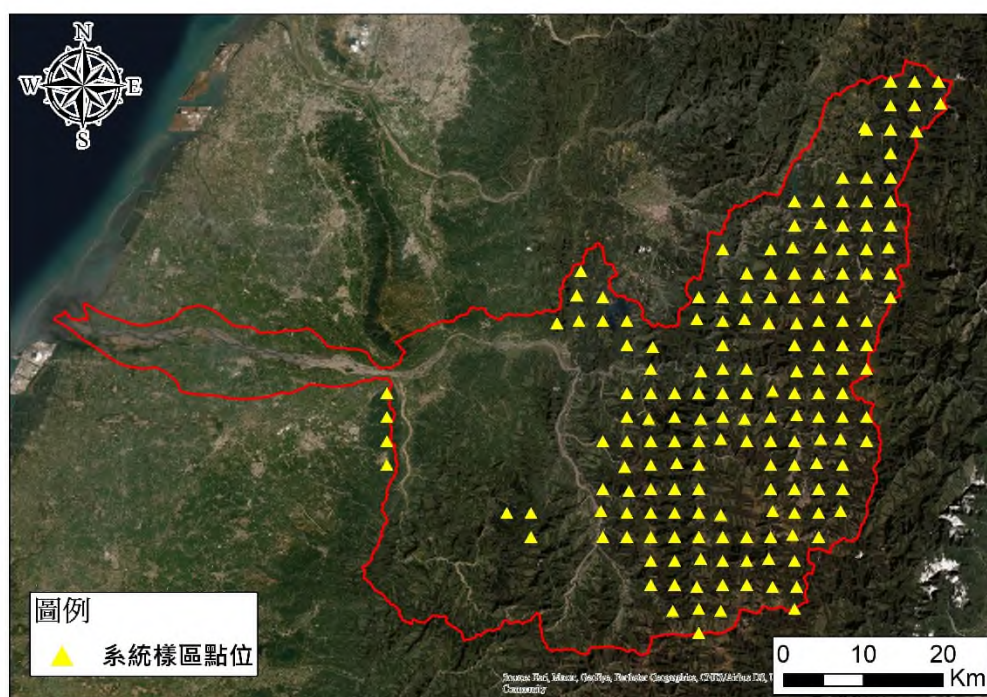


圖 5-1 濁水溪流域系統樣區點位(具有調查資料 97 年至 106 年)

調查工具除測繩及簡易羅盤儀之外，採用 Vetex Laser 400 雷射測距儀以聲波及紅外線量測樣木與樣線距離，並可利用角度測量樹高。

表 5-13 森林資源調查地面樣區紀錄表

○○林區管理處第四次全國森林資源調查地面樣區紀錄表				
基本資料	1. 基本圖圖號	□□□□□□□□	2. 樣點編號	□□□
	3. 系統坐標	(□□□□□□, □□□□□□□)		
	4. 樣區坐標	(□□□□□□, □□□□□□□)		
	5. 調查日期	□□□□□□□□	6. 樣區面積	□.□□
	樣區資料	7. 海拔	□□□□	8. 坡度
9. 方位角		□□□	10. 地形	□
11. 含石率		□□□%	12. 樹冠密度	□
13. 地被型態		□	14. 地被密度	□
15. 地被高度		□	16. 主要地被種類	_____
17. 次要地被種類		_____		
18. 腐植層厚度		□.□公尺	(第 18 及 19 項, 自 97 年 11 月 18 日「第四次全國森林資源調查工作討論」會議決議後調查)	
19. 腐植層型態		□_____		
SP、PC 記述		20. SP 樹種*	_____	21. SP 胸徑*
	22. SP 樹高*	□□. □	23. SP-PC 斜距*	□□□. □
	24. SP-PC 方位角*	□□□	25. SP-PC 高低角*	□□□
	26. SP 座標*	(□□□□□□, □□□□□□□)		
	27. SP 照片檔名*	_____	* 非必要欄位	
	28. PC-S 照片檔名	_____	29. PC-E 照片檔名	_____
	A、B 木記述	30. A 木樹種	_____	31. A 木胸徑
32. A 木樹高		□□. □	33. A 木距離	□□. □□
34. A 木方位角		□□□	35. PC-A 照片檔名	_____
36. B 木樹種		_____	37. B 木胸徑	□□□. □
38. B 木樹高		□□. □	39. B 木距離	□□. □□
40. B 木方位角		□□□	41. PC-B 照片檔名	_____
調查者簽名：				

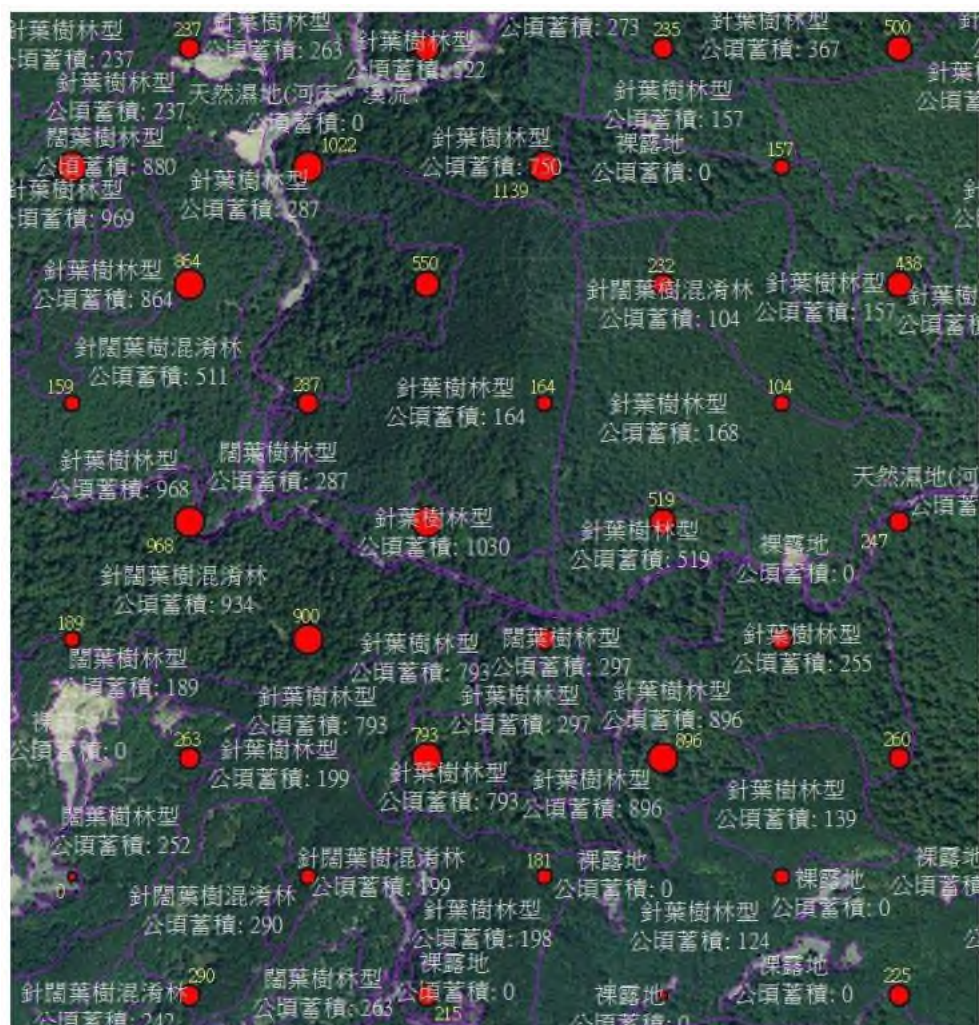
(2)森林蓄積量調查

林木蓄積之調查方式採系統與雙重取樣方式進行，其主要工作包括地面樣區設置及航照樣點判釋：

森林資料調查運用農林航空測量所空載數值航照相機或掃描儀 (Intergraph DMC 或 Leica ADS40)之高解析度(25 公分)數值航照影像，以 3D 林型立體觀測儀判釋圈繪森林之林型、經營類別、主要樹種，並計算其面積，以 GIS 圖層管理。林型分為針葉樹林、針闊葉樹混淆林、闊葉樹林、竹林、竹闊混淆林、竹針混淆林、待成林地等 7 類。經營類別則參考 FAO 的分類標準，依人類干擾的程度、集約管理情形、更新方式等面向，區分為以下 5 類：

- 原生林 (Primary forests)
- 經改造天然林 (Modified natural forests)
- 半天然林 (Semi-natural forests)
- 生產性人工林 (Productive forest plantations)
- 保護性人工林 (Protective forest plantations)

航照樣點判釋之樣點的設置以每 12.5 公頃取一處航照像片樣點進行立體觀測，記錄林分之樹高、冠幅與鬱閉度等三項參數。結合地面實際調查蓄積，求取前揭參數與林分單位面積蓄積之關係式(空中林分材積式)，推算各樣點之單位面積蓄積(圖 6-2)。



圖片來源: 李桃生(2015)

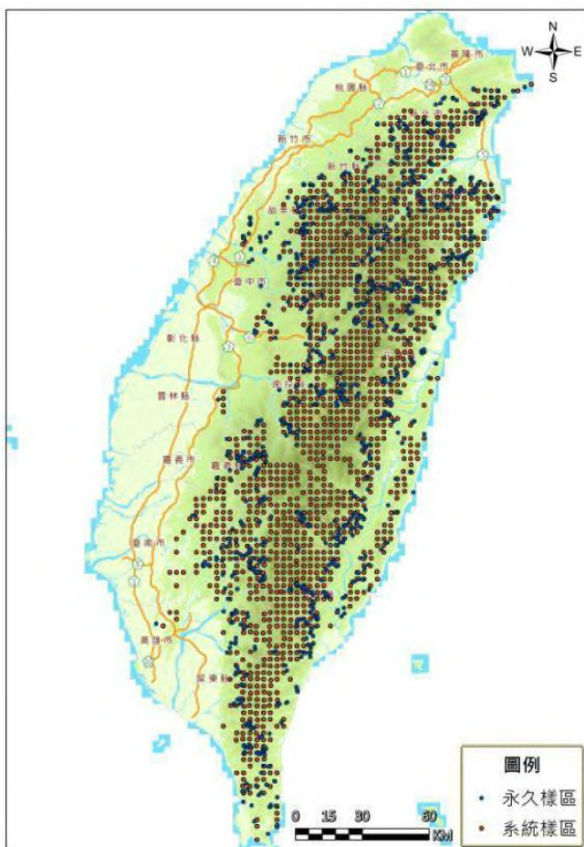
圖 5-2 各樣點森林蓄積量分布

再依地面樣區(圖 6-4a)及航照樣點之結果換算成各林型單位面積蓄積(單位:公頃),得台灣森林林地蓄積量分布圖(圖 5-3b)。依第四次森林資源調查結果,主要林型單位蓄積計算結果如表 5-14,其中各林型以天然針葉樹林型平均每公頃蓄積 499.65 立方公尺最高,竹木混淆林平均每公頃蓄積 67.1 立方公尺最低。竹林樣區則係計算竹材單位面積支數,如屬竹木混淆者並另行計算林木材積。

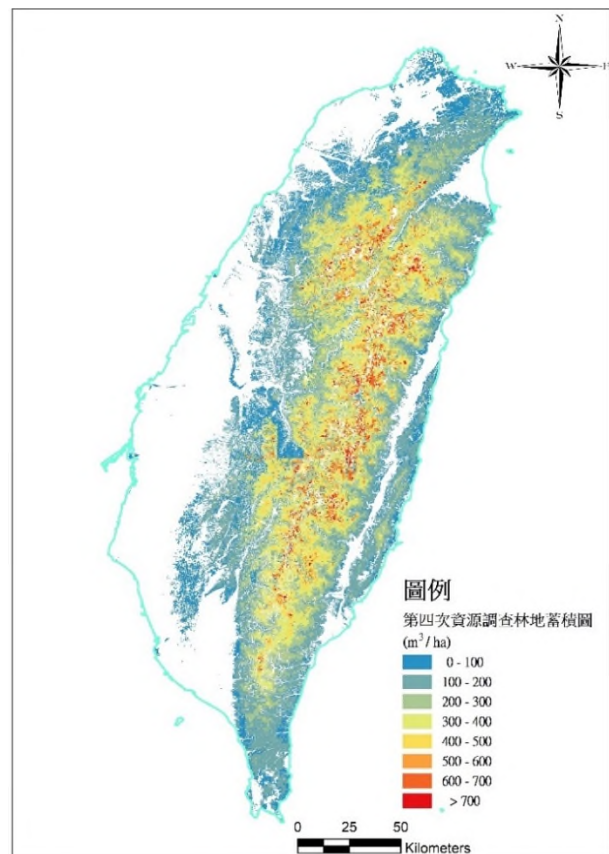
表 5-14 各主要林型及主要樹種單位面積蓄積

林型	總樣區	蓄積量(m^3/ha)	標準誤差(m^3/ha)
天然針葉樹林型	241	499.65	31.08
天然針闊葉樹林型	113	486.28	39.20
闊葉樹林型	2073	198.95	4.07
人工針葉林	153	318.05	18.58
人工針闊葉樹林型	75	287.77	25.57
人工闊葉樹林型	135	147.66	15.83
竹林(單稈)	230	14,929 支	3,261
竹林(叢生)	296	10,618 支	3,914
竹木混淆林	314	67.1	14.06

資料來源:第四次森林資源調查



圖片來源:第四次森林資源調查報告



a. 系統樣區及永久樣區分布

b. 第四次森林資源調查蓄積量分布

圖 5-3 地面樣區及蓄積量分布圖

(3)永久樣區

國家及區域的森林資源調查資訊，均配合複查頻率每 5 年即發布乙次，此外聯合國糧農組織自 1990 年起，每 5 年定期發布全球森林資源狀況評估報告，相較之下，我國歷次全國森林資源調查間隔將近 20 年，且地面樣區達 3,648 個，樣點均勻的散布於廣大的山區，大部分均無步徑可循，在國有林事業區有 1,648 個樣點，平均每個樣點須花 3.13 天調查；區外林地有 2,000 個樣點，總調查天數 1,790 天，平均每個樣點須花 0.89 天，總調查共歷經 4 年。透過系統樣區之地面調查更新頻率已無法滿足現代資訊需求，亦無法與國際接軌。

為獲取林木生長資訊，林務局自民國 86 年起，陸續於全島不同林型與海拔高度設置森林永久樣區，每 5 年複查一次，迄今獲得 2 至 3 輪之生長資訊，並已依據該資訊建立 12 種主要樹種之蓄積生長模式。然森林永久樣區並非以系統方式取樣，容易受人為主觀影響，造成蓄積推估偏高情形，因此其最主要的目標在於累積長達 10 至 15 年連續長期的調查資料，仍是臺灣林木生長與枯死數據直接的來源，而非森林蓄積的推估。

永久樣區設置大小以 0.1 公頃、0.05 公頃及 0.02 公頃為標準。樣區林型其平均生長量及年平均生長率大多呈正成長，部分樣區樣木遭天然災害影響而損壞流失呈負成長，濁水溪流域內依各事業區(圖 6)各劃分為埔里、阿里山、濁水溪、丹大及巒大事業區，其各事業區之永久樣區數量及歷次調查年份如下：

埔里事業區 99 個 (90、95、100、105)

阿里山事業區 16 個 (90、95、100、105)

濁水溪事業區 100 個 (91、96、106)

丹大事業區 84 個 (86、91、96、101、106)

巒大事業區 86 個(87、92、97、102)

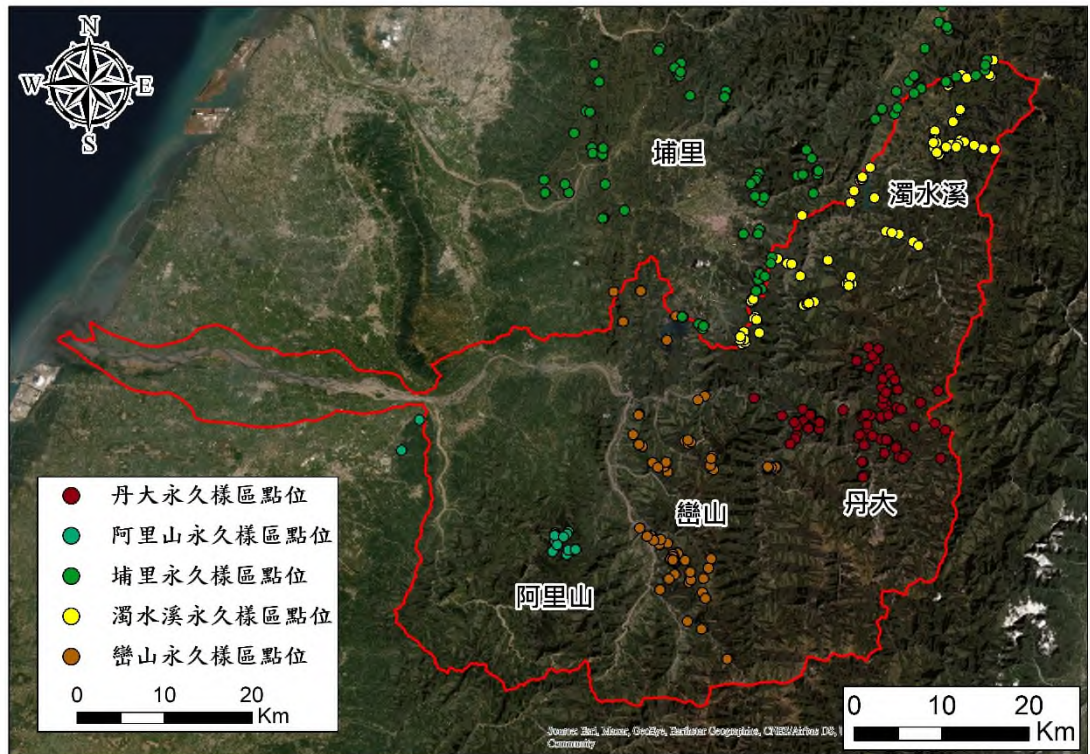


圖 5-4 濁水溪流域永久樣區分布

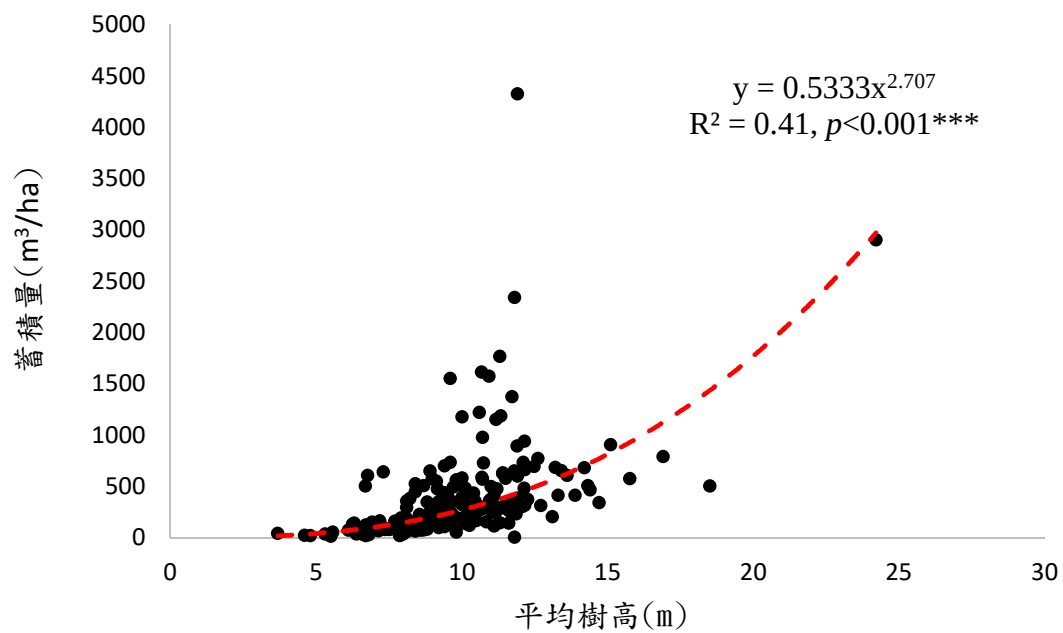
林務局目前已依據樣區代表性及考量調查成本，篩選應實施複查的系統樣區計 1,376 個(約 84%)，永久樣區計 954 個(約 31%)，於 102 年起展開複查作業。原則上每 5 年複查 1 次，惟有 154 個樣區偏遠、調查成本較高，每 10 年複查 1 次。將來全國或區域尺度之森林蓄積仍由系統樣區之單位蓄積結合林型面積推估，未實施複查之系統樣區結合永久樣區之林型生長率估算其單位蓄積。

