

【臺北市立美術館「2020 台北雙年展」作品  
《儲回大地的藝術》碳中和複層林營造案】  
期末成果報告

<https://www.taipeibiennial.org/2020>



臺北市林業技師公會

理事 長：顏仁德

總 幹 事：陳阿興（計畫主持人）

中華民國 110 年 12 月 15 日

## 摘要

自 1997 年於日本京都召開 UNFCCC COP3，通過了「京都議定書(Kyoto Protocol, KP)」，作為世界具體推動減少溫室氣體排放的國際公約，而京都議定書亦正式將造林與再造林活動納入其清潔發展機制(Clean Development Mechanism, CDM)計畫中，其原意在於允許已開發國家，藉由於開發中國家實施造林與再造林等 CDM 計畫，來抵消其部分溫室氣體排放量。即人類生活所需之活動項目，包括交通、能源使用、農業以及工業生產等過程所產生之 CO<sub>2</sub> 排放(簡稱碳排放)，若想降低活動項目之碳排放量，除在能源使用或生產過程採取減排技術外，亦可透過碳抵換(碳補償)方式，達到中和碳排放量的目的。

實踐 2020 台北雙年展「你我不住在同一個星球上：外交新碰撞」的核心主題，以實踐植林減碳的複層林營造活動，並結合學術單位的調查研究，分析植林後之碳吸存功能，讓聯展活動能共同關切人類藝術、環境與生活的議題，宣揚「你我不住在同一個星球上，但對於生態環境的維護，有相同的理念，並貢獻心力」，而 2020 台北雙年展之 CO<sub>2</sub> 排放量，總計約為排放 390 ton CO<sub>2</sub> 量。如何達到碳中和除了通過使用低碳能源取代化石燃料及節能減排之外，透過植樹造林來抵消活動所產生的 CO<sub>2</sub> 的排放量為本計畫執行之目標。以原生樹種之臺灣肖楠(*Calocedrus formosana*)、楓香(*Liquidambar formosana*)及相思樹(*Acacia confusa*)進行整地造林，並透過撫育作業達到新植林木、留存木及未來下層木之林相改良目的，提升森林的碳吸存能力。

本計畫以國際間之碳減量方法(Approved VCS Methodology VM0005 1.2)作為碳吸存推估之參考依據，並依照林地經營現況，透過改善森林經營計畫之減量措施架構與 MRV 精神，評估此展覽活動所產生之碳排放量(390 ton CO<sub>2</sub>)，在森林經營期間，何時可達到碳中和的目標。由林相改良及碳中和計算分析結果可知，本計畫以面積 52.70 ha 為規劃區，其中 10.11 ha 作為專案經營活動範圍，四種不同基線情境下，藉由本專案活動(改善森林經營計畫)，得知 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，分別為 4,523.39 ton CO<sub>2</sub> 吸收量、4,346.64 ton CO<sub>2</sub> 吸收量、3,993.15 ton CO<sub>2</sub> 吸收量及 3,816.40 ton CO<sub>2</sub> 吸收量，而分別約於第 8~9 年可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量及專案活動中所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量，但現階段部分數據為本專案假設情境，故後續可藉由監測計畫，以滾動方式調整碳中和的情境。

---

以適度的植林及積極的森林經營管理方式，增加森林的多目標功能，除原有的涵養水源、水土保持及生物多樣性等功能外，未來預期可增加景觀美質、休閒遊憩、碳中和等功能，故選用生長期短之相思樹、中期楓香、生長期較長之臺灣肖楠，兼具碳固定與生態效益之平衡。森林經營係以多元目標為發展方向，並以實踐永續森林為宗旨。而臺灣肖楠的樹型優美，成林後呈現櫛比鱗次的景觀；楓香為變葉樹種，從春季新生枝桠的嫩綠、夏季的翠綠、秋季轉紅、冬季落葉，呈現四季不同的美感；相思樹為常綠喬木，夏季花期放眼望去一片金黃。未來從大崙頭山鄰近的步道遠望，可增添不同的視覺享受。林木修枝所得的枝條，可利用作為工藝品，或是做為菇類栽種的原料，可透過內雙溪自然教育中心辦理相關的課程活動，提供環境教育活動的素材。

## Abstract

Since the UNFCCC COP3 was held in Kyoto, Japan in 1997, the "Kyoto Protocol (KP)" was adopted as an international convention to specifically promote the reduction of greenhouse gas emissions of the world. It also officially included afforestation and reforestation activities in the Clean Development Mechanism (CDM) plan, its original intention is to allow developed countries to offset part of their greenhouse gas emissions by implementing CDM plans such as afforestation and reforestation in developing countries. Thus, the activities required for human life, including the CO<sub>2</sub> emissions produced by the processes of transportation, energy use, agriculture, and industrial production. As to reduce the carbon emissions of activities, in addition to energy use or production in addition to emission reduction technologies, carbon offsets can also be used to achieve the goal of neutralizing the carbon footprint.

To achieve the core theme of the Taipei Biennial 2020 "*You and I don't Live on the Same Plane: new diplomatic encounters*", the project to implement the multi storied forest management system to reduce carbon emissions and combined the academic institutions to conduct research investigations and analyzing the carbon sequestration function after planting, so that the joint exhibition can jointly care about the issues of human art, environment, life and to promote "*You and I don't Live on the Same Plane, but we have the same concept and contribute our efforts to the maintenance of the ecological environment*". The emissions of the Taipei Biennial 2020 are approximately 390 ton CO<sub>2</sub>.

---

To achieve carbon neutrality in addition to the use of low-carbon energy to replace fossil fuels and energy conservation and emission reduction, afforestation to offset the CO<sub>2</sub> emissions generated by activities is the goal of this project. The native species of *Calocedrus formosana*, *Liquidambar formosana* and *Acacia confusa* are used for afforestation, and through tending operations to achieve the purpose of improving carbon storage capacity of forests with the morphology of newly planted trees, remaining trees and underlayer vegetation.

This project uses the international carbon reduction methodology (Approved VCS Methodology VM0005 1.2) as the reference basis for carbon storage estimation and evaluates this exhibition by improving the forest management plan's reduction measures framework and MRV spirit in accordance with the status of forest management. The amount of carbon emissions (390 ton CO<sub>2</sub>) generated by the activity and when will the goal of carbon neutrality be reached during the forest management period? According to the results of forest improvement and carbon neutral calculation and analysis, this project set an area of 52.70 ha as the planning area, of which 10.11 ha with the scope of project management activities. Under four different baseline scenarios, this project activity (improvement of forest management plan), the results show that the CO<sub>2</sub> changes of the project activities in 25 years are 4,523.39 ton CO<sub>2</sub> absorption, 4,346.64 ton CO<sub>2</sub> absorption, 3,993.15 ton CO<sub>2</sub> absorption and 3,816.40 ton CO<sub>2</sub> absorption, which can be offset in the 8<sup>th</sup> to 9<sup>th</sup> year respectively. The amount of CO<sub>2</sub> generated by the Taipei Art Museum 390 ton CO<sub>2</sub> and the CO<sub>2</sub> emissions generated during the project activities. However, some of the data based on the project's hypothetical scenario, so the subsequent monitoring plan can be used to adjust the carbon emissions in a rolling manner and the situation.

Appropriate forest planting and active forest management methods are used to increase the multi-purpose functions of the forest. In addition to the original functions of water and soil conservation and biodiversity, it is expected to increase landscape, leisure and carbon neutrality in the future. Therefore, the *Acacia confusa*, *Liquidambar formosana*, and *Calocedrus formosana* with short, mid, and long rotation age respectively are selected to have a balance of carbon sink and ecological benefits. The forest management act takes multiple goals as the direction and takes the sustainable forest management as the purpose. To that end, the trees of *Calocedrus formosana* are beautiful, showing a landscape with dense, tall that spring up thick and fast after it grown as a forest; *Liquidambar formosana* is a species of variable-leaf colors, from the tender green of new

---

branches in spring, verdant green in summer, turning in red in autumn, and deciduous leaves in winter, presenting the beauty of different seasons; The *Acacia confusa* is an evergreen tree and looks golden during the summer flowering period. Looking at the trail near Daluntou Mountain in the future will add different visual enjoyment. In this forest management plan period, the branches obtained from tree pruning can be used as handicrafts or as raw materials for mushroom cultivation, and the Nei Shuangxi Nature Education Center can handle relevant courses and activities to provide materials for environmental education activities in this area.

## 目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
目錄.....	V
壹、計畫緣起及目的.....	1
一、計畫緣起.....	1
二、計畫目的.....	4
貳、計畫實施地點概況及林地使用現況.....	5
一、計畫區位置及人文交通狀況.....	5
二、計畫區氣候.....	7
三、林地使用現況.....	8
參、計畫工作項目規劃及執行方法.....	10
一、計畫區森林經營規劃、資源分析及調查.....	10
二、複層林規劃與營造.....	11
三、碳吸存推估與監測規劃.....	12
肆、執行成果.....	14
一、計畫區森林經營規劃、資源分析及調查成果.....	14
二、複層林營造規劃及成果.....	24
三、碳吸存推估與監測規劃及成果.....	50
伍、討論.....	92

---

一、森林的生態服務價值.....	92
(二)以造林來達成碳中和之效應.....	95
(三)臺灣現階段碳中和所面臨之問題.....	101
柒、結論.....	105
捌、參考文獻.....	107
附件一 專有名詞.....	114
附件二 複層林營造碳吸存推估與監測規劃書(5 ha 保留).....	119

## 圖目錄

圖 1 計畫實施地點及周邊人文交通狀態.....	5
圖 2 計畫區之生態氣候圖.....	7
圖 3 計畫區之林相現況.....	9
圖 4 計畫區之林地使用分區規劃圖.....	14
圖 5 計畫區之海拔分布圖.....	15
圖 6 計畫區之坡度分布圖.....	16
圖 7 計畫區之坡向分布圖.....	17
圖 8 計畫區之水系圖.....	18
圖 9 計畫區之土壤圖.....	19
圖 10 計畫區內樣區位置圖.....	20
圖 8 計畫區、規劃造林區及規劃保留區之胸徑級分布情形.....	22
圖 12 小規模塊狀整理伐造林區位置圖.....	24
圖 13 造林區現場勘查(一).....	26
圖 14 造林區現場勘查(二).....	26
圖 15 造林區現場勘查(三).....	27
圖 16 造林區現場勘查(四).....	27
圖 17 造林區整理伐前之定位及邊界木標示.....	28
圖 18 造林區於整理伐後之邊界測量.....	29
圖 19 整理伐作業前之林地現況示意圖.....	31

圖 20 整理伐作業後之林地現況示意圖.....	32
圖 21 造林區之整理伐之現況.....	32
圖 22 造林區整理伐前中後照片(一).....	35
圖 23 造林區整理伐前中後照片(二).....	36
圖 24 造林區整理伐前中後照片(三).....	37
圖 25 造林區位置分布圖.....	40
圖 26 以鑽洞機進行植穴開挖.....	43
圖 27 新植苗木之栽植作業.....	43
圖 28 新植苗木之標誌桿施作.....	44
圖 29 新植苗木與標誌桿以塑膠繩固定.....	44
圖 30 造林區之植樹造林成果.....	45
圖 31 造林區之植樹造林與保留木.....	45
圖 32 草生地之造林區造林成果.....	46
圖 33 新植苗木生長情形.....	46
圖 34 計畫區內撫育作業位置圖.....	49
圖 35 本案 CO <sub>2</sub> 移除量計算之操作流程.....	53
圖 36 不同森林類型不同林齡之碳累積速率圖.....	62
圖 37 專案活動於 25 年間之 CO <sub>2</sub> 變化量(情境一).....	78
圖 38 專案活動於 25 年間之 CO <sub>2</sub> 變化量(情境二).....	80
圖 39 專案活動於 25 年間之 CO <sub>2</sub> 變化量(情境三).....	82

---

圖 40 專案活動於 25 年間之 CO <sub>2</sub> 變化量(情境四).....	84
圖 41 人工造林地(種植於 2020 年)與保育性森林每公頃累積 CO <sub>2</sub> 當量吸存比較 ...	98
圖 42 森林碳排放與碳固定抵銷.....	99

## 表目錄

表 1 計畫區之坡度分級及所佔面積.....	16
表 2 計畫區之坡向分級及所佔面積.....	17
表 3 計畫區森林資源樣區調查表.....	23
表 4 造林區編號與面積對照表.....	25
表 5 造林區整理伐前後對照及保留樹種統計表.....	34
表 6 造林樹種特性及選擇原因表.....	39
表 7 造林面積、樹種及數量表.....	41
表 8 撫育作業規劃表.....	49
表 9 本專案活動之碳中和減量架構表.....	50
表 10 基線 CO <sub>2</sub> 淨移除量計算之參數表.....	55
表 11 $\Delta CBSL, tree, t$ 參數表.....	55
表 12 本計畫所使用之各樹種生物量、碳吸存量推估之相關本土轉換係數.....	57
表 13 $\Delta CP, t$ 參數表.....	58
表 14 $\Delta CFM, t$ 參數表.....	60
表 15 基線(情境一)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO <sub>2</sub> 變化量表.....	63
表 16 基線(情境二)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO <sub>2</sub> 變化量表.....	64
表 17 基線(情境三)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO <sub>2</sub> 變化量表.....	65
表 18 基線(情境四)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO <sub>2</sub> 變化量表.....	66
表 19 留存木各專案年分之生長量、碳儲存量及 CO <sub>2</sub> 儲存量表.....	68

---

表 20 臺灣肖楠各專案年分之材積、碳儲存量、CO <sub>2</sub> 儲存量表 .....	70
表 21 楓香各專案年分之材積、碳儲存量、CO <sub>2</sub> 儲存量表 .....	72
表 22 相思樹各專案年分之材積、碳儲存量、CO <sub>2</sub> 儲存量表 .....	74
表 23 伐倒木蓄積量、碳儲存量及 CO <sub>2</sub> 排放量表 .....	75
表 24 專案活動之油耗量及所產生之 CO <sub>2</sub> 排放量表 .....	76
表 25 未來專案活動之油耗量及所產生之 CO <sub>2</sub> 排放量表 .....	77
表 26 各專案年分 CO <sub>2</sub> 淨值總表(情境一).....	79
表 27 各專案年分 CO <sub>2</sub> 淨值總表(情境二).....	81
表 28 各專案年分 CO <sub>2</sub> 淨值總表(情境三).....	83
表 29 各專案年分 CO <sub>2</sub> 淨值總表(情境四).....	85
表 30 不確定性與風險管理所採取行動之操作模式 .....	86
表 31 不同種類動物監測方法建議說明 .....	90
表 32 專案區域及非專案區域所面臨的機會與風險 .....	94

# 臺北市立美術館「2020 台北雙年展」 作品《儲回大地的藝術》碳中和複層 林營造案

## 壹、計畫緣起及目的

### 一、計畫緣起

臺北市立美術館（北美館）創立於 1983 年，在過去數十年中，北美館不僅促進了臺灣近現代藝術的活絡，也持續與國際當代藝術的脈動同步。「台北雙年展」從簡單的意義上解讀，是一個有關「當代」藝術安置在某種擴大的「全球社會」的概念裡的手段。這個大轉型歷經了十八年的時間，九屆的「台北雙年展」就跟這座城市一樣，經歷着一段評估、改變、擴充與成長的時光。長期以來，「台北雙年展」試圖建立一個聯結本地和國際社群的直接網絡，一個以美學、道德、社會、經濟為共同出發點，不帶任何意識形態或預設立場或既定目標的社群網絡，同時藉由國際性的展覽平臺，積極地從深度、廣度兩方面回應當代藝術之趨勢與潮流，創造雙向溝通的對話機制。

2020 台北雙年展將以「你我不住在同一個星球上：外交新碰撞」為主題“*You and I don't live on the same planet*”—*New Diplomatic Encounters*，策展概念強調，當今人類對生態議題有著嚴重的對立是無從掩飾的事實。因此當前情勢已不再只是關於願景（*Visions*）的衝突，更是關乎認知這個世界「組成特性」的差異。原本的譬喻修辭如今已成既存的事實。標題中的「你和我」揭示了本次策展對於衝突與分歧的關注，但策展人強調，希望能轉化衝突與分歧為具建設性的對話。透過展覽、工作坊、研究計畫，本屆雙年展將轉化美術館成為一個能讓來自不同「星球」觀點交會的新形態外交場域。

本計畫為實踐 2020 台北雙年展「你我不住在同一個星球上：外交新碰撞」的核心主題，以實踐植林減碳的複層林營造活動，並結合學術單位的調查研究，分析植林後之碳吸存功能，讓聯展活動能共同關切人類藝術、環境與生活的議題，宣揚「你我不住在同一個星球上，但對於生態環境的維護，有相同的理念，並貢獻心力」，而 2020 台北雙年展之 CO<sub>2</sub> 排放量，其計算單位為二氧化碳當量 (CO<sub>2</sub>-e) (簡稱為 CO<sub>2</sub> 量或碳量)，包含展館營運排放 295 ton CO<sub>2</sub> 量、人員差旅運輸排放 49 ton CO<sub>2</sub> 量、作品製作和運輸排放 45.6 ton CO<sub>2</sub> 量，總計約為排放 390 ton CO<sub>2</sub> 量。碳中和係指一定期間內，碳排放量與減少的碳排量或淨碳吸存量之間互相抵消，達到淨零碳排放量 (Net-zero carbon emission) 的效果，其達成方式主要包括碳減量及碳抵換 (Berndes, *et al.*, 2016)。而如何達到碳中和除了通過使用低碳能源取代化石燃料及節能減排之外，其中植樹造林亦可用來抵消人類經濟活動所產生的 CO<sub>2</sub> 的排放量 (Pacala and Socolow, 2004; Lal, 2008; 林俊成等, 2012; Berndes, *et al.*, 2016)。本專案係屬實驗性質，以臺北市士林區翠山段一小段 81 號公有地之次生林 (Secondary forest) 為植樹造林活動範圍，使用友善環境方式，以不使用大型機具，僅以人力作業方式，將全區 52.70 ha 中 10.11 ha 作為基線面積，以原生樹種之臺灣肖楠 (*Calocedrus formosana*)、楓香 (*Liquidambar formosana*) 及相思樹 (*Acacia confusa*) 進行整地造林，並透過撫育作業達到新植林木、留存木及未來下層木之林相改良目的，提升森林的碳吸存能力。從次生林角度來看，較為年輕之次生林生長率會大於枯死率，但隨著次生林的演替階段的演進，林分生長率會逐漸降低，甚至小於枯死率，其森林的碳吸存力將大幅降低 (Elias, *et al.*, 2020)，而對於如能進行局部更新造林，亦即透過增加 CO<sub>2</sub> 吸收量的森林管理活動，可提升植林減碳的貢獻 (林俊成、柳婉郁, 2010)。

基於策展的概念，北美館將地球目前所面臨的全球氣候變遷議題納入策展的概念中，期待藉由二氧化碳減量的實踐、展覽平臺及

---

對話等方式來聯結美學、道德、社會、經濟相互間的關係，展現策展對在地及國際社會的環境維護責任。本案將以植林減碳的實踐，實際於策展期間於臺北市近郊之公有林地，進行有計畫性的進行營造複層林，並結合學術單位研究，分析植林後森林碳吸存(Carbon Sequestration)的效益評估，並透過工作坊來共同關切人類藝術、環境與生活的共同議題，以實踐本次策展的核心概念。

---

## 二、計畫目的

隨著聯合國氣候變化綱要公約 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 及京都議定書 (Kyoto Protocol) 的提出與生效，讓溫室氣體減量不再只是口號，各國需付出實際的行動，以減緩全球暖化所帶來的危機。在 2005 年起生效的京都議定書第 3.3 條即明白規範 1990 年以後所進行之造林 (Afforestation)、再造林 (Reforestation)、改善森林經營管理 (Improved Forest Management) 及毀林 (Deforestation) 之二氧化碳吸收或排放淨值，可併入排放減量值計算。而國際上已許多國際企業為善盡企業社會責任，透過不同方法進行排放減量的案例，如 Verra 項目編號 672 (INFAPRO REHABILITATION OF LOGGED-OVER DIPTEROCARP FOREST IN SABAH, MALAYSIA) 位於馬來西亞沙巴之案例，其透過改善森林經營管理活動，將伐採後被蔓藤攀附之森林 (低產林) 轉為高產林之方式進行碳排放減量；項目編號 2410 (REFORESTATION OF DEGRADED FOREST RESERVE AREAS IN GHANA, WEST AFRICA) 為西非加納之案例，將退化森林保護區透過再造林活動進行碳排放減量，這些案例皆以 VCS 標準取得認證。而透過森林經營進行造林、再造林及改善森林經營管理活動，在這些國家的溫室氣體減量中已扮演著關鍵角色。執行之目的：

1. 在於利用改善森林經營管理的方式，以小規模林地為範圍，以永續經營為理念，規劃森林經營的作業方法。
2. 結合森林經營專業，進行複層林之營造，並評估森林碳吸存量。
3. 藉由 2020 年雙年展對在地與國際社會的穿透力，宣揚「你我不住在同一個星球上，對於生態環境的維護，必須要有相同的理念，並貢獻心力」。

## 貳、計畫實施地點概況及林地使用現況

### 一、計畫區位置及人文交通狀況

以「臺北市士林區翠山段一小段 81 號之公有地」為範圍(以下簡稱：計畫區)，計畫區面積為 52.70 ha，其位置如圖 1。

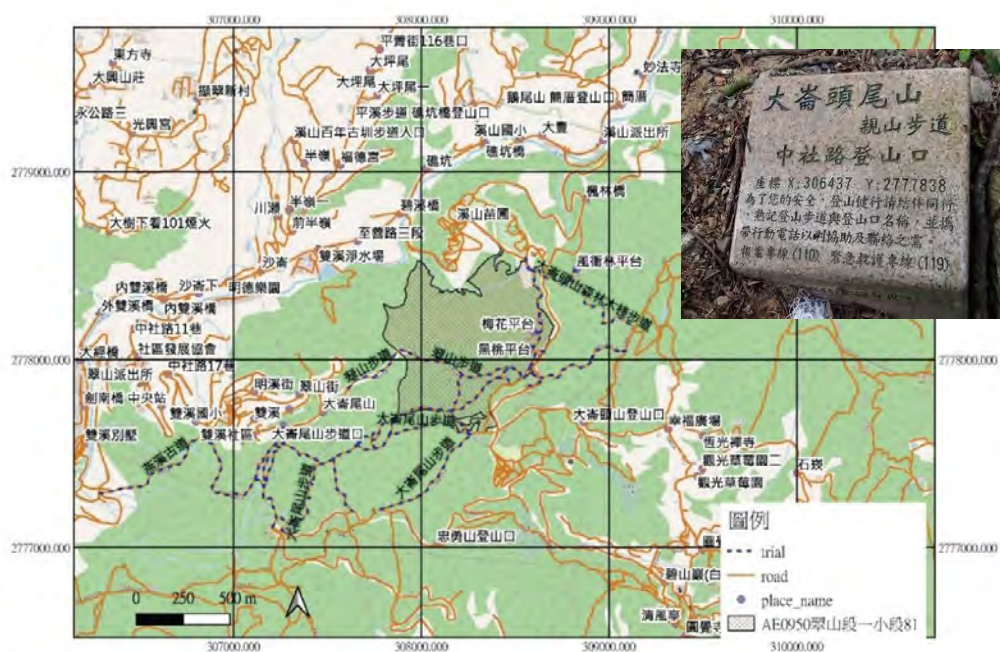


圖 1 計畫實施地點及周邊人文交通狀態

計畫區(圖 1)鄰近中社路二段，由臺北市可搭乘捷運至士林站，轉公車 255 或 255(區)至「大崙頭尾山親山步道口」下車，即可到達計畫區。計畫區內有三條步道穿越其間，包括：

1. 大崙頭尾山親山步道：該步道由計畫區北面之萬溪產業路開始穿越計畫區，可前進大崙頭山，大崙尾山為內湖地區最高山脈，可眺望外雙溪、陽明山，全程 5.4 km。

- 
2. 翠山步道：為一條自然步道，因步道地屬於士林區翠山里，因此命名為翠山步道，由翠山步道出發，可以銜接串連鄰近的碧溪步道、大崙頭山森林木棧道、大崙尾山登山步道，再經由中社步道繞回中社路二段。
  3. 碧溪步道：為「大崙頭尾山親山步道」路線之一，由太陽廣場出發穿越計畫區可行至碧山露營區附近，沿線並設置梅花平臺、黑桃平臺及方塊平臺。  
三條自然步道由臺北市政府維護管理，以碎石枕木及木棧道組成，步道坡度平緩，因位處公路沿線且為各遊憩區之邊緣地帶，交通可及性與遊客使用密度相對較高，屬於一般健行步道等級。步道沿途設有觀景臺、瞭望臺，可供休憩觀景，行走其間可享受山林清境之美及吸收森林潔淨的空氣。

## 二、計畫區氣候

本計畫區位於臺北市士林區，本區氣候屬亞熱帶型氣候(圖 2)，年均溫 23.4°C，年降雨量約為 3,186.5 mm，每年 3 月至 12 月為特濕期 (Perhumid)，而翌年 1 月至 2 月為相對潮濕期(Period of Relative Humid)。

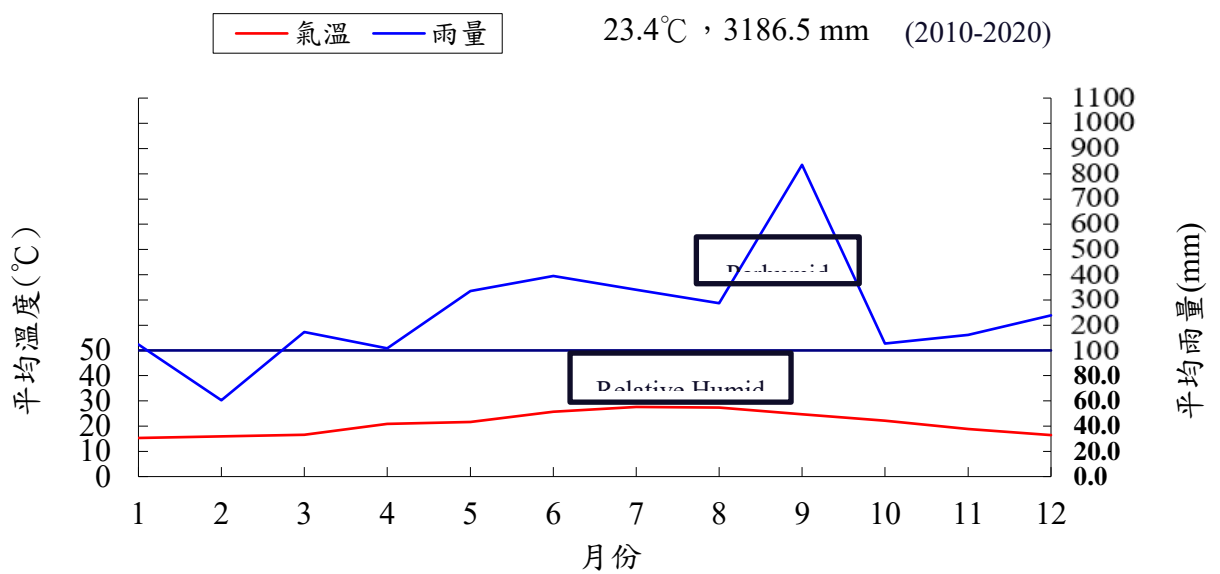


圖 2 計畫區之生態氣候圖(資料來源：臺灣氣候變遷推估與資訊平臺 TCCIP)

### 三、林地使用現況

計畫區之林地依據「林業試驗所 (2019) 臺北市林地整體發展建議委託專業服務案」之調查及最新的航空照片判釋，指出區內為早期曾為開發造林及農作之林地，現已逐步演替為闊葉樹次生林(Secondary forest)，屬於非保安林坡度 35 度以下且覆蓋度 70%以上之林地，因其為演替初期之林相，林地內 5 cm 以上林木密度推估約 1,660 stems/ha，樣區內樹種以山紅柿 (*Diospyros morrisiana*)、小葉杞 (*Ardisia quinquegona*)、茜草樹 (*Randia canthioides*) 及鵝掌柴 (*Schefflera octophylla*) 為優勢(林試所，2019)，樹種平均分布，因株數密度高，樹型呈現細高狀態，超過 50% 之樣木直徑介於 5~15 cm，而胸高直徑小於 5 cm 之苗木數量僅約佔 1/6，林地透空性不足，地被植物更新不佳，碳吸存能力較差。

依據國立嘉義大學(2019)針對大崙頭山林地所進行之地面樣區調查，其植物社會組成無明顯差異，亦屬林木株數多且密度高，樹型呈現細高狀態，上層優勢主要以大明橘 (*Myrsine seguinii*)、豬腳楠 (*Machilus thunbergii*)、山紅柿及鵝掌柴等組成；中層鵝掌柴、燈稱花 (*Ilex asprella*)、大明橘、茜草樹等為主要優勢；灌木層以燈稱花、鵝掌柴及糊欏 (*Ilex formosana*) 等為主要優勢；地被層植物受林冠鬱閉度影響，林冠鬱閉度高之處以鬼杪欏 (*Gymnosphaera podophylla*)、小月桃 (*Alpinia intermedia*) 及日本山桂花 (*Maesa japonica*) 等植物組成；林冠鬱閉度低者以芒萁 (*Dicranopteris pedata*)、燈稱花等為優勢。

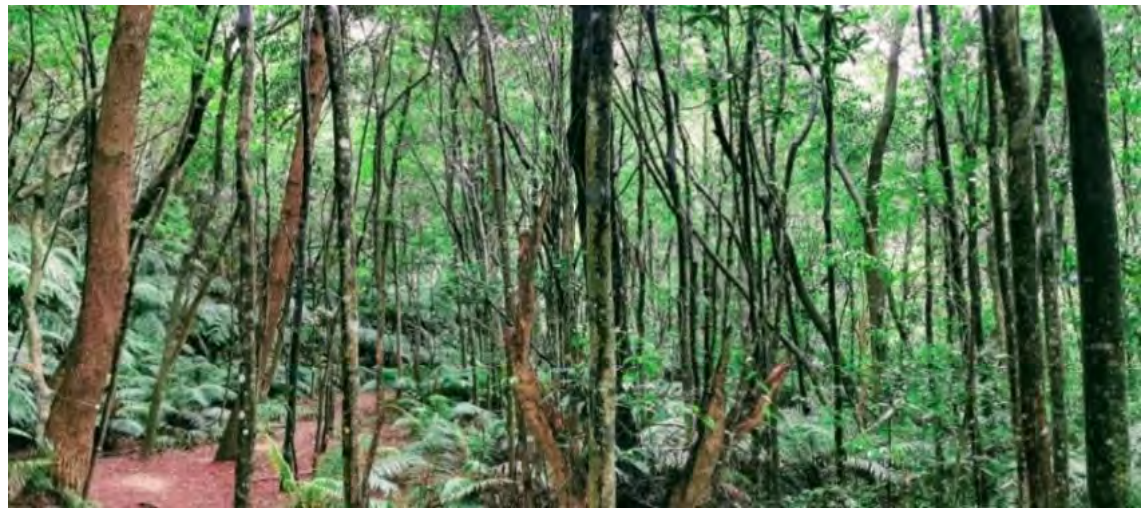


圖 3 計畫區之林相現況

## 參、計畫工作項目規劃及執行方法

為營造計畫區兼具有生產性與景觀性之複層林林相，提升計畫區之碳吸存能力，本案將使用友善環境方式以小規模塊狀整理伐作業移除不良形狀及生長不良之林木，並以原生樹種之臺灣肖楠(*Calocedrus formosana*)、楓香(*Liquidambar formosana*)及相思樹(*Acacia confusa*)等樹種進行造林及撫育，以營造複層林林相，而所採用之造林樹種苗木由林業相關機關提供，若造林樹種之苗木供應不足時，則以適地適木之原生樹種補足之。

計畫主要工作項目包括：

1. 計畫區森林經營規劃、資源分析及調查。
2. 複層林規劃與營造。
3. 碳吸存推估與監測規劃。

各工作項目之執行方法分述如下：

### 一、計畫區森林經營規劃、資源分析及調查

以「臺北市士林區翠山段一小段 81 號之公有地」(52.70 ha) 作為經營計畫規劃範圍，而針對計畫區進行基礎資料分析，並以計畫區作為目標區域進行森林資源調查。

#### (一) 計畫區經營規劃

以提升森林的碳吸存為規劃理念，配合森林資源之現況及環境周遭環境，進行計畫區(52.70 ha)之作業分區規劃，其規劃原則為林地坡度大於 35 度將列為保留區，而溪流、步道兩旁將規劃 20 m 的緩衝帶，進行整理伐作業時，得視現場狀態適時調整。

## (二)計畫區基礎資料分析

以航空影像，建立初步基礎資料，如計畫區之坡度、坡向、地文、水文、土壤及地質資料。

## (三)計畫區森林資源現況調查

於計畫區內經等高線、坡度及坡向等因子選擇適當地點，以小規模塊狀整理伐方式規劃合計 10 ha 之整理及造林作業，並以造林區面積之 10% 為調查樣區，即每一樣區面積 0.05 ha、取樣 20 個臨時樣區，面積總計 1 ha，進行樣區之設置；樣區調查項目包括：樹種、胸徑及樹高，樣區分析內容包括樹種組成及林分結構分析，以供為整理伐作業規劃之參考。

## 二、複層林規劃與營造

造林區之複層林營造規劃，係以固定成本達到最高效益為原則，並於計畫執行期間內選擇最佳之造林季節，於造林區內進行小規模整理伐及撫育作業，施業過程將提供造林地植樹活動之影像紀錄，供臺北市立美術館舉辦美術聯展期間，針對植林減碳議題提供宣導題材。

### (一)複層林營造之規劃

以基礎資料分析作為基礎，針對計畫區域進行複層林營造之規劃，並根據現場踏勘結果進行實際營造區域位置確定，最後使用高精度工程測繪儀進行界木及邊界定位。

### (二)整理伐及整地作業

主要以樹種組成及未來造林林木之生長空間為考量，將移除不良木、危害木及保留未來木方式進行整理伐，並將伐倒木進行分段

---

(1~1.5 m)處理，並堆置於保留帶，以維護水土保持。並將造林地依等高線採橫坡造林方式進行整地。

### (三)造林作業

配合林地之經營目標以及造林地之環境條件，選擇適宜樹種，依適地適種原則實施造林。

### (四)撫育作業

撫育作業主要有刈草、除蔓作業及修枝作業，新植作業依新植後1-6年間每年刈草次數依3、3、2、2、1、1為原則，但因造林區於北部，而北部地區因雨水豐沛易孳生雜草，刈草次數會視狀況而進行增加，並於6年撫育期間內適時實施修枝作業。

## 三、碳吸存推估與監測規劃

「2020 台北雙年展」展覽活動所產生的碳排放量(Carbon Emission)，經藝術家推估約為390 ton CO<sub>2</sub>排放量。參考國外VCS標準，針對造林/再造林(Afforestation and Reforestation, AR)及改善森林經營(Improved Forest Management, IFM)等森林碳匯計算方法學之精神，以本案計畫範圍之林地經營現況，參考IFM之低產量森林轉換為高產量森林(VM0005)及透過延長輪伐期時間改善森林經營(VM0003)之方法學為主要精神，並根據一般碳中和計算之概念，符合可量測、可報告、可驗證(Measurement, Reporting, Verification, MRV)之機制，評估北美館辦理此次展覽活動所產生之碳排放之碳中和(Carbon Neutral)效益。

---

### (一)基線計算

基線計算以專案作業前之地面樣區調查資料估算淨基準碳排放量和碳移除量(Carbon Removal)，此方法參數包含地上部生物量、地下部生物量、枯死木。

### (二)專案計算

專案計算以專案邊界內執行改善森林經營計畫活動等作業進行估算，其中包含造林木的地上部生物量、地下部生物量；整理伐後伐倒木的碳變化量；施行專案活動而造成的碳排放量。

### (三)洩漏

於專案邊界外所產生之碳洩漏(Carbon Leakage)。

### (四)監測

監測計畫需包含監測基線情境下的碳儲存量(Carbon Storage)變化及碳排放、監測專案活動後的碳儲存變化和碳排放及估算事後總淨碳儲存量變化和碳排放量。

## 肆、執行成果

### 一、計畫區森林經營規劃、資源分析及調查成果

#### (一)計畫區森林經營規劃

本案以提升森林的碳吸存為規劃理念，配合森林資源之現況及周遭環境，進行計畫區(52.70 ha)之土地使用規劃，規劃方法係以地理資訊系統(Geographic Information Systems, GIS)將計畫區之步道系統、地文及水文資料，進行環域分析(Buffer analysis)及套疊分析(Overlay analysis)，並依據山坡地土地可利用限度分類標準，進行坡度分級，屬5級至6級坡及溪流、步道兩旁之20 m緩衝帶，將不列入造林範圍，其面積為20.84 ha(以下稱規劃保留區)，可供複層林營造之面積為31.86 ha(以下稱可規劃造林區)(圖4)。

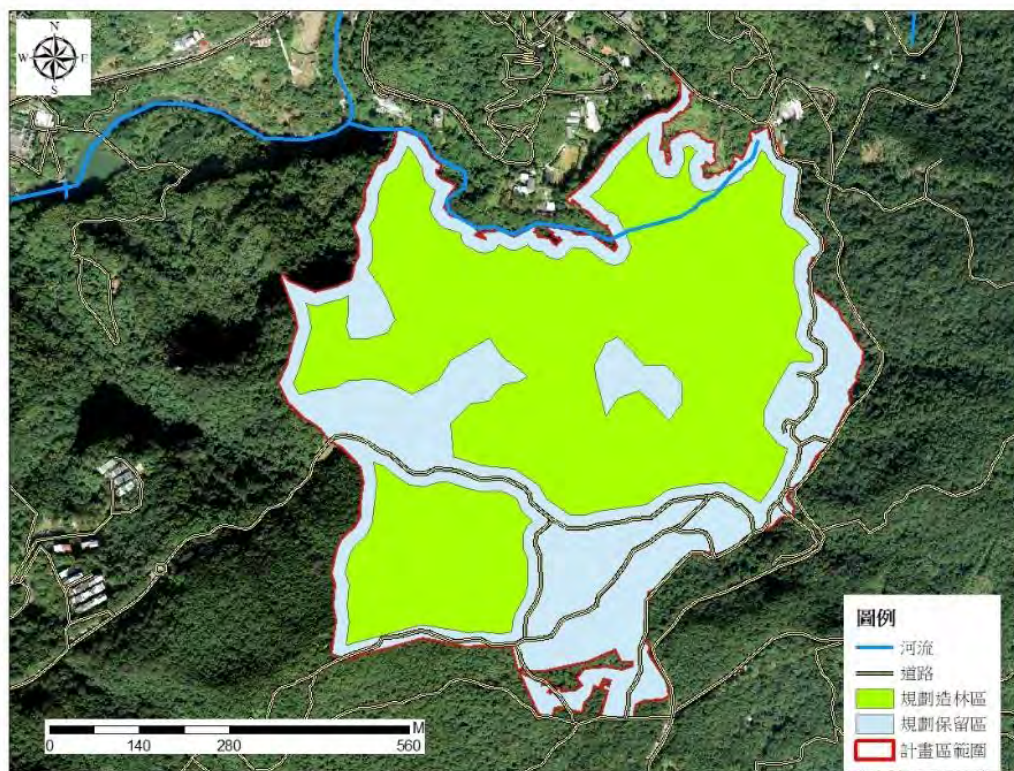


圖4 計畫區之林地使用分區規劃圖

## (二)計畫區之基地分析

利用數位航空影像、數位高程及相關之地理圖資，進行計畫區之海拔高、坡度、坡向、水系、地質及土壤資料之分析，其結果分述如下：

### 1.地形分析

計畫區海拔高度範圍約 150~450 m，高低差約 300 m，屬於低海拔山區地形(圖 5)；坡度介於 0~55%之間，大部分地區屬於三級坡，佔總面積 66.03%，坡度分布表(圖 6 與表 1)。

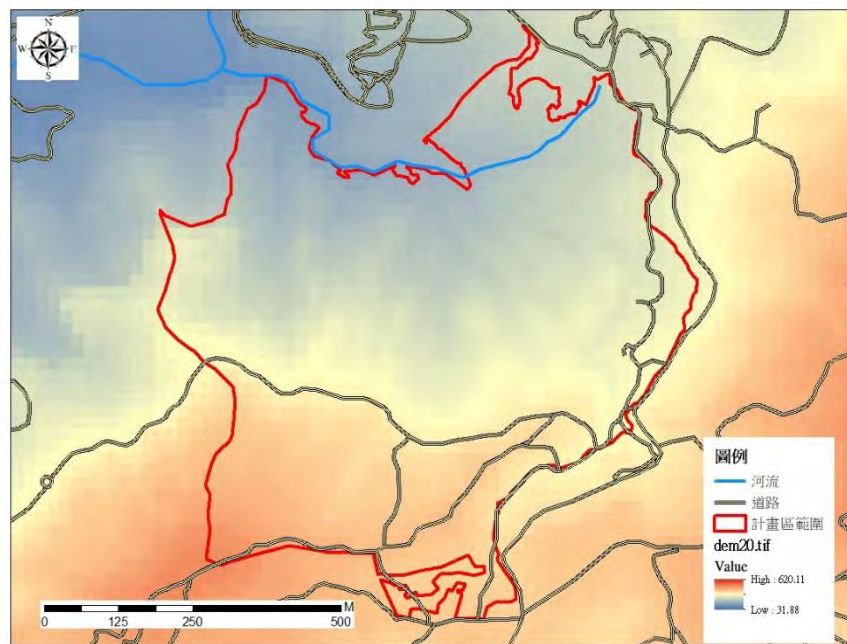


圖 5 計畫區之海拔分布圖

表 1 計畫區之坡度分級及所佔面積

坡地分級	坡度	面積(ha)	百分比(%)
一級坡	小於 5%	0.46	0.88
二級坡	5%~15%	5.96	11.31
三級坡	15%~30%	34.80	66.03
四級坡	30%~40%	10.98	20.84
五級坡	40%~55%	0.50	0.94
六級坡	大於 55%	0.00	0.00
總計		52.70	100.00

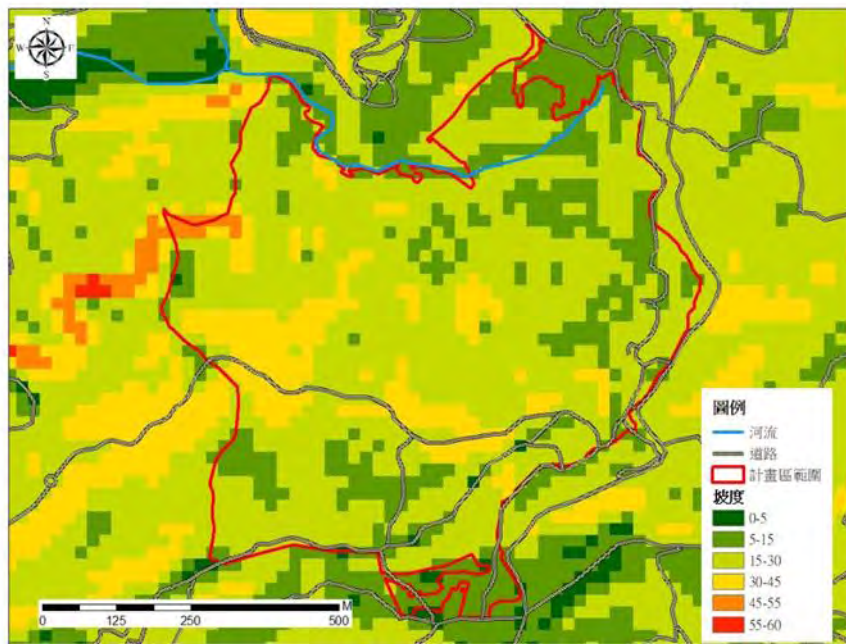


圖 6 計畫區之坡度分布圖

計畫區之坡向以東南向所佔面積最大(8.21 ha，佔 15.58%)，北坡及西北向次之，分別為 7.94 ha 及 7.71 ha，如表 2 與圖 7 所示。

表 2 計畫區之坡向分級及所佔面積

坡向	面積(ha)	佔全區百分率(%)
北向	7.94	15.07
東北向	5.00	9.49
東向	6.21	11.78
東南向	8.21	15.58
南向	6.39	12.13
西南向	5.74	10.89
西向	5.50	10.44
西北向	7.71	14.63
總計	52.70	100.00

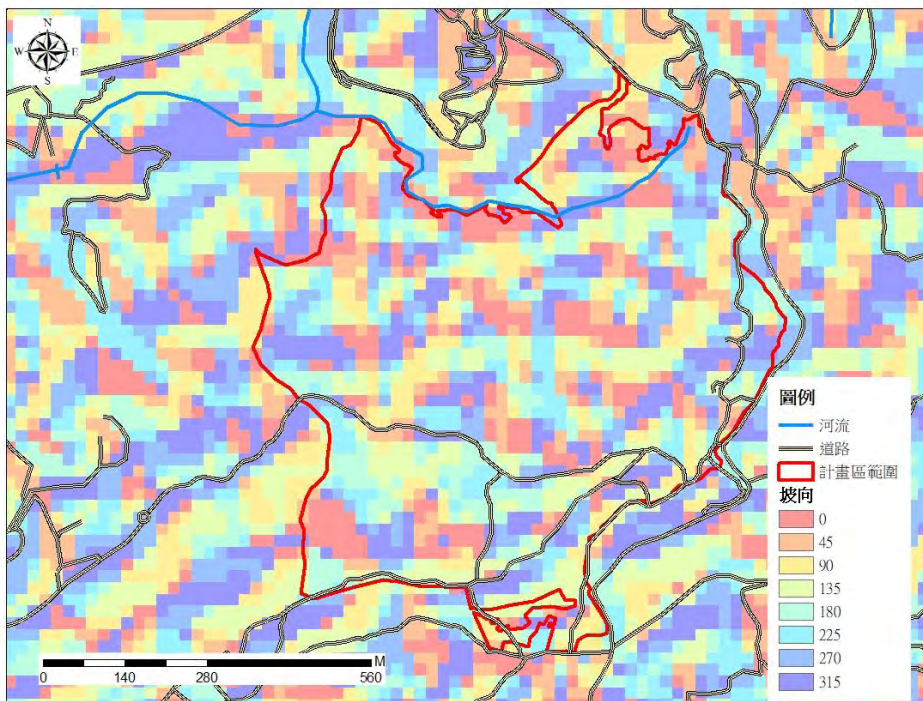


圖 7 計畫區之坡向分布圖

## 2.水系

計畫區屬於內雙溪支線流域，其流域經計畫區北處流向內雙溪，如圖 8 所示。

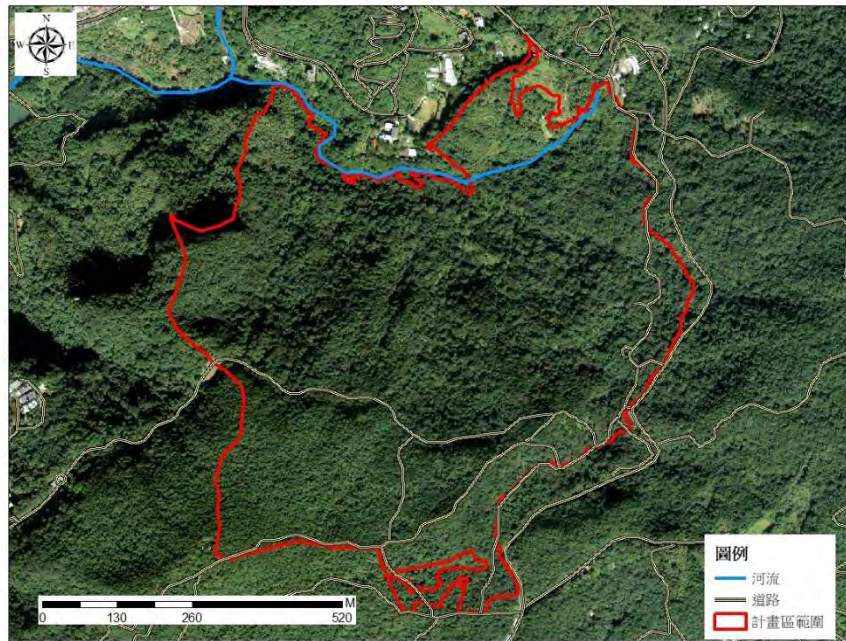


圖 8 計畫區之水系圖

### 3.地質及土壤

計畫區內屬於古老之沉積岩，於雙溪河床為大寮層可見由厚層塊狀砂岩和頁岩或砂岩、頁岩互層所組成，而主要土壤以幼黃壤土為主(圖 9)。

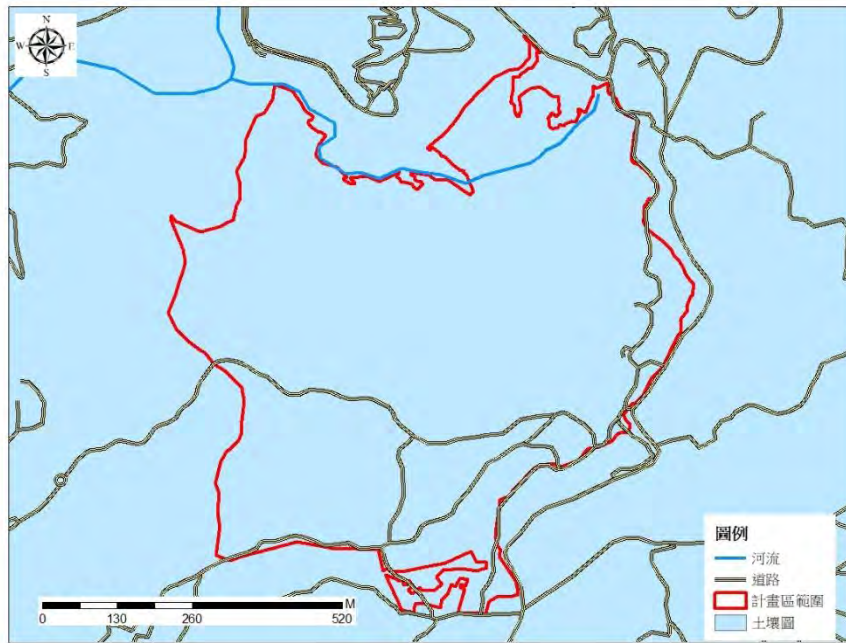


圖 9 計畫區之土壤圖

### (三) 計畫區森林資源現況調查

為有效掌握目前計畫區林分狀況，進行範圍內森林資源調查，並考量等高線、坡度及坡向等因子，進行立意取樣(立意取樣為由調查人員之主觀經驗，從總樣本中選擇可代表總體的單位，進行樣本抽樣)，每一樣區面積為 0.05 ha，共計 20 個樣區(圖 10)，其中 17 個位於規劃造林區，3 個位於規劃保留區，總面積為 1 ha。調查項目包括：樹種、胸徑及樹高，樣區分析內容包括樹種組成及林分結構分析，以供為整理伐之參考。