3. 地面樣區調查資料與蓄積量推估

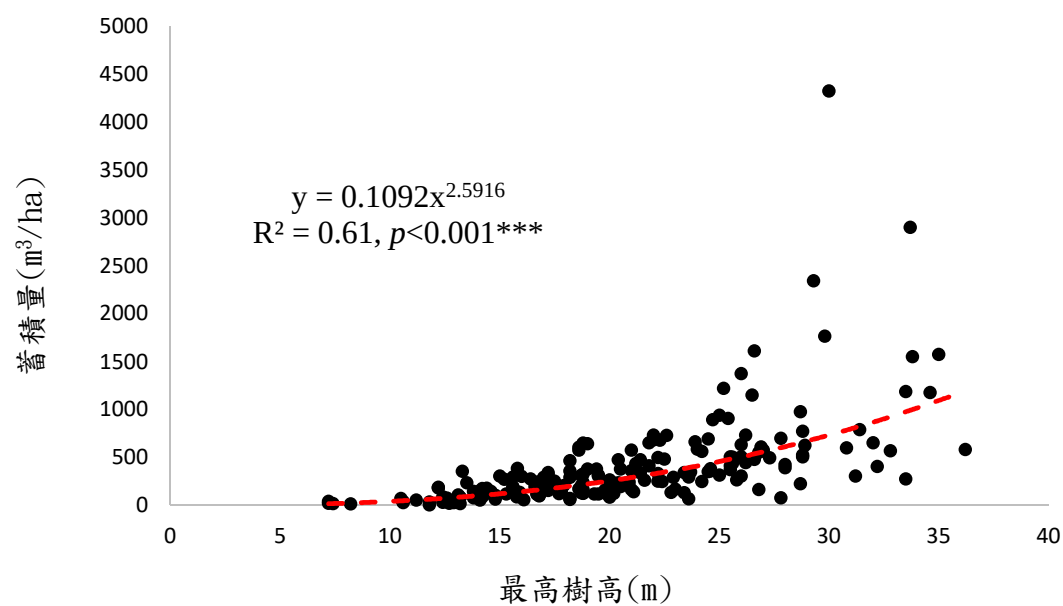
空載光達點雲數據可即時推估樹冠高程之特性，並利用樹高加以推求林分蓄積量，快速評估林地碳存量。藉由實際調查資料之樹高及蓄積量進行統計分析，建立樹高與林分蓄積量迴歸推估式。依據各林區管理處自 97 年至 106 年之地面樣區(系統樣區)進行每木調查資料，蒐集樹種、胸高直徑、樹高資料與樣區實際 GPS 點位，透過林務局台灣林產物處分調查用(1997)立木材積求積式，將調查資料計算每公頃林分蓄積量，其材積求積式如公式(2)。

$$\text{材積}=(\text{胸高直徑})\times(\text{胸高直徑})\times 0.79\times\text{樹高}\times 0.45 \quad (2)$$

本研究使用濁水溪流域自 97 年至 106 年共計 202 個地面樣區調查資料，並由各地面樣區調查資料計算總立木材積量並換算為林分蓄積量(m^3/ha)；天然林因林相組成複雜，當樣區內的樹木材積量落差大時，常因單一或是少數巨型的立木如扁柏、紅檜及台灣鐵杉等老樹巨木(單株(胸高直徑 242cm、29.3m)蓄積量可達 61 m^3)，造成整體單位蓄積量提高，達到 $4000 \text{ m}^3/\text{ha}$ 以上。因此統計各樣區之每木平均樹高、單株最高樹高分別與蓄積量進行迴歸分析。將平均樹高及最高樹高資料分別作為解釋變數(x)，與應變數蓄積量(y)，分別建立乘冪迴歸模型，結果顯示(圖 5-5)，在平均樹高方面迴歸式呈現低度相關性(R^2 僅達 0.41，而兩者具有顯著水準 $p<0.001$)；另在最高樹高方面迴歸式達到中度相關性($R^2=0.61$ ，同樣具有顯著水準 $p<0.001$)。



(a) 平均樹高



(b) 最高樹高

圖 5-5 樹高與林分蓄積量迴歸推估模式

另將平均樹高與最高樹高之差值作為衡量指標，為降低單一大型植株影響整體蓄積量，將平均樹高與最高樹高差異較大的地面樣區進行剔除，並將平均樹高與蓄積量重新進行迴歸分析，分別以差異 20 公尺、15 公尺、10 公尺及 5 公尺以上的樣區進行扣除，其迴歸分析結果顯示(表 5-15)，在將平均樹高與最高樹高之差值達 10 公尺以上的樣區扣除後(圖 5-6)，整體的迴歸分析最高的模型相關性($R^2 = 0.53$, $p < 0.001$)，判定係數亦提升 0.12，而在扣除後差異 5 公尺的迴歸分析結果模型相關性有降低趨勢($R^2 = 0.37$, $p < 0.001$)，因整體樣本數降低至 33 個導致模型代表性不足而導致，其判定係數降低 0.04。

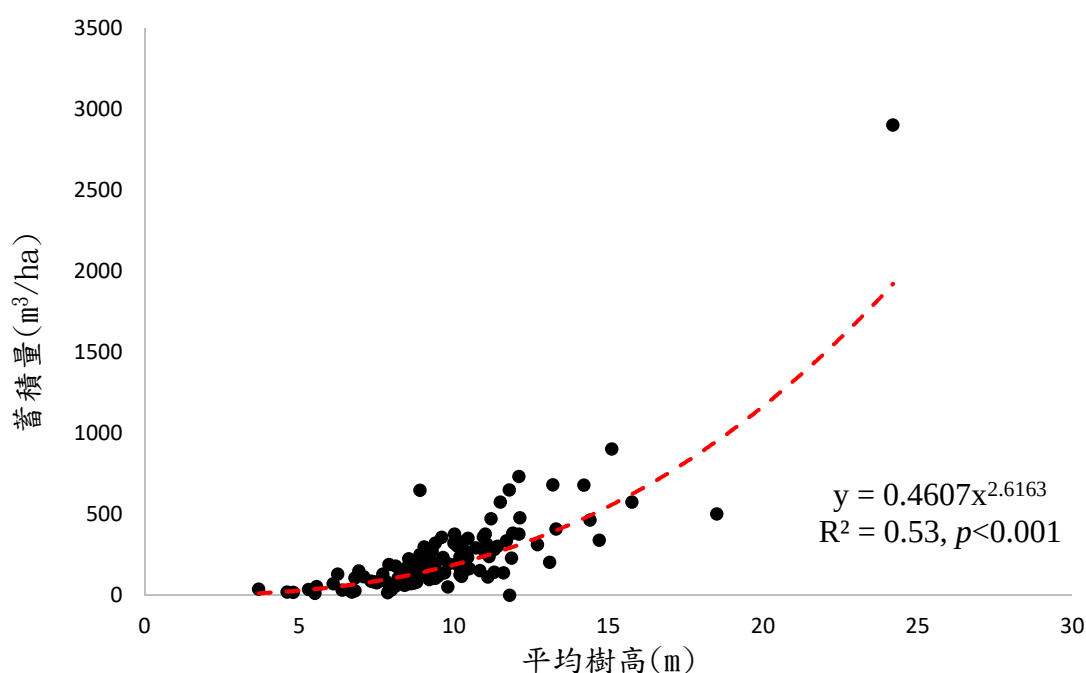


圖 5-6 平均樹高與林分蓄積量迴歸推估模式(10 公尺內)

表 5-15 扣除樣區樹高差異之迴歸分析成果表

平均樹高與最高樹高之 差值範圍	樣點數	迴歸式	R ²
20 公尺內	193	$y = 0.5765x^{2.6557}$	0.42***
15 公尺內	163	$y = 0.5772x^{2.5924}$	0.48***
10 公尺內	115	$y = 0.4607x^{2.6163}$	0.53***
5 公尺內	33	$y = 0.875x^{2.138}$	0.37***

透過系統樣區樹高與蓄積量之迴歸式，即可應用樹高資料當作解釋變數(x)，利用迴歸式($y = 0.4607x^{2.6163}$)進行蓄積量(y)之推估。

3. 層級三 (Tier 3)

層級三是最高級別的估算方法，例如建置模式及監測系統來分析不同時間內各地碳存量變化。第三層級所需系統也可以用地理資訊系統為基礎，結合林齡、林地分類、生產數據調查和土壤調查，並與多個監測系統相互整合。本研究根據林地碳存量的重要特徵萃取相關環境指標，建立可動態評估林地碳存量的概念模型。

第六章 碳存量推估模式建置

第一節 模型建置樣區

研究樣區選定濁水溪流域，考量碳存量評估模式建置之環境指標中的高精度數值地形模型資料屬國家管制資料，故本創新研究試以流域尺度進行建模，後續試需求逐步推向評估全台農村。濁水溪流域位處臺灣中部地區，流經彰化縣、雲林縣、南投縣、嘉義縣四大縣(圖 6-1)與二十一鄉鎮，流域面積約為 3,156.9 平方公里。濁水溪流域邊界係以水利署公告為準，其中濁水溪流域內已核定農再社區總計共有 55 處。

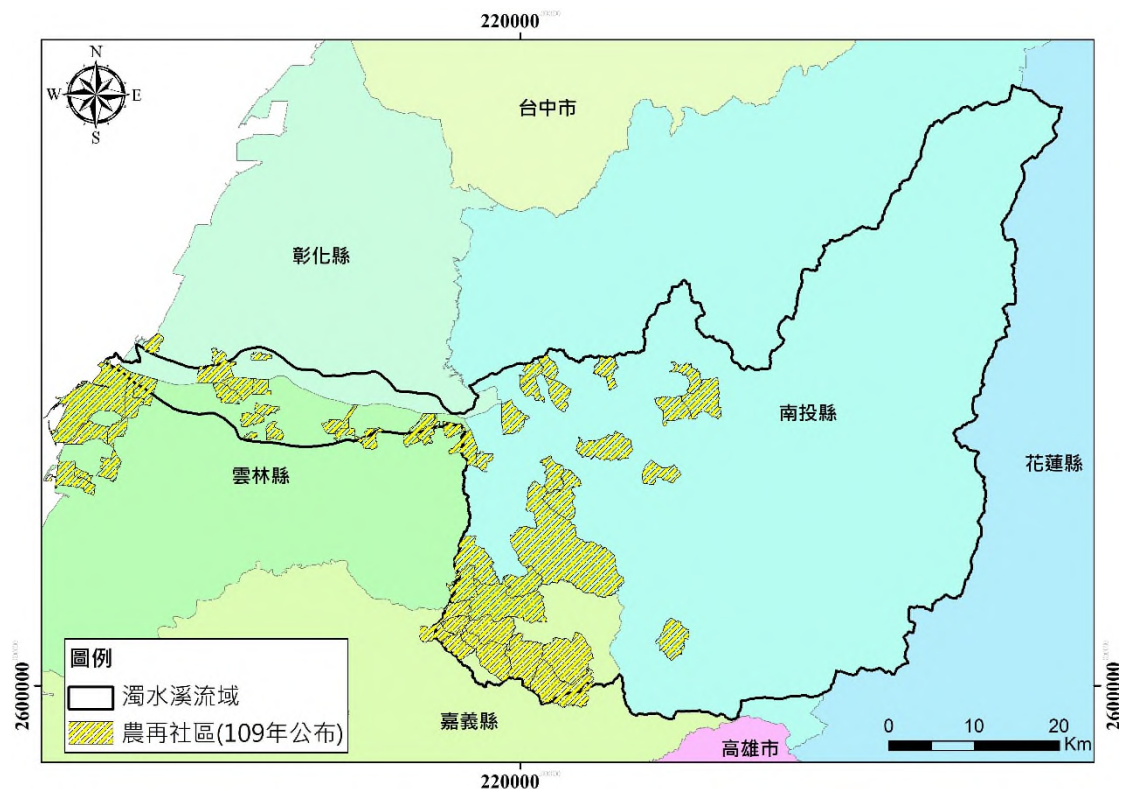


圖 6-1 濁水溪流域內的農再社區之空間分布

依據農村再生整體發展計畫將台灣農村可概括劃分為「一般型、原民型、山村型、漁村型、離島型」等五種發展功能類型。參照水土保持局提供之農村再生分類資料，首先將濁水溪流域內 55 個農再社

區分為漁村型、原民型，再透過 110 年度山坡地範圍圖再劃分為一般型及山村型，而本區無離島型。經功能類型劃分結果顯示(圖 6-2)，一般型共有 21 處；原鄉型 3 處；山村型共有 25 處；漁村型 5 處(表 6-1)；另南投縣魚池鄉頭社社區因鄰近日月潭，又為原住民邵族之傳統活動領域，分類上屬於原民及漁村複合型。

各農再社區之基本屬性資料建置項目包含有社區基本資料(編號、縣市、鄉鎮、村里、社區名稱、核定年、社區面積)、社區發展功能類型，據此農再社區資訊目錄作為後續社區碳存量評估之依據，參考表 6-2。

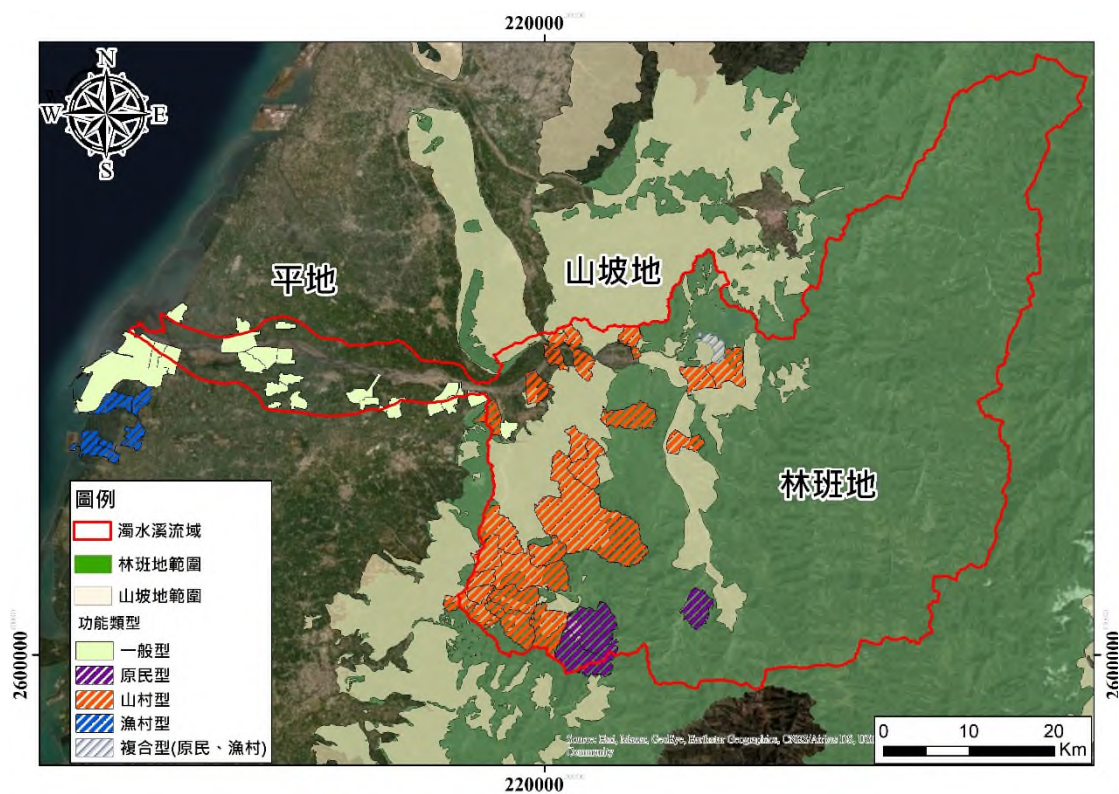


圖 6-2 農再社區之功能類型成果

表 6-1 55 處農再社區發展功能類型統計表

發展功能類型	農村數量
一般型	21
原民型	3
山村型	25
漁村型	5
離島型	無
複合型	1 (水里鄉頭社社區)

表 6-2 濁水溪流域內的農再社區資訊

序列	縣市	鄉鎮	村里	社區名	面積 (ha)	核定年	功能類型
1	彰化縣	大城鄉	西港村	西港社區	355	102.04	一般型
2	彰化縣	大城鄉	潭墘村	潭墘社區	1,067	104.02	一般型
3	彰化縣	竹塘鄉	土庫村	土庫社區	174	102.05	一般型
4	南投縣	竹山鎮	德興里	柯仔坑社區	293	106.11	一般型
5	雲林縣	麥寮鄉	三盛村	三盛社區	762	102.09	一般型
6	雲林縣	麥寮鄉	新吉村	新吉社區	597	103.07	一般型
7	雲林縣	麥寮鄉	中興村	中興社區	4,117	105.12	一般型
8	雲林縣	莿桐鄉	興桐村	孩沙里社區	208	102.07	一般型
9	雲林縣	莿桐鄉	麻園村	蒜鄉麻園社區	384	103.02	一般型
10	雲林縣	莿桐鄉	興貴村	興南社區	54	103.03	一般型
11	雲林縣	莿桐鄉	義和村	義和社區	455	105.1	一般型
12	雲林縣	林內鄉	林北村	林北社區	329	100.06	一般型
13	雲林縣	林內鄉	烏塗村	烏塗社區	373	104.07	一般型
14	雲林縣	林內鄉	重興村	重興社區	588	105.01	一般型
15	雲林縣	二崙鄉	大義村	大義社區	326	103.09	一般型
16	雲林縣	二崙鄉	來惠村	來惠社區	91	103.1	一般型
17	雲林縣	二崙鄉	崙東村	崙東社區	305	104.12	一般型
18	雲林縣	二崙鄉	永定村	永定社區	274	105.09	一般型
19	雲林縣	二崙鄉	港後村	四番地社區	601	106.03	一般型
20	雲林縣	二崙鄉	楊賢村	楊賢社區	344	107.07	一般型
21	雲林縣	二崙鄉	大庄村	大庄社區	501	108.06	一般型

22	嘉義縣	阿里山鄉	來吉村	來吉社區	2,347	105.02	原民型
23	嘉義縣	阿里山鄉	十字村	十字社區	2,344	107.02	原民型
24	南投縣	信義鄉	同富村	桐林社區	1,128	103.07	原民型
25	嘉義縣	梅山鄉	碧湖村	碧湖社區	455	109.05	山村型
26	嘉義縣	梅山鄉	太平村	太平社區	560	101.06	山村型
27	嘉義縣	梅山鄉	太興村	太興社區	679	105.05	山村型
28	嘉義縣	梅山鄉	太和村	太和社區	1,764	106.02	山村型
29	嘉義縣	梅山鄉	龍眼村	龍眼社區	538	105.05	山村型
30	嘉義縣	梅山鄉	瑞里村	瑞里社區	1,571	108.06	山村型
31	嘉義縣	梅山鄉	瑞峰村	瑞峰社區	1,433	108.06	山村型
32	南投縣	水里鄉	上安村	上安社區	785	100.07	山村型
33	南投縣	水里鄉	頂崁村	頂崁社區	882	106.08	山村型
34	南投縣	水里鄉	民和村	民和社區	1,390	106.06	山村型
35	南投縣	名間鄉	濁水村	濁水社區	402	103.09	山村型
36	南投縣	竹山鎮	富州里	富州社區	671	101.04	山村型
37	南投縣	竹山鎮	社寮村	社寮社區	397	101.08	山村型
38	南投縣	竹山鎮	桶頭里	桶頭社區	1,664	104.11	山村型
39	南投縣	竹山鎮	延正里	延正社區	823	108.06	山村型
40	南投縣	竹山鎮	大鞍里	大鞍社區	8,263	106.02	山村型
41	南投縣	鹿谷鄉	竹豐村	竹豐社區	731	102.1	山村型
42	南投縣	鹿谷鄉	竹林村	竹林社區	1,285	104.11	山村型
43	南投縣	鹿谷鄉	永隆村	永隆社區	1,463	106.07	山村型
44	南投縣	集集鎮	隘寮里	隘寮社區	415	108.12	山村型
45	南投縣	集集鎮	廣明里	廣明社區	616	105.08	山村型
46	雲林縣	林內鄉	坪頂村	坪頂社區	703	103.08	山村型
47	雲林縣	古坑鄉	樟湖村	樟湖社區	987	102.09	山村型
48	雲林縣	古坑鄉	草嶺村	石壁社區	984	103.1	山村型
49	雲林縣	古坑鄉	草嶺村	草嶺社區	2,970	105.01	山村型
50	雲林縣	麥寮鄉	海豐村	楊厝社區	442	101.08	漁村型
51	雲林縣	麥寮鄉	海豐村	海豐社區	785	103.08	漁村型
52	雲林縣	臺西鄉	五港村	五港社區	957	103.07	漁村型
53	雲林縣	臺西鄉	和豐村	新興社區	562	104.09	漁村型
54	雲林縣	臺西鄉	永豐村	永豐社區	169	108.05	漁村型
55	南投縣	魚池鄉	頭社村	頭社社區	574	105.09	複合型

本研究彙整

第二節、模型建置基礎

二氧化碳的儲存，主要仰賴林木進行光合作用吸收大氣之中的二氧化碳，將大氣中的無機碳轉化為有機碳形式儲存於林木體內，利用植生指標來反映植物行光合作用的強弱；碳儲存會依據林木材積生長而有差異，而材積量多寡則利用林木胸徑與樹高間接求得；另外植物體之枯枝落葉將碳儲存於林地表面，一部份經直接分解、腐爛、散逸而將碳回歸於大氣中，另部份則分解為土壤有機質，其儲存量約佔全部固定態碳的三分之二，頗為可觀 (Environmental Protection Administration, 2018)。

本研究透過萃取環境指標結合林業單位調查成果，建立層級三的碳存量評估模式。由於林地生態系統極其複雜，為了合理的評估林地碳存量之空間分布，識別林地碳存量的關鍵指標為其重要，並使用概念模型對其進行動態評估。模式概念以 IPCC (2014) 第五次評估報告中提出的災害風險評估為軸，並定量分析各種環境指標對於碳存量的影響。模型中主要用於計算外力（外部因素）和內力（區位因素）的組合，量化森林碳儲量的空間分佈。由於災害風險的概念，常會用以評估事件發生所產生的負面影響，然隨著風險評估的發展，不同領域對風險的定義和評估目標也有所不同，風險產生的結果也可以把它反轉過來作為保育或保護的思維 (Wu et al., 2022)，將其作為評估碳存量之概念模式。

環境指標以 NDVI 作為模型的外部因子，透過植物光合作用來反映綠覆情形；TWI 作為區位因子來表示土壤深度的化育潛勢；CHM 可以獲取植株的生長高度作為修正因子，木本植物和草本植物都能光合作用，但木本植物為多年生，材積量自然與草本植物差異甚巨，利用植體株高可反映材積的大小，以三項關鍵的環境指標的來建置碳存

量評估模式之基礎。

由於計算出的 NDVI、TWI 及 CHM 範圍較廣，亦有負值，為判斷各個指標對潛在碳存量的影響，需要對各個指標進行正規化 (Yingmin et al., 2019)，以平衡各個指標在計算中的權重。正規化公式如下(3)：

$$\text{Normalization} = \frac{(X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (3)$$