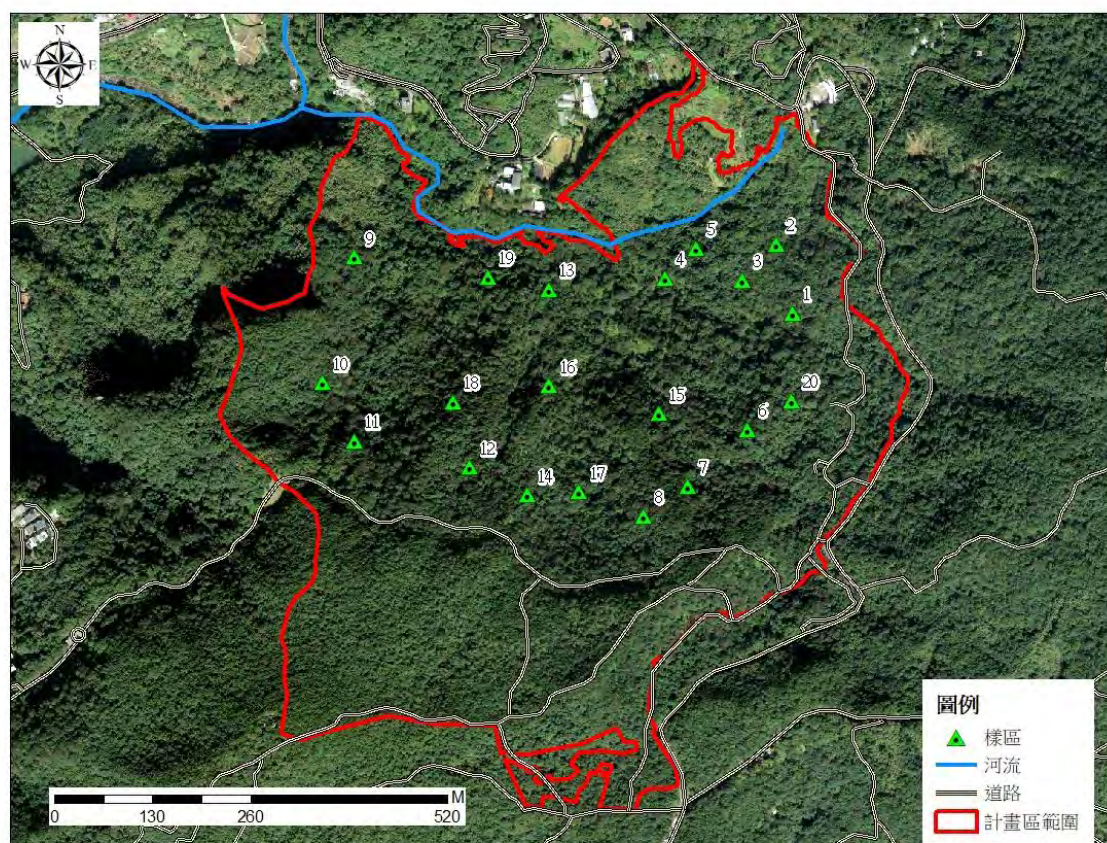


圖 10 計畫區內樣區位置圖

經由本次調查發現計畫區內有少數小面積草生地，推測過去於計畫區內有小型崩塌所導致，而樹種組成以油桐(*Vernicia fordii*)、白栴(*Triadica cochinchinensis*)、大明橘(*Myrsine seguinii*)、豬腳楠(*Machilus thunbergii*)及鵝掌柴(*Schefflera octophylla*)等為優勢木，燈稱花(*Ilex asprella*)及茜草樹(*Randia cochinchinensis*)等為次優勢木，灌木層以燈稱花、鵝掌柴等為主要樹種。地被因受林冠鬱閉度之影響，林冠鬱閉度高之區域，以鬼杪櫛(*Alsophila podophylla*)為優勢樹種；林冠鬱閉度低之區域，以芒萁(*Dicranopteris pedata*)為優勢。依據樣區每木調查分析結果顯示，林分之胸高直徑(Diameter at Breast Height, DBH)多數以 5-10 cm 之林木組成，少數林木胸徑大於 25 cm，林分平均胸徑約為  $11.75 \pm 6.54$  cm、樹高約為  $6.54 \pm 1.84$  m、平均每公頃蓄積量約為 96.18 m<sup>3</sup>(表 3)，其林分結構分析如圖 7 所示。而 2019 年林業試驗所執行「臺北市林地整體發展建議委託專業服務案」，由其調查及最新的航空照片判釋，顯示計畫區內，早期曾為開發造林及農作之林地，現已逐步演替為闊葉樹次生林，屬於非保安林坡度 35 度以下，且覆蓋度 70%以上之林地，林地內 5 cm 以上林木密度推估約每公頃 1,660 株，樣區內樹種以山红柿(*Diospyros morrisiana*)、小葉杞(*Ardisia quinquegona*)、茜草樹及鵝掌柴為優勢(林試所，2019)，樹種均勻分布，因株數密度高，樹型呈現細高狀態，超過 50% 之樣木胸徑介於 5-15 cm，而胸徑小於 5 cm 之苗木數量僅約佔 1/6，林地透空性不足，地被植物更新不佳，碳吸存能力較差。另張坤城、邱清安(2019)針對大崙頭山林地，進行地面樣區植物調查，其植物社會組成與林業試驗所調查之結果差異不大，亦屬林木株數多且密度高，樹型呈現細高狀態。

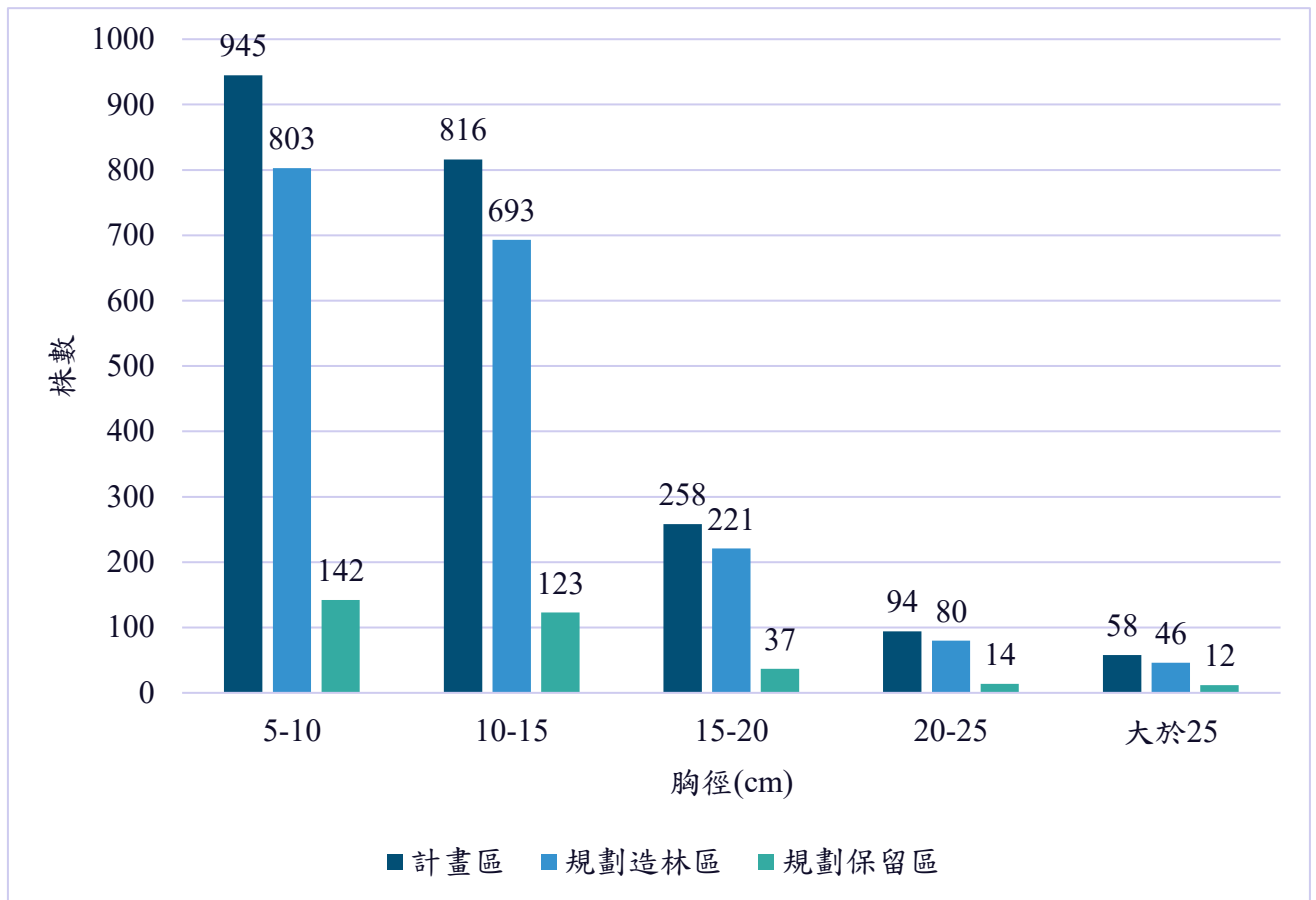


圖 11 計畫區、規劃造林區及規劃保留區之胸徑級分布情形

表 3 計畫區森林資源樣區調查表

樣區編號	樣區位置(TWD 97 坐標) X、Y		林型	平均胸徑 (cm)	平均樹高 (m)	每公頃 株數	蓄積量(m <sup>3</sup> /ha)
1	308551	2778270	闊葉次生林	10.70±5.21	5.98±1.01	2,160	81.88
2	308529	2778360	闊葉次生林	11.58±5.89	6.03±1.30	2,200	81.40
3	308485	2778310	闊葉次生林	11.56±5.28	6.15±1.33	2,060	81.67
4	308383	2778310	草生地				
5	308424	2778350	闊葉次生林	12.21±4.94	6.58±1.12	2,400	91.77
6	308492	2778110	闊葉次生林	12.41±4.38	6.11±1.77	2,280	99.55
7	308413	2778040	闊葉次生林	10.56±5.78	6.10±1.50	1,920	80.93
8	308355	2778000	闊葉次生林	10.39±4.72	5.94±1.11	2,160	97.56
9	307974	2778340	闊葉次生林	11.52±4.93	7.9±1.57	2,220	99.21
10	307931	2778170	闊葉次生林	11.10±4.13	7.35±1.10	2,140	83.93
11*	307973	2778100	闊葉次生林	12.86±5.26	7.71±1.73	2,160	110.01
12	308125	2778060	闊葉次生林	13.08±4.32	6.74±1.23	1,880	113.11
13	308229	2778300	闊葉次生林	10.38±4.39	7.44±1.60	2,200	103.27
14	308201	2778030	闊葉次生林	12.12±4.02	5.14±1.06	2,060	86.9
15*	308374	2778130	闊葉次生林	10.91±4.90	6.16±1.49	2,300	99.71
16	308230	2778170	闊葉次生林	11.13±5.43	6.08±1.18	2,100	100.16
17	308270	2778030	闊葉次生林	13.68±5.21	7.90±1.80	2,140	111.65
18*	308103	2778150	闊葉次生林	12.47±5.65	5.41±1.75	2,100	84.62
19	308150	2778310	闊葉次生林	12.95±4.39	6.19±1.42	2,360	101.64
20	308551	2778150	闊葉次生林	11.57±5.54	7.26±1.62	2,400	118.41

註：\*為規劃保留區，其餘皆為規劃造林區；平均值±標準差

## 二、複層林營造規劃及成果

### (一)複層林營造之規劃及成果

以小規模塊狀整理伐之更新作業方式，進行造林區之複層林營造，經進行現場勘查後，發現部分區域現場落差變化較大(圖 13)、地表石塊多(圖 14)、有溪溝穿越(圖 15)及有護坡工程(圖 16)等，不適宜整地造林，故經與委託單位討論後，以不違反規劃原則下，針對造林區位置進行滾動式調整(調整後造林區如圖 12、表 4)。經調整後，以計畫區總面積 52.70 ha 與造林區面積 10.11 ha，造林區面積占計畫區總面積的 19.18%，若依造林區立木度表示整理強度則為 16.92%(造林區胸高斷面積合計/計畫區胸高斷面積合計) $\times 100\%$ 。

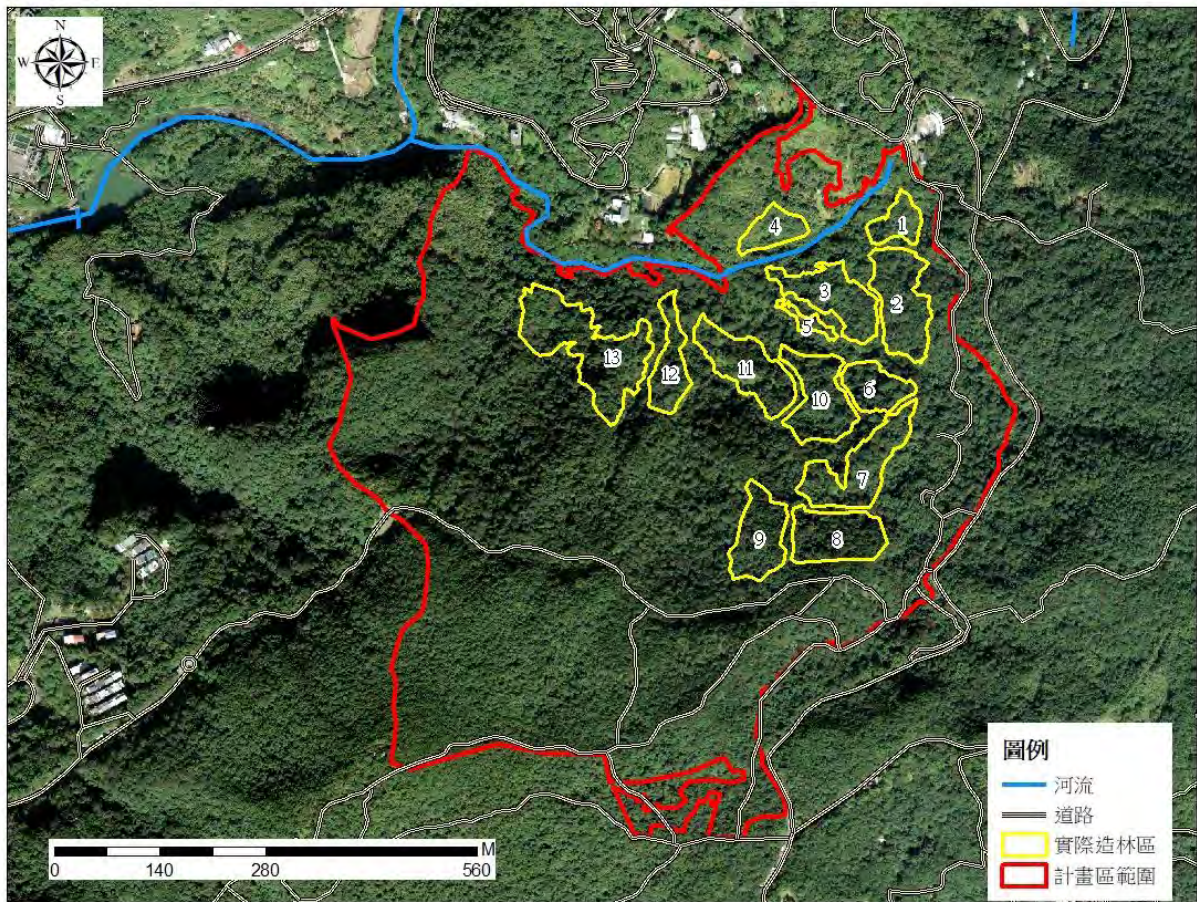


圖 12 小規模塊狀整理伐造林區位置圖

表 4 造林區編號與面積對照表

編號	分區	面積(ha)	造林區編號	面積(ha)
1	實際造林區	10.11	1	0.35
			2	1.03
			3	0.87
			4	0.40
			5	0.13
			6	0.51
			7	1.03
			8	0.90
			9	0.85
			10	0.91
			11	0.95
			12	0.61
			13	1.57
小計		10.11	---	10.11
2	規劃保留區	42.59	---	---
合計		52.70	---	---



圖 13 造林區現場勘查(一)



圖 14 造林區現場勘查(二)



圖 15 造林區現場勘查(三)



圖 16 造林區現場勘查(四)

於造林區中利用即時動態定位技術(Real Time Kinematic, RTK )、高解析度航測影像及掌上型雙星定位儀，進行造林區之界木及計畫區邊界之定位，並以噴漆方式進行界木標示及邊界定界，以利造林區之邊界定位及整地造林及撫育面積之計算及位置之確認(圖 17、18)。



圖 17 造林區整理伐前之定位及邊界木標示



圖 18 造林區於整理伐後之邊界測量

---

## (二)整理伐及整地作業之成果

造林區以橫坡整地方式進行作業。整理伐對象為闊葉次生林小徑木及形質不良木、被壓木及生長不良木。伐倒木以分段(1-1.5 m)處理，並堆置於保留帶，以增進造林區之水土保持功能。

### 1.整地作業規範

(1)以橫坡整地造林為原則，但如遇空地內陡坡或殘木過多，致整地困難時，經機關及監工人員核實後，始得按地形以順坡整地造林。

(2)橫坡整地工作：依等高線每隔 2-3 m 開設橫帶，植林帶寬度 1.5 m 以上，地被植物高度不得超過 10 cm、樹頭高度不得超過 20 cm；列間帶寬度 1.5 m 以下，如整地時伐除竹木過多，無法按規定進行整地或植列內遇樹頭或岩石或保留木，無法按規定株距栽植時，得酌量增減寬度，地被植物及樹頭高度 30 cm 以下，伐除之竹、木及枝條，整齊堆放於植林帶上下側，形成保留帶寬度約 1.5 m，以增加造林區對水土保持之功能。

(3)砍除之草、竹木須分段整齊堆置排於植林帶上下側之保留帶。

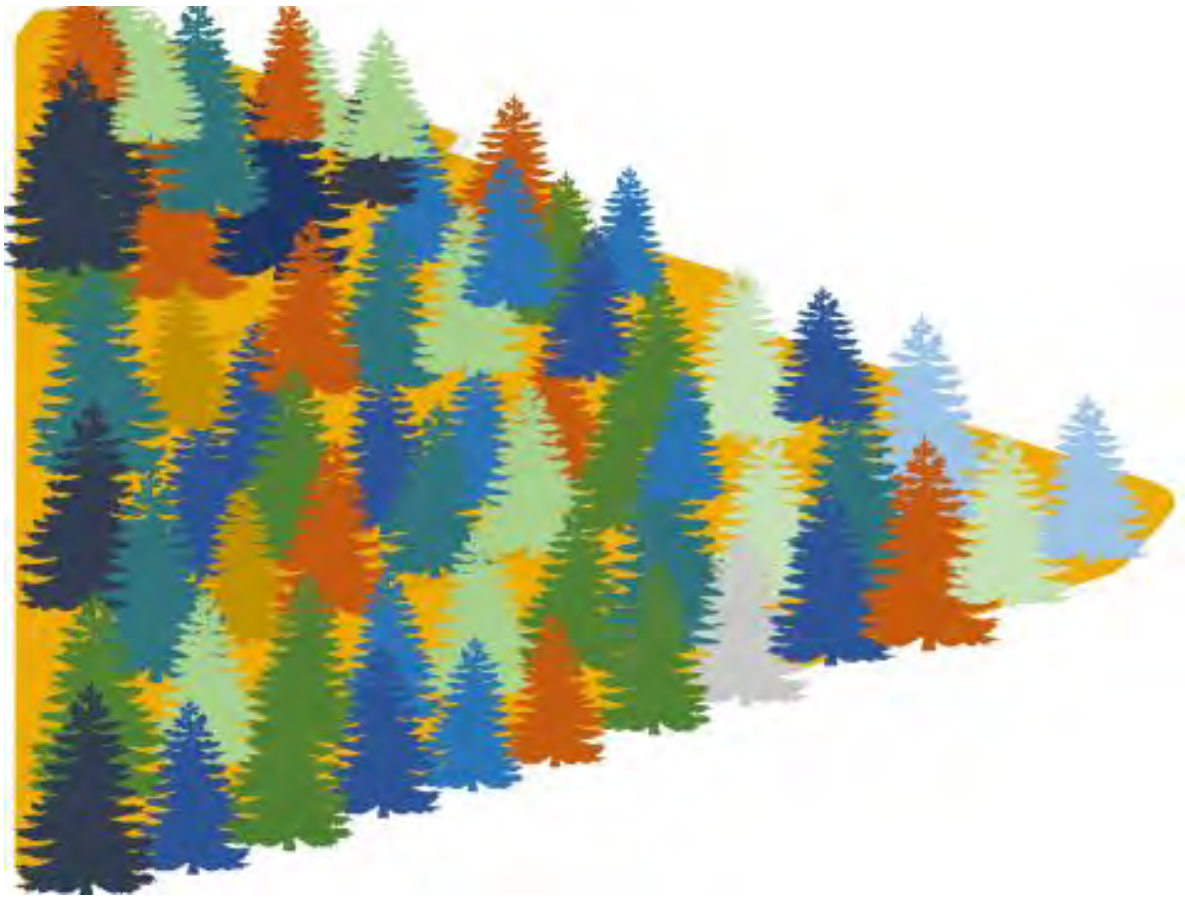


圖 19 整理伐作業前之林地現況示意圖

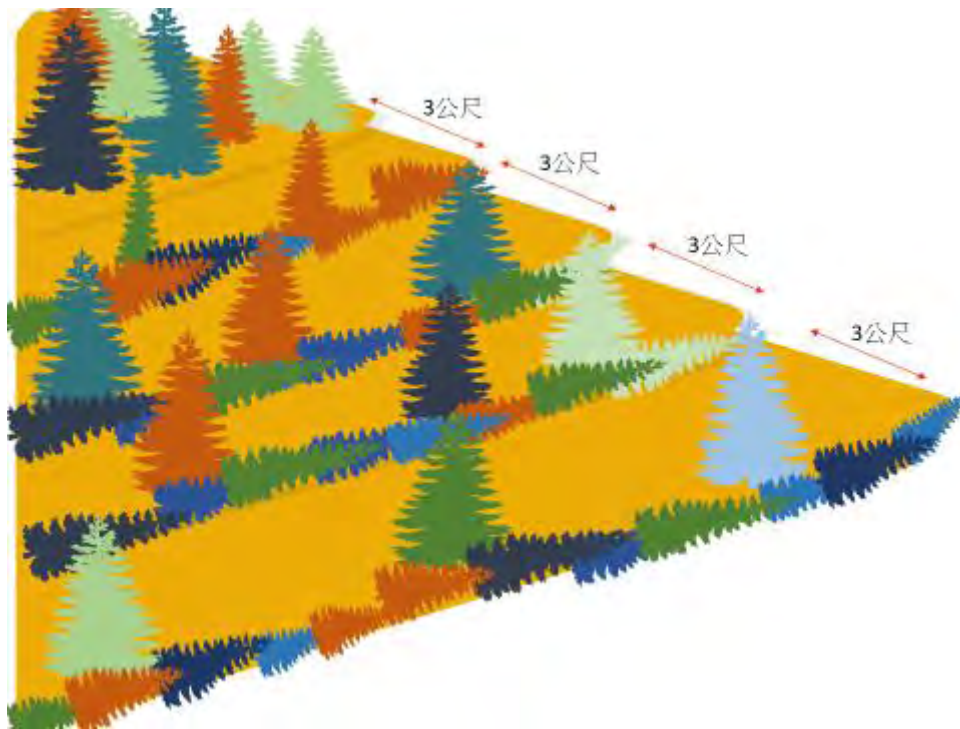


圖 20 整理伐作業後之林地現況示意圖



圖 21 造林區之整理伐之現況

## 2.整理伐作業程序及規範

(1)造林區之邊界經確認後，於區內伐除形質不良木、被壓木及生長不良木，如經監工確認之珍貴稀有樹種或徑級大於 25 cm 以上者，具有保留價值之林木，不得砍除，但徑級大於 25 cm 以上，屬於斷頭或風折等不良木，則予以伐除(珍貴稀有樹種除外)。

(2)整理伐順序：自林分之下坡向嶺線方向依序整理，伐除不良木、被壓木及生長不良木。

(3)伐倒前準備：倒木方向之地表如有突起物、灌叢、根株或岩塊等障礙物時，應先清除，以免危險及倒木損傷。

(4)伐採完成後的木材不搬出利用，且樹頭作業應低於 20 cm 以下，並將枝條及殘材分段並妥善排列整齊置放於保留帶。

## 3.整理伐及整地成果

根據本計畫之整地作業規範及整理伐作業程序及規範，在造林區內進行伐木整地，並已完成 10.11 ha 的整理伐與整地作業，各造林區之整理伐前與整理伐後對照表如表 5，整理伐前株數以每公頃株數換算，整理伐後株數於現場量測而得，造林區編號 6、11、13 為草木雜生之林地，而造林編號 6 因周遭具有較多小徑木，因此每公頃株數較編號 7 之造林地株數為多，而造林區前中後圖如圖 22-24。

造林區 編號	面積(ha)	整理伐前蓄 積量(m <sup>3</sup> )	整理伐後蓄 積量( m <sup>3</sup> )	整理伐 前株數	整理伐 後株數	保留樹種
1	0.35	33.66	20.32	760	132	白柏、光葉柃木、米碎柃木、山紅柿、杜英、薯豆、烏來柯、長尾柯、大葉楠、紅楠、楊梅、大頭茶、小葉赤楠、大明橘、長花厚殼樹、朱紅水木、裏白饅頭果、山黃梔、茜草樹等。
2	1.03	99.06	45.72	2,236	293	
3	0.87	83.67	33.47	1,889	182	
4	0.40	38.47	19.39	868	86	
5	0.13	12.50	6.30	282	20	
6*	0.51	49.05	24.38	1,107	158	
7	1.03	99.06	43.63	2,236	221	
8	0.90	86.56	34.62	1,954	192	
9	0.85	81.75	39.70	1,845	156	
10	0.91	87.52	51.65	1,976	372	
11*	0.95	91.37	29.82	2,062	167	
12	0.61	58.66	35.47	1,324	220	
13*	1.57	151.00	91.54	3,408	570	
合計	10.11	972.33	476.01	21,947	2,769	

表 5 造林區整理伐前後對照及保留樹種統計表

註：整理伐前蓄積量以每公頃蓄積量換算，整理伐後蓄積量係依現場取樣計算而得；整理伐前株數以每公頃株數換算，整理伐後株數以現場而得。\*該造林區多屬草木雜生地，以高莖草類伴生小徑木為主。



圖 22 造林區整理伐前中後照片(一)



圖 23 造林區整理伐前中後照片(二)



圖 24 造林區整理伐前中後照片(三)

---

### (三)造林作業及成果

#### 1.造林樹種選擇

造林樹種之選擇以適地適木之本土樹種為主，並參考 20 種臺北市坡地適生樹種推薦，本案選定之主要造林樹種以臺灣肖楠、相思樹、楓香等本土樹種。以臺灣肖楠為例，依臺灣植物誌(Flora of Taiwan)內容，臺灣肖楠分布於臺灣中北部海拔 300-1,900 m，加上北部植物因氣候北降現象，常會分布於相對更低海拔處，而各樹種特性及選擇原因如表 6。

表 6 造林樹種特性及選擇原因表

樹種	特性	選擇原因
臺灣肖楠	臺灣特有種為臺灣針葉樹一級木之一，為臺灣北區與中區適生樹種，其海拔分布(中北部海拔 300-1,900 m)，其材質密緻優良且生長良好，具高經濟及生態價值，且樹型優美具觀賞價值。	其生長迅速、樹幹通直及樹型優美，兼具經濟、碳吸存及景觀之功能，因此本案選擇此樹作為主要造林樹種。
相思樹	常綠喬木，分布海拔於 100 -600 m 之低、中海拔地區，其根系發達生長快速，達到水土保持之效，且為林務局造林樹種之一。	其生長快速、木材質地良好，且可有效改良土壤，可供增加碳吸存量，因此本案選擇此樹作為造林樹種，並主要栽植於土壤貧脊區域(草生地)。
楓香	落葉喬木，分布於 1,500 m 以下，其根系擴張良好、生長快速，且樹型優美具觀賞價值，且為公私有林重要造林樹種之一。	其生長快速、樹型優美，可增加碳吸存量並兼具景觀，因此本案選擇此樹種作為造林樹種。

邱清安等(2021)指出臺灣原生植物超過 4 千餘種，但在都市林推廣應用原生樹種切缺乏完整資料，該研究過專家共同推薦，並配合原生樹種名錄、圖鑑等，進行 157 種臺灣都市林原生栽植樹種推薦，其中臺灣肖楠、相思樹、以及楓香均屬於 157 種推薦名單中之樹種。

## 2.造林作業位置及密度

根據平地造林直接給付及種苗配撥實施要點中，平地造林樹種及每公頃栽植株數基準表指出，臺灣肖楠適生區域為臺灣北區與中區、相思樹與楓香為臺灣全區，每公頃栽植株數基準，一般農牧用地之木材利用及景觀造林其造林株數為每公頃 1,500 株，而本計畫屬小規模塊狀整理伐，造林區面積合計 10.11 ha，依合約規定造林密度為每公頃 1,000 株(不包含留存木株數)，故保有更多生長空間給予栽植林木。造林區位置及樹種配置如圖 25 及表 7。

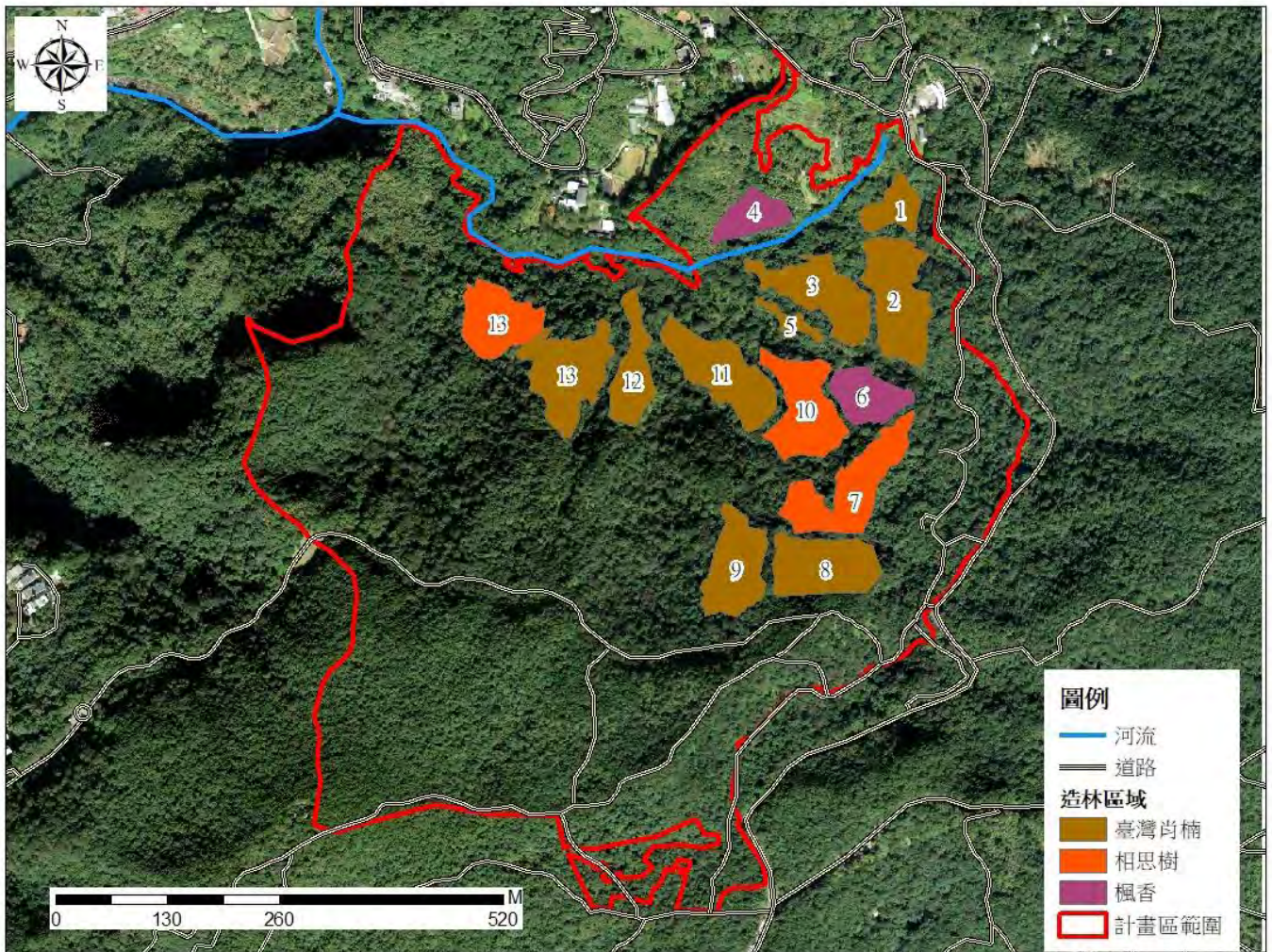


圖 25 造林區位置分布圖

表 7 造林面積、樹種及數量表

造林區編號	面積(ha)	造林樹種	造林株數(不含留存木株數)
1	0.35	臺灣肖楠	350
2	1.03	臺灣肖楠	1,030
3	0.87	臺灣肖楠	870
4	0.40	楓香	400
5	0.13	臺灣肖楠	130
6	0.51	楓香	510
7	1.03	相思樹	1,030
8	0.90	臺灣肖楠	900
9	0.85	臺灣肖楠	850
10	0.91	相思樹	910
11	0.95	臺灣肖楠	950
12	0.61	臺灣肖楠	610
13	0.89	臺灣肖楠	890
	0.68	相思樹	680
合計	10.11	臺灣肖楠 6,580 株；楓香 910 株；相思樹 2,620 株	10,110

### 3.造林作業規範

#### (1)造林季節

依據計畫區之生態氣候圖分析結果，本區造林宜於初春苗木休眠甦醒之前，其造林季節以 12-3 月為佳，最晚宜在梅雨季結束之前完成新植作業；理想之苗木出栽天氣為陰天且土壤濕潤時為佳；目前本案已完成新植作業。

#### (2)苗木規格

---

苗木規格配合樹種特性、造林地環境等，因地制宜、綜合考量，本案所使用苗木以苗高 $>50$  cm 或地徑 $>0.60$  cm 為原則。

### (3) 新植苗木標準程序

- A. 苗木運送方式：透過貨車搬運至計畫區鄰近道路處，再以人力搬運至各造林區。
- B. 於橫帶上栽植，株行距約  $2 \pm 0.5$  m。
- C. 在袋苗運往造林地前已須充分灌水，並避免強日曝曬，於搬運時無破壞袋內土壤及損壞苗木。
- D. 施業中障礙木過多時，無法按規定株距栽植時，則酌量增減，但維持原規劃原則每公頃栽植株數不少於規定栽植株數。
- E. 栽植後於每株苗木旁豎立長度 100 cm 以上竹（木）片標誌，寬  $3 \pm 1$  cm，厚  $1.5 \pm 0.5$  cm，若為圓柱形直徑  $2 \pm 0.5$  cm，出土竹(木)片末端噴紅色油漆  $5 \pm 1$  cm 環繞竹(木)片明顯標示，以示植株記號，並用繩或塑膠帶將苗木與標示桿於適當位置適度捆綁，以使苗木挺立。

#### 4.造林成果



圖 26 以鑽洞機進行植穴開挖



圖 27 新植苗木之栽植作業



圖 28 新植苗木之標誌桿施作



圖 29 新植苗木與標誌桿以塑膠繩固定



圖 30 造林區之植樹造林成果



圖 31 造林區之植樹造林與保留木



圖 32 草生地之造林區造林成果



圖 33 新植苗木生長情形

#### (四)撫育作業

造林後需適時實施刈草、除蔓等撫育作業，並適度清理非造林目標樹種或與經營目標衝突之稚樹；本案建議於出栽後 6 年內於造林區實施刈草、除蔓、修枝等撫育工作。各年度可依序實施 3、3、2、2、1、1 次，且作業前可透過教育訓練避免撫育作業時損傷栽種之苗木及該區域特殊植物。當造林苗木逐漸鬱閉時，即應適時予以修枝或適度疏伐等中後期撫育，以調整林分結構、增進森林健康。若為遊憩景觀林及環境保育林，則造林後之撫育作業頻度及方式，則應配合經營目標彈性實施。其關於撫育作業之刈草、除蔓、修枝作業如下：

##### 1.刈草

苗木出栽後，應在苗木受雜草抑制之前實施刈草，其頻度在剛出栽時較高，之後依年度減少，也可參酌該區域氣候及之生長高度與競爭關係進行調整。同時須特別注意機械除草時切勿傷及苗木及特殊植物，以免影響後續苗木之存活、生長、良好形質。刈草標準如下：

- (1)刈草須依照原種植之橫行或縱行，順等高線，水平條割。
- (2)刈草須儘量砍伐，並將植列所割雜草整齊堆移於列間草帶內。
- (3)造林地內一切雜草及其他間作物、竹類等應悉數砍除，不得留存，竹類砍除後並堆置排列整齊於雜草堆積帶上。
- (4)樹苗及竹(木)片如遭遇蔓藤纏繞必須清除蔓藤連根拔除，傾斜之苗木及竹片，應即予扶直，竹片並插深牢固。
- (5)植穴內除草時並應隨時加以培土，俾免苗木根部裸露出土面。
- (6)小灌木須鋸斷橫放成行於雜草堆積帶上，所留根株不得超出 20 cm。

---

## 2.除蔓

剛出栽之苗木經常受林地蔓藤攀爬，不僅阻擋苗木之光合作用，亦常造成苗木彎曲，嚴重影響苗木之存活與生長，因此有必要於第一時間內完全連根剷除蔓藤，其頻度於出栽後各年度依序實施 3、3、2、2、1、1 次為原則，同時可依造林地之環境、苗木大小、蔓藤種類及數量等進行調整。本案除蔓作業將配合刈草作業進行。

## 3.修枝

苗木造林後須實施修枝，促使林木生長的形質良好，亦可增進林地空隙，加速腐植層分解，促進地力，減少病蟲害發生等好處。修枝宜儘早實施、一般應在枝徑小於 5 cm 內進行，修枝之高度宜同時對樹種、冠幅、鬱閉度、養成目標等綜合考量。修枝之位置應考量樹幹與枝修之接合部位組織，以傷口最小、切口平整、癒合最快為原則。就本案造林區造林地而言，應於出栽後 2 年每年均實施 1 次修枝作業，以養成優良形質。

## 4.留存木整理伐作業

本案留存木未來將新植苗木生長狀況及現場狀況進行留存木之整理伐，以利新植苗木及留存木之未來生長。

## 5.本案撫育作業位置及面積如圖 34、表 8 所示。

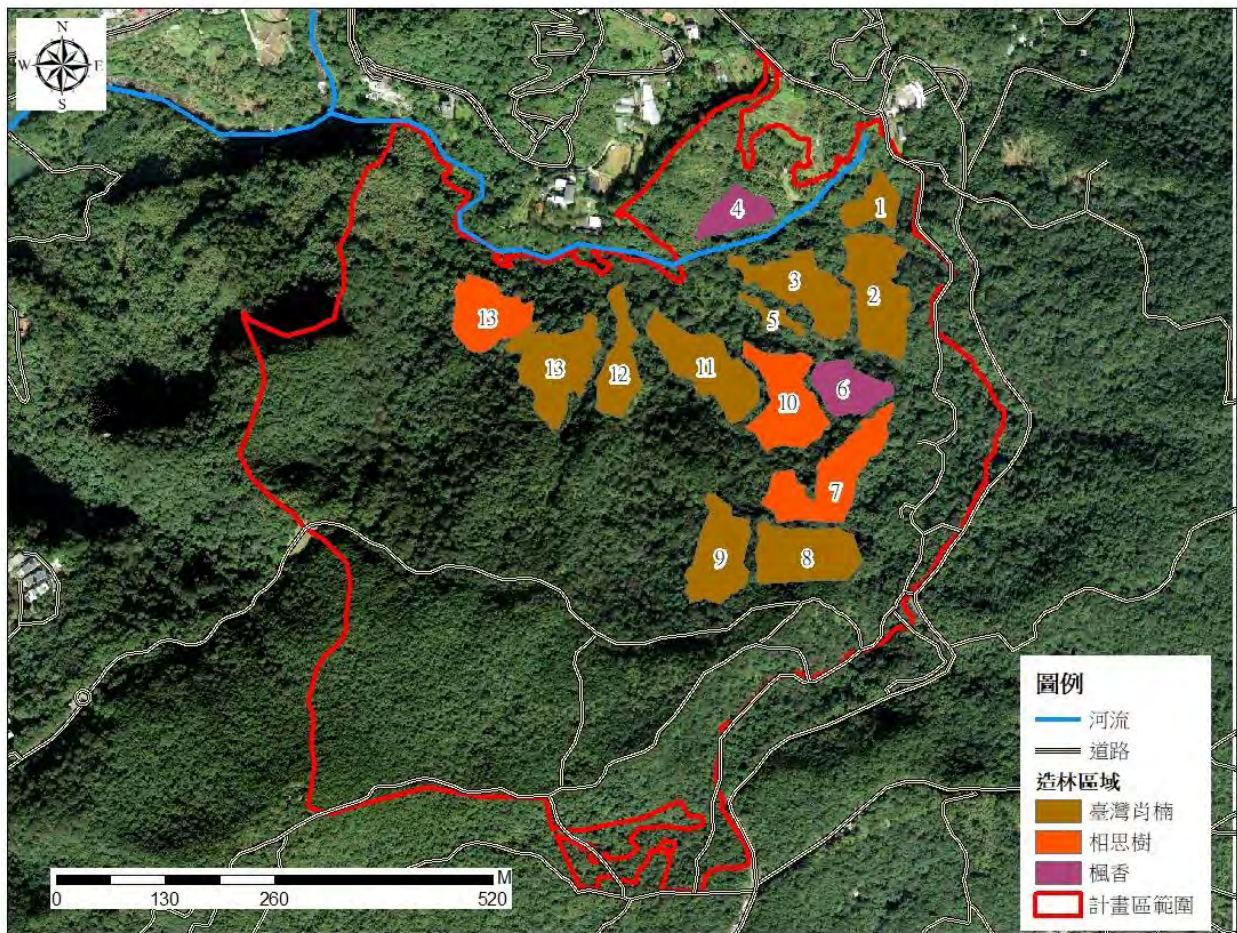


圖 34 計畫區內撫育作業位置圖

表 8 撫育作業規劃表

年度(民國)	撫育位置:	撫育作業別及頻度(次)	累計撫育面積(ha)	備註
	撫育位置編號			
110	1~13	刈草(2)、除蔓(2)	20.22	
111	1~13	刈草(3)、除蔓(3)	30.33	
112	1~13	刈草(2)、除蔓(2)、修枝(1)	20.22	
113	1~13	刈草(2)、除蔓(2)、修枝(1)	20.22	
114	1~13	刈草(1)、除蔓(1)、修枝(1)	10.11	
115	1~13	刈草(1)、除蔓(1)、修枝(1)	10.11	
總計			111.21	

### 三、碳吸存推估與監測規劃及成果

本案乃參考國外 VCS 標準，針對造林/再造林(Afforestation and Reforestation, AR)及改善森林經營(Improved Forest Management, IFM)等森林碳匯計算方法學之精神，以本案計畫範圍之林地經營現況，參考 IFM 之低產量森林轉換為高產量森林 (VM0005)及透過延長輪伐期時間改善森林經營 (VM0003)之方法學為主要精神，並根據一般碳中和計算之概念，符合可量測、可報告、可驗證(Measurement, Reporting, Verification, MRV)之機制，並評估北美館辦理此次展覽活動所產生之碳排放，能否使其達到抵換因該展覽產生的碳排放目標。

#### (一)本案之碳中和減量架構

本案之碳中和減量架構，係參考 VCS 之改善森林經營(IFM)的相關方法學，並依照 MRV 精神，進行本案碳中和減量架構之設計，主要包括適用條件、專案邊界、基線計算、專案計算、洩漏排放、CO<sub>2</sub> 淨移除量及監測計畫，如下表 9 所示，其操作流程圖如圖 35。

表 9 本專案活動之碳中和減量架構表

減量措施	改善森林經營
適用條件	1.改善森林經營為屬於「森林」維持「森林」的活動。 2.專案執行期間，不得在有目的情況下進行林產物收穫。 3.本減量方式適用於次生林(過去曾有人為擾動，後續因缺乏經營所形成之森林)，若為次生林演替後期，基線假設為 0，若反之則需進行監測評估以修正基線值。 4.基線及專案活動期間，不會發生生物質燃燒及清除枯木等情況，若有則須納入排放計算。 4.林地與森林必須由管理單位認定為無違法伐木。
專案邊界	1.專案邊界及土地合格性 專案區域需符合「森林」條件之土地，且未發生土地利用變化。進行專案活動前需取得主管機關指定、認可或批准，才可計入改善森林經營(IFM)類別。發起人需明確界定專案的空間邊界，以便對專案的 CO <sub>2</sub> 排放量(Carbon dioxide emissions)

	<p>和 CO<sub>2</sub> 移除量(Carbon dioxide removal)進行準確的計算、監測、核算和核查。</p> <p>2.專案邊界內碳匯變化的計算項目 透過改善森林經營活動作為減量方式，而碳匯變化主要來自地上部、地下部生物量、枯死木及木產品納入計算項目，而廢棄物及土壤有機碳非主要碳庫，不納入計算項目。</p> <p>3.專案邊界內碳釋放源的計算項目 計算撫育造林活動所產生的車輛/機械使用化石燃料排放的 CO<sub>2</sub> 總量。</p> <p>4.專案邊界外之碳洩漏(Carbon leakage) 估算專案活動是否會造成專案邊界外 CO<sub>2</sub> 排放量的增加。</p>								
<p>基線計算</p>	<p>為符合可操作之方法，以文獻蒐集所得資料或專案作業前之地面樣區調查資料，進行估算淨基準 CO<sub>2</sub> 排放量和 CO<sub>2</sub> 移除量。</p> $\Delta C_{BSL,t} = \Delta C_{BSL,tree,t} - GHG_{BSL-E,t}$ <table border="1" data-bbox="391 1003 1307 1283"> <thead> <tr> <th>參數</th> <th>定義</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\Delta C_{BSL,t}</math></td> <td>基線情境下，專案範圍內 t 年 CO<sub>2</sub> 淨移除量</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta C_{BSL,tree,t}</math></td> <td>基線情境下，專案範圍內第 t 年之林木的地上部、地下部 CO<sub>2</sub> 變化量</td> </tr> <tr> <td><math>GHG_{BSL-E,t}</math></td> <td>基線情境下，專案範圍內造成的專案邊界內的 CO<sub>2</sub> 排放量</td> </tr> </tbody> </table>	參數	定義	$\Delta C_{BSL,t}$	基線情境下，專案範圍內 t 年 CO <sub>2</sub> 淨移除量	$\Delta C_{BSL,tree,t}$	基線情境下，專案範圍內第 t 年之林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量	$GHG_{BSL-E,t}$	基線情境下，專案範圍內造成的專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量
參數	定義								
$\Delta C_{BSL,t}$	基線情境下，專案範圍內 t 年 CO <sub>2</sub> 淨移除量								
$\Delta C_{BSL,tree,t}$	基線情境下，專案範圍內第 t 年之林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量								
$GHG_{BSL-E,t}$	基線情境下，專案範圍內造成的專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量								
<p>專案計算</p>	<p>計算專案情境下，造林木或留存木地上、地下部 CO<sub>2</sub> 儲存變化量、森林經營活動留於專案邊界內而產生之 CO<sub>2</sub> 排放量(如：伐採之林木、撫育後枝條、以及撫育過程所造成之 CO<sub>2</sub> 排放量，如鏈鋸或割草機等使用汽油)及森林經營活動所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量。留存木之 CO<sub>2</sub> 儲存變化量，採用留存率進行估算，而留存率則以胸高斷面積保留率進行計算。</p> $\Delta C_{P,t} = \Delta C_{P,tree,t} - \Delta C_{Cut,tree,t} - GHG_{p,t}$ <table border="1" data-bbox="391 1711 1369 1948"> <thead> <tr> <th>參數</th> <th>定義</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\Delta C_{P,t}</math></td> <td>第 t 年專案情境下碳匯實際 CO<sub>2</sub> 淨移除量</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta C_{P,tree,t}</math></td> <td>第 t 年之造林木及留存木的地上部、地下部 CO<sub>2</sub> 變化量</td> </tr> </tbody> </table>	參數	定義	$\Delta C_{P,t}$	第 t 年專案情境下碳匯實際 CO <sub>2</sub> 淨移除量	$\Delta C_{P,tree,t}$	第 t 年之造林木及留存木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量		
參數	定義								
$\Delta C_{P,t}$	第 t 年專案情境下碳匯實際 CO <sub>2</sub> 淨移除量								
$\Delta C_{P,tree,t}$	第 t 年之造林木及留存木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量								

	$\Delta C_{Cut,tree,t}$	專案活動實施 t 年後，因施行專案活動而造成專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量(如:伐倒木之 CO <sub>2</sub> 量)	
	$GHG_{p,t}$	專案活動實施 t 年後，因施行專案而造成專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量(如：汽油燃燒)	
CO <sub>2</sub> 洩漏	適用條件，因改善森林經營活動(如：整理伐、造林、撫育)無潛在性的碳洩漏，CO <sub>2</sub> 洩漏量可設為 0。		

$\Delta C_{FM,t} = \Delta C_{p,t} - \Delta C_{BSL,t} - LK$	
參數	定義
$\Delta C_{FM,t}$	第 t 年(專案活動實施 t 年後)之 CO <sub>2</sub> 淨移除量
$\Delta C_{p,t}$	第 t 年之專案情境下實際 CO <sub>2</sub> 淨移除量
$\Delta C_{BSL,t}$	第 t 年之基線情境下 CO <sub>2</sub> 淨移除量
$LK$	第 t 年，因專案導致於專案邊界外 CO <sub>2</sub> 洩漏

監測方法	基線位置及專案邊界內設置永久監測樣區，並透過長期監測資料，以便進行碳庫碳儲存變化之監測。
------	--

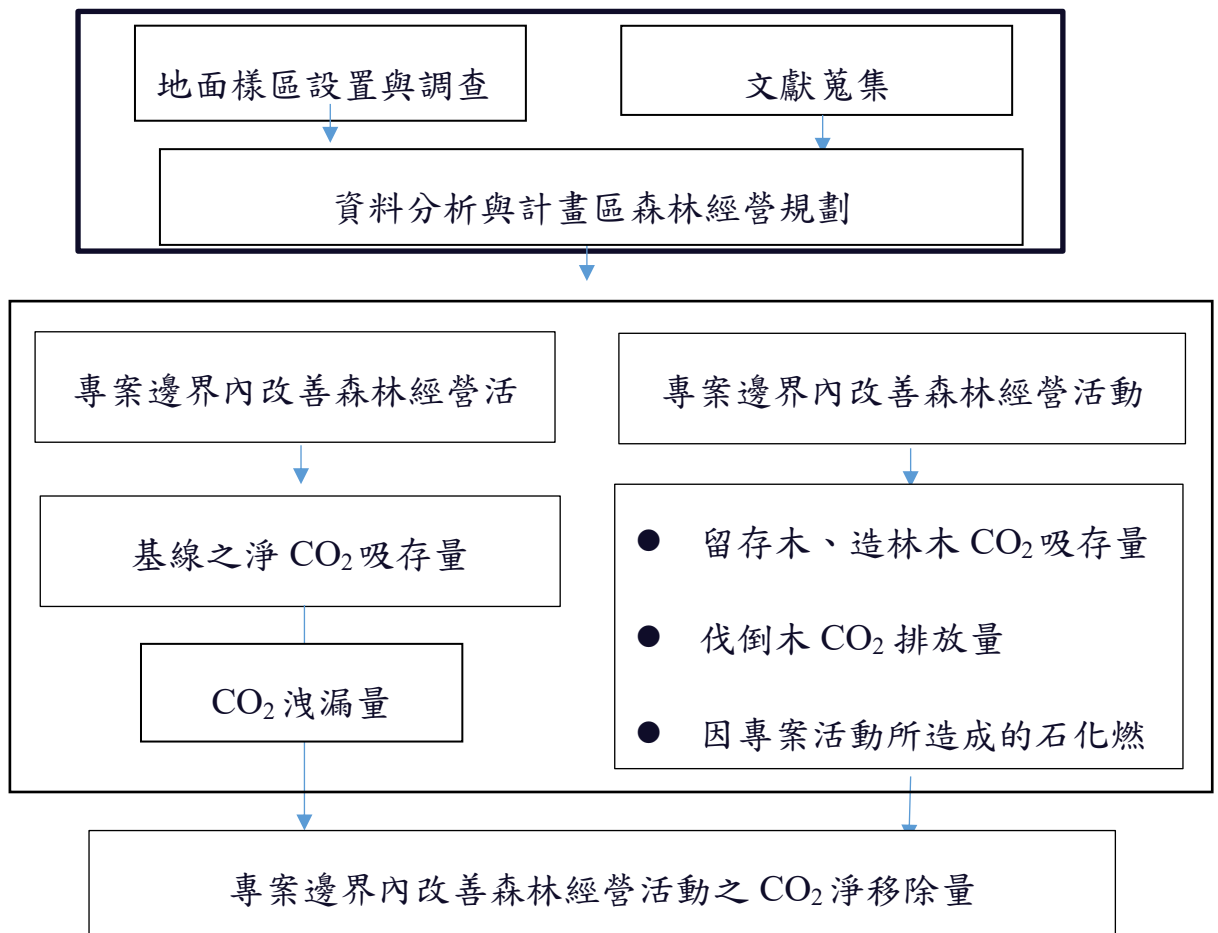


圖 35 本案 CO<sub>2</sub> 移除量計算之操作流程

## (二)專案活動之 CO2 排放量、移除量及基線 CO2 淨移除量之計算方法

### 1.基線 CO2 淨移除量之計算

基線(Business As Usual, BAU)為「CO2 排放基線」，實質上為「什麼都不做」，亦即完全不採取任何溫室氣體減量的情境(OECD, 2009)。本計畫之基線 CO2 淨移除量(CO2 net removals)計算，係以專案作業前之地面樣區調查資料，估算基線之 CO2 排放量(CO2 emissions)、移除量及淨移除量，此方法參數包含地上部生物量、地下部生物量、枯死木與林產品。