估算的碳存量指標(CSI_{st})及碳通量指標(CSI_{fx})只是一個指標值，無法獲得實際的碳存量。因此，有必要通過與實測數據的相關性分析來獲得估算的成果。

由於碳庫的組成可分為生物量、枯有機質和土壤碳，其碳存量主要受植物類型、樹齡和環境的影響。碳存量是一定時間內透過植物行光合作用增加材積量及枯枝落葉層而累積的總量。可利用相關網格數據提取的光合作用、地形濕度、樹高進行「加總」綜合評估。

植物的碳通量主要描述了其單位時間內的碳儲量，測量重點在於初級生產，植物的初級生產受環境脅迫（乾旱、風害、病蟲害、火災、倒塌等）的影響較大，可利用風險評估模式計算各影響因素的「乘積」。碳存量和碳通量的公式如下(4)與(5)：

$$CSI_{st} = mNDVI + mTWI + mCHM \quad (4)$$

$$CSI_{fx} = mNDVI \times mTWI \times mCHM \quad (5)$$

式中： CSI_{st} 為碳存量指數， CSI_{fx} 為碳通量指數； $mNDVI$ 、 $mTWI$ 、 $mCHM$ 分別是 NDVI、TWI 和 CHM 正規化後的結果。

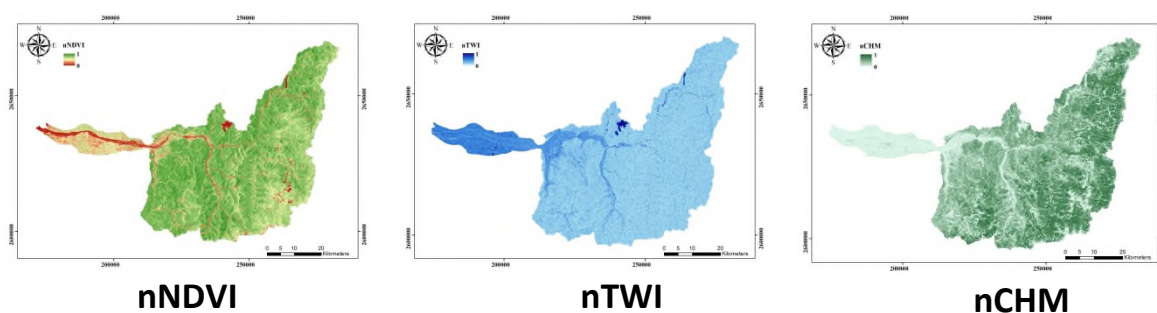


圖 6-3 各類指標正規化之空間分布

透過蒐集數值高程/地表模型、衛星遙測影像、調查資料、資料等各機關產製之數據萃取相關環境指標，透過潛勢指標與現地調查之間的關係，推估碳存量空間分布圖，研究流程圖(圖 6-4)。

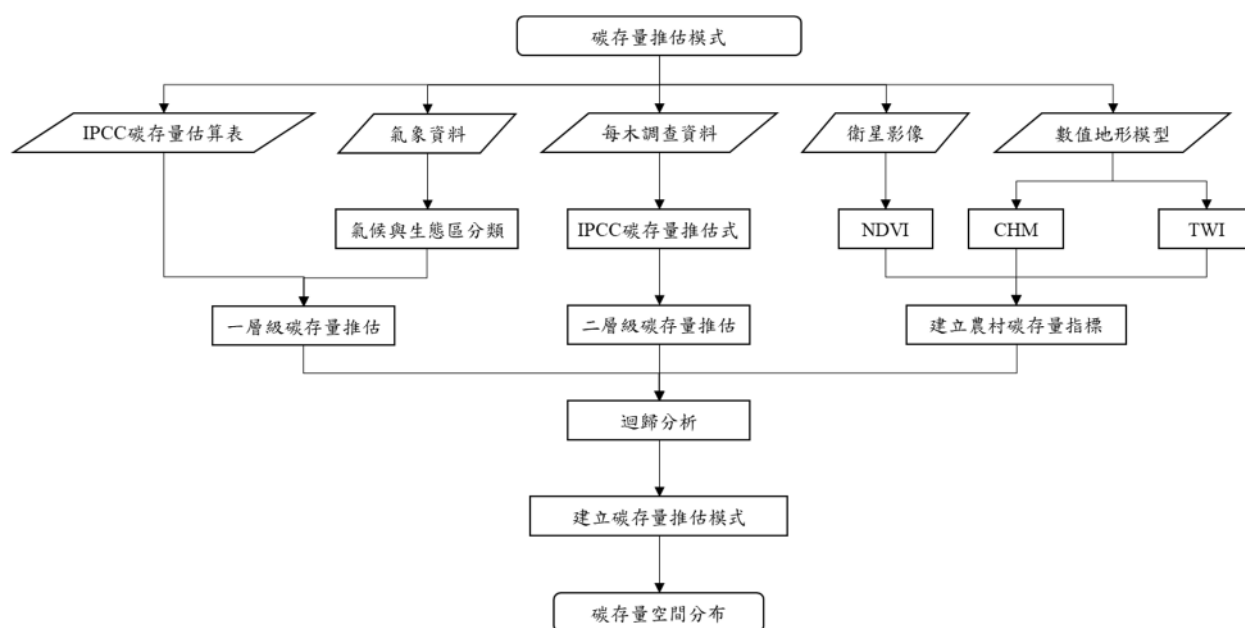


圖 6-4 碳存量推估模式流程圖

第三節、模式建置及環境指標萃取

1. 流域氣候分帶劃分

台灣位處亞熱帶島嶼國家，受到季風及地形因素而有多樣的生態類型，生態區受到溫度、降雨及蒸發量之多寡而有差異，形成不同的氣候帶及生態區系，依據 IPCC 的碳存量估算指南係以聯合國糧食及農業組織(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)之氣候帶與生態區進行分類，作為選用其估算所屬區域之估算係數，進而推估第一層級碳存量。氣候區與生態區劃分標準(表 6-3)，首先以劃分氣候帶為主，以月均溫度狀況作為依據(Köppen, 1931)，將世界氣候劃分為五種主要的柯本氣候類型。生態區分區標準：以各月均溫、乾濕季數(雨量、蒸發散)及海拔高程進行細分。

以流域周遭共計 42 站 20 年長期氣象站資料，使用克利金法推估氣溫及降雨量，可得到十二個月份之月平均溫度及降雨量之空間分布圖層(設定空間解析度為 200 公尺)。氣溫推估方面，因山區觀測站相對數量稀少(圖 6-5)，但受地形起伏導致溫差影響效益大，因此，除了透過克利金法亦配合數值地形資料(Digital Elevation Model, DEM)輔助加以修正，考量「環境溫度遞減率」進行內插修正；以海拔高度超過 100 公尺的格點進行修正，該格點與鄰近的氣象站之海拔差異，計算與氣象站之環境溫度遞減率推估其遞減氣溫，並透過由克利金法所計算之氣溫兩者平均得到推估氣溫。透過網格式之氣溫及降雨量空間分布，建構流域高解析度氣候生態區劃分，依序製作氣候帶圖層與生態區圖(圖 6-6)，主要由亞熱帶濕潤森林及亞熱帶山地系統為主，涵蓋部分溫帶山地系統、寒帶山地系統及位於玉山主峰的極地氣候。

表 6-3 氣候區與生態區分區標準(FAO, 2001)

氣候帶	名稱	生態區系
Tropical 每個月均溫皆 大於 18°C	Tropical rain forest, TAr Tropical moist deciduous forest, TAWa Tropical dry forest, TAWb Tropical shrubland, TBSh Tropical desert, TBWh Tropical mountain systems, TM	冬季，乾季小於三個月 冬季，乾季三到五個月 冬季，乾季五到八個月 半乾燥：蒸發量大於降 雨量 每個月皆乾季 海拔大於 1000 公尺 無乾季
Subtropical 月均溫大於 10°C 有八個月 以上	Subtropical humid forest, SCf Subtropical dry forest, SCs Subtropical steppe, SBSH Subtropical desert, SBWh Subtropical mountain systems, SM	冬雨夏乾：季節乾旱 半乾旱：蒸發量大於降 雨量 每個月皆乾季 海拔大於 800 公尺 最冷月均溫大於 10°C
Temperate 月均溫大於 10°C 有四到八 個月	Temperate oceanic forest, TeDo Temperate continental forest, TeDc Temperate steppe, TeBSk Temperate desert, TeBWk Temperate mountain systems, TeM	最冷月均溫小於 10°C 半乾燥：蒸發量大於降 雨量 每個月皆乾季 海拔大於 800 公尺
Boreal 月均溫大於 10°C 小於三個 月	Boreal coniferous forest, Ba Boreal tundra woodland, Bb Boreal mountain systems, BM	針葉樹密林 稀疏樹林 海拔大於 600 公尺
Polar 每月均溫皆小 於 10°C	Polar, P	每月均溫皆小於 10°C
氣候域：以月均溫度狀況作為依據，同 Köppen-Trewartha 氣候組別(Köppen, 1931)。 乾旱月份：總降水量(mm) ≤ 2 x 月均溫度(°C)。		

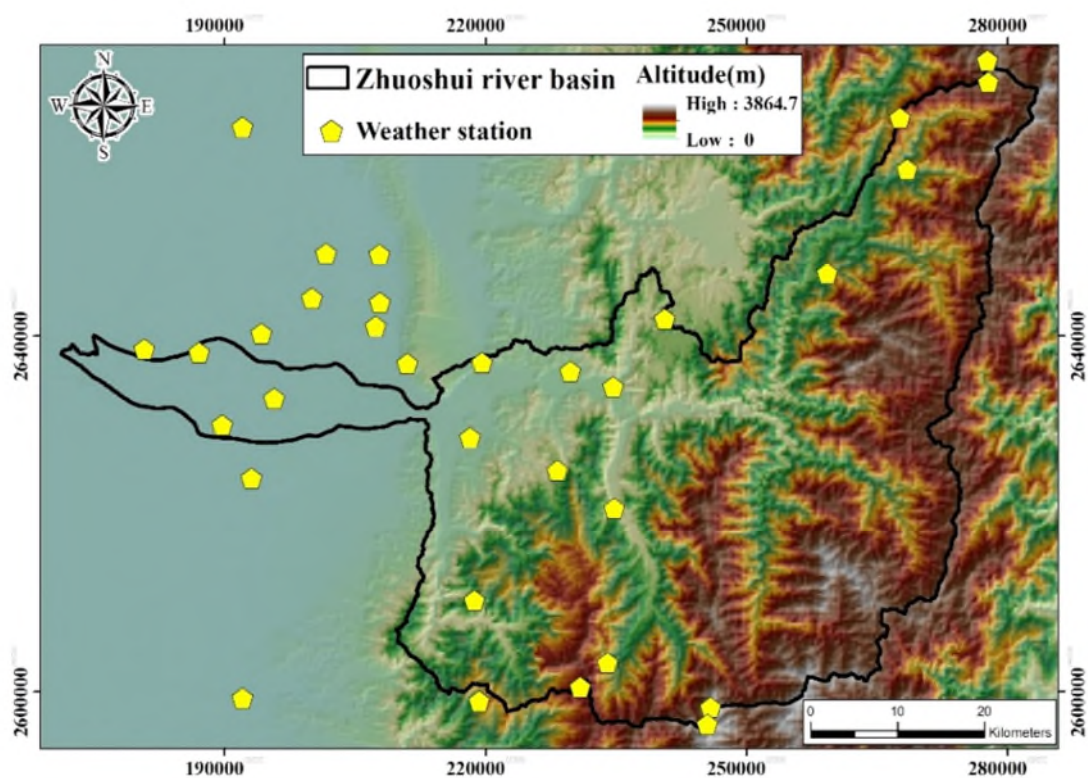


圖 6-5 流域周遭氣象站及海拔

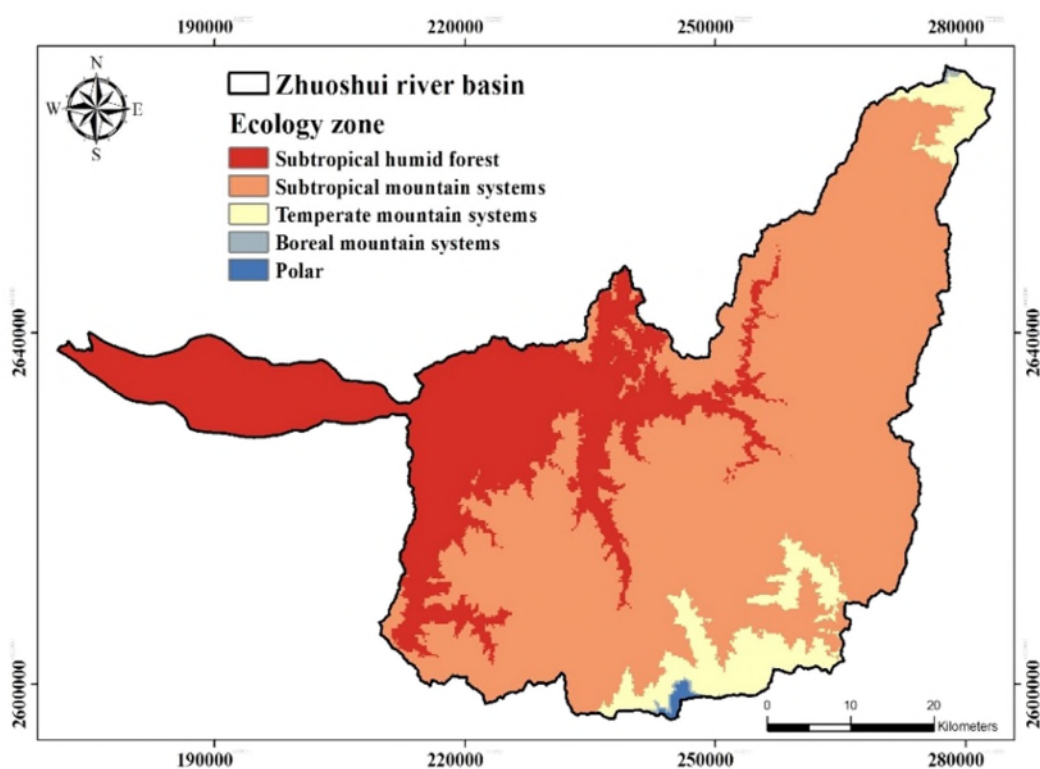


圖 6-6 流域氣候及生態區劃分結果

2. 常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)

常態化差異植生指標(NDVI)可判斷地表受植生覆蓋程度，以植物吸收紅光(R)行光合作用，反射近紅外光(NIR)之特性，可用於判別地表植生覆蓋程度 (Rouse et al., 1973)，並可以用於區別地覆情形，林昭遠(2010)透過 NDVI 評估碳存量優劣之評估指標。NDVI 其計算式如下(5)：

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (5)$$

3. 地形濕度指標(Topographic Wetness Index, TWI)

地形濕度指標最早為 Beven and Kirkby (1979)所提出，為水文模式(Topography based hydrological Model)主要概念模式之一。其中考慮兩個因素，為坡度與上游集水面積(圖 6-7)。當坡度較陡時，導致逕流流速快，土壤堆積能力較差，反之若坡度較緩時，則土壤化育及堆積能力較佳，故土壤深度較深。當上游集水區面積較大，能夠接收上游集水區經逕流運輸的土砂，若恰為坡度平緩處則此處為土壤化育及堆積較多區位。地形濕度指標的公式如下(6)：

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \theta}\right) \quad (6)$$

式中： A_s =單位寬度集水面積， θ = 網格坡度。

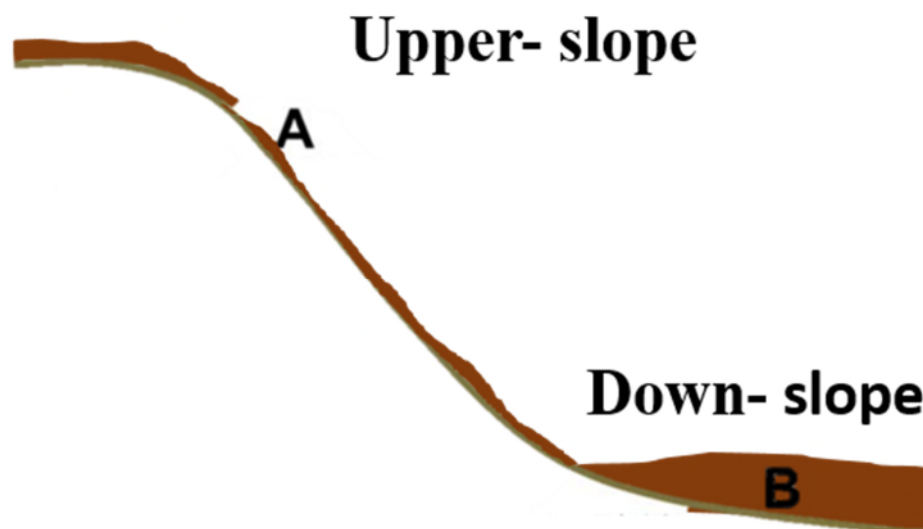


圖 6-7 地形濕度指標概念

4. 樹冠高度模型(Canopy Height Model, CHM)

因 NDVI 僅能代表植生覆蓋程度，木本植物和草本植物具有不同的固碳能力，而且草生地光合作用旺盛，因此僅使用 NDVI 可能會有所誤判。一般林木需要足夠土壤提供林木生長養分與水分，窪地、坑洞及坡腳處通常土壤較厚，較常有高大樹木存在；而陡峭的坡面其土壤厚度淺薄，使林木根系生長受限。因此利用樹冠高度可作為模式合理調整值。以同期 DSM 與 DEM 數值模型差值得樹冠高度模型，計算公式如下(7)：

$$CHM = DSM - DEM \quad (7)$$

第四節、模式驗證

模型驗證分為樣區驗證和網格驗證，樣區驗證主要使用林分樣區的實測材積(圖 6-8)，網格驗證主要使用系統樣區的樹高-材積公式，使用 Tier-2 方法估算樣區/網格的碳存量，並分析與模式估計指標值的相關性。相關分析的決定係數和顯著性水平用於評估模式的準確性。

網格樣本數根據 Yamane 1967 年提出的公式 ($n = \frac{N}{1+N(e^2)}$) 計算；其中：n 是訓練樣本，N 是總體數量，e 是信賴水準(Yamane, 1967)。因平均樹高與林分蓄積量迴歸推估模式有效樹高為 0~25m，將原 CHM 修正至 0~25m 以配合樹高蓄積量推估式。取點方式：將 CHM 分為五個等級，每個等級以隨機的方式各取 100 點，共 500 個點，扣除無林分資料及土地利用為竹林之點位，剩餘 366 點供網格驗證。

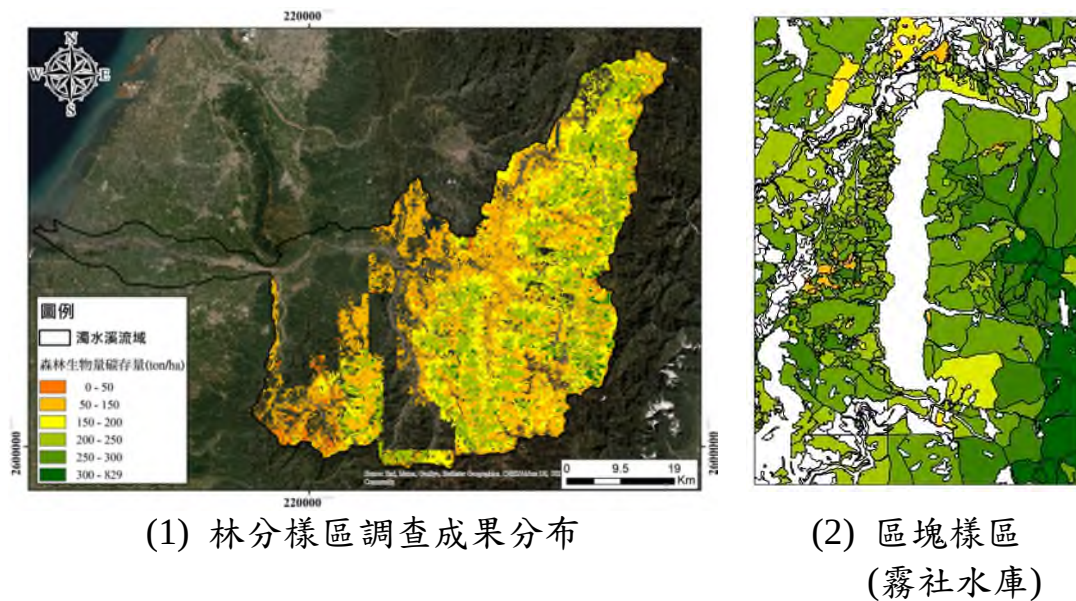


圖 6-8 模式驗證之基礎單元

第五節、IPCC 層級一估算成果

IPCC 國家溫室氣體清單指南 (2019) 提供的基本方法和預設值可以直接使用，無需細分活動數據。根據氣候生態區(圖 6-5)，可以計算出每個生態區的地上生物量面積、地下生物量與地上生物量的比值，以及該區域內森林的生物量，最終可以乘以 IPCC 推薦的碳轉換因子可得該地區的碳存量(表 6-4)。

表 6-4 不同氣候生態區植體碳存量估算(層級 1)

氣候生態區類 型	面積 (ha)	地上生 物量 (Mg/ha)	地下生 物量與 地上生 物量之 比(R)	碳轉 換係 數 (CF)	植體碳存量 (Mg) $C_s = \text{面積} \times \text{地}$ $\text{上生物量} \times$ $(1+R) \times CF$
亞熱帶濕潤森 林	90162.6	323**	0.246**	0.47	17054730.05
亞熱帶山地系 統	203361	250.2**	0.24	0.47	29653401.46
溫帶山地系統	21817.7	170.4**	0.229**	0.47	2147475.89
寒帶山地系統	619.715	40*	0.39**	0.47	16194.39
極地	736.838	15*	0.39	0.47	7220.64
總計	316697.85 3				48879022.43 (154.34 Mg/ha)