基線 CO2 淨移除量計算，以加州環境保護署(California Environmental Protection Agency, CEPA)空氣資源局的履約抵換計畫為例，該計畫認為基線設定，會因計畫性質而有所不同(CEPA, 2014)。如依據經濟理論，並沒有說明設立基線的根據，基線可以因為要減少給林主給付之經濟考量而有所改變。此外若是沒有 CO2 儲存量基線的設定，執行 CO2 排放抵換計畫時，CO2 排放交易市場將會有過多的森林碳匯供給。若是 CO2 儲存量基線應用於 CO2 排放抵換計畫時，則 CO2 儲存量基線應以森林碳政策執行之前的砍伐行為為基準。柳婉郁、徐寬(2017)認為 CO2 儲存量如果基線制定能更具彈性，其可以減少一些資訊需求，進而減少政策執行的管理花費。

為符合本案可操作之方法，以全區 52.70 ha 中 10.11 ha 作為基線面積，由於計畫區過去無長期生長的監測資料，因此依據地理位置及林相較為接近之福山動態樣區複查計畫(行政院農業委員會林業試驗所, 2009)及 Elias et al.(2020) 的研究報告，彙整基線之年平均生長量推估值，以供為本案(式 1)基線 CO2 淨移除量之估算，相關參數如表 10、表 11。

$$\Delta C_{BSL,t} = \Delta C_{BSL,tree,t} - GHG_{BSL-E,t} \quad (式1)$$

表 10 基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量計算之參數表

參數	定義	單位
$\Delta C_{BSL,t}$	基線情境下，專案範圍內 t 年 CO <sub>2</sub> 淨移除量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$\Delta C_{BSL,tree,t}$	基線情境下，專案範圍內第 t 年之林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$GHG_{BSL-E,t}$	基線情境下，專案範圍內造成的專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量	tCO <sub>2</sub> -e/yr

(1)  $\Delta C_{BSL,tree,t}$  之計算

針對式(1)中  $\Delta C_{BSL}$  進行計算，其計算式如下：

$$\Delta C_{BSL,tree,t} = (C_{BSL,tree,t} - C_{BSL,tree,t-1}) \quad (\text{式2})$$

表 11  $\Delta C_{BSL,tree,t}$  參數表

參數	定義	單位
$\Delta C_{BSL,tree,t}$	基線情境下，專案範圍內第 t 年之林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$C_{BSL,tree,t}$	基線情境下，t 年林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$C_{BSL,tree,t-1}$	基線情境下，t-1 年林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 量	tCO <sub>2</sub> -e/yr

$C_{BSL,tree,t}$  之計算分為林木的地上部及地下部生物量，並以生物量擴展係數法，透過測定林木胸高直徑、樹高(Height, H)，依材積式計算單株林木樹幹材積(式 3)，後續根據 IPCC 規範的計算公式，由林分材積生長，估算生物量增加所致的碳儲存量變化。樹種的「地上部材積與生物量轉換係數(Biomass Conversion and Expansion Factors, BCEF)」、「地下部生物量與地上部生物量比例(Shoot ratio, R)」、

「碳含量轉換係數(Carbon Fraction, CF)」三項參數有關，亦即將林分每公頃「樹幹材積年淨生長量」乘以[BCEF×(1+R)×CF]即能算出其每公頃每年的碳變化量。其中 BCEF 亦可以用地上部生物量擴展係數(Biomass Expansion Factor, BEF)與基礎密度(D)相乘而得(式 4)，其係數表如表 12。

$$V_{\text{一般闊葉樹}} = 0.00008626 \times D^{1.8742} \times H^{0.8671} \text{ (式3)}$$

註：V：為該樹種單株樹幹材積(m<sup>3</sup>)；D為林木胸徑(cm)；H為林木樹高(m)

$$\sum_{i=1}^n C = V \times BEF \times D \times (1 + R) \times CF \text{ (式4)}$$

註：C：單株碳吸存量 (ton)；V：單株樹幹材積 (m<sup>3</sup>)；D為基礎密度(g/cm<sup>3</sup>) (樹幹絕乾重量/樹幹生材體積)；地上部生物量擴展係數(BEF)；地上部材積與生物量轉換係數(BCEF)為 BEF×D；地下部生物量與地上部生物量比例(R)；CF：碳含量轉換係數。

表 12 本計畫所使用之各樹種生物量、碳吸存量推估之相關本土轉換係數(林裕仁，2008)

樹種	D	BEF	R	CF
臺灣肖楠	0.54	1.23	0.28	0.4857
楓香	0.56	1.20	0.21	0.4691
相思樹	0.77	1.24	0.24	0.4717
其他闊葉林	0.56	1,20	0.21	0.4691

註: D: 基礎密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (樹幹絕乾重量/樹幹生材體積); BEF: 地上部生物量擴展係數; R: 地下部生物量與地上部生物量比例; CF: 碳含量轉換係數

透過式 4 計算單株碳吸存量，再利用  $\text{CO}_2$  與碳的分子量(44/12) 比，將碳含量轉換成  $\text{CO}_2$  當量，即為  $C_{BSL,tree,t}$ ;  $GHG_{BSL-E,t}$  因在基線情境下無造成碳排放即為 0。

## 2. 專案排放(專案 $\text{CO}_2$ 淨移除量)

本案於計畫全區 52.7 ha 內，設置 10.11 ha 作為專案面積，並進行促進森林管理活動，而實施專案後之實際  $\text{CO}_2$  淨移除量計算如式 5，相關參數如表 13：

$$\Delta C_{P,t} = \Delta C_{P,tree,t} - C_{Cut,tree,t} - GHG_{p,t} \quad (\text{式5})$$

表 13  $\Delta C_{P,t}$  參數表

參數	定義	單位
$\Delta C_{P,t}$	第 t 年專案情境下碳匯實際 CO <sub>2</sub> 淨移除量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$\Delta C_{P,tree,t}$	第 t 年之造林木及留存木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$C_{Cut,tree,t}$	專案活動實施 t 年後，因施行專案活動而造成專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量(如：伐倒木之 CO <sub>2</sub> 量)	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$GHG_{p,t}$	專案活動實施 t 年後，因施行專案而造成專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量(如：汽油燃燒)	tCO <sub>2</sub> -e/yr

(1)  $C_{P,tree,t}$  之計算

$C_{P,tree,t}$  之計算，主要分為造林木的生長量及留存木的地上部與地下部生物量。造林木之生長量計算，係藉由各造林樹種生長收穫模式的研究文獻蒐集，取得以林齡為獨立變數的林分單位蓄積量推估模式，進行臺灣肖楠、楓香及相思樹造林木在不同林齡情境下之生長量估算。而留存木之地上部及地下部生物量估算，係以 Fantini *et al.* (2019) 對於未經營次生林(Unmanaged secondary forest)與經營次生林(Managed secondary forest)的生長量比較研究，作為參考依據，並按留存比例進行估算。

(2)  $C_{Cut,tree,t}$  之計算

$C_{Cut,tree,t}$  之計算係以(式 3)進行伐倒木蓄積量推估，並以表 12 之其他闊葉林生物量轉換係數為依據，推估伐倒木的生物量。由於本案之伐倒木置放於專案邊界內，不搬出利用，因此伐倒木所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量，將延遲分年於專案邊界內釋放，本案將參考 Martin *et al.*(2021) 及 Seibold *et al.* (2021)研究的數據，進行伐倒木 CO<sub>2</sub> 排放量之年度推估。

---

Martin *et al.* (2021) 提出伐倒木置放於林間之生物量轉換為 CO<sub>2</sub> 排放量之轉換係數為 0.485，而 Seibold *et al.* (2021) 針對闊葉樹林伐倒木，置放於林間之 CO<sub>2</sub> 排放量速率進行研究，發現 CO<sub>2</sub> 排放量將以每年 15% 的速率逐年遞減。

### (3) GHG<sub>p,t</sub> 之計算

為施行專案而造成專案邊界內的 CO<sub>2</sub> 排放，係指營造複層林伐木、造林及刈草撫育所使用之油料量，計算基準以環境保護署公告之「固定源與移動源(燃料)CO<sub>2</sub> 排放係數」(溫室氣體排放係數管理表 6.0.4 版) 作為依據，1 L 汽油燃燒產生 2.26 Kg CO<sub>2</sub> 計算之，相關油耗於各項作業時紀錄之。

### 3. CO<sub>2</sub> 洩漏排放計算

CO<sub>2</sub> 洩漏係指實施溫室氣體管制，可能導致產業外移至其他碳管制較為寬鬆國家，反而增加全球排碳量之情況。本案為促進森林經營管理活動(如：林相改良、整理伐、造林)，不會產生潛在的 CO<sub>2</sub> 洩漏，因此在本案之 CO<sub>2</sub> 洩漏為 0。

### 4. CO<sub>2</sub> 淨值計算

$$\Delta C_{FM,t} = \Delta C_{p,t} - \Delta C_{BSL,t} - LK \quad (\text{式6})$$

改善森林經營管理活動的 CO<sub>2</sub> 量總淨值( $\Delta C_{FM,t}$ )是根據專案活動下改善森林經營管理活動後產生的 CO<sub>2</sub> 變化量( $\Delta C_{p,t}$ )減去基線情境中的林木的地上部、地下部 CO<sub>2</sub> 變化量( $\Delta C_{BSL,t}$ )及可能發生的任何潛在洩漏量(LK)的結果而計算。

表 14  $\Delta C_{FM,t}$  參數表

參數	定義	單位
$\Delta C_{FM,t}$	第 t 年(專案活動實施 t 年後)之 CO <sub>2</sub> 淨移除量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$\Delta C_{P,t}$	第 t 年之專案情境下實際 CO <sub>2</sub> 淨移除量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$\Delta C_{BSL,t}$	第 t 年之基線情境下 CO <sub>2</sub> 淨移除量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
<b>LK</b>	第 t 年，因專案導致於專案邊界外碳洩漏	tCO <sub>2</sub> -e/yr

### (三) 碳中和之計算結果

#### 1. 基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量

依基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量計算方式(式 1)，可得知在專案作業前 CO<sub>2</sub> 變化量，依據林務局福山動態樣區複查計畫，臺灣東北部低海拔闊葉林所設置之 25 ha 動態樣區，其每年的胸高斷面積之生長率為 4.28%(行政院農業委員會林業試驗所，2009)，以胸高斷面積之生長率為 4.28%，利用本案所調查之樣區，估算基線年平均生長量約為 0.5-3.91 m<sup>3</sup>/ha。而透過 Elias *et al.*(2020)所彙整之次生林年平均生長量，如圖 36，若為 20 年以下之次生林為 2.9-4.1 m<sup>3</sup>/ha 不等(Bonner *et al.*, 2013；Poorter *et al.*, 2016；Requena Suarez *et al.*, 2019)，若大於 20 年則為 1.2-2.6 m<sup>3</sup>/ha 不等(Bonner *et al.*, 2013；Requena Suarez *et al.*, 2019)，老熟林更低於 0.5 m<sup>3</sup>/ha(Brienen *et al.*, 2015；Requena Suarez *et al.*, 2019)。由國內外相關文獻研究所得之次生林年生長量數據，設計四種情境進行基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量計算，包括 1.情境(一)年平均生長量為 0.5 m<sup>3</sup>/ha、2.情境(二)年平均生長量為 1 m<sup>3</sup>/ha、3.情境(三)年平均生長量為 2 m<sup>3</sup>/ha、以及 4.情境(四)年平均生長量為 2.5 m<sup>3</sup>/ha 等四種。而因在基線情境下無造成碳排放即為 0，結果如表 15-18 所示。

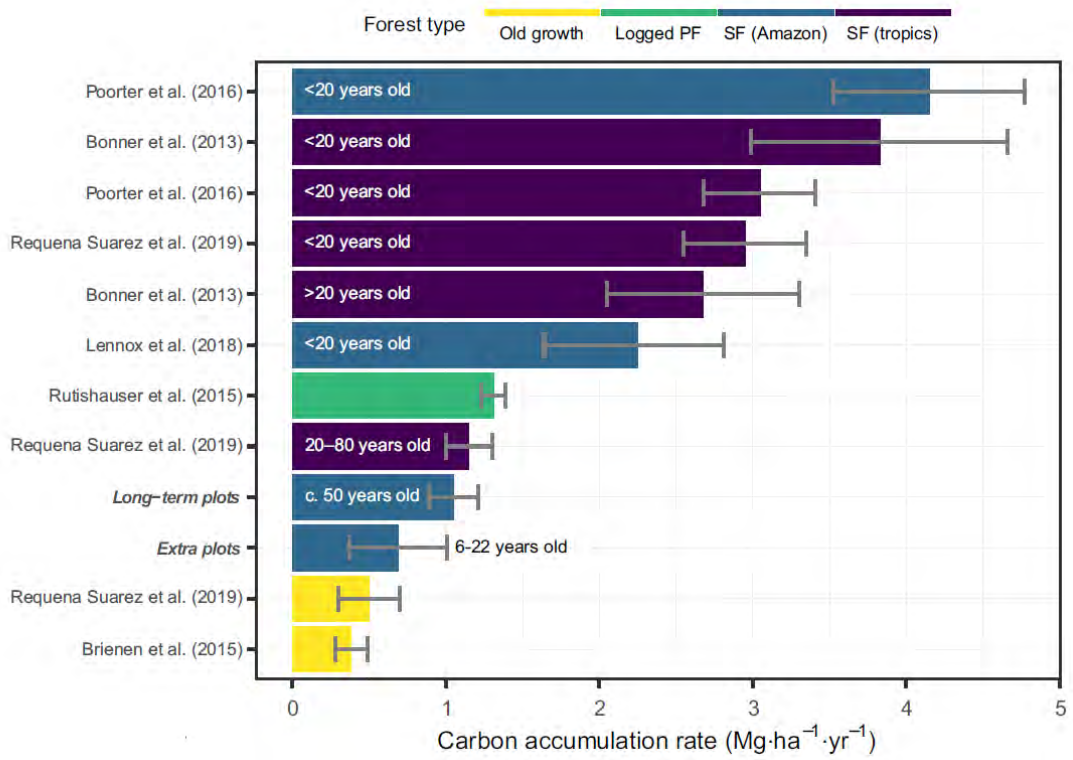


圖 36 不同森林類型不同林齡之碳累積速率圖(Elias et al., 2020)

表 15 基線(情境一)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO<sub>2</sub> 變化  
量表

專案 年分 (t)	基線面積 (ha)	平均年生長量 (m <sup>3</sup> /ha/year)	生長量 (m <sup>3</sup> )	碳儲存量 (ton)	基線 CO <sub>2</sub> 量* (C <sub>BSL,tree,t</sub> )( tCO <sub>2</sub> -e )
1	10.11	0.5	5.06	1.93	7.07(0.70 /ha)
2			10.11	3.86	14.14(1.40 /ha)
3			15.17	5.78	21.21(2.10 /ha)
4			20.22	7.71	28.28(2.80 /ha)
5			25.28	9.64	35.35(3.50 /ha)
6			30.33	11.57	42.42(4.20 /ha)
7			35.39	13.50	49.49(4.90 /ha)
8			40.44	15.43	56.56(5.59 /ha)
9			45.50	17.35	63.63(6.29 /ha)
10			50.55	19.28	70.70(6.99 /ha)
11			55.61	21.21	77.77(7.69 /ha)
12			60.66	23.14	84.84(8.39 /ha)
13			65.72	25.07	91.91(9.09 /ha)
14			70.77	26.99	98.98(9.79 /ha)
15			75.83	28.92	106.05(10.49 /ha)
16			80.88	30.85	113.12(11.19 /ha)
17			85.94	32.78	120.19(11.89 /ha)
18			90.99	34.71	127.26(12.59 /ha)
19			96.05	36.63	134.33(13.29 /ha)
20			101.10	38.56	141.40(13.99 /ha)
21			106.16	40.49	148.47(14.69 /ha)
22			111.21	42.42	155.54(15.38 /ha)
23			116.27	44.35	162.61(16.08 /ha)
24			121.32	46.28	169.68(16.78 /ha)
25			126.38	48.20	176.75(17.48 /ha)

註: \*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

表 16 基線(情境二)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO<sub>2</sub> 變化

量表

專案年分 (t)	基線面積 (ha)	平均年生長量 (m <sup>3</sup> /ha/year)	生長量 (m <sup>3</sup> )	碳儲存量 (ton)	基線 CO <sub>2</sub> 量* (C <sub>BSL,tree,t</sub> )( tCO <sub>2</sub> -e )
1	10.11	1	10.11	3.86	14.14(1.40 /ha)
2			20.22	7.71	28.28(2.80 /ha)
3			30.33	11.57	42.42(4.20 /ha)
4			40.44	15.43	56.56(5.59 /ha)
5			50.55	19.28	70.7(6.99 /ha)
6			60.66	23.14	84.84(8.39 /ha)
7			70.77	26.99	98.98(9.79 /ha)
8			80.88	30.85	113.12(11.19 /ha)
9			90.99	34.71	127.26(12.59 /ha)
10			101.10	38.56	141.4(13.99 /ha)
11			111.21	42.42	155.54(15.38 /ha)
12			121.32	46.28	169.68(16.78 /ha)
13			131.43	50.13	183.82(18.18 /ha)
14			141.54	53.99	197.96(19.58 /ha)
15			151.65	57.84	212.1(20.98 /ha)
16			161.76	61.70	226.24(22.38 /ha)
17			171.87	65.56	240.38(23.78 /ha)
18			181.98	69.41	254.52(25.17 /ha)
19			192.09	73.27	268.66(26.57 /ha)
20			202.20	77.13	282.8(27.97 /ha)
21			212.31	80.98	296.94(29.37 /ha)
22			222.42	84.84	311.08(30.77 /ha)
23			232.53	88.69	325.21(32.17 /ha)
24			242.64	92.55	339.35(33.57 /ha)
25			252.75	96.41	353.49(34.96 /ha)

註: \*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

表 17 基線(情境三)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO<sub>2</sub> 變化

量表

專案年分(t)	基線面積(ha)	平均年生長量(m <sup>3</sup> /ha/year)	生長量(m <sup>3</sup> )	碳儲存量(ton)	基線 CO <sub>2</sub> 量* (C <sub>BSL,tree,t</sub> )( tCO <sub>2</sub> -e )
1	10.11	2	20.22	7.71	28.28(2.80 /ha)
2			40.44	15.43	56.56(5.59 /ha)
3			60.66	23.14	84.84(8.39 /ha)
4			80.88	30.85	113.12(11.19 /ha)
5			101.10	38.56	141.4(13.99 /ha)
6			121.32	46.28	169.68(16.78 /ha)
7			141.54	53.99	197.96(19.58 /ha)
8			161.76	61.70	226.24(22.38 /ha)
9			181.98	69.41	254.52(25.17 /ha)
10			202.20	77.13	282.8(27.97 /ha)
11			222.42	84.84	311.08(30.77 /ha)
12			242.64	92.55	339.35(33.57 /ha)
13			262.86	100.26	367.63(36.36 /ha)
14			283.08	107.98	395.91(39.16 /ha)
15			303.30	115.69	424.19(41.96 /ha)
16			323.52	123.40	452.47(44.75 /ha)
17			343.74	131.11	480.75(47.55 /ha)
18			363.96	138.83	509.03(50.35 /ha)
19			384.18	146.54	537.31(53.15 /ha)
20			404.40	154.25	565.59(55.94 /ha)
21			424.62	161.96	593.87(58.74 /ha)
22			444.84	169.68	622.15(61.54 /ha)
23			465.06	177.39	650.43(64.34 /ha)
24			485.28	185.10	678.71(67.13 /ha)
25			505.50	192.82	706.99(69.93 /ha)

註: \*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

表 18 基線(情境四)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO<sub>2</sub> 變化  
量表

專案 年分 (t)	基線面積 (ha)	平均年生長量 (m <sup>3</sup> /ha/year)	生長量 (m <sup>3</sup> )	碳儲存量 (ton)	基線 CO <sub>2</sub> 量* (C <sub>BSL,tree,t</sub> ) ( tCO <sub>2</sub> -e )
1	10.11	2.5	25.28	9.64	35.35(3.50 /ha)
2			50.55	19.28	70.7(6.99 /ha)
3			75.83	28.92	106.05(10.49 /ha)
4			101.10	38.56	141.4(13.99 /ha)
5			126.38	48.20	176.75(17.48 /ha)
6			151.65	57.84	212.1(20.98 /ha)
7			176.93	67.49	247.45(24.48 /ha)
8			202.20	77.13	282.8(27.97 /ha)
9			227.48	86.77	318.15(31.47 /ha)
10			252.75	96.41	353.49(34.96 /ha)
11			278.03	106.05	388.84(38.46 /ha)
12			303.30	115.69	424.19(41.96 /ha)
13			328.58	125.33	459.54(45.45 /ha)
14			353.85	134.97	494.89(48.95 /ha)
15			379.13	144.61	530.24(52.45 /ha)
16			404.40	154.25	565.59(55.94 /ha)
17			429.68	163.89	600.94(59.44 /ha)
18			454.95	173.53	636.29(62.94 /ha)
19			480.23	183.17	671.64(66.43 /ha)
20			505.50	192.82	706.99(69.93 /ha)
21			530.78	202.46	742.34(73.43 /ha)
22			556.05	212.10	777.69(76.92 /ha)
23			581.33	221.74	813.04(80.42 /ha)
24			606.60	231.38	848.39(83.92 /ha)
25			631.88	241.02	883.74(87.41 /ha)

註: \*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

## 2. 專案活動之 CO<sub>2</sub> 排放量

本計畫以 10.11 ha 作為專案面積，進行改善森林經營活動，其專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量估算，包括留存木及造林木之 CO<sub>2</sub> 變化量 ( $C_{P,tree,t}$ )、伐倒木之 CO<sub>2</sub> 排放量 ( $C_{Cut,tree,t}$ ) 及實施專案所產生之 CO<sub>2</sub> 量 ( $GHG_{p,t}$ )，並計算專案情境下之 CO<sub>2</sub> 淨移除量 ( $\Delta C_{P,t}$ )。

### (1) 留存木及造林木之 CO<sub>2</sub> 變化量 ( $C_{P,tree,t}$ )

#### a. 留存木

本計畫留存木 CO<sub>2</sub> 變化量係參考臺灣東北部低海拔闊葉林所設置之 25 ha 動態樣區之複查資料(林務局，2019)及 Fantini *et al.* (2019)針對次生林之經營與未經營之林木生長量比較研究，推估經營的次生林，其平均生長量約為 3.7 m<sup>3</sup>/ha/year，本專案活動留存木之材積比例約為 49%，留存木以專案面積 10.11 ha 之 49%計算平均生長量，其平均年生長量約為 17.96 m<sup>3</sup>/year，再轉換成 CO<sub>2</sub> 量，如表 19 所示。

表 19 留存木各專案年分之生長量、碳儲存量及 CO<sub>2</sub> 儲存量表

專案年分 (t)	留存木生長量 (m <sup>3</sup> )	留存木碳儲存量 (ton)	留存木 CO <sub>2</sub> 儲存量* ( tCO <sub>2</sub> -e )
1	17.96	6.85	25.11(2.48 /ha)
2	35.91	13.70	50.22(4.97 /ha)
3	53.87	20.55	75.34(7.45 /ha)
4	71.82	27.40	100.45(9.94 /ha)
5	89.78	34.24	125.56(12.42 /ha)
6	107.73	41.09	150.67(14.90 /ha)
7	125.69	47.94	175.79(17.39 /ha)
8	143.64	54.79	200.90(19.87 /ha)
9	161.60	61.64	226.01(22.36 /ha)
10	179.55	68.49	251.12(24.84 /ha)
11	197.51	75.34	276.23(27.32 /ha)
12	215.46	82.19	301.35(29.81 /ha)
13	233.42	89.03	326.46(32.29 /ha)
14	251.38	95.88	351.57(34.77 /ha)
15	269.33	102.73	376.68(37.26 /ha)
16	287.29	109.58	401.80(39.74 /ha)
17	305.24	116.43	426.91(42.23 /ha)
18	323.20	123.28	452.02(44.71 /ha)
19	341.15	130.13	477.13(47.19 /ha)
20	359.11	136.98	502.24(49.68 /ha)
21	377.06	143.82	527.36(52.16 /ha)
22	395.02	150.67	552.47(54.65 /ha)
23	412.97	157.52	577.58(57.13 /ha)
24	430.93	164.37	602.69(59.61 /ha)
25	448.88	171.22	627.81(62.10 /ha)

註: \*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

---

## b. 臺灣肖楠

臺灣肖楠造林木之生長量估算，係參考劉宣誠、吳萬益(1986)針對蓮華池地區臺灣肖楠造林木之生長研究中，以樹幹解析研究所得之生長資料，本計畫加以整理，並建構以林齡為基礎之蓄積量推估模式(式 7)，並依據臺灣肖楠之造林面積(6.58 ha)，計算不同林齡之蓄積量，並依該樹種之生物量及碳量之轉換係數估算 CO<sub>2</sub> 儲存量，如表 20。

$$V = -30.19 + 5.5772A + 0.2917A^2 \quad (\text{式7})$$

註：V 為每公頃材積(m<sup>3</sup>/ha)，A 為林齡(year)。

表 20 臺灣肖楠各專案年分之材積、碳儲存量、CO<sub>2</sub>儲存量表

專案年分 (t)	專案面積(ha)	材積(m <sup>3</sup> )	碳儲存量(ton)	CO <sub>2</sub> 儲存量(tCO <sub>2</sub> -e)**
1-4*	6.58	---	---	---
5		32.18	13.29	48.73(7.41 /ha)
6		89.89	37.12	136.10(20.68 /ha)
7		151.44	62.54	229.30(34.85 /ha)
8		216.84	89.54	328.32(49.90 /ha)
9		286.09	118.13	433.16(65.83 /ha)
10		359.18	148.32	543.83(82.65 /ha)
11		436.12	180.09	660.32(100.35 /ha)
12		516.91	213.45	782.64(118.94 /ha)
13		601.54	248.40	910.78(138.42 /ha)
14		690.02	284.93	1,044.75(158.78 /ha)
15		782.35	323.06	1,184.54(180.02 /ha)
16		878.52	362.77	1,300.15(202.15 /ha)
17		978.54	404.07	1,481.59(225.17 /ha)
18		1,082.41	446.96	1,638.85(249.07 /ha)
19		1,190.12	491.44	1,801.94(273.85 /ha)
20		1,301.68	537.50	1,970.85(299.52 /ha)
21		1,417.09	585.16	2,145.58(326.08 /ha)
22		1,536.34	634.40	2,326.14(353.52 /ha)
23		1,659.44	685.23	2,512.53(381.84 /ha)
24		1,786.39	737.65	2,704.73(411.05 /ha)
25	1,917.18	791.66	2,902.76(441.15 /ha)	

註: \*幼樹(1~4年生)林木測計精度較難掌握，易造成估計上之誤差，不宜估算。

\*\*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

---

c. 楓香

本計畫楓香生長量係參考鄭欽龍(2009)國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃，以報告中針對楓香所建立之公式，並加以整理並建構以林齡推估材積之迴歸方程式(式 8)，並依據楓香之造林面積(0.91 ha)，計算不同林齡之蓄積量，並依該樹種之生物量及碳量之轉換係數，估算 CO<sub>2</sub> 儲存量，如表 21。

$$V = 52.427 + 4.9119A + 0.0442A^2 \quad (\text{式8})$$

註：V 為每公頃材積(m<sup>3</sup>/ha)，A 為林齡(year)。

表 21 楓香各專案年分之材積、碳儲存量、CO<sub>2</sub>儲存量表

專案年分 (t)	面積(ha)	材積(m <sup>3</sup> )	碳儲存量(ton)	CO <sub>2</sub> 儲存量( tCO <sub>2</sub> -e )**
1-4*	0.91	---	---	---
5		71.06	27.11	99.39(109.22 /ha)
6		75.98	28.98	106.26(116.77 /ha)
7		80.97	30.88	113.24(124.44 /ha)
8		86.04	32.82	120.34(132.24 /ha)
9		91.20	34.78	127.54(140.16 /ha)
10		96.43	36.78	134.87(148.20 /ha)
11		101.74	38.81	142.30(156.37 /ha)
12		107.14	40.87	149.84(164.66 /ha)
13		112.61	42.95	157.50(173.08 /ha)
14		118.17	45.07	165.27(181.62 /ha)
15		123.81	47.22	173.15(190.28 /ha)
16		129.52	49.40	181.15(199.07 /ha)
17		135.32	51.62	189.26(207.98 /ha)
18		141.20	53.86	197.48(217.01 /ha)
19		147.16	56.13	205.81(226.17 /ha)
20		153.19	58.43	214.26(235.45 /ha)
21		159.31	60.77	222.81(244.85 /ha)
22		165.51	63.13	231.48(254.38 /ha)
23		171.79	65.53	240.27(264.03 /ha)
24		178.15	67.95	249.16(273.81 /ha)
25		184.59	70.41	258.17(283.70 /ha)

註: \*幼樹(1~4年生)林木測計精度較難掌握，易造成估計上之誤差，不宜估算。

\*\*以 CO<sub>2</sub>與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub>量

---

#### d. 相思樹

相思樹之生長量推估，係參考鄭欽龍(2009)國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃，以報告中針對楓香所建立之生長模式，本計畫加以整理，並建構以林齡為基礎之蓄積量推估模式(式 9)，並依相思樹之造林面積(2.62 ha)，估算不同林齡之蓄積量，並依該樹種之生物量及碳量之轉換係數，估算 CO<sub>2</sub> 儲存量，如表 22。

$$V = -17.515 + 6.5991A + 0.1549A^2 \quad (\text{式9})$$

註：V 為每公頃材積(m<sup>3</sup>)，A 為林齡(year)。

表 22 相思樹各專案年分之材積、碳儲存量、CO<sub>2</sub>儲存量表

專案年分(t)	專案面積(ha)	專案材積(m <sup>3</sup> )	專案碳儲存量(ton)	專案 CO <sub>2</sub> 儲存量(tCO <sub>2</sub> -e)**
1-4*	2.62	---	---	---
5		50.70	28.32	103.83(39.63 /ha)
6		72.46	40.47	148.38(56.63 /ha)
7		95.02	53.07	194.58(74.27 /ha)
8		118.40	66.12	242.45(92.54 /ha)
9		142.59	79.63	291.99(111.44 /ha)
10		167.59	93.59	343.18(130.98 /ha)
11		193.40	108.01	396.04(151.16 /ha)
12		220.03	122.88	450.55(171.97 /ha)
13		247.46	138.20	506.74(193.41 /ha)
14		275.71	153.98	564.58(215.49 /ha)
15		304.77	170.20	624.08(238.20 /ha)
16		334.64	186.89	685.25(261.55 /ha)
17		365.32	204.02	748.08(285.53 /ha)
18		396.82	221.61	812.57(310.14 /ha)
19		429.12	239.65	878.72(335.39 /ha)
20		462.24	258.15	946.54(361.27 /ha)
21		496.17	277.09	1,016.01(387.79 /ha)
22		530.91	296.50	1,087.15(414.94 /ha)
23		566.46	316.35	1,159.96(442.73 /ha)
24		602.82	336.66	1,234.42(471.15 /ha)
25	640.00	357.42	1,310.54(500.21 /ha)	

註: \*幼樹(1~4年生)林木測計精度較難掌握，易造成估計上之誤差，不宜估算。

\*\*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

(2) 伐倒木之 CO<sub>2</sub> 排放量( $C_{Cut,tree,t}$ )

伐倒木之 CO<sub>2</sub> 排放量，係依據整理伐前後之蓄積量，計算伐倒木蓄積量，生物量轉換係數係以表 11 之其他闊葉林為依據，本案因伐倒木放置於專案邊界不搬出利用，未來將逐年腐朽釋放 CO<sub>2</sub>，且會有部分木質殘留於土壤中，而參考 Martin *et al.*(2021)針對闊葉林林木置放於林間之碳轉換係數，可依生物量乘以 0.485 為伐倒木之 CO<sub>2</sub> 總排放量( $C_{Cut,tree,t}$ )，其結果如表 23。

表 23 伐倒木蓄積量、碳儲存量及 CO<sub>2</sub> 排放量表

造林區編號	面積(ha)	整理伐前蓄積量(m <sup>3</sup> )	整理伐後蓄積量(m <sup>3</sup> )	伐倒木蓄積量(m <sup>3</sup> )	伐倒木 CO <sub>2</sub> 排放量( $C_{Cut,tree,t}$ )(tCO <sub>2</sub> -e)
1	0.35	33.66	20.32	13.34	6.47(18.49 /ha)
2	1.03	99.06	45.72	53.34	25.87(25.12 /ha)
3	0.87	83.67	33.47	50.20	24.35(27.99 /ha)
4	0.40	38.47	19.39	19.08	9.25(23.13 /ha)
5	0.13	12.50	6.30	6.20	3.01(23.13 /ha)
6	0.51	49.05	24.38	24.67	11.96(23.46 /ha)
7	1.03	99.06	43.63	55.43	26.88(26.10 /ha)
8	0.90	86.56	34.62	51.94	25.19(27.99 /ha)
9	0.85	81.75	39.70	42.05	20.39(23.99 /ha)
10	0.91	87.52	51.65	35.87	17.40(19.12 /ha)
11	0.95	91.37	29.82	61.55	29.85(31.42 /ha)
12	0.61	58.66	35.47	23.19	11.25(18.44 /ha)
13	1.57	151.00	91.54	59.46	28.84(18.37 /ha)
合計	10.11	972.33	476.01	496.32	240.72(23.81 /ha)

表 23 所估算之伐倒木之 CO<sub>2</sub> 總排放量( $C_{Cut,tree,t}$ )，依據 Seibold *et al.*, (2021) 針對闊葉樹伐倒木置放於林間，腐朽釋放 CO<sub>2</sub> 之速率為每年 CO<sub>2</sub> 總排放量( $C_{Cut,tree,t}$ ) 的 15%，並逐年遞減。

### (3) 專案活動所產生之 CO<sub>2</sub> 量( $GHG_{p,t}$ )

專案活動所造成之專案邊界內的 CO<sub>2</sub> 排放量之計算，係根據營造複層林期間及未來造林區刈草撫育作業所使用之油料量，專案活動包括整地、整理伐及造林作業，作業期間記錄每日所消耗之油料，並轉化為公頃消耗油料量，統計結果為每公頃需消耗油料 110 L，而未來造林區刈草作業預計每公頃之消耗油量為每公頃 25 L，汽油燃燒計算基準以 1 L 產生 2.26 Kg CO<sub>2</sub> 計算之，結果如表 24、表 25。

表 24 專案活動之油耗量及所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量表

造林區編號	面積(ha)	油耗量(L)	實施專案所產生之 CO <sub>2</sub> 量 ( $GHG_{p,t}$ )( tCO <sub>2</sub> -e )
1	0.35	38.50	0.09
2	1.03	113.30	0.26
3	0.87	95.70	0.22
4	0.40	44.00	0.10
5	0.13	14.30	0.03
6	0.51	56.10	0.13
7	1.03	113.30	0.26
8	0.90	99.00	0.22
9	0.85	93.50	0.21
10	0.91	100.10	0.23
11	0.95	104.50	0.24
12	0.61	67.10	0.15
13	1.57	172.70	0.39
合計	10.11	1,112.10	2.51

表 25 未來專案活動之油耗量及所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量表

專案年分 (t)	撫育次數	面積(ha)	每公頃油耗(L)	所產生 CO <sub>2</sub> 量 (tCO <sub>2</sub> -e)
1	1	10.11	25	0.57
2	3			1.71
3	2			1.14
4	2			1.14
5	1			0.57
6	1			0.57
總計				5.71

註：依據林務局刈草作業標準前六年次數為 3 次、3 次、2 次、2 次、1 次、1 次，但本計畫因特殊情況導致第一年無法符合 3 次標準，以實際可操作之次數計算。

### 3. 洩漏排放計算

本案無潛在的碳洩漏，CO<sub>2</sub> 洩漏量視為 0。

### 4. CO<sub>2</sub> 總淨值( $\Delta C_{FM,t}$ ) 量之估算

以改善森林經營管理之專案活動，其 CO<sub>2</sub> 總淨值( $\Delta C_{FM,t}$ ) 是根據專案活動後，所產生的 CO<sub>2</sub> 變化量( $\Delta C_{P,tree,t}$ ) 減去基線情境中的林木的地上部、地下部 CO<sub>2</sub> 儲存量( $\Delta C_{BSL,tree,t}$ ) 及可能發生的任何潛在洩漏量(LK)為基礎，進行估算。為分析本案對於抵銷北美館辦理此展覽活動，所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量及專案活動中所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量，依據四種不同基線情境，估算專案活動後 25 年間該專案之 CO<sub>2</sub> 變化量，其結果分述如下：

(1)情境一(基線平均生長量 0.5 m<sup>3</sup>/ha/year)

情境一為基線平均生長量以 0.5 m<sup>3</sup>/ha/year 作為依據，估算透過專案活動(改善森林經營計畫)於 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，如圖 37，其結果於第 25 年可增加 4,523.39 ton CO<sub>2</sub> 吸收量，各年變化量如表 26，且於第 8 年可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量。

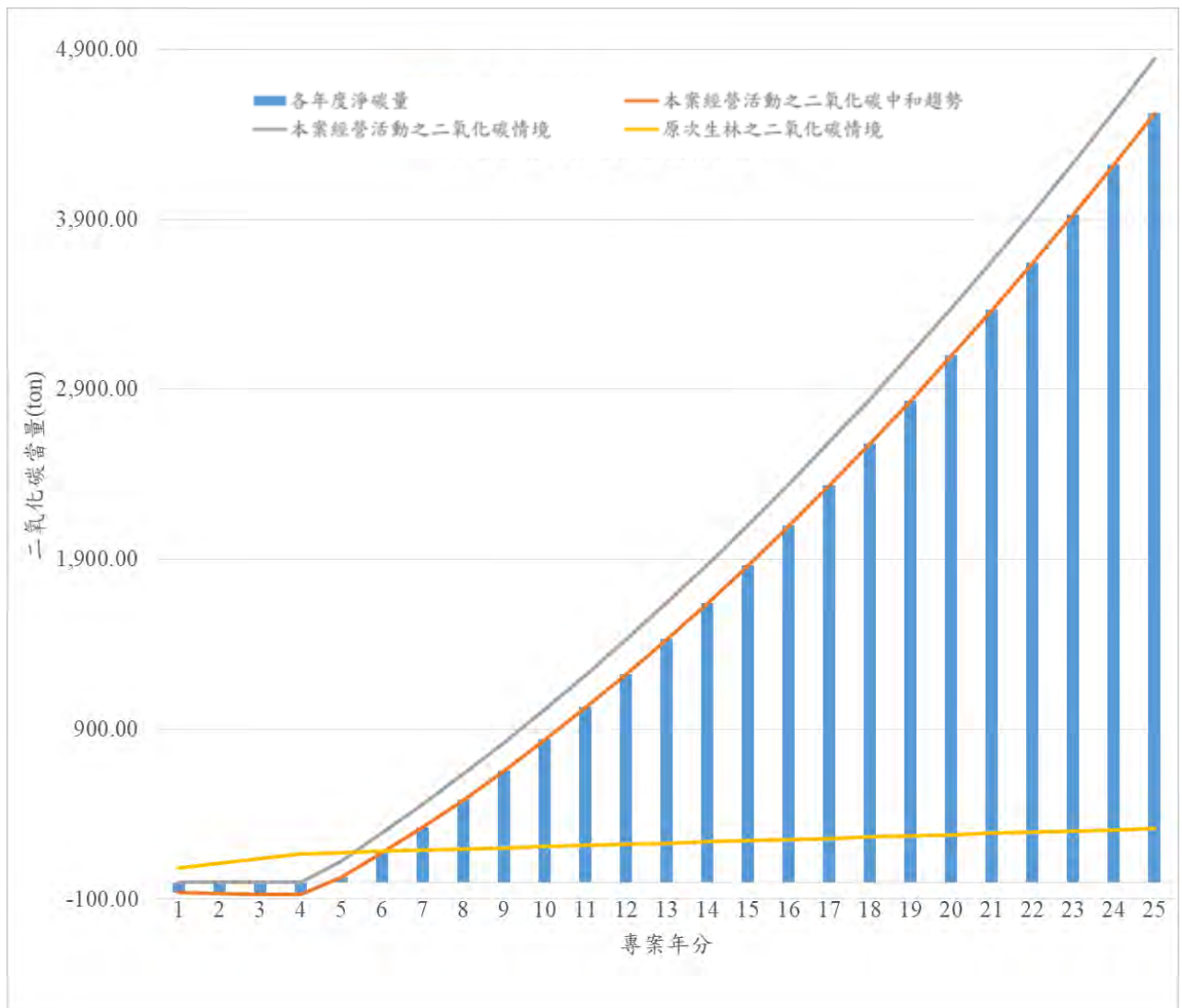


圖 37 專案活動於 25 年間之 CO<sub>2</sub> 變化量(情境一)

表 26 各專案年分 CO<sub>2</sub> 淨值總表(情境一)單位：(tCO<sub>2</sub>-e)

專案年分(t)	基線 CO <sub>2</sub> 儲存量 (C <sub>BSL,tree,t</sub> )	CO <sub>2</sub> 淨移除量(ΔC <sub>P,t</sub> )						洩漏排放(LK)	合計(T)	CO <sub>2</sub> 淨值變化量(ΔC <sub>FM,t</sub> )*
		留存木及造林木 CO <sub>2</sub> 儲存量 (C <sub>P,tree,t</sub> )				伐倒木 CO <sub>2</sub> 排放量 (C <sub>Cut,tree,t</sub> )	實施專案所產生之 CO <sub>2</sub> 排放量 (GHG <sub>p,t</sub> )			
		留存木	臺灣肖楠	楓香	相思樹					
1	-7.07	25.11	---	---	---	-74.45	-3.08	---	-59.49	---
2	-14.14	50.22	---	---	---	-99.39	-4.79	---	-68.10	-8.61
3	-21.21	75.34	---	---	---	-120.59	-5.94	---	-72.40	-4.30
4	-28.28	100.45	---	---	---	-138.61	-7.08	---	-73.52	-1.12
5	-35.35	125.56	48.73	6.76	42.88	-153.92	-7.65	---	27.01	100.52
6	-42.42	150.67	136.10	13.63	87.43	-166.94	-8.22	---	170.25	143.24
7	-49.49	175.79	229.30	20.61	133.64	-178.01	-8.22	---	323.61	153.36
8	-56.56	200.90	328.32	27.71	181.51	-187.41	-8.22	---	486.23	162.62
9	-63.63	226.01	433.16	34.91	231.04	-195.41	-8.22	---	657.87	171.63
10	-70.70	251.12	543.83	42.23	282.23	-202.20	-8.22	---	838.30	180.43
11	-77.77	276.23	660.32	49.67	335.09	-207.98	-8.22	---	1,027.34	189.05
12	-84.84	301.35	782.64	57.21	389.61	-212.89	-8.22	---	1,224.86	197.51
13	-91.91	326.46	910.78	64.87	445.79	-217.07	-8.22	---	1,430.71	205.85
14	-98.98	351.57	1,044.75	72.64	503.63	-220.61	-8.22	---	1,644.78	214.07
15	-106.05	376.68	1,184.54	80.52	563.14	-223.63	-8.22	---	1,866.98	222.20
16	-113.12	401.80	1,330.15	88.52	624.30	-226.19	-8.22	---	2,097.24	230.26
17	-120.19	426.91	1,481.59	96.63	687.13	-228.37	-8.22	---	2,335.48	238.24
18	-127.26	452.02	1,638.85	104.85	751.62	-230.22	-8.22	---	2,581.64	246.16
19	-134.33	477.13	1,801.94	113.18	817.78	-231.80	-8.22	---	2,835.68	254.04
20	-141.40	502.24	1,970.85	121.63	885.59	-233.13	-8.22	---	3,097.56	261.88
21	-148.47	527.36	2,145.58	130.18	955.07	-234.27	-8.22	---	3,367.23	269.67
22	-155.54	552.47	2,326.14	138.85	1,026.21	-235.24	-8.22	---	3,644.68	277.44
23	-162.61	577.58	2,512.53	147.64	1,099.01	-236.06	-8.22	---	3,929.86	285.19
24	-169.68	602.69	2,704.73	156.53	1,173.47	-236.76	-8.22	---	4,222.77	292.91
25	-176.75	627.81	2,902.76	165.54	1,249.60	-237.35	-8.22	---	4,523.39	300.61

註\*CO<sub>2</sub> 淨值變化量(ΔC<sub>FM,t</sub>)為 T<sub>t+1</sub>-T<sub>t</sub>

## 2.情境二(基線平均生長量 1 m<sup>3</sup>/ha/year)

情境二為基線平均生長量以 1 m<sup>3</sup>/ha/year 作為依據，估算透過專案活動(改善森林經營計畫)於 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，如圖 38，其結果於第 25 年可增加 4,346.64 ton CO<sub>2</sub> 吸收量，各年變化量如表 27，且於第 8 年可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量。

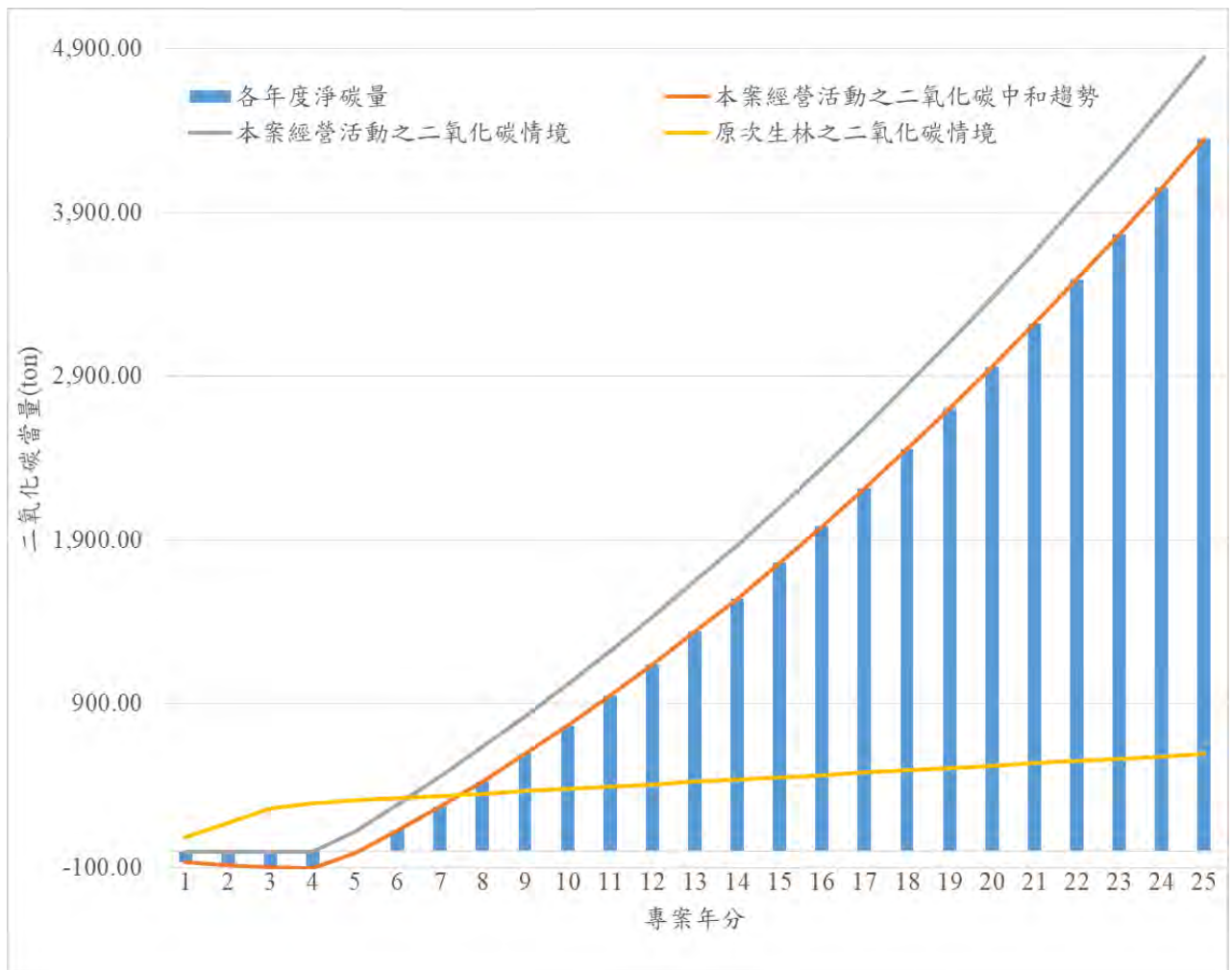


圖 38 專案活動於 25 年間之 CO<sub>2</sub> 變化量(情境二)

表 27 各專案年分 CO<sub>2</sub>淨值總表(情境二)單位：(tCO<sub>2</sub>-e)

專案年分(t)	基線碳量 (C <sub>BSL,tree,t</sub> )	CO <sub>2</sub> 淨移除量(ΔC <sub>P,t</sub> )						洩漏 排放 (LK)	合計 (T)	CO <sub>2</sub> 淨值 變化量 (ΔC <sub>FM,t</sub> )*
		留存木及造林木 CO <sub>2</sub> 量 (C <sub>P,tree,t</sub> )				伐倒木 CO <sub>2</sub> 量 (C <sub>Cut,tree,t</sub> )	實施專案 所產生之 CO <sub>2</sub> 量 (GHG <sub>p,t</sub> )			
		留存 木	臺灣 肖 楠	楓香	相思樹					
1	-14.14	25.11	---	---	---	-74.45	-3.08	---	-66.56	---
2	-28.28	50.22	---	---	---	-99.39	-4.79	---	-82.24	-15.68
3	-42.42	75.34	---	---	---	-120.59	-5.94	---	-93.61	-11.37
4	-56.56	100.45	---	---	---	-138.61	-7.08	---	-101.80	-8.19
5	-70.70	125.56	48.73	6.76	42.88	-153.92	-7.65	---	-8.34	93.45
6	-84.84	150.67	136.10	13.63	87.43	-166.94	-8.22	---	127.83	136.17
7	-98.98	175.79	229.30	20.61	133.64	-178.01	-8.22	---	274.12	146.29
8	-113.12	200.90	328.32	27.71	181.51	-187.41	-8.22	---	429.67	155.55
9	-127.26	226.01	433.16	34.91	231.04	-195.41	-8.22	---	594.24	164.56
10	-141.40	251.12	543.83	42.23	282.23	-202.20	-8.22	---	767.60	173.36
11	-155.54	276.23	660.32	49.67	335.09	-207.98	-8.22	---	949.57	181.98
12	-169.68	301.35	782.64	57.21	389.61	-212.89	-8.22	---	1,140.02	190.44
13	-183.82	326.46	910.78	64.87	445.79	-217.07	-8.22	---	1,338.80	198.78
14	-197.96	351.57	1,044.75	72.64	503.63	-220.61	-8.22	---	1,545.80	207.00
15	-212.10	376.68	1,184.54	80.52	563.14	-223.63	-8.22	---	1,760.93	215.13
16	-226.24	401.80	1,330.15	88.52	624.30	-226.19	-8.22	---	1,984.12	223.19
17	-240.38	426.91	1,481.59	96.63	687.13	-228.37	-8.22	---	2,215.29	231.17
18	-254.52	452.02	1,638.85	104.85	751.62	-230.22	-8.22	---	2,454.38	239.09
19	-268.66	477.13	1,801.94	113.18	817.78	-231.80	-8.22	---	2,701.35	246.97
20	-282.80	502.24	1,970.85	121.63	885.59	-233.13	-8.22	---	2,956.16	254.81
21	-296.94	527.36	2,145.58	130.18	955.07	-234.27	-8.22	---	3,218.76	262.61
22	-311.08	552.47	2,326.14	138.85	1,026.21	-235.24	-8.22	---	3,489.14	270.37
23	-325.21	577.58	2,512.53	147.64	1,099.01	-236.06	-8.22	---	3,767.26	278.12
24	-339.35	602.69	2,704.73	156.53	1,173.47	-236.76	-8.22	---	4,053.10	285.84
25	-353.49	627.81	2,902.76	165.54	1,249.60	-237.35	-8.22	---	4,346.64	293.54