** : IPCC, 2019 , * : IPCC, 2006

第六節、IPCC 層級二估算成果

此方法與層級 1 類似，但土地利用的排放因子或活動數據應以國內專家學者蒐集或調查的數據為基礎，利用國內研究文獻得出台灣的換算因子。如果缺乏國內研究因素，可使用 IPCC 預設值。目前台灣少有對混交林的相關研究，因此以闊葉樹和針葉樹的平均值作為混交林的碳轉換因子。針葉樹的生物量轉換和擴展係數（BCEFs）引用自 Liu 和 Wang(2008)，平均值為 0.51。闊葉樹取自(Lin 和 He，2005; Xu 等人，2006； Lin 等人，2007; Liu 和 Wang，2008)文獻統計的中位數為 0.92。對於針闊混交林，兩者的平均值為 0.72。台灣針葉樹種的地上生物量與地下生物量的比值 R 缺乏研究，只對柳杉有較深入

的討論。如果只使用單一樹種作為所有森林類型的數據，則代表性較差。因此，IPCC 提供了亞熱帶濕潤森林的數據，針葉樹的 R 值為 0.22。碳轉換因子 CF 基於 Lin 等人(2002)研究台灣 24 種針闊葉樹的主要木材的平均值，針葉樹的碳轉換係數為 0.4821，闊葉樹的碳轉換係數為 0.4691。根據台灣林業研究所提供的每棵樹的調查數據，得到每塊人工林地的平均材積，然後再根據前人研究建立的樣本面積和各森林類型碳存量的相關因子(表 5-10)代入 IPCC 碳存量估算公式，得到層級 2 之森林碳存量(表 6-5)。

表 6-5 林分樣區 2012 年之碳存量(層級 2)

Plot	Area (ha)	Unit volume (m ³ /ha)	BCEFs	(1+R)	CF	Biomass Carbon stock (Mg)
1	70.15	293.11	0.92	1.24	0.4691	11003.73
2	71.96	363.77	0.92	1.24	0.4691	14008.24
3	84.34	113.60	0.72	1.23	0.4756	4035.39
4	59.29	113.60	0.72	1.23	0.4756	2836.71
5	128.57	300.22	0.92	1.24	0.4691	20656.54
6	110.16	113.60	0.72	1.23	0.4756	5270.78
7	57.78	385.30	0.92	1.24	0.4691	11913.58
8	51.21	170.84	0.92	1.24	0.4691	4682.15
9	63.09	113.60	0.72	1.23	0.4756	3018.57
10	59.64	358.03	0.92	1.24	0.4691	11427.25
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
309	64.95	210.60	0.92	1.24	0.4691	7320.41
310	65.15	197.38	0.92	1.24	0.4691	6881.93
311	81.25	522.25	0.51	1.22	0.4821	12727.60
312	68.06	220.60	0.92	1.24	0.4691	8034.17
313	51.65	235.37	0.92	1.24	0.4691	6505.64

第七節、IPCC 層級三估算成果

1. 林分樣區碳存量成果

基於概念模型，每個網格的 nNDVI、nTWI 和 nCHM 分別代表光合作用、土壤碳和生物量碳。三個指標相加可以得到分析網格的碳儲量指數 (CSI_{st})。 CSI_{st} 取值範圍為 0 到 3。 CSI_{st} 值越大，碳存量越大。以碳存量指標 $CSI_{st}=nNDVI+nTWI+nCHM$ 及碳通量指標 $CSI_{fx}=nNDVI \times nTWI \times nCHM$ 評估樣區碳吸存量之狀況，圖 6-9 顯示碳存量指標與植體碳存量有極顯著之線性關係($y=9.8144x-320.42$; $R^2=0.6046$, $p<0.001$)，碳存量指標能有效推估林分樣區之碳存量。

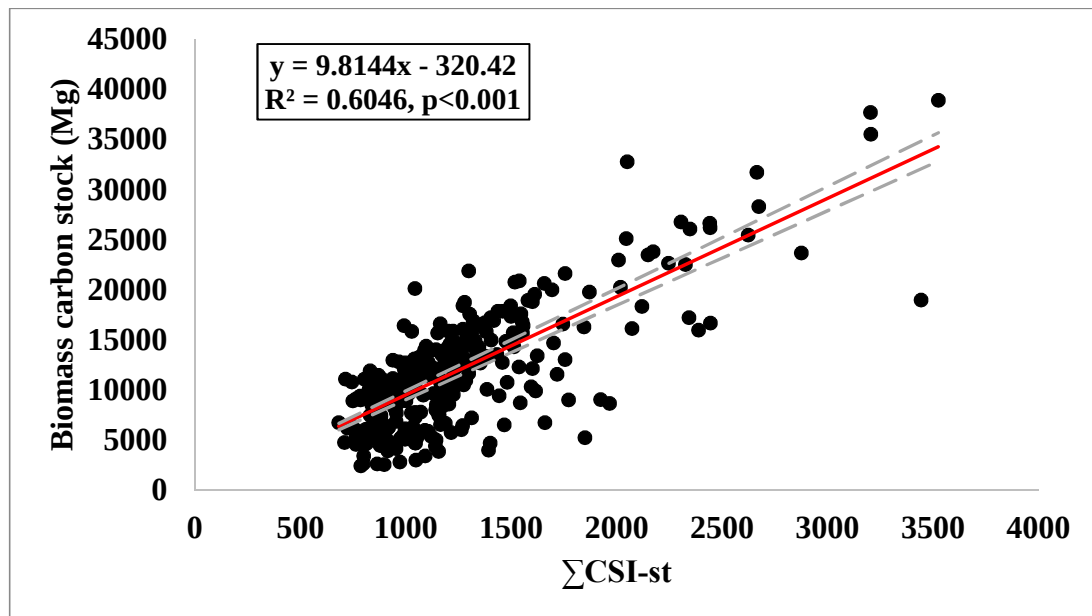


圖 6-9 林分樣區碳存量指標與植體碳存量之關係

2. 林分樣區碳通量成果

如果林地受到崩塌等外力的影響，碳庫中的碳會迅速流失，造成碳通量的負面反映。因此，模式計算是基於參數相乘，任何參數變為零都會停止碳存量系統。林分樣區兩期(2003, 2012)間的碳儲量差異用於將其轉換為碳通量(表 6-6)，圖 6-10 顯示碳通量指標與林分碳通量關係之斜率值為正，顯示林分樹種之固碳率有增加趨勢，其增加幅度

可由斜率值加以量化評估。

表 6-6 林分樣區之碳通量

樣區	面積 (ha)	2003 年植體 碳存量(Mg)*	2012 年植體 碳存量(Mg)*	碳通量 (Mg yr ⁻¹)
1	70.15	1029.23	994.55	3.85
2	71.96	1331.75	1233.15	10.96
3	84.34	1391.45	1440.98	-5.50
4	59.29	970.67	926.38	4.92
5	128.57	1655.49	1688.90	-3.71
6	110.16	1849.31	1796.30	5.89
7	57.78	1051.79	970.55	9.03
8	51.21	813.04	833.85	-2.31
9	63.09	1046.63	1075.45	-3.20
10	59.64	1051.56	1109.20	-6.40
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
310	65.15	953.05	975.03	-2.44
311	81.25	1352.27	1447.39	-10.57
312	68.06	1141.75	1117.38	2.71
313	51.65	739.34	757.89	-2.06

*:Estimated from CSI-st

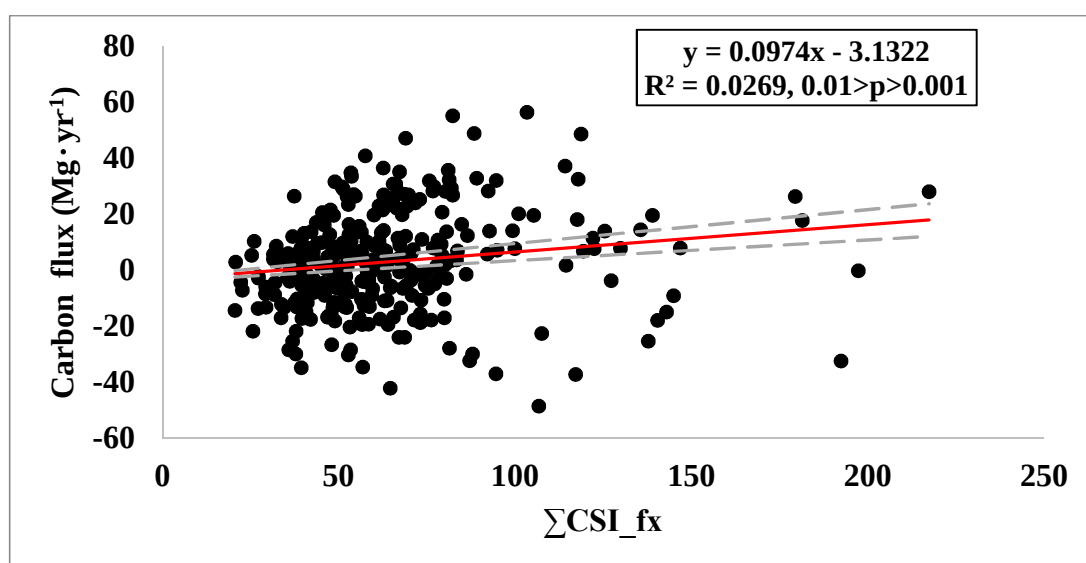


圖 6-10 林分樣區碳通量指標與碳通量之關係

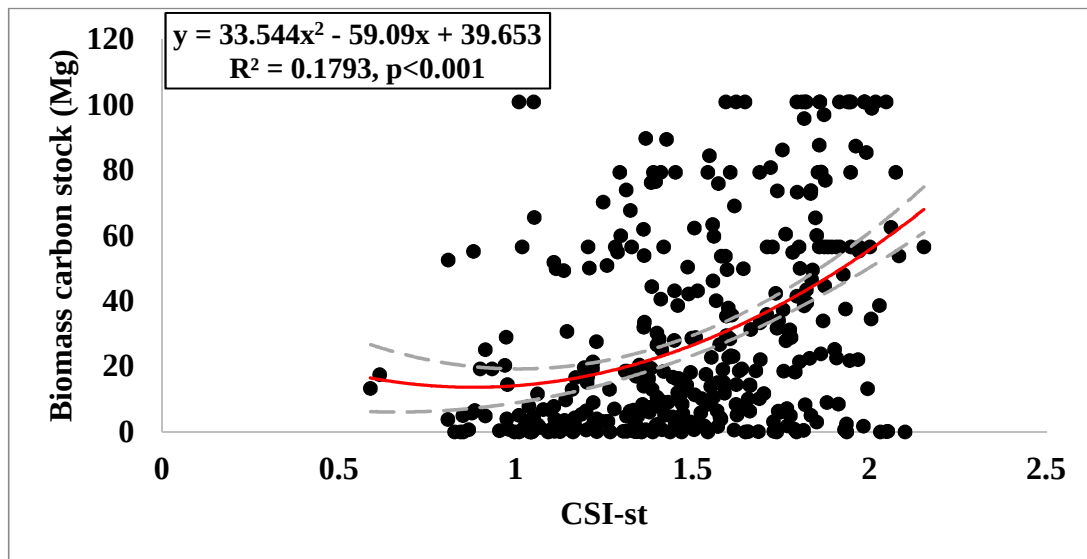
3. 網格碳存量成果

2012 年各採樣網格的植體碳存量如表 6-7 所示，各網格碳存量指數與植體碳存量關係如圖 6-11。

表 6-7 透過 CHM 和轉換因子估算之網格植體碳存量(2012)

Plot	Area (ha)	Unit volume (m ³ /ha)	CHM(m)	BCEFs	(1+R)	CF	Biomass
							Carbon stock (Mg)
1	0.09	15.10	559.71	0.51	1.22	0.4821	15.11
2	0.09	9.73	177.26	0.51	1.22	0.4821	4.79
3	0.09	14.76	527.35	0.51	1.22	0.4821	14.24
4	0.09	25.00	2093.38	0.92	1.24	0.4691	100.82
5	0.09	6.07	51.58	0.51	1.22	0.4821	1.39
6	0.09	15.06	555.86	0.51	1.22	0.4821	15.01
7	0.09	23.88	1856.82	0.92	1.24	0.4691	89.43

8	0.09	7.41	86.92	0.92	1.24	0.4691	4.19
9	0.09	22.43	1576.14	0.92	1.24	0.4691	75.91
10	0.09	2.12	3.29	0.92	1.24	0.4691	0.16
...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
362	0.09	2.44	4.75	0.51	1.22	0.4821	0.13
363	0.09	4.86	28.83	0.51	1.22	0.4821	0.78
364	0.09	16.99	762.03	0.72	1.23	0.4756	28.89
365	0.09	4.01	17.44	0.51	1.22	0.4821	0.47
366	0.09	12.45	337.84	0.92	1.24	0.4691	16.27

圖 6-11 CSI_{st} 與層級 2 植體碳存量的關係

4. 網格碳通量成果

使用兩期植體碳存量之差值，可得兩期碳存量之年平均碳通量（表 6-8）。網格碳通量指數與碳通量的關係如圖 14 所示，顯示碳

通量指標與網格碳通量關係之斜率值為正，顯示集水區網格之植生固碳率有增加趨勢，其增加幅度可由斜率值加以量化評估。由網格與林分樣區之斜率值 0.3135 vs 0.0974(圖 6-12)可知，網格樣區之斜率較大，其植生固碳率較佳。

表 6-8 樣點碳通量分布

2003 年植體碳存 量(Mg)*	2012 年植體碳 存量(Mg)*	碳通量 (Mg yr ⁻¹)
1.2012	1.8187	-0.0686
1.3445	1.4008	-0.0063
1.4829	1.5114	-0.0032
1.9853	1.3050	0.0756
1.3441	1.9363	-0.0658
1.5702	1.0814	0.0543
1.4257	2.0671	-0.0713
1.0460	0.8783	0.0186
1.5729	1.9564	-0.0426
1.3135	1.3136	0.0000
...	...	...
...	...	...
1.3042	1.0616	0.0270
1.7373	1.2732	0.0516
1.5081	1.0313	0.0530
1.8134	1.1678	0.0717
1.4609	1.0686	0.0436

*:Estimated from CSI-st

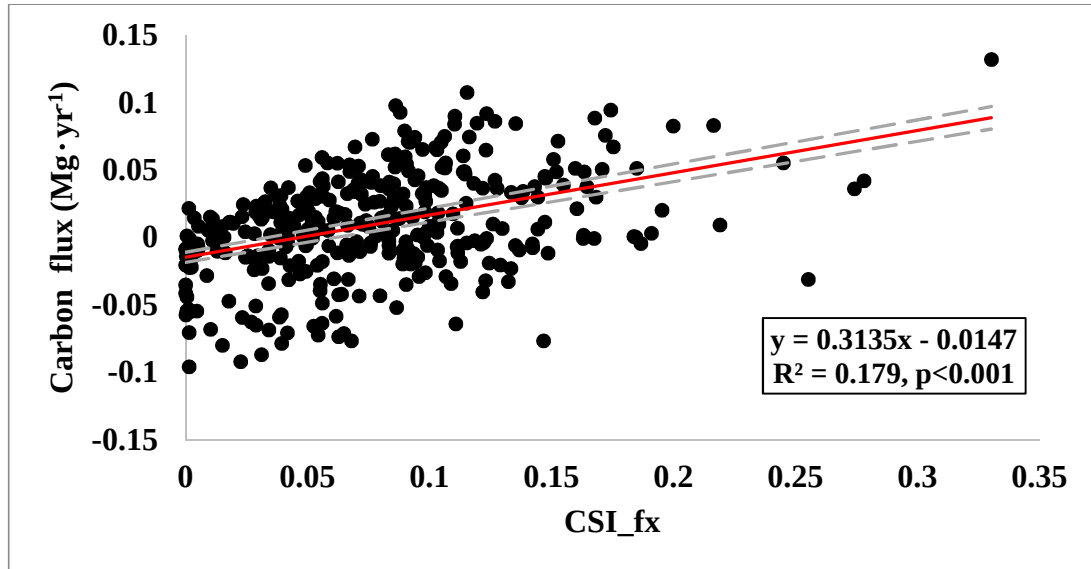


圖 6-12 CSI_fx 與碳通量的關係

第八節、模式在非林地之應用

流域碳存量空間分布模式係基於光合作用(NDVI)、土壤深度(TWI)、以及樹高(CHM)等環境指標加以建置，土壤深度為長期化育資訊由 DEM 推估，樹高資訊由光譜 LiDAR 影像計算 DSM 與 DEM 之差值，光合作用指標係由衛星影像萃取常態化差異植生指標 NDVI 而得，三環境指標在時間上之變異性大小順序依次為 NDVI>CHM>TWI。自然狀態下 NDVI 之變化除受季節性影響外；亦受天然災害(病蟲害、乾旱、火燒、崩塌等)及人為墾殖之影響；而 CHM 之變化主要是受天然災害崩塌之影響。短期內集水區地形變化不大致 TWI 主要是反應長期土壤之化育深度。所以 NDVI 主要反映生物量之初級生產物(primary production)碳吸存(carbon sequestration)，而 CHM 係反映植體過往累積(次級產物)之碳存量；TWI 係反映土壤長期化育之碳存量。將上述三個環境指標分別代表集水區植生立地(碳庫)之碳存量。另外本建置模式係以森林(未受人為干擾)之系統樣區加以驗證；而農村再生社區之類型受人為干擾幅度差異甚大，模式估算之碳存量僅能反映潛在之碳存量分布，主要是流域下游平地區位

主要是沖積扇地形，上游沖刷下來之土層會大量累積，致土壤碳存量較高，尤其是溼地區位易累積大量土壤及枯枝葉，雖無光合作用及植物生長，長期累積的結果會反映出濕地碳存量會居其他土地利用類別之冠。所以開發度較高之區位因破壞植栽、不透水面積增加，仍有多量碳存量主要是被封土壤內仍存有大量碳所致。本研究重點是碳存量之空間分布，其包括現況植生初期產物之碳吸存、已合成為植體碳含量之次級產物、以及土壤之長期化育碳含量。模式推估在林地驗證上之準確度極高可達到 0.1%顯著水準，能忠實反映林地之碳存量。但在非林地區位(如開發度較高農村再生地區)，其與 IPPC 土地利用分類碳存量之推算結果會有高估情形，主要差異是 IPPC 在土地利用分類之碳存量並未對封存的土壤碳進行探討分類，本研究碳存量模式之物理意義主要在凸顯碳存量潛勢，如何讓這些已封存之碳不被排出之外，另可再藉由環境營造增加植栽之碳吸存，能迅速達到碳之淨零排放為本研究之評估目標。模式藉由兩期碳存量之空間分布，可進一步推算兩期之碳通量，模式之碳通量指標即可有效反映研究區位碳吸存之空間分布，能具體指出碳通量劣化熱區，供社區綠環境營造改善之參考。

第七章 碳存量推估模式之應用

農村再生社區分散全國各地，如何建置客觀量化之農村再生營造效益評估模式極為重要，傳統之現地調查需要大量的人力物力，實地調查數據雖然比較準確，但費時費力，經濟效益差；且更新困難有必要從衛星圖像中萃取環境指標配合概念模式，建立流域不同時期碳儲量之分布；利用兩期碳存量可計算碳通量之空間分布，再以碳通量指標評估各農村再生社區之營造效益。兩期社區碳存量有隨著海拔越高越好之趨勢(圖 7-1 及圖 7-2)，但碳通量指標可反映社區災害韌性及社區營造效益，其空間分布較碳存量變異較大(圖 7-3)。在評估農村再生社區營造效益可採標章給分，主要是將農村再生社區歸群分析，以同時期相同社區類型之碳存量平均值為該群社區之營造基準，再配合碳通量之變化加以評估，其評分標準以 5 顆星為最高等級。