註\*CO<sub>2</sub>淨值變化量(ΔC<sub>FM,t</sub>)為 T<sub>t+1</sub>-T<sub>t</sub>

### 3.情境三(基線平均生長量 2 m<sup>3</sup>/ha/year)

情境三為基線平均生長量以 2 m<sup>3</sup>/ha/year 作為依據，估算透過專案活動(改善森林經營計畫)於 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，如圖 39，其結果於第 25 年可增加 3,993.15 ton CO<sub>2</sub> 吸收量，各年變化量如表 28，且於第 9 年可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量。

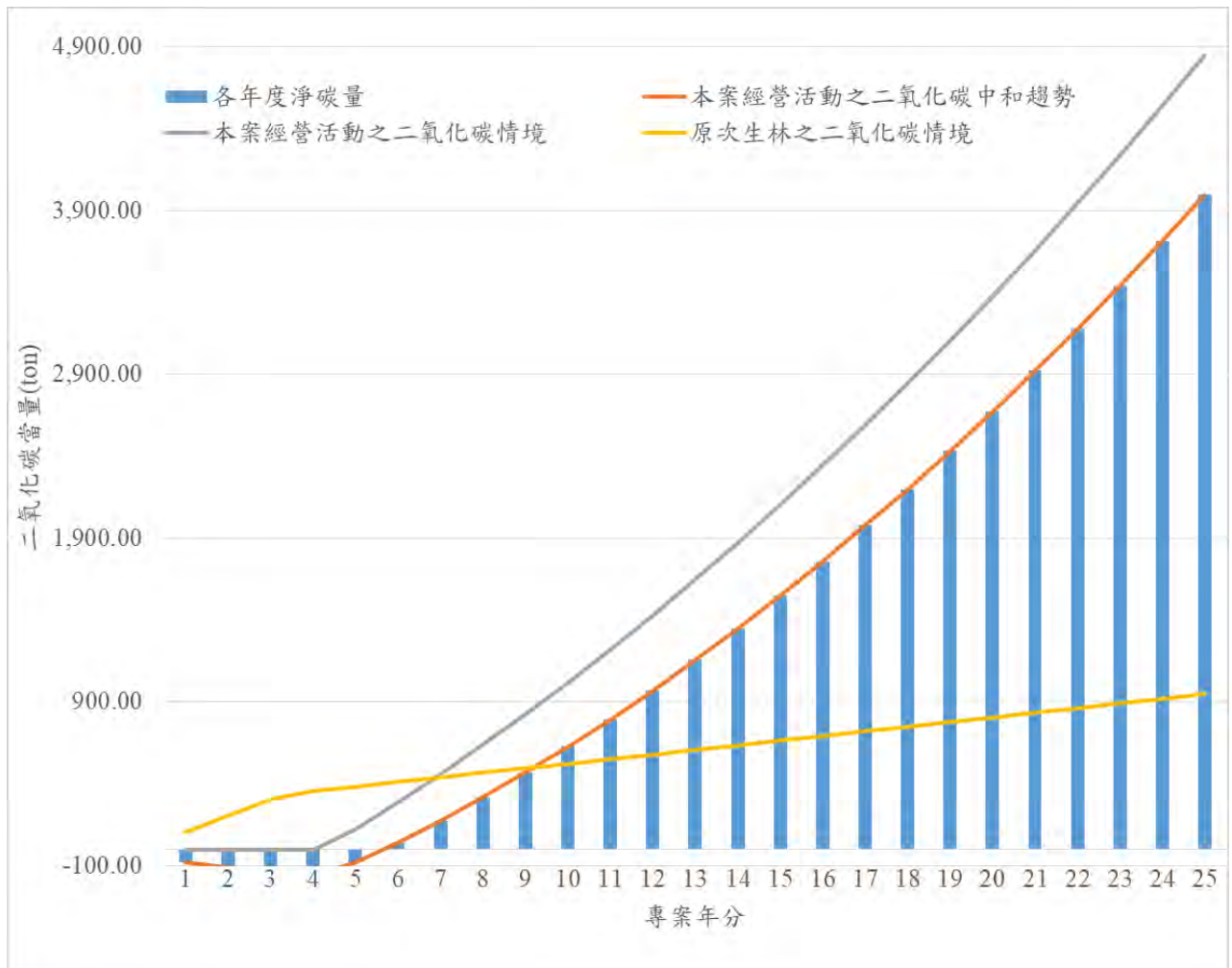


圖 39 專案活動於 25 年間之 CO<sub>2</sub> 變化量(情境三)

表 28 各專案年分 CO<sub>2</sub> 淨值總表(情境三)

單位：ton

專案年分(t)	基線碳量 ( $C_{BSL,tree,t}$ )	CO <sub>2</sub> 淨移除量( $\Delta C_{p,t}$ )						洩漏 排放 (LK)	合計 (T)	CO <sub>2</sub> 淨值 變化量 ( $\Delta C_{FM,t}$ )*
		留存木及造林木 CO <sub>2</sub> 量 ( $C_{p,tree,t}$ )				伐倒木 CO <sub>2</sub> 量 ( $C_{Cut,tree,t}$ )	實施專案 所產生之 CO <sub>2</sub> 量 ( $GHG_{p,t}$ )			
		留存 木	臺灣肖 楠	楓香	相思樹					
1	-28.28	25.11	---	---	---	-74.45	-3.08	---	-80.70	-80.70
2	-56.56	50.22	---	---	---	-99.39	-4.79	---	-110.52	-29.82
3	-84.84	75.34	---	---	---	-120.59	-5.94	---	-136.03	-25.51
4	-113.12	100.45	---	---	---	-138.61	-7.08	---	-158.36	-22.33
5	-141.40	125.56	48.73	6.76	42.88	-153.92	-7.65	---	-79.04	79.31
6	-169.68	150.67	136.10	13.63	87.43	-166.94	-8.22	---	42.99	122.03
7	-197.96	175.79	229.30	20.61	133.64	-178.01	-8.22	---	175.14	132.15
8	-226.24	200.90	328.32	27.71	181.51	-187.41	-8.22	---	316.56	141.41
9	-254.52	226.01	433.16	34.91	231.04	-195.41	-8.22	---	466.98	150.42
10	-282.80	251.12	543.83	42.23	282.23	-202.20	-8.22	---	626.20	159.22
11	-311.08	276.23	660.32	49.67	335.09	-207.98	-8.22	---	794.04	167.84
12	-339.35	301.35	782.64	57.21	389.61	-212.89	-8.22	---	970.34	176.30
13	-367.63	326.46	910.78	64.87	445.79	-217.07	-8.22	---	1,154.98	184.64
14	-395.91	351.57	1,044.75	72.64	503.63	-220.61	-8.22	---	1,347.84	192.86
15	-424.19	376.68	1,184.54	80.52	563.14	-223.63	-8.22	---	1,548.84	200.99
16	-452.47	401.80	1,330.15	88.52	624.30	-226.19	-8.22	---	1,757.88	209.05
17	-480.75	426.91	1,481.59	96.63	687.13	-228.37	-8.22	---	1,974.91	217.03
18	-509.03	452.02	1,638.85	104.85	751.62	-230.22	-8.22	---	2,199.87	224.95
19	-537.31	477.13	1,801.94	113.18	817.78	-231.80	-8.22	---	2,432.70	232.83
20	-565.59	502.24	1,970.85	121.63	885.59	-233.13	-8.22	---	2,673.36	240.67
21	-593.87	527.36	2,145.58	130.18	955.07	-234.27	-8.22	---	2,921.83	248.47
22	-622.15	552.47	2,326.14	138.85	1,026.21	-235.24	-8.22	---	3,178.06	256.23
23	-650.43	577.58	2,512.53	147.64	1,099.01	-236.06	-8.22	---	3,442.04	263.98
24	-678.71	602.69	2,704.73	156.53	1,173.47	-236.76	-8.22	---	3,713.74	271.70
25	-706.99	627.81	2,902.76	165.54	1,249.60	-237.35	-8.22	---	3,993.15	279.40

註\*CO<sub>2</sub> 淨值變化量( $\Delta C_{FM,t}$ )為  $T_{t+1}-T_t$

#### 4.情境四(基線平均生長量 2.5 m<sup>3</sup>/ha/year)

情境四為基線平均生長量以 2.5 m<sup>3</sup>/ha/year 作為依據，估算透過專案活動(改善森林經營計畫)於 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，如圖 40，其結果於第 25 年可增加 3,816.40 ton CO<sub>2</sub> 吸收量，各年變化量如表 29，且於第 9 年可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量。

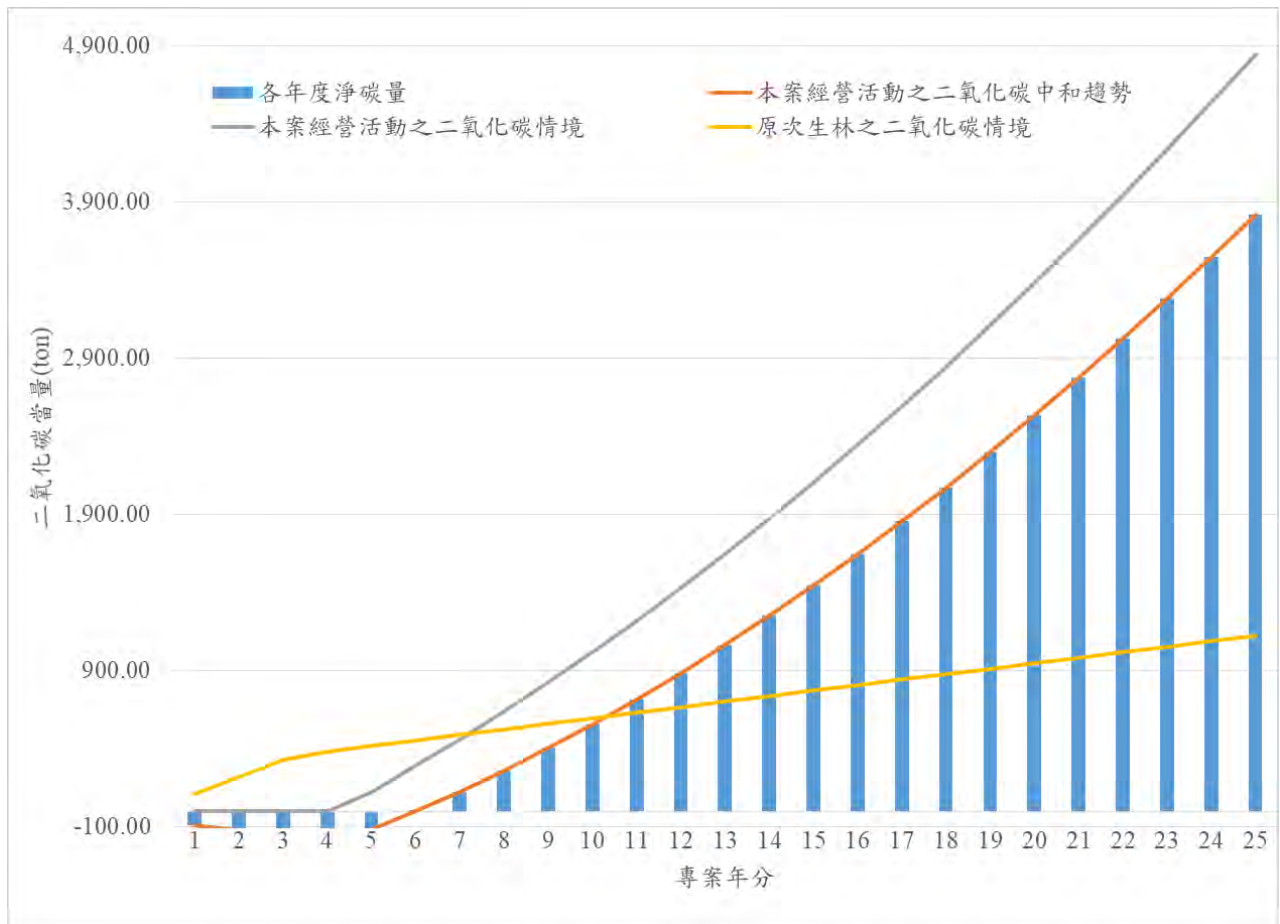


圖 40 專案活動於 25 年間之 CO<sub>2</sub> 變化量(情境四)

表 29 各專案年分 CO<sub>2</sub> 淨值總表(情境四)

單位：ton

專案年分(t)	基線碳量 (C <sub>BSL,tree,t</sub> )	CO <sub>2</sub> 淨移除量(ΔC <sub>P,t</sub> )						洩漏 排放 (LK)	合計 (T)	CO <sub>2</sub> 淨值 變化量 (ΔC <sub>FM,t</sub> )*
		留存木及造林木 CO <sub>2</sub> 量 (C <sub>P,tree,t</sub> )				伐倒木 CO <sub>2</sub> 量 (C <sub>Cut,tree,t</sub> )	實施專案 所產生之 CO <sub>2</sub> 量 (GHG <sub>p,t</sub> )			
		留存 木	臺灣肖 楠	楓香	相思樹					
1	-35.35	25.11	---	---	---	-74.45	-3.08	---	-87.77	-87.77
2	-70.70	50.22	---	---	---	-99.39	-4.79	---	-124.66	-36.89
3	-106.05	75.34	---	---	---	-120.59	-5.94	---	-157.24	-32.58
4	-141.40	100.45	---	---	---	-138.61	-7.08	---	-186.63	-29.40
5	-176.75	125.56	48.73	6.76	42.88	-153.92	-7.65	---	-114.39	72.24
6	-212.10	150.67	136.10	13.63	87.43	-166.94	-8.22	---	0.57	114.96
7	-247.45	175.79	229.30	20.61	133.64	-178.01	-8.22	---	125.65	125.08
8	-282.80	200.90	328.32	27.71	181.51	-187.41	-8.22	---	260.00	134.34
9	-318.15	226.01	433.16	34.91	231.04	-195.41	-8.22	---	403.35	143.35
10	-353.49	251.12	543.83	42.23	282.23	-202.20	-8.22	---	555.50	152.15
11	-388.84	276.23	660.32	49.67	335.09	-207.98	-8.22	---	716.27	160.77
12	-424.19	301.35	782.64	57.21	389.61	-212.89	-8.22	---	885.50	169.23
13	-459.54	326.46	910.78	64.87	445.79	-217.07	-8.22	---	1,063.07	177.57
14	-494.89	351.57	1,044.75	72.64	503.63	-220.61	-8.22	---	1,248.86	185.79
15	-530.24	376.68	1,184.54	80.52	563.14	-223.63	-8.22	---	1,442.79	193.92
16	-565.59	401.80	1,330.15	88.52	624.30	-226.19	-8.22	---	1,644.77	201.98
17	-600.94	426.91	1,481.59	96.63	687.13	-228.37	-8.22	---	1,854.72	209.96
18	-636.29	452.02	1,638.85	104.85	751.62	-230.22	-8.22	---	2,072.61	217.88
19	-671.64	477.13	1,801.94	113.18	817.78	-231.80	-8.22	---	2,298.37	225.76
20	-706.99	502.24	1,970.85	121.63	885.59	-233.13	-8.22	---	2,531.97	233.60
21	-742.34	527.36	2,145.58	130.18	955.07	-234.27	-8.22	---	2,773.36	241.40
22	-777.69	552.47	2,326.14	138.85	1,026.21	-235.24	-8.22	---	3,022.53	249.16
23	-813.04	577.58	2,512.53	147.64	1,099.01	-236.06	-8.22	---	3,279.43	256.91
24	-848.39	602.69	2,704.73	156.53	1,173.47	-236.76	-8.22	---	3,544.06	264.63
25	-883.74	627.81	2,902.76	165.54	1,249.60	-237.35	-8.22	---	3,816.40	272.33

註\*CO<sub>2</sub> 淨值變化量(ΔC<sub>FM,t</sub>)為 T<sub>t+1</sub>-T<sub>t</sub>

根據上述四種情境可知，其基線平均生長量由 0.5 -2.5m<sup>3</sup>/ha/year，其 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，於第 25 年四種情境均可增加 3,800 ton 以上之 CO<sub>2</sub> 吸收量，而為抵減北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 排放量，四種情境均於 9 年內可完成抵減。

綜觀國際間對於碳中和之分析過程，均容許其有不確定性 (Uncertainty) 或稱不確定度，不確定性是風險估計過程中之可信賴度 (Credibility)，其為對於未來環境之改變或推估所採用之參數，因有不可掌握及量測技術的限制等因素，會造成推估結果的不確定性。童慶彬、李明旭(2013)指出因應氣候變遷所產生之不確定性，必須有相關對策，如資料不正確性、模式不正確性、未來不確定性與環境不確定性等，而針對不確定性必須產生對應之風險管理行動 (Risk Management Actions) 如表 30。

表 30 不確定性與風險管理所採取行動之操作模式(童慶彬、李明旭，2013)

	衝擊程度 (Impact)	風險管理採取行動(Risk Management Actions)		
不確定性 (Uncertainty)	顯著	可考慮採取管理行動	一定採取管理行動並監測風險	最積極的管理行動
	一般	可能接受與持續監測風險	值得努力推動管理行動	必須努力推動管理行動
	不顯著	接受風險	接受與持續監測風險	管理與監測風險
		低	中	高
		可能性		

---

依上述概念對於本計畫中相關資料、模式及未來與環境不確定性進行分析，在資料面本計畫採取國內同地區或同樹種資料為主，若無則以國外相關資料或參數進行選用，在碳中和計算之方法學上，因國內目前尚未發展公布有關 IFM 的操作方法，故依照 VCS 架構與 MRV 精神，建立本專案活動之碳匯推估架構，而針對未來與環境之不確定性，以不同情境所產生之結果進行呈現，後續可藉由監測計畫，以監測風險的管理方式，降低不確定性的產生。

根據 U.S. EPA(1992)指出不確定性之產生可能有情境、參數或模式而來，如不正確或不充足之資訊、不精確或偏頗度量、以及選取不正確模式等。對於本案而言，主要不確定性在於評估方法及所採用的參數，如材積式與生長量參數在地區上會有差異，主要影響因素為環境所帶來的生長差異，但無論差異變化如何，均會位於該樹種之生長區間內，如生育環境的調適或適度的撫育措施，即可提升林木生長量，若環境嚴苛產生逆境，對林木而言會產生生長停滯或緩慢生長等現象，在這樣的背景之下，則需藉由監測資料來修正參生長模式，以降低推估結果的不確定性。伐倒木腐爛的部分，根據伐倒木置放於林間 CO<sub>2</sub> 會自然釋放，其速率亦與未來環境有關，且會因不同樹種、氣候條件具有腐爛速率之不確定性，故亦建議未來有需要進行在地的調查研究與監測來降低其不確定性。

惟本計畫之不確定性因子，未來可透過監測計畫進行調查，包括次生林的生長監測，其生長資料可供為基線修正之參考；造林木和留存木監測計畫，可調整或修正目前參數；動物監測計畫則可了解以碳中和為目標之森林生態價值；以及水土保持監測計畫，可供為了解植林減碳所造成水土保持衝擊及其恢復情形，如此進行模式逐步修正及滾動式的調整所採用之參數，即可符合 MRV 之架構與精神，進而達到與實際狀況相同之情境。

## 5. 監測計畫

本案監測計畫以碳庫之 CO<sub>2</sub> 儲存變化量、排放量及生態環境狀況，為監測計畫之兩大主軸。碳庫之 CO<sub>2</sub> 儲存變化量及排放量的修正，主要以次生林監測計畫及造林木和留存木監測計畫來達成，而生態環境狀況的變化，主要以動植物監測計畫及水土保持監測計畫來達成。

### (1) 次生林生長監測計畫

次生林監測計畫為監測實際保留區之次生林 CO<sub>2</sub> 儲存變化量，藉由每期監測調查資料，分析修正基線之碳儲存量，以建立該地區更具參考之基線 CO<sub>2</sub> 儲存變化量推測之參數。

樣區設置數量及大小:於 52.70 ha 計畫區中 42.70 ha 之規劃保留內，逢機設置 5 個 0.05 ha 永久監測樣區。

樣區監測頻度:專案活動之前 10 年，每年監測一次，10 年後以每 2 年監測調查一次，至達成本案碳中和之目標後，以每 5 年監測調查一次。

樣區調查項目:於樣區內進行每木之胸高直徑、樹高及樹種的調查，並記錄樣區內之地被植物樣態(包括覆蓋度及植物種類)，以利於未來進行查驗及詳細記錄相關變化量。

### (2) 造林木與留存木之生長監測計畫

造林木與留存木監測計畫，需包含專案活動實施後造林木及留存木之 CO<sub>2</sub> 吸存變化量監測，利用每一期的樣區監測調查資料，分析造林木及留存木之年平均生長量，以供地區性林木生長模式之修正，並可查驗及記錄 CO<sub>2</sub> 吸存的變化量。

---

樣區設置數量及大小:於 10.11 ha 之造林區內，設置 5 個 0.05 ha 的永久監測樣區，包括 1 個楓香樣區、2 個相思樹樣區及 3 個臺灣肖楠樣區。

樣區監測頻度:前 10 年每年監測調查一次，10 年後以每 2 年監測調查一次，至達成本案碳中和之目標後，再以每 5 年監測調查一次。

樣區調查項目:於監測樣區內進行每株造林木及留存木之胸高直徑、樹高及樹種等項目之調查。

### (3)動物監測計畫

目前國內並無針對動物環境監測訂定相關法規，僅符合《開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準》第十六條中所列之情形者，依法須實施環境影響評估，行政院環境保護署亦公告《動物生態評估技術規範》，故計畫團隊建議未來依照《動物生態評估技術規範》於規劃保留區與造林區域，進行動物調查並進行比較，動物監測種類及調查方法可參考表 31。而本區域於上述規範中屬於第二級區域，因此最低調查頻度，建議 1 年約 2 季~4 季，調查時間則依照物種之生活習性不同而進行調整。調查後可藉由「行政院農業委員會特有生物研究保育中心臺灣野生動物資料庫查詢系統」及「行政院農業委員會公告之保育類野生動物名錄」，進行物種與保育等級確定。

### (4)水土保持監測計畫

為確保案址水土保持及坡地安全，已於施業後每個月，由水土保持服務團專業技師定期現勘一次，刈草撫育期間建議定期勘查監測，林地植生覆蓋達 60%以上後即可停止監測。

監測計畫之實施，建議委託具備林業專長，如符合國家法定資格之具有林業技術專業執業之林業技師、水土保持技師或相關背景之森

林、動植物相關科系之學者專家，進行更詳細監測計畫之設計、調查與分析。

表 31 不同種類動物監測方法建議說明

監測類群	調查方法	調查方法說明
鳥類	沿線調查法	於監測樣區範圍內設置等長的監測樣線，以8-10倍的雙筒望遠鏡觀察沿線鳥類，輔以鳴叫聲音辨別，記錄實際保留區與實際造林區之棲地類型中看到和聽到的鳥類種類。
哺乳類	紅外線 自動照相機	<p>永久監測樣區100 m範圍內架設紅外線自動照相機，進行連續性拍攝，每季至少有30天以上之紀錄，並每月進行巡視確保照相機作業無誤。</p> <p>透過所收集之野生動物出現種類及出現次數資料，並透過標準化活動指標亦稱出現頻度指數(Occurrence Index, OI)，可作為族群豐富度指標，其計算公式如下：</p> $OI = \frac{\text{一物種在該樣點的有效影片或照片總數量}}{\text{該樣點的相機總工作時數}} \times 1000$ <p>hrs</p> <p>相機工作時數為相機開機後至最後1張照片拍攝時間的間隔時間，以小時為計算單位，總工作時數則是各次工作時數的加總。有效照片為1 hr內同一隻個體的連拍，只視為1張有效照片紀錄；不同個體，即使同1 hr內連拍，也當作不同的有效紀錄，若1張內有2隻以上個體，每隻都視為1筆有效紀錄。</p>
爬蟲類	沿線調查法	利用目視遇測法(Visual Encounter Survey)於樣區內進行調查，調查主要針對飛蜥、草蜥和石龍子科或其他關注物種等。調查沿線進行，輔以徒手或使用工具翻動地表或枯枝落

監測類群	調查方法	調查方法說明
		葉進行檢視，並針對關注物種進行族群數量監測。
蜂蝶類	沿線調查法	於監測樣區範圍內設置等長的監測樣線，調查時沿線以目視和利用8-10 倍的雙筒望遠鏡觀察，記錄沿線兩側各5 m範圍內發現的種類，輔以昆蟲網進行捕捉，鑑定種類後立即釋放，並針對關注物種(如：臺灣小灰蛺蝶 <i>Dodona eugenes</i> )進行族群數量監測。

---

## 伍、討論

### 一、森林的生態服務價值

森林具備多目標經營之效益以及森林生態系服務(Forest Ecosystem Services, FES)之功能，所謂森林生態系服務功能，係指森林生態系在整體生態系循環過程中所維持生態環境、氣候調節的功能與效用，森林生態系所提供之功能及服務種類繁多，除了供給人類基本生活物質，如木材、燃料(生產功能)及遊憩服務(休閒遊憩功能)等；更提供環境廢棄物之分解、養分循環的場所(環境功能)；此外還可做為生命存續的基礎，如物種基因庫(生物性功能)、環境氣候調節與水源涵養(調節與水源涵養功能)、提供動植物棲息所(生態功能)及碳吸存(碳中和功能)等(Ninan and Kontoleon, 2016; 陳玉蘭等，2005；吳孟珊，2014；謝敬華、柳婉郁，2018)。

自然環境所提供的生態系服務功能可分兩層面來討論，一是作用於動植物之存續，包含生產投入的供應、生物生命的維持；另一是非因社會經濟使用而實現之價值(Ninan and Inoue, 2013)。首先在生產投入的供應、生物生命的維持等作用於動植物之存續，生產投入的供應係指自然界在病蟲害控制、洪澇控制、土壤肥力的養成、水的過濾等方面的服務，這些服務支持生態系的生產活動；而生物生命的維持方面，乃主要描述生態系提供了動植物食物來源、棲地、風景欣賞或間接作用於食物鏈之串聯上的服務。另外在非使用性的價值上，生態系提供存在的價值與選擇的價值，對物種存在的本身、生物多樣性的組成、環境適宜性的維持等賦予價值(李宣德、馮豐隆，2005；侯元照、吳水榮，2008；Goulder and Kennedy, 1997；Costanza *et al.*, 1997)。

一般普遍認同生態系服務具有之供給服務、調節服務、支持服務與文化服務四大類服務中，亦含有從使用上至存在上的價值，也就是由人為使用、加工，直接或間接投入於社會經濟的供給服務、調節與