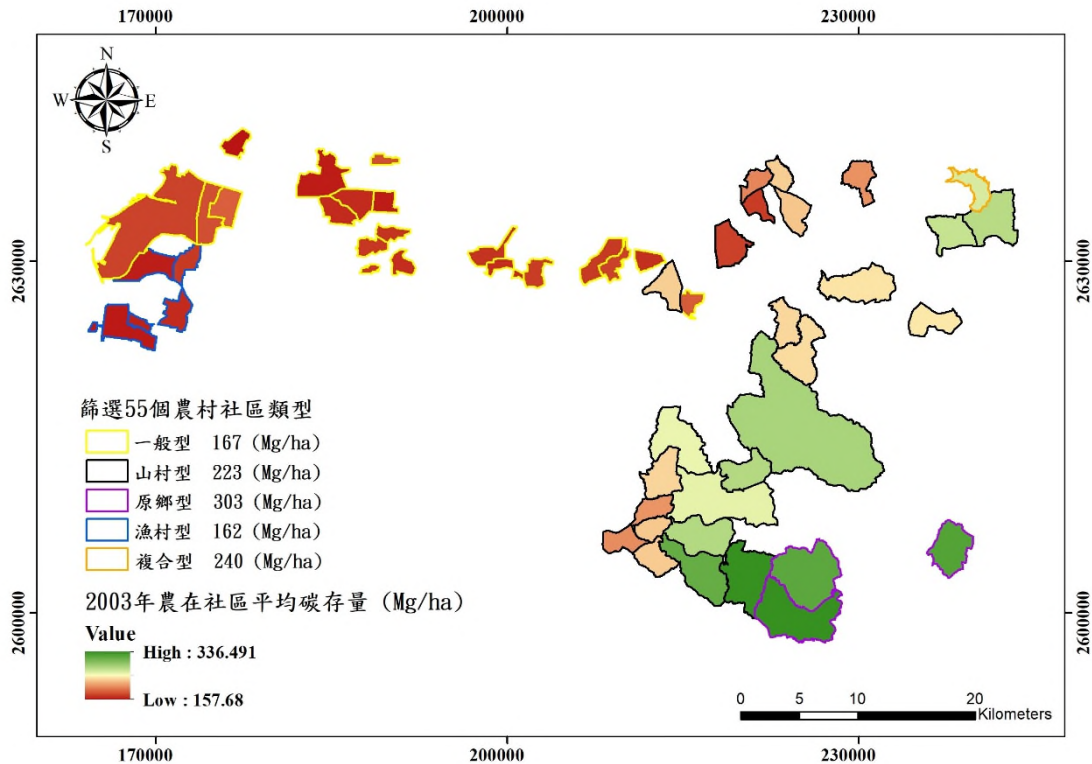


圖 7-1 2003 年 55 個農村再生社區平均碳存量

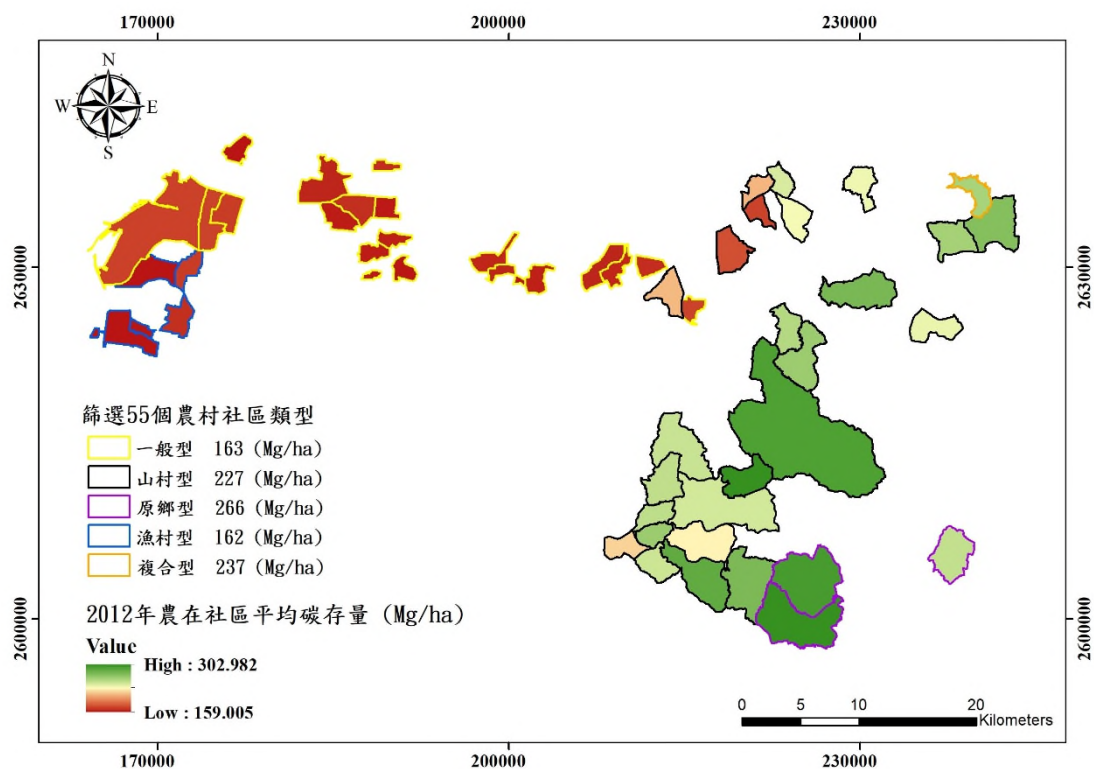


圖 7-2 2012 年 55 個農村再生社區平均碳存量

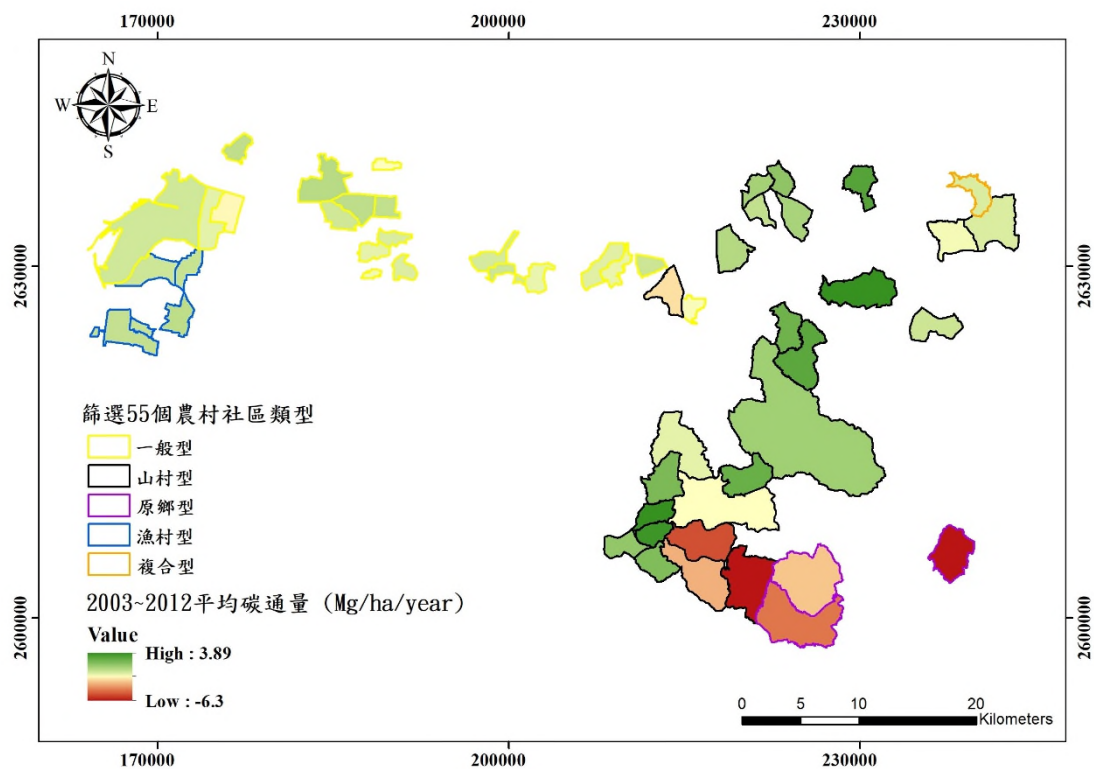


圖 7-3 2003 年至 2012 年農村再生社區碳通量

2003 年各類型碳存量平均基礎值，一般型為 167.1 噸/公頃、原民型為 302.7 噸/公頃、山村型 223.4 噸/公頃、漁村型 162.1 噸/公頃及複合型 240.4 噸/公頃。2012 年碳存量平均基礎值，一般型為 163.5 噸/公頃、原民型為 266.2 噸/公頃、山村型 227.2 噸/公頃、漁村型 162.4 噸/公頃及複合型 240.4 噸/公頃。農村再生營造效益評估採標章給分，主要是以相同時期同樣社區類型之碳存量平均值為其營造基準，其評分標準以 5 顆星為最高等級。可分為：1.營造初始期採社區碳存量低於同樣社區類型均值，2.營造後期社區碳存量高於同樣社區類型均值、3.社區兩期之平均碳通量為正值、4.社區碳通量變異係數($0 < cv < 5$)、以及 5.社區碳通量負值(劣化)面積占比(%)等五個評估項目，每符合一個項目給定 1 顆星，最高給定 5 顆星。項目 1 取決於找出須營造之社區，選定低於平均碳存量之社區給於顆星獎勵，項目 2 取決於碳存量之營造效益，項目 3 考量營造期間植生復育良好，碳通量為正值，項目 4 為碳通量正值且其變異係數小於 5，此反應區位營造之碳存量改善均勻度高，項目 5 表示社區負碳通量面積占比小於 40%。農村再生社區營造效益評估成果如表 7-1 所示，可見 55 個農村再生社區中具最高營造效益(5 顆星)等級有碧湖及龍眼社區，具有次高營造效益(4 顆星)等級有潭墘、四番地、竹林、及永隆等社區，具 3 顆星等級有太興、竹豐、廣明、與樟湖等社區，具 2 顆星等級為西港、林北、楊賢、太平、濁水、富州、社寮、延正、大鞍、隘寮、石壁、楊厝、五港、新興等社區，其他社區為僅具 1 顆星以下。

表 7-1 農村再生社區營造效益評估成果

序 列	社 區	類 型	2003 年基 礎值 (噸/ 公頃)	2003 年碳存 量小於 基礎值	2012 年基 礎值 (噸/ 公頃)	2012 年碳存 量大於 基礎值	平均 碳通 量(噸 /公頃 /年)	碳通量 變異係 數 ($0 < cv < 5$)	碳通 量負 值(劣 化)面 積占 比 (%)	評 分 等 級 (顆 星 數 目)
1	西港	一般型	167.1	157.7*	163.5	159.0	0.15*	7.2	46.6	2
2	潭墘	一般型	167.1	159.7*	163.5	162.7	0.32*	4.9*	36.8*	4
3	土庫	一般型	167.1	174.7	163.5	164.5*	-1.14	-1.9	77.8	1
4	柯仔坑	一般型	167.1	178.4	163.5	169.7*	-0.96	-3.2	72.8	1
5	三盛	一般型	167.1	175.0	163.5	169.9*	-0.57	-4.9	54.2	1
6	新吉	一般型	167.1	179.4	163.5	168.2*	-1.25	-3.2	59.8	1
7	中興	一般型	167.1	170.9	163.5	169.4*	-0.16	-26.1	51.5	1
8	孩沙里	一般型	167.1	164.0	163.5	162.8	-0.12	-11.5	53.6	0
9	蒜鄉麻園	一般型	167.1	168.5	163.5	162.4	-0.69	-2.3	74.4	0
10	興南	一般型	167.1	163.3*	163.5	160.3	-0.34	-4.2	68.5	1
11	義和	一般型	167.1	165.6*	163.5	163.1	-0.28	-5.0	58.7	1
12	林北	一般型	167.1	165.2*	163.5	164.5*	-0.08	-30.0	55.8	2
13	烏塗	一般型	167.1	169.8	163.5	163.4	-0.71	-3.6	69.4	0
14	重興	一般型	167.1	167.4	163.5	162.7	-0.51	-4.2	64.7	0
15	大義	一般型	167.1	167.0*	163.5	161.2	-0.65	-2.4	68.8	1
16	來惠	一般型	167.1	168.0	163.5	160.5	-0.83	-2.5	75.2	0
17	崙東	一般型	167.1	164.1*	163.5	160.3	-0.42	-4.2	65.1	1
18	永定	一般型	167.1	165.4*	163.5	162.0	-0.38	-3.7	64.1	1
19	四番地	一般型	167.1	163.2*	163.5	165.0*	0.20*	11.7	36.1*	4
20	楊賢	一般型	167.1	159.4*	163.5	160.6	0.14*	10.5	45.9	2
21	大庄	一般型	167.1	163.0*	163.5	161.2	-0.20	-7.9	55.9	1
22	來吉	原民型	302.7	284.3*	266.2	265.1	-2.14	-8.2	54.0	1
23	十字	原民型	302.7	336.5	266.2	303.0*	-3.72	-5.1	58.1	1
24	桐林	原民型	302.7	287.3*	266.2	230.6	-6.30	-2.5	69.7	1
25	碧湖	山村型	223.4	212.8*	227.2	241.2*	3.16*	3.3*	35.8*	5
26	太平	山村型	223.4	194.5*	227.2	204.8	1.15*	7.0	45.8	2
27	太興	山村型	223.4	213.8*	227.2	227.9*	1.56*	6.4	43.4	3
28	太和	山村型	223.4	299.1	227.2	249.3*	-5.53	-2.8	68.6	1
29	龍眼	山村型	223.4	196.5*	227.2	231.6*	3.89*	2.3*	33.1*	5
30	瑞里	山村型	223.4	280.4	227.2	257.7*	-2.52	-6.0	58.6	1
31	瑞峰	山村型	223.4	252.8	227.2	212.3	-4.50	-3.0	67.2	0
32	上安	山村型	223.4	221.2*	227.2	220.4	-0.08	-118.6	52.9	1
33	頂崁	山村型	223.4	246.6	227.2	238.4*	-0.90	-11.9	51.2	1
34	民和	山村型	223.4	251.2	227.2	247.8*	-0.38	-29.4	51.0	1
35	濁水	山村型	223.4	192.3*	227.2	198.6	0.70*	9.5	45.0	2
36	富州	山村型	223.4	212.0*	227.2	217.5	0.61*	15.7	47.1	2
37	社寮	山村型	223.4	168.6*	227.2	169.8	0.14*	21.0	54.1	2
38	桶頭	山村型	223.4	234.1	227.2	229.1*	-0.56	-20.1	49.9	1
39	延正	山村型	223.4	169.3*	227.2	173.0	0.41*	8.3	46.7	2
40	大鞍	山村型	223.4	255.4	227.2	263.2*	0.86*	15.6	45.4	2
41	竹豐	山村型	223.4	216.9*	227.2	234.3*	1.93*	5.5	43.4	3
42	竹林	山村型	223.4	218.8*	227.2	240.7*	2.43*	4.0*	39.5	4
43	永隆	山村型	223.4	220.4*	227.2	250.7*	3.37*	3.3*	35.6	4
44	隘寮	山村型	223.4	214.0*	227.2	224.9	1.21*	8.0	43.9	2
45	廣明	山村型	223.4	196.0*	227.2	218.9	2.54*	3.0*	37.7	3
46	坪頂	山村型	223.4	214.2*	227.2	199.0	-1.69	-5.5	54.8	1
47	樟湖	山村型	223.4	216.2*	227.2	231.0*	1.64*	6.4	40.2	3

48	石壁	山村型	223.4	252.0	227.2	271.0*	2.11*	6.8	42.9	2
49	草嶺	山村型	223.4	236.2	227.2	226.5	-1.08	-11.6	50.8	0
50	楊厝	漁村型	162.1	167.8	162.4	167.9*	0.01*	125.6	45.0	2
51	海豐	漁村型	162.1	160.4*	162.4	159.3	-0.11	-10.3	53.1	1
52	五港	漁村型	162.1	159.0*	162.4	159.7	0.08*	14.2	56.0	2
53	新興	漁村型	162.1	162.8	162.4	164.8*	0.22*	7.5	40.4	2
54	永豐	漁村型	162.1	160.5*	162.4	160.4	-0.02	-72.8	55.6	1
55	頭社	複合型	240.4	240.4	240.4	237.1	-0.36	-26.1	55.1	0

以群集分析將農村再生社區營造效益評分等級分為高、中、低三類，再藉由社區之面積、戶數、人口數、平均高程、平均坡度、計畫數等相關資訊 (表 7-2)，以典型判別分析進行分類，顯示農村再生社區營造效益分類可由社區相關資訊加以呈現，其分類準確度達 70.9% (表 7-3)，可見農村再生營造效益與社區之區位、開發度及計畫數有關，典型判別分析散佈圖如圖 7-4 所示。

表 7-2 農村再生社區相關資訊與營造效益等級類別

序列	社區	類型	面積 (ha)	戶數	人口數	平均高程(m)	平均坡度(度)	計畫數	評分等級	等級類別
1	西港	一般型	355	344	1121	1.3	0.9	2	2	中
2	潭墘	一般型	1,067	463	1346	10.9	0.8	4	4	中高
3	土庫	一般型	174	249	865	17.8	0.8	2	1	中
4	柯仔坑	一般型	293	165	424	138.3	1.8	1	1	中
5	三盛	一般型	762	701	2108	4.6	1.5	4	1	中
6	新吉	一般型	597	407	1242	6.1	2.1	5	1	中
7	中興	一般型	4,117	568	1700	3.5	0.8	1	1	中
8	孩沙里	一般型	208	214	770	38.0	0.5	5	0	低
9	蒜鄉麻園	一般型	384	574	1896	43.8	0.5	4	0	低
10	興南	一般型	54	150	700	41.5	0.8	1	1	中
11	義和	一般型	455	388	1260	35.0	0.7	1	1	中
12	林北	一般型	329	5759	19698	93.0	2.1	4	2	中
13	烏塗	一般型	373	414	1371	74.2	1.3	5	0	低
14	重興	一般型	588	545	2498	67.8	1.3	1	0	低
15	大義	一般型	326	352	1079	18.9	0.5	1	1	中
16	來惠	一般型	91	202	950	20.0	0.5	3	0	低
17	崙東	一般型	305	628	1798	22.0	0.6	1	1	中
18	永定	一般型	274	500	1857	21.1	0.8	1	1	中
19	四番地	一般型	601	80	425	16.4	1.2	1	4	中高
20	楊賢	一般型	344	404	1391	20.4	0.8	1	2	中
21	大庄	一般型	501	172	591	14.8	0.8	1	1	中
22	來吉	原民型	2,347	126	364	1451.6	35.4	1	1	中
23	十字	原民型	2,344	128	357	1449.8	32.2	1	1	中
24	桐林	原民型	1,128	171	664	1373.3	32.3	4	1	中
25	碧湖	山村型	455	117	306	733.3	32.6	1	5	中高
26	太平	山村型	560	187	613	914.0	31.5	11	2	中高
27	太興	山村型	679	155	494	732.9	27.3	1	3	高

28	太和	山村型	1,764	350	1146	1216.7	31.9	1	1	中
29	龍眼	山村型	538	187	300	841.8	31.6	2	5	高
30	瑞里	山村型	1,571	254	775	1052.1	34.2	1	1	中
31	瑞峰	山村型	1,433	269	906	829.6	31.2	1	0	低
32	上安	山村型	785	511	1210	728.2	22.3	7	1	中
33	頂炭	山村型	882	400	1500	506.4	26.9	1	1	中
34	民和	山村型	1,390	454	1087	570.5	28.6	2	1	中
35	濁水	山村型	402	624	2000	216.8	11.6	1	2	中
36	富州	山村型	671	273	806	269.9	14.7	6	2	中
37	社寮	山村型	397	434	1423	172.4	2.6	5	2	中
38	桶頭	山村型	1,664	383	1100	430.6	26.4	1	1	中
39	延正	山村型	823	666	1969	148.3	3.7	2	2	中
40	大鞍	山村型	8,263	259	488	1351.8	33.7	2	2	中
41	竹豐	山村型	731	362	1067	496.2	25.4	11	3	高
42	竹林	山村型	1,285	716	1676	881.9	27.7	3	4	高
43	永隆	山村型	1,463	560	1850	735.0	25.9	1	4	高
44	隘寮	山村型	415	230	528	263.8	15.3	3	2	中
45	廣明	山村型	616	400	1045	315.3	14.8	1	3	中
46	坪頂	山村型	703	218	698	199.8	18.9	4	1	中
47	樟湖	山村型	987	205	561	592.1	30.1	6	3	中
48	石壁	山村型	984	32	200	1290.5	33.7	3	2	中
49	草嶺	山村型	2,970	0	690	777.5	32.9	5	0	低
50	楊厝	漁村型	442	367	1029	2.9	0.9	1	2	中
51	海豐	漁村型	785	451	1401	1.4	0.8	5	1	中
52	五港	漁村型	957	779	2171	0.4	0.7	1	2	中
53	新興	漁村型	562	1238	3673	3.9	0.8	1	2	中
54	永豐	漁村型	169	576	1711	0.3	0.7	1	1	中
55	頭社	複合型	574	335	1350	2.9	0.9	2	0	低

表 7-3 典型判別分析結果

			預測的各組成員			
			中	高	低	總和
原始的	個數	中	25	10	2	37
		高	1	8	1	10
		低	1	1	6	8
	%	中	67.6	27.0	5.4	100.0
		高	10.0	80.0	10.0	100.0
		低	12.5	12.5	75.0	100.0

註: 70.9% 個原始組別觀察值已正確分類。

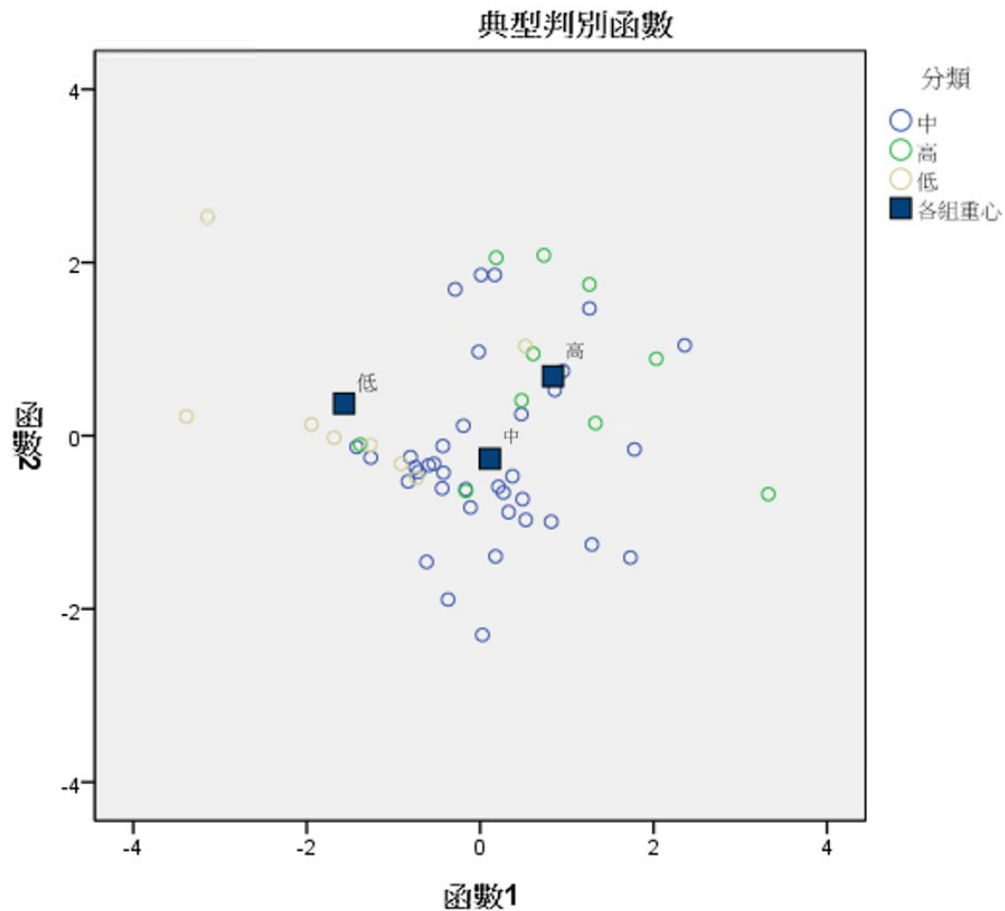


圖 7-4 典型判別分析散佈圖

研究結果顯示第 1 函數軸解釋率為 76.4%，第 2 函數軸解釋率為 23.6% (表 7-4)。另由典型判別分析結構矩陣(表 7-5)發現，第 1 函數軸之主要解釋因子為平均高程；第 2 函數軸為平均坡度、計畫數量、社區戶數、社區人口數、社區面積。另外各 Fisher's 線性區別函數如表 7-6 所示。

表 7-4 典型判別分析函數特徵值

函數	特徵值	變異數的%	累積%	典型相關
1	.523 ^a	76.4	76.4	.586
2	.162 ^a	23.6	100.0	.373

a.分析時會使用前 2 個典型區別函數。

表 7-5 典型判別分析結構矩陣

	函數 1	函數 2
平均高程	.252*	.161
平均坡度	.338	.470*
計畫數量	-.070	.336*
社區戶數	.046	-.327*
社區人口數	-.024	-.299*
社區面積	.030	-.197*

區別變數和標準化典型區別函數之間的合併後組內相關。變數係依函數內相關的絕對大小加以排序。

*. 在每個變數和任一區別函數之間的最大絕對相關

函數	特徵值	變異數的%	累積%	典型相關
1	.196 ^a	67.2	67.2	.405
2	.096 ^a	32.8	100.0	.296

a. 分析時會使用前 2 個 典型區別函數。

表 7-6 典型判別分析分類函數係數

	農村再生社區營造效益		
	中	高	低
社區面積	.000	.000	.001
社區人口數	-.002	-.004	.006
社區戶數	.009	.015	-.018
計畫數量	.375	.371	.598
平均高程	.000	-.004	-.002
平均坡度	.062	.258	.051
(常數)	-2.593	-3.895	-3.143

Fisher's 線性區別函數

標準化之典型區別函數係數，該係數為重要性指標，係數絕對值越大者，表示其重要性越高。表 7-7 顯示函數 1 具正值變數以「社區戶數」(11.111)最高，負值部分以「社區人口數」(-10.994)較大，為函數 1 重要判別變數。由各組重心函數(表 7-8)可知，社區營造效益為中類別及高類別之重心分別為 0.112 與 0.841，故典型判別函數係

數為正且較大之變數，即為決定社區營造效益屬中級與高級的主要判別係數。社區營造效益為低類別之重心為-1.569，典型區別函數係數為負且絕對值較大之變數，即為與其他分級的主要判別係數。第2函數正值以「社區人口數」(3.48)之係數較大，社區營造效益屬高類別與低類別之重心分別為0.686與0.372，故正且較大之變數，即為與他分級的主要判別係數。顯示以碳存量指標評估農村再生經營成效涉及農村再生社區之區位、規模、開發度、以及計畫數量。由典型判別分析散佈(圖7-4)可知，營造效益各類別之重心坐標分別為：高類別(正，正)，中類別(正，負)，低類別(負，正)；再由典型判別分析結構矩陣(表7-5)顯示函數1及函數2之主要解釋因子為正者分別是平均高程、平均坡度、以及計畫數量。此反映農村再生營造效益屬高類別之區位與社區地形及計畫數有顯著關係；而低類別區位受函數1之主要解釋因子為負及函數2之主要解釋因子為正者所影響，分別是社區戶數、社區人口數、以及社區面積，顯示農村再生營造效益屬低類別之區位與社區規模及開發度有關。可見以碳存量指標評估農村再生營造效益之良窳能凸顯水土保持局投入社區營造計畫之貢獻，計畫投入數量越多營造效益越高。

表 7-7 標準化的典型區別函數係數

	函數 1	函數 2
社區面積	-.334	-.241
社區人口數	-10.994	3.480
社區戶數	11.111	-3.722
計畫數量	-.249	.180
平均高程	-.324	-1.760
平均坡度	.900	2.124

表 7-8 典型判別分析各類別之重心

類別	函數 1	函數 2
中	.112	-.266
高	.841	.686
低	-1.569	.372
未標準化的典型區別函數以組別平均數加以評估		

第八章 結論

本研究透過環境指標結合概念模式，依據 IPPC Tier-3 層級經由 Tier-2 驗證，建置農村再生社區碳匯評估模式。農村再生社區之營造效益可由碳匯能力加以評估，依地形及功能區分，以碳存量為指標評估各社區在同類型中碳存量之良窳；透過時序分析可有效量化農村再生營造前、後碳存量之消長。

農村再生營造效益評估採標準給分，主要是以同時期同社區類型之碳存量平均值為其營造基準。可分為：1.營造初始期採社區碳存量低於同樣社區類型均值，2.營造後期社區碳存量高於同樣社區類型均值、3.社區兩期之平均碳通量為正值、4.社區碳通量變異係數($0 < cv < 5$)、以及 5.社區碳通量負值(劣化)面積占比(%)等五個評估項目，滿足上述項目之一者給 1 顆星。55 個農村再生社區中具最高營造效益(5 顆星)等級有碧湖及龍眼社區，次高營造效益(4 顆星)等級有潭墘、四番地、竹林、及永隆等社區，具 3 顆星等級有太興、竹豐、廣明、與樟湖等社區，2 顆星等級為西港、林北、楊賢、太平、濁水、富州、社寮、延正、大鞍、隘寮、石壁、楊厝、五港、新興等社區，其他社區為僅具 1 顆星以下。

研究顯示農村再生營造效益屬高類別社區與地形及計畫數有顯著關係；而低類別社區受函數 1 之主要解釋因子為負及函數 2 之主要解釋因子為正者所影響，分別是社區之戶數、人口數、以及面積，顯示農村再生營造效益屬低類別之區位與社區規模及開發度有關。可見以碳存量指標評估農村再生營造效益之良窳能凸顯水土保持局投入社區營造計畫之貢獻，計畫投入數量越多營造效益越高。研究成果可供低碳綠環境投入時，評估營造優先順序及效益之參據。

參考文獻

1. 王立志(1996)，氣候變遷對台灣林業的衝擊與適應，氣候變遷衝擊評估與因應策略建議研討會論文集，215-229。
2. 王秀娟(2002)，綠地計畫之理論與實證，田園城市文化事業有限公司，台北市。
3. 王亞男、周宏祈、王介鼎、陳秋萍(2010)，溪頭三叉崙柳杉生長量及碳貯存效益之研究，國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 24(2)，157-167。
4. 王亞男、劉秀卿、蕭英倫(2005)，行道樹水黃皮二氧化碳固定效益之研究，中華林學季刊 38, 151-61。
5. 王瑞閔(2007)，台灣國有林地森林碳吸存估算方法之探討，國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系碩士論文。
6. 王義仲(2004)，麻竹稈之生物量與碳蓄積量推估，林產工業 23(1)，13-22。
7. 王義仲(2006)，竹林生物量調查回顧與展望，森林碳吸存研討會論文集:167-188。
8. 王義仲、陳周宏(1995)，台灣產竹種工藝利用價值之評估 (I)，林產工業 14(1):82-4。
9. 行政院農業委員會林務局(1995)，第三次台灣森林資源及土地利用調查，行政院農業委員會林務局。
10. 行政院農業委員會林務局(2014)，第四次台灣森林資源及土地利用調查，行政院農業委員會林務局。
11. 吳政達(2017)，臺灣南部荖濃溪事業區不同林型森林碳貯存量及碳吸存量之研究，國立中興大學森林學系碩士學位論文。
12. 呂錦明、胡大維、施文君(1984)，銀合歡生長之研究—佳林密度試

- 驗區三年之生長及生物量，林業試驗所試驗報告第 438 號。
13. 呂錦明、陳財輝(1992)，桂竹之林分構造及生物量—桶頭—桂竹林分之例，林業試驗所研究報告季刊 7(1)，1-13。
 14. 李俊祥、宋永昌、傅徽楠(2003)，上海市中心城區地表溫度與綠覆蓋率相關性研究，上海環境科學，22(9)：13-15。
 15. 李宣德、馮豐隆(2008)，森林碳吸存資源調查推估模式系統—以臺灣樟樹為例，臺灣林業科學 23:11-22。
 16. 李雅婷(2019)，以環境指標推估集水區碳存量空間分布之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
 17. 李蘇竣(2021)，領先各部會農委會拋 2050 農業淨零碳排規劃 9 月成立專責辦公室(新聞)，<http://ddpp.ntu.edu.tw/selected-articles/domestic-news/1457-news-1100902n6.html>。
 18. 林世宗、鍾智昕、邱祈榮、林朝欽(2008)，台灣二葉松地上部生物量及碳吸存量之估算，中華林學季刊 41(4)，521-535。
 19. 林世宗、鍾智昕(2005)，台灣二葉松林木地上部碳吸存之估算，森林經營對二氧化碳吸存之貢獻研討會論文集，49-63。
 20. 林俊成(2007)，台灣森林碳量估算及不確定性來源探討，碳循環在台灣研討會。
 21. 林俊成、李國忠(2005)，森林資源碳吸存監測計畫，台灣林業九十四年十月號。
 22. 林昭遠、吳逸崙、莊智瑋(2010)，利用 SPOT 衛星影像推估碳存量可行性之研究，水土保持學報，42(2)，199-212。
 23. 林國銓、何淑玲(2005)，由生物量推估臺灣不同林分之碳儲存量，森林經營對二氧化碳吸存之貢獻研討會論文集，97-108。
 24. 林國銓、杜清澤、黃菊美(2007)，苗栗地區相思樹和木油桐人工林

- 碳和氮累積量及生產量之估算，中華林學季刊 40(2)，201-218。
25. 林國銓、杜清澤、黃菊美(2007)，苗栗地區相思樹和木油桐人工林碳和氮累積量及生產量之估算。中華林學季刊，40(2):201-218。
26. 林國銓、杜清澤、黃菊美(2009)，台東地區相思樹與楓香兩人工林碳累積量，林業研究季，31(3): 55-68。
27. 林國銓、杜清澤、黃菊美(2010)，光蠟樹人工林碳貯存量和吸存量之估算。中華林學季刊，43(2)：261-276。
28. 林國銓、黃菊美、杜清澤(2008)，檳木人工林造林木碳貯存量和吸存量之估算。國家公園學報，18(2): 45-58。
29. 林裕仁、王秋嫻、Sara Wu(2011)，四種臺灣竹材碳轉換係數之分析，臺灣林業科學 26(4):341-355。
30. 林裕仁、李國忠、林俊成(2002)，以生物量與材積關係式推估台灣地區森林林木碳貯存量之研究，台大實驗林研究報告 16(2)，71-79。
31. 林裕仁、劉瓊霏、林俊成(2002)，臺灣地區主要用材比重與碳含量測定，臺灣林業科學，17(3)，291-299。
32. 邱祈榮、鄭智馨、林俊成、詹為巽(2012)，廢耕檳榔園再造林之碳儲存變化推估—以種植桃花心木為例，中華林學季，45(1)，97-108。
33. 袁力頤(2006)，紅檜與柳杉人工林地上部碳貯存量之推估，國立中興大學森林學研究所碩士論文。
34. 柯淑惠(2006)，台灣檳人工林生物量及碳儲存量之研究，國立中興大學森林學系碩士論文。
35. 孫百寬、陳涓婷、顏添明、李隆恩(2013)，臺灣中部地區孟宗竹林不同經營強度林分性態值、地上部生物量及碳貯存量之比較，林業研究季刊 35(1)，23-32。

36. 張瑞峯(2012)，臺灣農村低碳社區發展策略之研究，國立虎尾科技大學休閒遊憩系碩士論文。
37. 許原瑞、洪昆源、王巧萍、吳孟鈴、邱祈榮(2006)，海岸林分生物量調查規劃，2006 年森林碳吸存研討會論文集，217-235。
38. 許晃雄(2021)，IPCC AR6 第一工作小組報告揭露的氣候危機，中央研究院環境變遷研究中心。
39. 許博行、顏添明(2005)，惠蓀林場 42 種原生樹種幼齡期生長量分析與生長模式之探討，中華林學季刊 38(3)，323-335。
40. 陳信宏(2011)，遙測技術於台北市都市綠地之碳吸存監測研究，中國文化大學景觀學研究所碩士論文。
41. 陳財輝、呂錦明(1988)，苗栗海岸沙丘木麻黃人工林之生長及林分生物量。林業試驗所研究報告季刊，3(1):333-343。
42. 陳財輝、許博行、張峻德(1998)，四湖木麻黃林分生物量及養分量聚集。台灣林業科學，13(4):325-349。
43. 陳朝圳(1999)，南仁山森林生態系植生綠度之季節性變化，中華林學季刊，32(1)：53-66。
44. 陳慧敏(2003)，綠覆率與地表溫度關係之研究—以龍潭地區為例，中華大學土木工程學系碩士論文。
45. 游麗玉(1995)，惠蓀實驗林場桂竹林生物量與養分聚積，國立中興大學碩士論文。
46. 黃凱洛(2003)，杉木人工林生長量與碳吸存之研究，國立中興大學森林學研究所碩士論文。
47. 黃意茹(2001)，都市綠覆率與氣溫之相關性研究—衛星影像類神經網路分類法之應用，逢甲大學土地管理所碩士論文。
48. 廖宜緯、陳美光、陳羽康、鍾玉龍、吳守從(2011)，應用 SPOT 衛

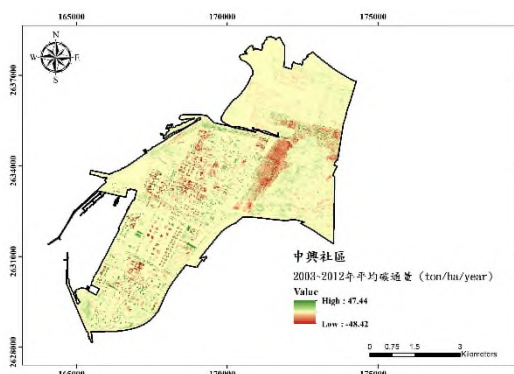
- 星影像推估台糖公司屏東縣平地造林碳貯存，航測及遙測學刊，16(2)，101-113。
49. 劉知妤、王兆桓(2008)，以林齡－蓄積量模式估算柳杉及檜木人工林的碳吸存量，宜蘭大學生物資源學刊，4(1):35-45。
50. 鄭祈全(2014)，遙測技術於台北都會區碳吸存時空變異分析之研究，中國文化大學景觀學系所研究計畫。
51. 賴爽云(2008)，遙測應用於高雄市都市林碳吸存之評估，國立屏東科技大學森林系碩士學位論文。
52. 謝漢欽(1998)，SPOT 綠度與森林生育地因子於台灣杉材積推估之探討，台灣林業科學，13(3):175-188。
53. 顏添明、黃凱洛(2006)，杉木地上部碳儲存量之推估，台灣林業科學，1(2):273-280。
54. Beven, K.J., Kirkby, M.J. (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, 24(1), 43-69.
55. Brown, S., A. Lugo, E. Chapman, J. (1986). Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. Canadian Journal of Forest Research 16, 390-394.
56. Fang, J. Y., Chen, A.P. Peng, C.H. Zhao, S.Q. Ci, L .G. (2001). Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science 292, 2320-2322.
57. FAO, 2020. Global Forest Resources Assessment 2020, Global Forest Resources Assessment 2020. FAO, Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/CA9825EN>
58. Gifford, R.M. (2000) Carbon contents of aboveground tissues of forest and woodland trees. National Carbon Accounting System Technical Report no. 22. Canberra: Australian Greenhouse Office, p17.

59. Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) (2014). Fifth Assessment Report (AR5). <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>.
60. Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) (1996). Chapter 5. Land-use Change and Forestry Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual. The Intergovernmental Panel on Climate Change, Blacknell,5.6-5.75.
61. Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use.
62. Köppen, W. (1931). Grundriss der Klimakunde. Walter deGruyter Co., Berlin, Germany.
63. O’Keefe, P., Westgate, K., Wisner, B. (1976) Taking the naturalness out of natural disasters. Nature vol.206.
64. Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R.A., Kauppi, P.E., Kurz, W.A. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science 333,988.
65. Parresol, B. (1999). Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. Forest Science 45, 573-593.
66. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. (1973).Monitoring vegetation systems in the great plain with ERTS.Proceedings of the 3rd ERTS Symposium.
67. Tsai, J. L., Tsuang, B. J., Tu, C.Y. (2008). Characteristics of CO₂ flux over different land types in Taiwan and future field experiment plan of TTFRI. Proceedings of the international symposium on CO₂ flux monitoring technology, 25-34.
68. UNDHA. (1992). Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management. DNA/93/36, United Nations Department of Humanitarian Affairs, Geneva, Switzerland.

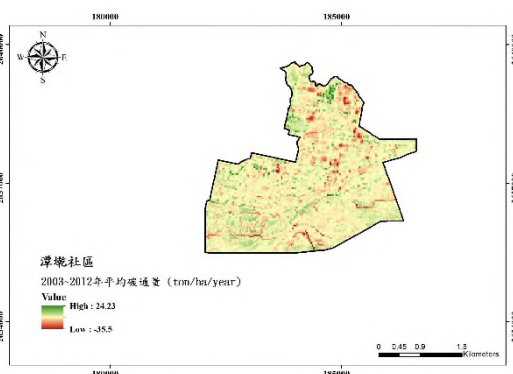
69. UNFCCC, (2009). Resource guide for preparing the national communications of non-annex i parties. United Nations Framework Convention on Climate Change, 1-34.
70. Wu, S.W., Lin, C.Y., Sun, M.Y., Lu, S.Y. (2022). Estimation of soil depth in the Liukuei Experimental Forest by using conceptual model. CATENA, 209(2).
71. Yingmin, J., Junping, D., Weicun, Z. (2019). Proceedings of 2018 Chinese Intelligent Systems Conference: Volume II. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2291-4>.

附錄

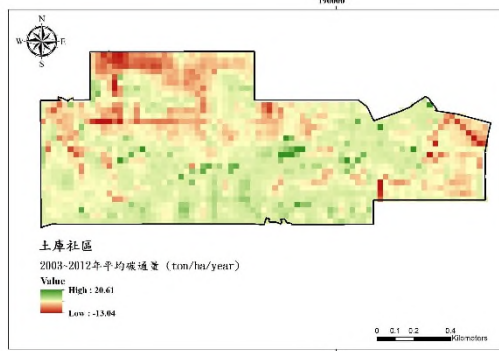
附錄一、55 處農村社區探碳通量空間分布



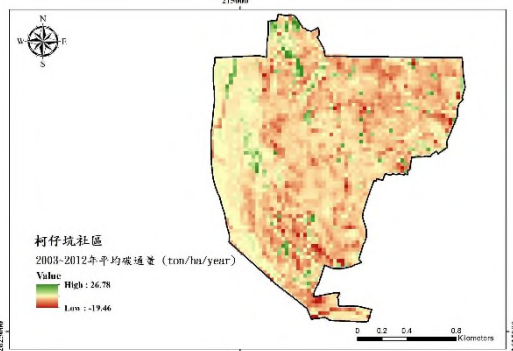
(1) 西港社區碳通量空間分布



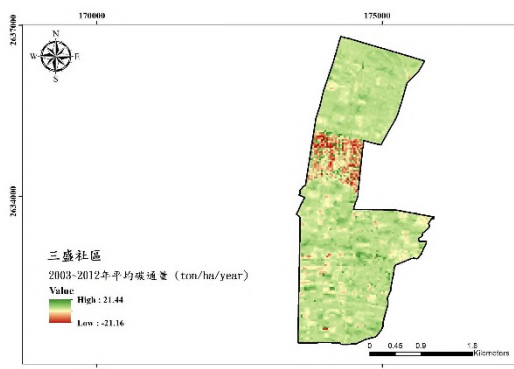
(2) 潭墘社區碳通量空間分布



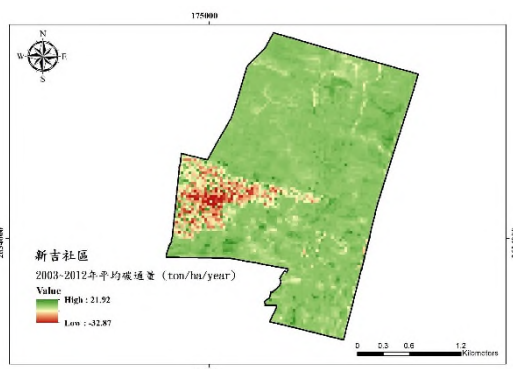
(3) 土庫社區碳通量空間分布



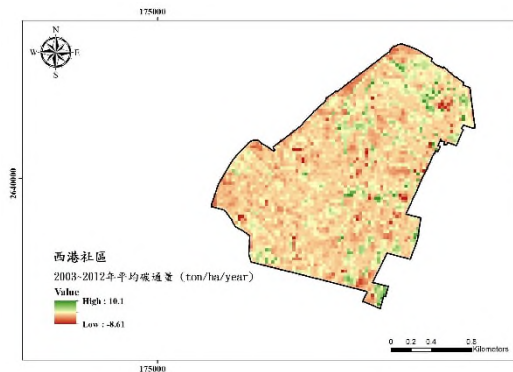
(4) 柯仔坑社區碳通量空間分布



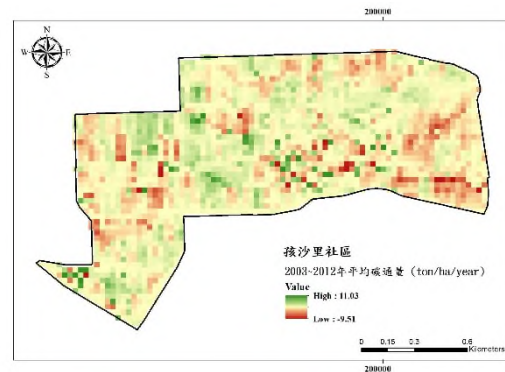
(5) 三盛社區碳通量空間分布



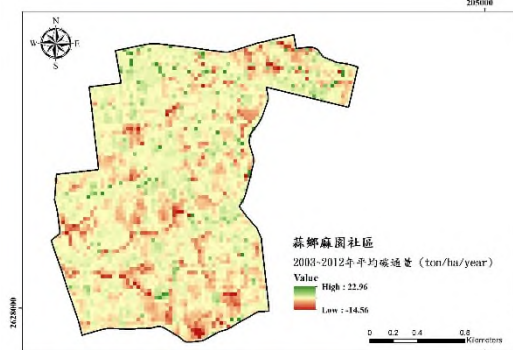
(6) 新吉社區碳通量空間分布



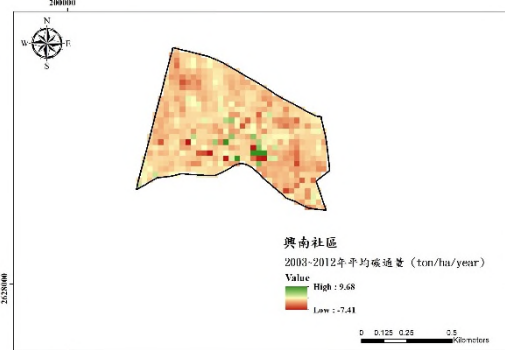
(7) 中興社區碳通量空間分布



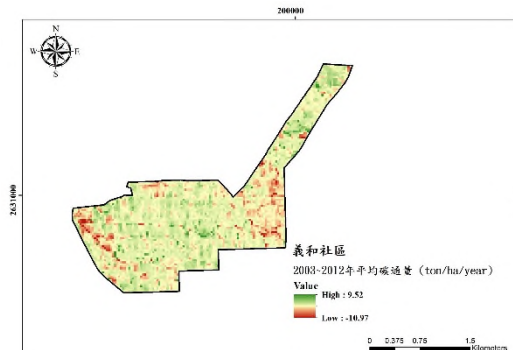
(8) 孩沙里社區碳通量空間分布



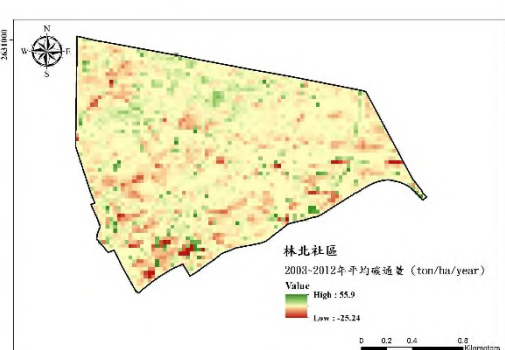
(9) 蒜鄉麻園社區碳通量空間分布



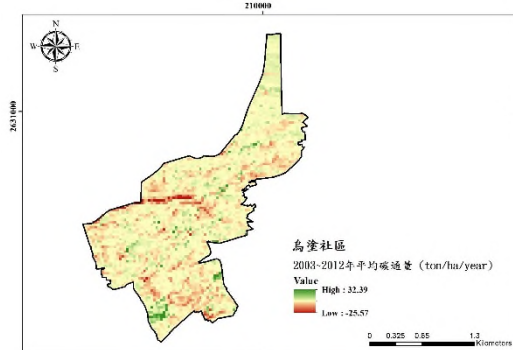
(10) 興南社區碳通量空間分布



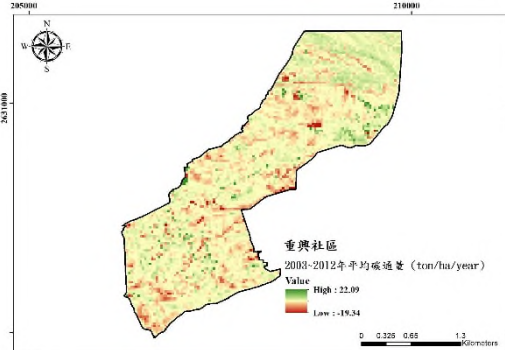
(11) 義和社區碳通量空間分布



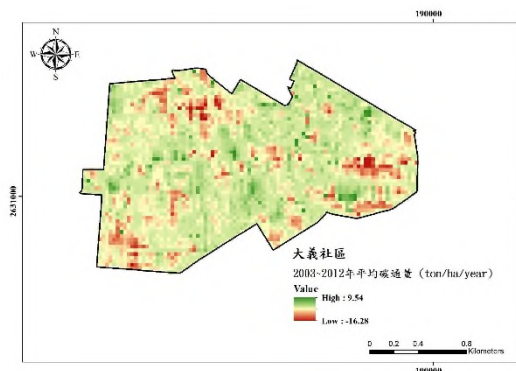
(12) 林北社區碳通量空間分布



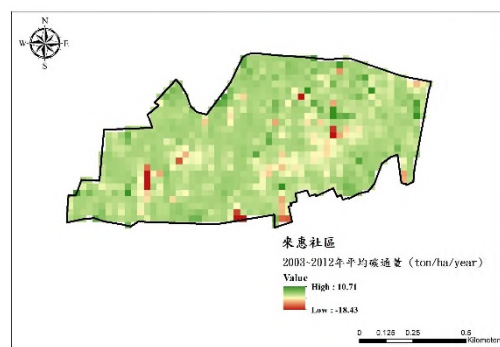
(13) 烏塗社區碳通量空間分布



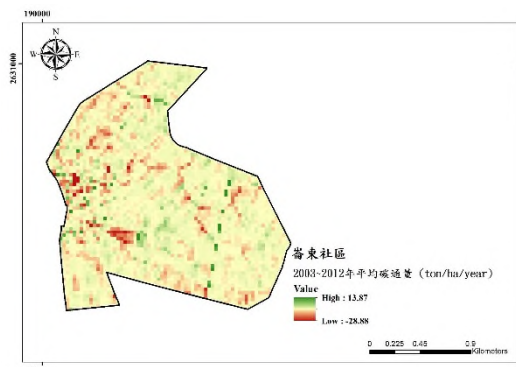
(14) 重興社區碳通量空間分布



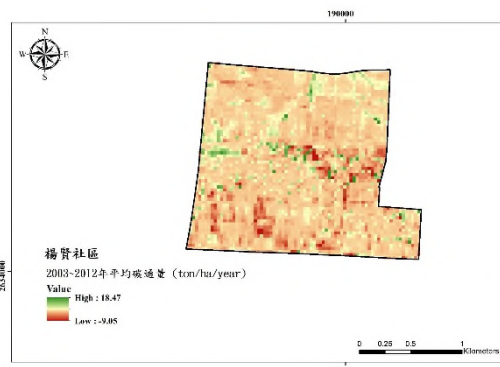
(15) 大義社區碳通量空間分布



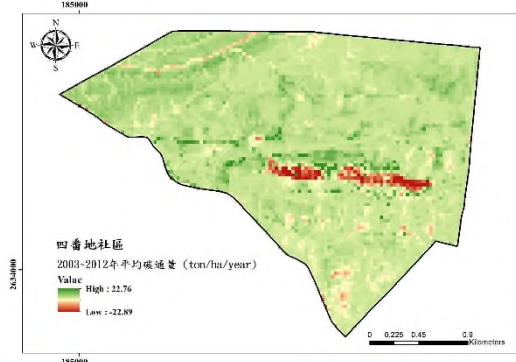
(16) 來惠社區碳通量空間分布



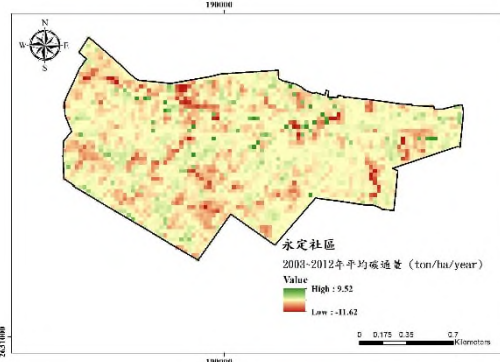
(17) 崙東社區碳通量空間分布



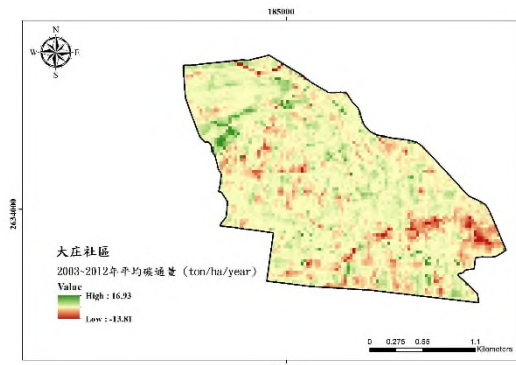
(18) 永定社區碳通量空間分布



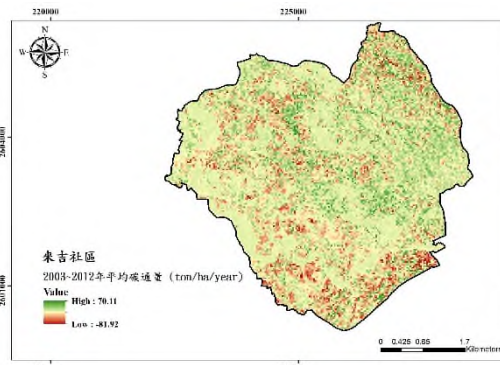
(19) 四番地社區碳通量空間分布



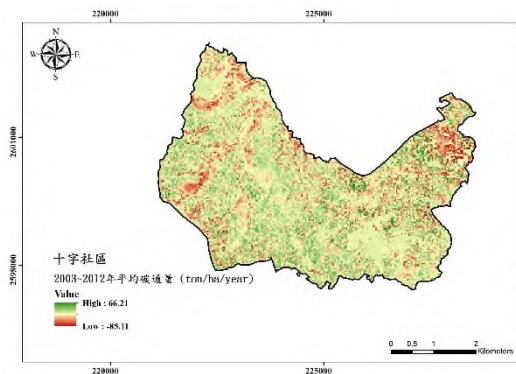
(20) 楊賢社區碳通量空間分布



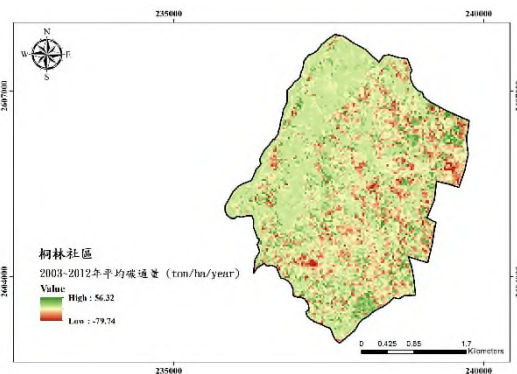
(21) 大庄社區碳通量空間分布



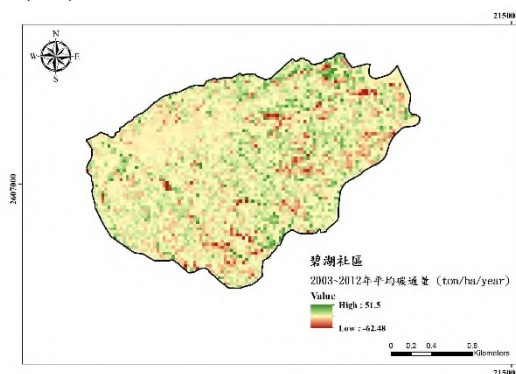
(22) 來吉社區碳通量空間分布



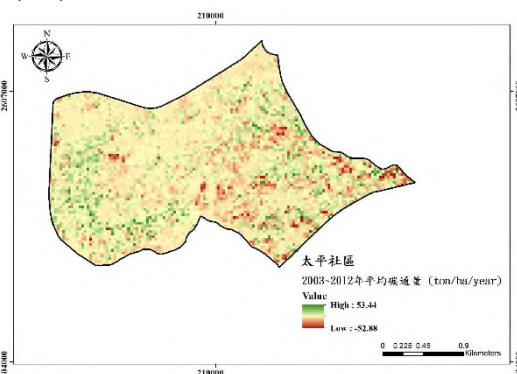
(23) 十字社區碳通量空間分布



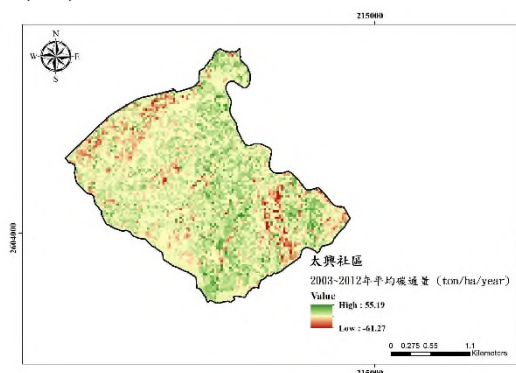
(24) 桐林社區碳通量空間分布



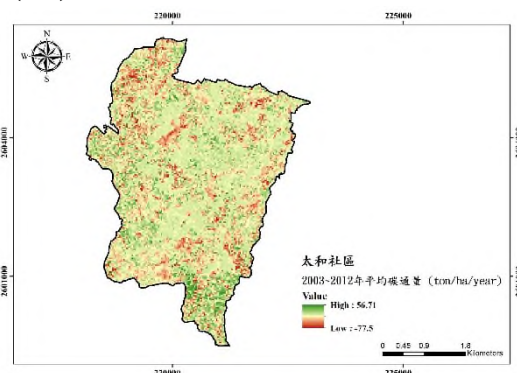
(25) 碧湖社區碳通量空間分布



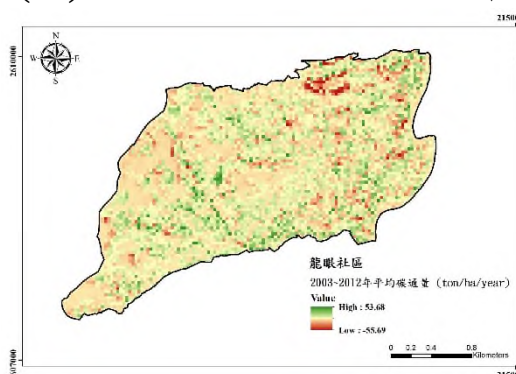
(26) 太平社區碳通量空間分布



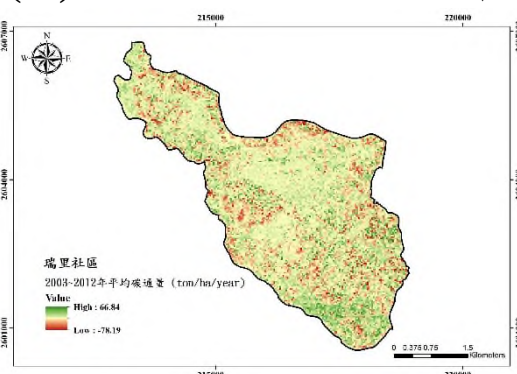
(27) 太興社區碳通量空間分布



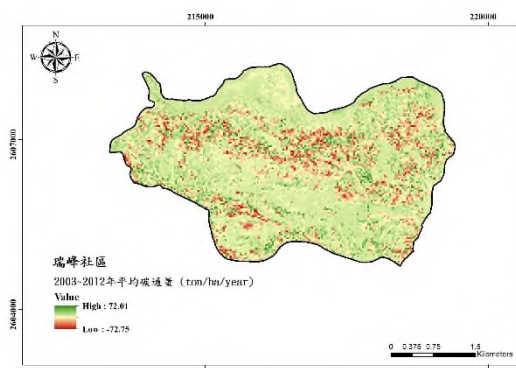
(28) 太和社區碳通量空間分布



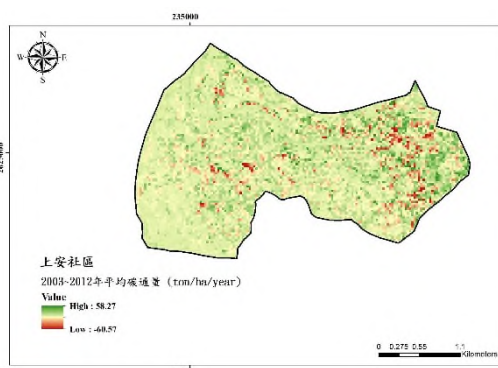
(29) 龍眼社區碳通量空間分布



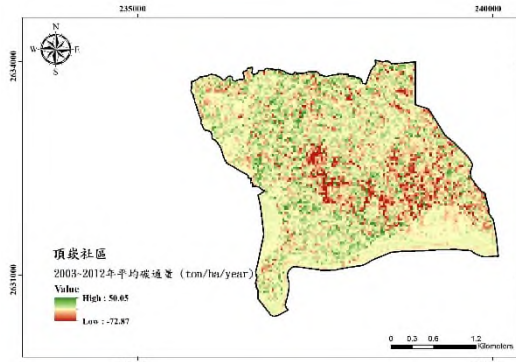
(30) 瑞里社區碳通量空間分布



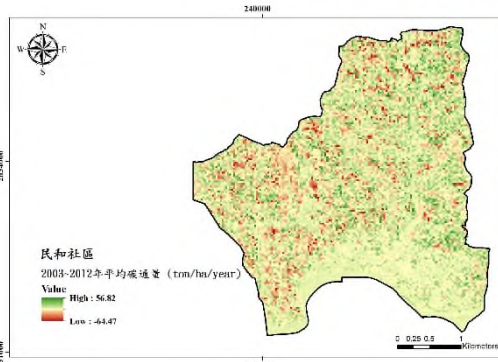
(31) 瑞峰社區碳通量空間分布



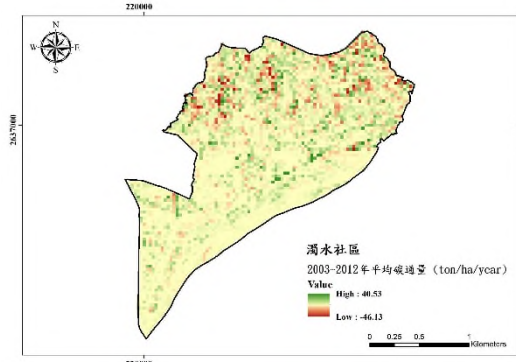
(32) 上安社區碳通量空間分布



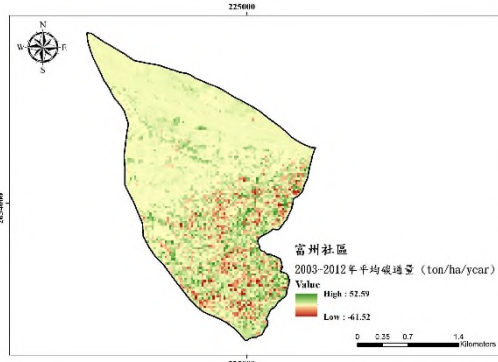
(33) 頂崁社區碳通量空間分布



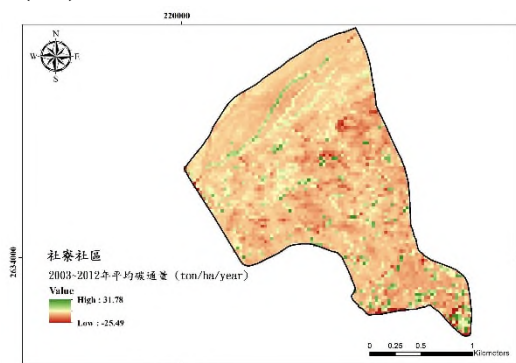
(34) 民和社區碳通量空間分布



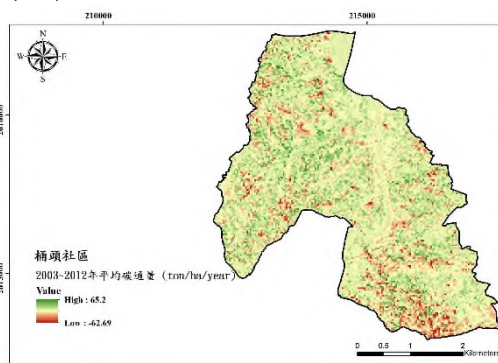
(35) 濁水社區碳通量空間分布



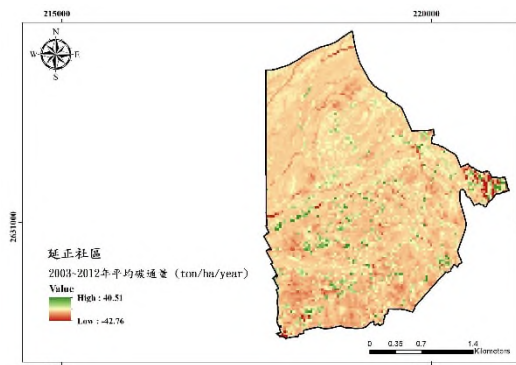
(36) 富州社區碳通量空間分布



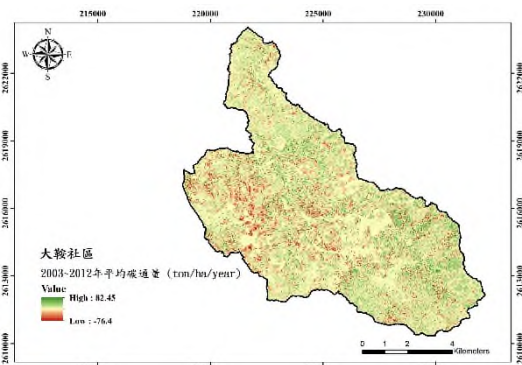
(37) 社寮社區碳通量空間分布



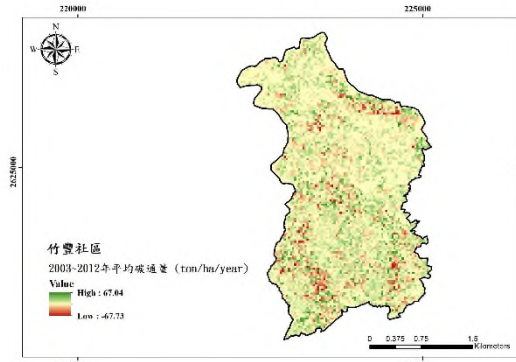
(38) 桶頭社區碳通量空間分布



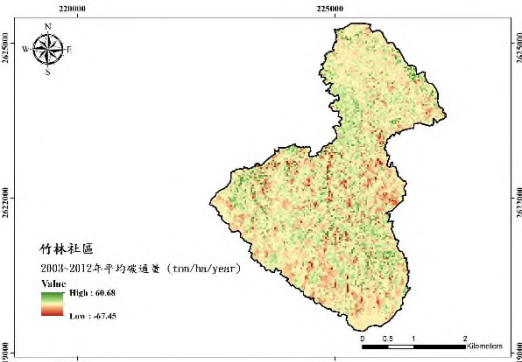
(39) 延正社區碳通量空間分布



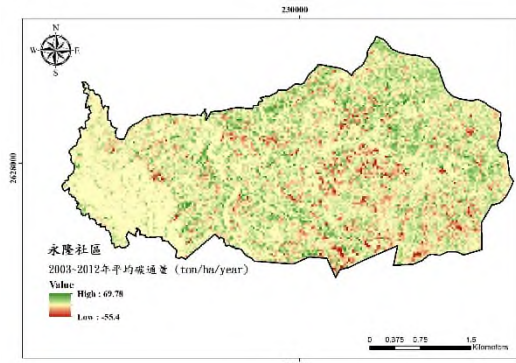
(40) 大鞍社區碳通量空間分布



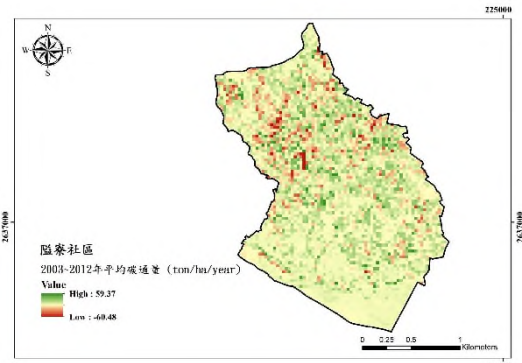
(41) 竹豐社區碳通量空間分布



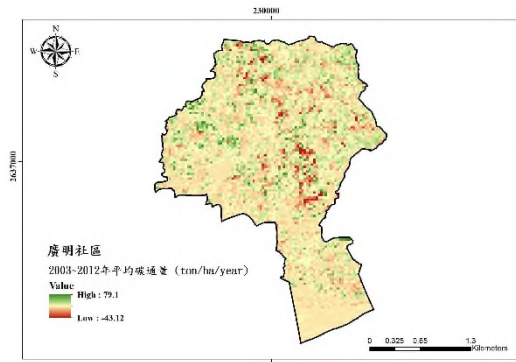
(42) 竹林社區碳通量空間分布



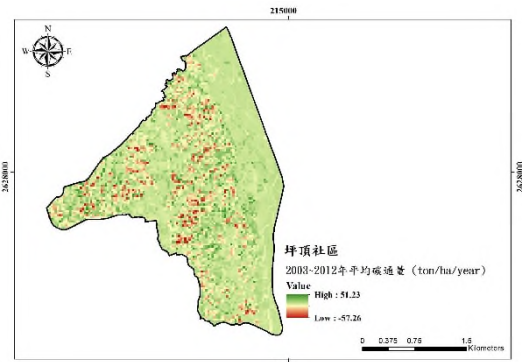
(43) 永隆社區碳通量空間分布



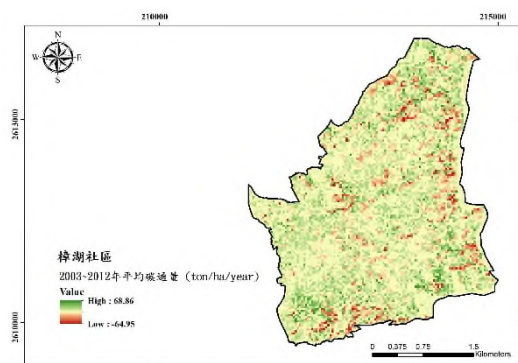
(44) 隘寮社區碳通量空間分布



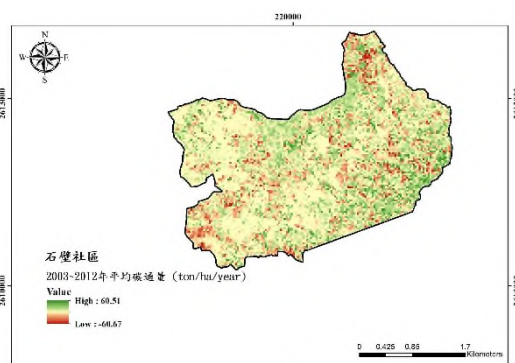
(45) 廣明社區碳通量空間分布



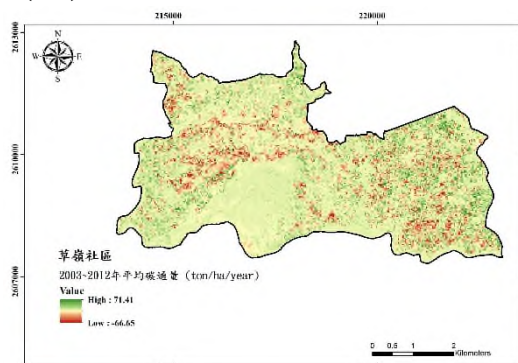
(46) 坪頂社區碳通量空間分布



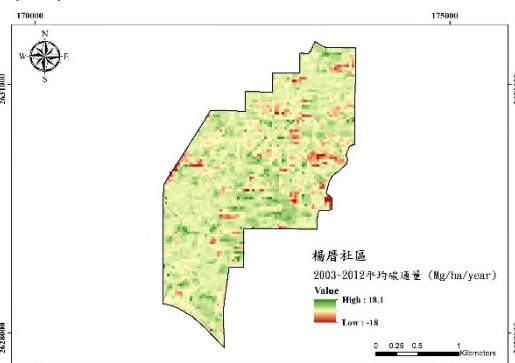
(47) 樟湖社區碳通量空間分布



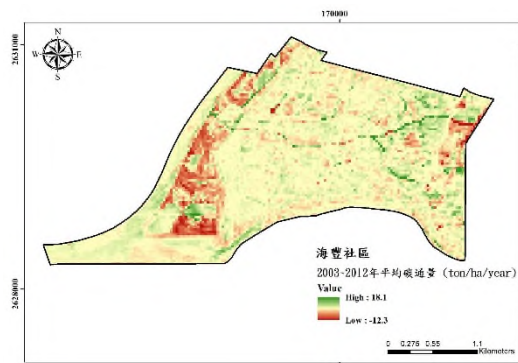
(48) 石壁社區碳通量空間分布



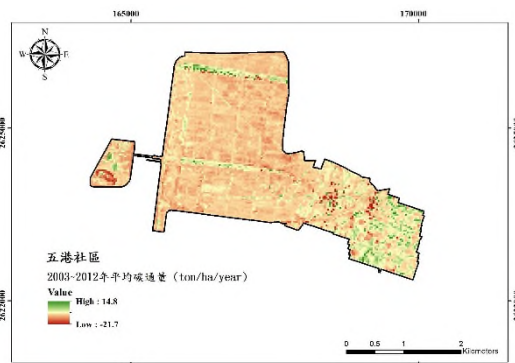
(49) 草嶺社區碳通量空間分布



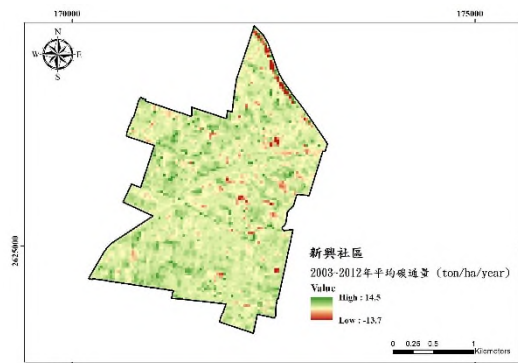
(50) 楊厝社區碳通量空間分布



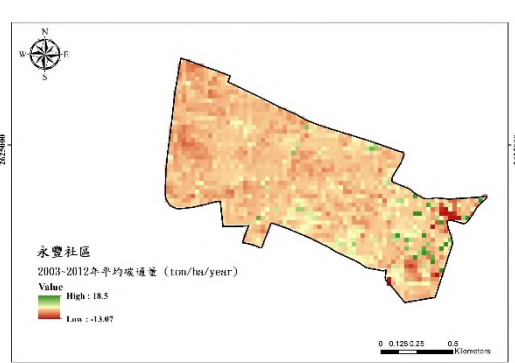
(51) 海豐社區碳通量空間分布



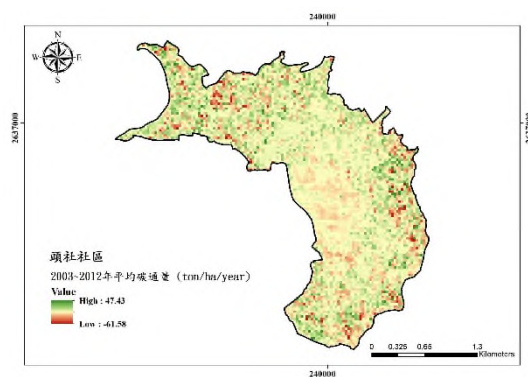
(52) 五港社區碳通量空間分布



(53) 新興社區碳通量空間分布



(54) 永豐社區碳通量空間分布



(55) 頭社社區碳通量空間分布

附錄二、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

編號	審查意見	意見回覆
1	農村再生所營造休憩點碳存量，未必會比雜木叢生荒地還要高。此外，農產業發展蓬勃，農業所需資材室、小型加工室、農機室、甚至農舍等，將佔掉農地面積。綜上，農村活化與產業發展越好，恐造成碳存量降低，本計畫如何利用碳存量來論述農村再生結果，或應有其他碳存觀點建議。	農村再生發展過程，隨建成土地增加而減少整體土地碳匯功能，近年「農村低碳社區」之政策，透過農村自身達到「淨零排放」的目標，因此，現階段農村營造除了既有的綜合考量，應透過農村再生核定前土地利用情形或參考相同發展功能類型的農村之碳存量做為評估基準值，透過農村設施低碳化與增加植栽綠化面積，達到碳匯補償效果。
2	農村(地)屬生命力變動狀態，以稻田為例，有耕後裸地、秧苗、成株、結穗、收割等時期，碳存量應會隨時節變化，建議納入考量。	IPCC 碳匯估算原則，係以該年生物量淨累積值轉換而推估碳匯量。以稻田而言，隨作物成株、結穗、收割之過程，又因採收而損失，雖農地具有多樣狀態但最終還是無淨碳存量增長。
3	農村社區營造涉及農村再生工程、產業發展，以及相關部會單位介入(如文化部、客委會、營建署與原民會等)，每年都會有一定程度變化，未來碳存量評估精確性、圖資取得來源、技術操作、更新速度及費用成本等，能否克服未來應用上之任何問題？另圖資分析頻率應涵蓋多少年度，才有較佳與精確效果。本計畫理論證明未來可用或不可用，或相關建議作法，皆具研究價值性。	本案以 IPCC 為碳存量評估準則，結合過去調查資料，建置可動態評估碳存量之概念模式。相關圖資的皆可達到 1m 網格的解析度，在大尺度範圍的評估下，空載影像已經大幅降低人為調查所需的成本，且相關技術持續擴展，在未來其具有應用潛力。 圖資分析頻率與經費有很大的關聯性，每個月一次或是每年一次其可能因變異小，而不符合效益。一般會以事件型或是 5 年評估為原則，達到最佳評估效果。

4	農村生活模式具有不同碳存量型態，臺灣里山農村推動在綠覆率等生態評估指標上，是否可加入碳存量項目，本計畫可納入思考。另在評估應用上未含平地農村考量為何？	「農村低碳社區」之政策發展下，除了透過綠覆率進行評估，草本與木本植物反映不同的碳匯共獻量，有必要研擬建置可評估概念模式，合理評估碳存量並做為未來評估指標之一。 本案篩選 55 處農村再生社區包含平地型。
5	本案選定濁水溪流域作為碳存量推估模式建置樣區，是否可說明原因及其代表性。	濁水溪流域上、中、下游呈現多樣化的氣候環境及人文特性，其中本案以濁水溪流域範圍周遭共 55 個農村社區，包含一般型、原民型、山村型及漁村型等發展功能類型，應具其研究代表性。
6	濁水溪流域含括地理區位由山區至沿海地區，其中所建置碳存量模型之驗證係利用林務局永久樣區之比對進行驗證，查永久樣區位處範圍皆位於山區林務局林場，對於沿海漁村之碳存量模型如何驗證。	調查數據需耗費長期人力物力資源透入而得，依據 IPCC 提供國際使用的評估原則下，可分為三個層級，其中層級一為利用 IPCC 國際通用數據其推估值不確定性高，層級二則是採用國家調查數據降低不確定性為主。國內具有長期監測資料並且具有代表性，以林務局永久樣區為主，雖位於山區但其建置之分布具有其意義及代表性，與層級一資料相比已經可大幅降低資料不確定性。
7	建議可選定山、海、平原等每一個代表性農村社區作為示範區，提供綠化前後碳存量比對。	依意見辦理並納入成果報告。

附錄三、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

編號	審查意見	意見回覆
1	請補述期末報告與後續方向及內容。	已補期末報告內容及後續方向，請參閱第七及第八章。
2	P.6-P.24, 2003~2012 年各類型社區別中，以原民型的碳通量總計最大(36.5)，是否可與目前研究內容，進行對照說明？	兩期碳量指標雖以原住民型為最大，但碳通量卻以碧湖及龍眼社區較大。進一步分析顯示農村再生營造效益屬高類別社區與地形及計畫數有顯著關係；而低類別社區受函數 1 之主要解釋因子為負及函數 2 之主要解釋因子為正者所影響，分別是社區之戶數、人口數、以及面積，顯示農村再生營造效益屬低類別之區位與社區規模及開發度有關。
3	可否說明目前研究中，效益最好與效益最差的關鍵因素為何？	農村再生營造效益屬高類別社區與地形及計畫數有顯著關係；而低類別社區受函數 1 之主要解釋因子為負及函數 2 之主要解釋因子為正者所影響，分別是社區之戶數、人口數、以及面積，顯示農村再生營造效益屬低類別之區位與社區規模及開發度有關。
4	是否可提出”碳存量”，如何協助農村發展之具體項目為何？	以碳存量指標評估農村再生營造效益之良窳能凸顯水土保持局投入社區營造計畫之貢獻，計畫投入數量越多營造效益越高。本研究產出具水土保持特色農村再生碳存量分布圖資，有助於後續農村再生規劃業務上之精進及應用。研究成果可供低碳綠環境投入時，評估營造優先順序及效益

		之參據。
5	P.3-P.4，4.農村再生之「定位」…應該不是”定位”，請協助修正標題	感謝委員指正，已修正為「農村再生社區發展功能類型」。
6	研究流程清晰，相關文獻及技術爬梳完整。	謝謝評論。
7	本研究為「碳存量指標在農村再生社區營造效益評估之應用」重點在於營造效益，目前已針對 55 樣區 2003 年與 2012 年間碳存量的變化有了評估成果，然而仍無法呈現與農村再生社區「營造行為」間的關連性，建議或可與 55 樣區歷年投入資源加以比對，以了解相關資源投入與社區碳存量變化可能的關連性。	55 個農村再生社區中具最高營造效益(5 顆星)等級有碧湖及龍眼社區。以群集分析將農村再生社區營造效益評分等級分為高、中、低三類，再藉由社區之相關資訊，以典型判別分析進行分類，顯示農村再生社區營造效益分類可由社區相關資訊加以呈現，其分類準確度達 70.9%，可見農村再生營造效益與社區之區位、開發度及計畫數有關。 農村再生營造效益屬高類別社區與地形及計畫數有顯著關係；而低類別社區受函數 1 之主要解釋因子為負及函數 2 之主要解釋因子為正者所影響，分別是社區之戶數、人口數、以及面積，顯示農村再生營造效益屬低類別之區位與社區規模及開發度有關。
8	55 個樣區中原民型僅三個、複合型僅一個，樣本數少代表性待觀察外，也較難深入比較分析。此分類雖為參考農村再生整體發展計畫所訂，惟該計畫分類主要是以生活型態區分，是否對碳存量變化有決定性影響？還是環境(山、海、平原)影響比較大？建議可以再深入探討。	55 個農村再生社區中具最高營造效益(5 顆星)等級有碧湖及龍眼社區。以群集分析將農村再生社區營造效益評分等級分為高、中、低三類，再藉由社區之相關資訊，以典型判別分析進行分類，顯示農村再生社區營造效益分類可由社區相關資訊加以呈現，其分類準確度達 70.9%，可見農村再生營造效益與社區之區位、開

		發度及計畫數有關。
9	期初建議之一有說明後續會針對山、海、平原各選取一代表性農村社區作為示範區，其代表性是否有無篩選機制或原則可資作為參據。	本研究係以濁水溪流域之 55 農村再生社區為對象，透過環境指標結合林業單位調查成果，建立 IPPC 層級三的碳存量評估模式，使用概念模式對林地碳存量進行動態評估，量化碳儲量的空間分佈，綜合分析農村再生營造效益。
10	本案說明係採用山區林務局林場永久樣區作比對驗證，惟漁村與山區之差異恐影響驗證可靠度，雖於初期意見說明透過國家層級數據可大幅降低不確定性，試問是否有評估其可靠度之誤差範圍與說明。	本案模式係以森林(未受人為干擾)之系統樣區加以驗證；而農村再生社區之類型受人為干擾幅度差異甚大，模式估算之碳存量僅能反映潛在之碳存量分布，主要是流域下游平地區位主要是沖積扇地形，上游沖刷下來之土層會大量累積，致土壤碳存量較高，尤其是溼地區位易累積大量土壤及枯枝葉，雖無光合作用及植物生長，長期累積的結果會反映出濕地碳存量會居其他土地利用類別之冠。所以開發度較高之區位因破壞植栽、不透水面積增加，仍有多量碳存量主要是被封土壤內仍存有大量碳所致。本研究重點是碳存量之空間分布，其包括現況植生初期產物之碳吸存、已合成為植體碳含量之次級產物、以及土壤之長期化育碳含量。模式推估在林地驗證上之準確度極高可達到 0.1%顯著水準，能忠實反映林地之碳存量。但在非林地區位(如開發度較高農村再生地區)，其與 IPPC 土地利用分類碳存量之

		推算結果會有高估情形，主要差異是 IPPC 在土地利用分類之碳存量並未對封存的土壤碳進行探討分類，本研究碳存量模式之物理意義主要在凸顯碳存量潛勢，如何讓這些已封存之碳不被排出之外，另可再藉由環境營造增加植栽之碳吸存，能迅速達到碳之淨零排放為本研究之評估目標。模式藉由兩期碳存量之空間分布，可進一步推算兩期之碳通量，模式之碳通量指標即可有效反映研究區位碳吸存之空間分布，能具體指出碳通量劣化熱區，供社區綠環境營造改善之參考。
--	--	--

附錄四、期末聯合審查意見暨回覆辦理情形

編號	審查意見	意見回覆
1	計畫變數除農再計畫外，是否有考量其他部會計畫(如土木工程、景觀風貌營造、植樹造林、自行車系統建置等)所施作硬體設施，倘如納入評估會否改變所設參數。	本案之計畫變數係依水土保持局 - 農村風情網(https://rural.swcb.gov.tw/)之各農村之公開資料作為統計資料依據。 本案計畫執行中與局內承辦聯繫後，因各農村再生社區之投入計畫等相關資訊，涉及經費屬於非公開資料，故無法作為進一步納入評估。
2	碳存量指標在其他文獻研究中，有否建議本案可在增納因子？	本案碳存量指標以植物覆蓋(NDVI)、土壤化育(TWI)、林木高度(CHM)，共三大環境指標，其皆可反映在陸域生態系之土地三大碳庫(生物量、枯有機質與土壤)；針對植物生物量因本案僅以濁水溪流域為樣區，其區域之生態氣候區相近，植物種類較相似，後續針對全台尺度進行建模可納入氣候因子進行研討。
3	建議應探討社區環境特性，了解區內哪些屬人為投入或為自然環境本身資源，才可有效比較社區營造過程中所產生碳存正面效益。 另可評估設定基準年，以了解各部會投注資源所產生碳存量變化。	本案已將濁水溪流域農村遵循水保局之農村發展功能分為一般型、原民型、山村型、漁村型、離島型之五大類型作為社區環境特性之差異分類依據，並計算各類型農村之平均基礎值，針對不同類型社區營造碳存效益進行評估，可參考第八章。 模式所需之指標(DEM、DSM)，因過去全台產製之高精度及高解析度數值地形模

		型測製工作僅兩期之局限，分別為 2003-2005 年及 2010-2012 年(可參考第五章第一節表 5-2)，因此在設定基準評估年現階段仍受限圖資局限；近年內政 LiDAR 技術更新數值地形模型成果測製工作精進，期未來每五年獲取更新圖資，以利定期檢視營造效益。
4	就操作區域模擬成果，後續可擴大到全國尺度試辦，以利了解整體農村碳存量變化。	謝謝評論。