---

支持生物生命之延續到文化或未來價值的保存等四大類生態系服務內容(Daily, 1997; MA, 2005)。

王培蓉與鄭欽龍(2005)指出，不同經營模式下，經營管理者認知會有所差異，但符合 Thomas Kuhn 的科學典範理論。即「森林經營是人類與森林資源之間的互動關係，資源條件變化以及社會變遷，都會導致此一關係的改變。人類如何看待森林因時因地而異。人類為何而經營森林以及應如何經營森林，此即森林經營典範，也隨時空環境而變。但在改變的過程，因受不同專業養成教育影響，而使不同學科的專家，對於森林經營典範的認知並非一致。」。雖然不同經營管理者認知有所差異，但亦無法否定森林多目標經營之生態服務價值，如都市林、次生林、人工林及天然林，皆具備生態性、社會性及經濟性等多元價值，當然不可否認不同類型之森林皆具有碳吸存的價值，只是會有不同碳吸存能力，而森林之不同活動的導入將面臨著正面發展的機會，同時亦面臨著負面影響之風險。

本案針對專案區域(改善森林經營管理活動區域)及非專案區域(未經改善森林經營管理活動區域)，以機會與風險，進行分析比較如表 32。

表 32 專案區域及非專案區域所面臨的機會與風險

	機會	風險
非專案區域	樹種豐富	高度破碎化
	具有可用的生態知識	很少有良好的管理經驗
	具有良好的林木更新條件	某些因素(如火災、病蟲害)的風險出現的可能性
	可作為生態教學之區域	較高林地使用的壓力
	存在營運的組織(林業合作社)	較低的生長率
		對私營部門、社區和政府機構為一高度變革的經營策略
專案區域	具良好管理經營模式	較低樹種的多樣性
	林木生長率佳	需較多人力及金錢經營的投入
	具有景觀及遊憩之功能	
	可作為教學之區域	
	具較佳碳吸存能力	

## (二)以造林來達成碳中和之效應

碳中和意指將人類活動的碳排放量，以吸收並儲存大氣中碳素的方式加以平衡；儲存碳的森林碳庫包括地上生物量、地下生物量、枯落物、枯死木和土壤有機質等(IPCC, 2006)。而碳中和指的是一定期間內，碳排放量與減少的碳排量或淨碳儲存量之間互相抵消，達到淨零碳排放量的效果，其達成方式主要包括碳減量及碳抵換。

由於森林碳吸存效益的高低，取決於森林的年生長量，不同的森林結構(天然林、次生林、人工林)、不同的生態區位(氣候、地形、土壤)及不同的經營方式(經營與未經營)，皆會影響森林的碳吸存功能，但唯一不變的趨勢是各種類型的森林，隨著林齡的增加，其森林的碳匯功能，會有下降之趨勢，(Nabuurs and Schelhaas, 2002)曾針對歐洲 16 種森林類型，進行碳匯功能的研究，發現雖然各森林類型間之碳匯功能變異大，但達到碳封存率最高峰值，平均大約為 38 年，且可延續 15 年，平均碳匯值每年約為 2.98 Mg C /ha(森林類型介於 4.1 至 1.15 Mg C/ha 之間)，但林齡達到 200 年時，碳淨封存率達到飽和，平均碳匯值每年約為 0.8 Mg C /ha(森林類型從 1.4 到 0.13 Mg C/ha)。以未受干擾的天然林而言，老齡的天然林雖具有大量的碳儲存量，但森林群落中的其他植物、動物和微生物呼吸量大，枯枝落葉大量分解而消耗有機質，會釋排放 CO<sub>2</sub>，因此演替後期之天然林，其 CO<sub>2</sub> 吸存能力將會降低(Cook-Patton *et al.*, 2020)。

次生林是指在一個時間點或一段時間內，原始森林植被受到顯著(甚至全部)人為或自然干擾後，經過自然過程而形成的再生森林。依據世界糧農組織的統計，次生林是地球上的主要森林類型，長期而言，次生林與類似地點附近的原始森林，其森林結構或冠層物種組成，具有重大的差異性(Chokkalingam and de Jong, 2001)，次生林的演替時間長短是森林結構與物種變化的重要關鍵。正如 Chazdon (2016) 所說：次生林與恢復森林是森林保護與發展、社會科學與自然科學之間的紐

帶，次生林是波昂挑戰(Bonn Challenge)等倡議的絕佳機會，因為次生林的經營，將代表著森林的恢復行動，甚至是生產性林業的振興。在適當森林管理的下，將退化中的次生林地區加以轉變，是恢復土地生產力和恢復森林的替代方案。良好的次生林經營管理亦為碳儲存的重要貢獻者，因此也是 REDD+ 的重要貢獻者(Chazdon and Brancalion, 2019)。而透過提高人工林的經營效率，增加林地的生產力，在增加生長量之餘，也相對提高碳儲存量；在做法上，可藉延長輪伐期，以增加森林林地碳量的蓄積；在適地適木的原則下選擇適當樹種種植，改善林木育種技術、林下栽植等，以達成最適生產力和林地碳密度的增加。林俊成等(1999)估算柳杉人工林，依生物量變化做計量上分析，估算結果每公頃可儲存 CO<sub>2</sub> 量為 591.21 ton。Pedro *et al.* (1994)分析馬來西亞 Sabah 地區大規模種植龍腦香科林木對碳的吸存效果，初步估計輪伐期如為 60 年，每公頃可吸存 195 ton 的碳。

Nunes *et al.* (2020) 透過 136 篇文獻，進行森林對減緩氣候變遷之貢獻，並討論森林碳捕獲與碳儲存之相關模式，其中森林經營之模式包括，森林碳保存(Forest carbon conservation)、森林碳吸存(Forest Carbon sequestration)及森林碳替代(Forest carbon substitution)，其中有關森林碳保存模式包括控制伐採、森林保護、以及控制火災與病蟲害；森林碳保存模式透過經營手段延長輪伐期、減低林木危害，可將大氣中的 CO<sub>2</sub> 吸存於木材及土壤中，即可由森林碳保存模式轉變為森林碳吸存模式，導向森林更新、森林撫育、跡地造林以及增加木材生產等；最後則是森林碳替代模式，其為整合森林碳吸存模式與碳保護模式，透過擴大木材和燃料產品之利用，以林業管理程序，促進森林生長以及建造綠色能源等，延伸石化燃料替換為生物質衍生燃料，以短輪伐期作業增加綠色能源產品，最後則可增加由非林地轉為林地之面積。

而不同的森林減碳策略具有不同的碳匯能力，以上述三者而言，最高為碳替代模式，碳吸存模式次之，而碳保存模式最低。而不同的

樹種、林相具有不同的碳捕獲與儲存能力，且不同樹種之林相，亦會提供不同林產品。在裸露地或農地及林相遭破壞之土地，以造林或進行森林更新演替，或兩者兼用，以擴大造林面積，經由都市林和社區林的營造，也可擴大造林面積以增加吸存大氣 CO<sub>2</sub>，均具有良好之價值。森林中的植物藉行使光合作用，將大氣中的 CO<sub>2</sub> 加以吸收，轉化為有機碳的形式儲存於植物體內，而成為生物量的一部分；其林下的枯枝落葉層及森林土壤也有儲存碳的能力；大規模毀林之原始林(天然林)破壞是造成森林 CO<sub>2</sub> 釋放的重大原因，故於合適位置(如原土地非原始林或林相生長較差之林地)進行計畫性的伐採利用與更新，才能達成碳保護的永續性。林木屆伐期而伐採，便將林木狀態所儲存的碳加以收穫，林木收穫後，將原先所儲存的碳，以林產品的形式固定。

Houghton (1996)認為提高林木收穫過程之生產效率、延長林產品使用壽命等，皆會降低碳的釋放速率。因此在伐採集運時，提高林木收穫和過程的效率，改良收穫技術，可避免碳的損失。林產品不僅可固定碳，同時在製程上所排放的 CO<sub>2</sub> 與能源消耗，與其他材料而言相對為少。如用木材原料替代其他原料，不僅在能源消耗上節省，木質材料的利用可延遲碳釋放於大氣中，因此使用林產品以替代鋼鐵、鋁、混凝土和其他材料，可減少能源的消耗和減少化石能源的消費。

人工林的營造對於碳固定有積極之效應，以臺灣平地景觀造林來說，平地造林具國土保安、資源保育等功能，而造林木可從空氣中吸收 CO<sub>2</sub>，達到降低溫室效應，此法為最環保、最低成本與最有效的降低大氣 CO<sub>2</sub> 濃度之方法(邱志明等，2010；黃裕星，2010)，而近年來有相當多針對不同平地景觀造林樹種估算碳儲存量之報告，以台糖公司於屏東縣平地造林碳儲存量調查之研究，幼齡林以光蠟樹(*Fraxinus griffithii*)(10.63±2.96 Mg C/ha)、欖仁(*Terminalia catappa*)(8.76±2.79 Mg C/ha)、苦楝(*Melia azedarach* L.)(8.55±2.2 Mg C/ha)等三種樹種碳儲存能力較佳(廖宜緯等，2011)；以 Yadanar *et al.* (2021)於緬甸進行人工林

營造為例，其研究結果發現人工林之營造可有效降低 82%其他能源使用之碳排放；另針對不同輪伐期森林之營造，在樹種選擇上有速生及慢生樹種，除對於碳固定外，亦有其生態之效益。

Forster *et al.* (2021)研究人工林與次生林下種之林相，相較之下，人工林具備顯著減少溫室氣體排放之功能(圖 41)，主要因人工林乃基於對林木生長收穫的預期，故與次生林相比，人工林可提供更多、更長期的溫室氣體減排。該報告利用碳足跡生命週期評估(Life cycle assessment)，探討每公頃人工造林於百年內所能達成吸存二氧化碳量，相較於半天然次生林林分而言，自 2020 年起算至 2120 年止，包含收穫林木產品(Harvest wood product)等，100 年間次生林碳吸收量為 0.41-0.82 Gg CO<sub>2</sub>-e/ha 區間，而人工林碳吸存量為 1.36-2.96 Gg CO<sub>2</sub>-e/ha 區間，因此人工林之碳吸存能力相較次生林而言，能有更佳良好的效果，將生質能源與其他木材利用之效益帶入，讓碳吸存能力能達到事半功倍的提升(Forster *et al.*, 2021)。以人工林作為減少溫室氣體排放之手段，屬於強而有力之策略，並明顯於氣候變遷政策中發揮效果，包括根據《巴黎協定》(Paris Agreement)和即將公告的歐盟森林戰略政策。

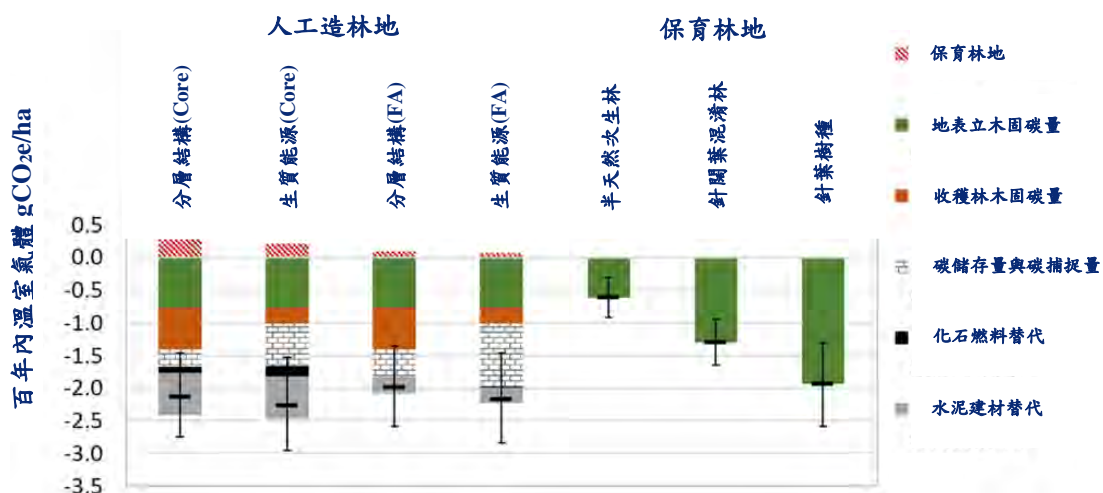


圖 41 人工造林地(種植於 2020 年)與保育性森林每公頃累積 CO<sub>2</sub> 當量吸存比較(轉譯自 Forster *et al.*, 2021)。註：Further Ambition 簡稱 FA，

Core and Further Ambition 為不同碳足跡生命週期評估之路徑方法差異。分層結構(Hierarchical)與生質能源(Bioenergy)為評估方法內之項目細節。

Berndes *et al.* (2016)指出，有效的森林經營透過全林分的森林經營規劃，可提供多樣且連續的生物碳流動。如圖 42 顯示碳平衡可能從封存轉變為突然發生森林火災或計畫內的收穫林分時的碳排放(紅色箭頭)，但碳排放活動可被其他林分的碳固定抵銷(綠色箭頭，以不同大小說明碳固定的變化率)，因此在整個地景中，森林碳儲存量圍繞趨勢線波動，該趨勢線可以增加、減少或大致穩定。地景層級的碳平衡受多種因素影響，但綜合起來，這些積極森林經營活動對森林碳的發展均產生平衡的影響。

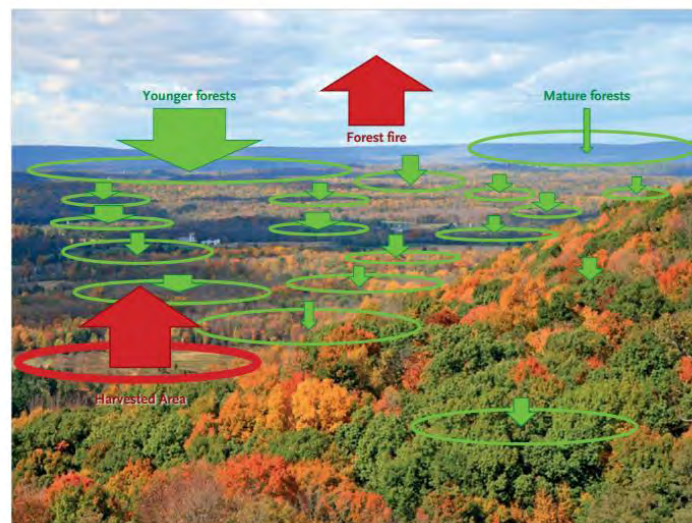


圖 42 森林碳排放與碳固定抵銷

---

次生林雖有碳固定抵銷效益但能力有限，若以具規劃性造林來達成碳中和之效應，一方面可透過人工林的經營提高林地的生產力，並在增加生長量之餘，也相對提高碳吸存量，即達到碳中和之目標。故做法上，可藉延長輪伐期，如本計畫栽植短中長輪伐期之樹種，以增加森林碳量的蓄積，並在適地適木的原則下選擇適當樹種種植、林下栽植等，以達成最適生產力和林地碳密度的增加。

### (三)臺灣現階段碳中和所面臨之問題

自 1972 年聯合國於斯德哥爾摩召開人類環境會議，即為首次全球共同討論環境議題，會議中並通過《人類環境宣言(Declaration on the Human Environment, 或稱「斯德哥爾摩宣言」)》。宣言指出：「所有政府與人民為維護與增進人類環境並為全人類與其子孫的福祉而共同努力」。而於 20 年後的 1992 年，聯合國於巴西里約召開了「聯合國環境與發展大會(United Nations Conference on Environment and Development, UNCED)」，會議中提出許多重要環境相關規範或準則，如「里約環境與發展宣言(Rio Declaration on Environment and Development, RDED)」、「二十一世紀議程(Agenda 21)」及「森林原則(Forest Principles, FP)」等文件，以及「生物多樣性公約(Convention on Biological Diversity, CBD)」和「聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)」。聯合國氣候變化綱要公約主要的重要原則包括共同但有差別的責任(Common but differentiated responsibilities)、充分考慮開發中國家之需要和特殊情況、預防措施、永續發展、國際合作等。

1995 年於德國柏林召開並擬定相關的法律，最後於 1997 年於日本京都召開 UNFCCC COP3，通過了著名的「京都議定書(Kyoto Protocol, KP)」，此為第一個具體推動減少溫室氣體排放的國際公約。京都議定書正式將造林與再造林活動納入其清潔發展機制(Clean Development Mechanism, CDM)計畫中，原始的用意是允許已開發國家透過在開發中國家實施造林與再造林等 CDM 計畫來抵消其部分溫室氣體排放量，但京都議定書規範過於理想，造成多國無法形成共識，故 2009 年於丹麥哥本哈根舉辦的 UNFCCC COP18 僅談出不具法律效力的政治性協議「哥本哈根協議(Copenhagen Accord, CA)」。

為持續解決全球暖化問題，2015 年於巴黎舉行的 COP21 最終達成共識，196 個國家一致通過以「巴黎協定」取代京都議定書。巴黎協

---

定容易獲得各國的共識，或許是因為協定並無嚴格限制各國的溫室氣體排放量，而有「國家自主貢獻(Intended Nationally Defined Contributions, INDCs)」條款，各國得評估自己國內的條件後，承諾自己的減排目標。巴黎協定與京都議定書最大之差異為，不再以強制手法賦予各國減碳的義務，且減碳也不再僅為附件一國家之責任與任務，而是世界各國必須自主提出自願減碳貢獻，來達到目標。

目前評估全球各國對於 CO<sub>2</sub> 減量的方式大概可分為三類，第一對排放超過額度之廠商徵收碳稅；第二由廠商自行造林或提供資金於國外進行造林；第三則是透過碳排放權的交易來讓廠商可以自由分配其排放量。國外也有許多國家，如美國、俄羅斯、澳洲、巴西、馬來西亞、哥斯大黎加、百里斯、玻利維亞、墨西哥與巴拉圭等，均有建立森林資源碳交易制度(Moura-Costa and Stuart, 1998；Totten, 1999)。

本計畫藝術家的初衷在於期望臺灣大型藝文機構以身作則，實踐減碳行動，並以「在地行動」喚起藝術圈及大眾認知，所以工作坊和研討會也是作品計畫的一環。CO<sub>2</sub> 抵銷的研究與第三方驗證，並非藝術家計畫的重點，除因本案碳排放量也僅止於藝術家的估算之外，同時也不希望將環境責任外部化，進而走上國際碳權交易的捷徑，故仍以碳減量「在地行動」為計畫主要內容，而大至國家、企業，小至機構、活動，均可對碳中和有所貢獻。

2020 年 11 月 24 日臺灣六都之中的新北市率先宣示進入「氣候緊急狀態」，簽署《氣候緊急宣言》(Climate Emergency Declaration, CED)，並承諾在 2030 年減少碳排放 30%；這將超越中央訂定的減碳 20% 目標。我國於 2015 年通過《溫室氣體減量與管理法》，即期盼 2050 年溫室氣體排放量必須降為 2005 年排放量的一半，而碳中和之概念也在 2020 年不斷被世界各國提出，包括歐盟、加拿大、南非已承諾到 2050 年實現碳中和；紐西蘭、智利、丹麥、法國、匈牙利和英國等，已進一步將 2050 年目標納入法律；奧地利、冰島、與芬蘭將碳中和目

---

標提前，均為世界各國之努力方式。國內於 2020 年開始啟動溫室氣體減量及管理法的修正草案，擬升級我國氣候變遷應對措施，如行政院將設「氣候會報」，提升氣候政策指揮層級；增訂「碳費」徵收機制與「調適專章」，加強氣候變遷風險評估等。

根據林俊成等(2010)指出，部分企業認為林務局雖認定造林可做減碳標準，但環境保護署是否認可，以及是否能有完整機制，現階段均無明確資訊，而臺灣在推動造林減碳還面臨土地取得不易、政府政策不確定性、認證成本過高等困難，皆降低企業將造林作為減碳策略之意願。若可突破造林地取得不易之問題，企業均有高度意願進行海外造林投資計畫，故應該正視森林作為碳匯之商品化功能。

臺灣現階段並非聯合國成員，故在國際上任何活動均可能受到不公平對待，碳中和三大步驟包括碳足跡盤查、碳減量行動、碳權抵換。目前國內碳權交易並未有成熟市場，故致力於碳減量(減少碳排放及增加碳吸存)應是當前應積極採取的行動，並非主管機關無標準方法學就不得計算，甚至阻礙整體發展。為了達到本案初衷，即透過植樹造林增加碳吸存，且具有一般碳交易計畫碳權額度計算，符合可量測、可報告、可驗證(MRV)之機制，使其達到抵換因展覽產生的碳排放目標，並無所謂基線排放過多，反造成碳排放之問題。

一般而言，林木於生長期間吸存大量的碳，輪伐期屆齡即透過伐採利用，成為木材製品後仍可固定碳，不會分解成 CO<sub>2</sub> 進入大氣層中。林地空間重新造林即可持續不斷吸存碳，除供其他人類活動之碳中和之外，亦可持續降低大氣碳含量(減碳)。但本案雖為複層林營造，原環境屬於次生林，過去為農業使用，廢耕後自然演替為闊葉樹次生林；現階段透過適當營林方式，可使栽植樹種碳吸存能力大於原生的次生林，碳蓄積能力增加之森林等同碳庫量變大，循環時間拉長，故總蓄積亦大於次生林，即使未來不考慮伐除利用，其碳吸存總量亦可大於原生的次生林。

---

本案在施作手法上皆考慮生態層面施作，非如一般人工經濟林的皆伐且種植單一樹種；作業方式包含規劃鑲嵌塊狀複層林營造、留存生物廊道及棲息空間，以及多樹種營造。雖本案新植苗木為經濟樹種，適當撫育亦有收穫可能性；惟本案現行營造方式並非純經濟造林模式。複層林為就現有造林地(包括人工造林或天然更新造林地)，於中、後期撫育階段，分年實施造林木之疏伐或整理伐，除去生長過密及形質不良的樹木，目的為促進留存林木生長；伐採後之空隙地另選擇較耐陰的樹種實施林下栽植，以改良林相及林分結構。如此多層次的森林結構，可增加對病蟲害的抗性，促進森林健康。

本案是全臺灣次生林以林相改良實施植林減碳之首例，將於全區(含保留區)規劃設立永久樣區，監測計畫區 52.70 ha 範圍內的森林動態變化，不僅可獲取相關生長資訊，也能瞭解林地變化情形，滾動式調整經營計畫，作為後續臺北市政府經營管理公有林的參考。

## 柒、結論

人類於生活所需要之活動項目，包括交通、能源使用、農業以及工業生產等過程所釋放之 CO<sub>2</sub> 均是碳排放，若想降低碳排量，除在能源使用或生產過程採取減排技術外，亦可透過碳抵換(碳補償)方式，達到中和碳排放量的作用。故森林碳中和意味著人類活動所產生碳排放，合理的森林經營將具備碳中和的能力。

本案以國際間之碳減量方法(Approved VCS Methodology VM0005 1.2)作為碳吸存推估之參考依據，而計畫範圍之林地經營現況，透過改善森林經營計畫之減量措施架構與MRV精神，評估北美館辦理此展覽活動所產生之碳排放(390 ton CO<sub>2</sub>)，在森林經營期間何時可達到碳中和的目標。由林相改良及碳中和計算分析結果可知，於計畫面積 52.70 ha 中 10.11 ha 作為專案範圍，四種不同基線情境下透過本專案活動(改善森林經營計畫)，得知 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，分別為 4,523.39 ton CO<sub>2</sub> 吸收量、4,346.64 ton CO<sub>2</sub> 吸收量、3,993.15 ton CO<sub>2</sub> 吸收量及 3,816.40 ton CO<sub>2</sub> 吸收量，而分別約於**第 8~9 年可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量及專案活動中所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量**，但現階段部分數據為本專案假設情境，故後續可藉由監測計畫，以滾動方式調整碳中和的情境。

本案初衷係以適度的植林及積極的森林經營管理方式，增加森林的多目標功能，除原有的涵養水源、水土保持及生物多樣性等功能外，未來預期可增加景觀美質、休閒遊憩、碳中和等功能，故選用生長期短之相思樹、中期楓香、生長期較長之臺灣肖楠，兼具碳固定與生態效益之平衡。

森林經營係以多元目標為發展方向，並以實踐永續森林為宗旨。而臺灣肖楠的樹型優美，成林後呈現櫛比鱗次的景觀；楓香為變葉樹種，從春季新生枝桠的嫩綠、夏季的翠綠、秋季轉紅、冬季落葉，呈

---

現四季不同的美感；相思樹為常綠喬木，夏季花期放眼望去一片金黃。未來從大崙頭山鄰近的步道遠望，可增添不同的視覺享受。林木修枝所得的枝條，可利用作為工藝品，或是做為菇類栽種的原料，可透過內雙溪自然教育中心辦理相關的課程活動，提供環境教育活動的素材。

---

## 捌、參考文獻

- 王培蓉、鄭欽龍 (2005) 臺灣森林與保育專家對於森林經營典範認知之差異。中華林學季刊 38(4): 437-447。
- 行政院農業委員會 (2018) 農業部門溫室氣體排放管制行動方案(第一期階段)。
- 行政院農業委員會林業試驗所 (2009) 福山闊葉林長期動態研究(3/3)。
- 行政院環境保護署 (2015) 溫室氣體減量及管理法。
- 行政院環境保護署 (2018) 溫室氣體減量推動方案。
- 行政院環境保護署 (2019) 造林與植林碳匯專案活動。
- 林務局 (2019) 福山動態樣區複查計畫。
- 吳孟珊 (2014) 生態系服務的定義與特性。林業研究專訊 21(5): 54-57。
- 吳俊賢 (1999) 臺灣林業政策之發展與展望，國立東華大學專題演講。
- 李宣德、馮豐隆 (2005) 臺灣森林永續經營之生態指標。森林生態系永續經營研討會。
- 林俊成、王培蓉、李俊志 (2010) 臺灣地區造林減碳之需求面向及參與途徑分析。林業研究季刊 32(2): 49-58。
- 林俊成、吳俊賢、柳婉郁、李俊志 (2012) 民眾對全球暖化知覺、態度與植林減碳意願之研究。臺灣林業科學 27(1): 59-79。
- 林俊成、李國忠、林裕仁 (1999) 柳杉人工林碳儲存效果與適應成本研究。臺大實驗林研究報告 13(1): 51-60。

- 
- 林俊成、柳婉郁 (2010) 考慮機會成本下碳吸存成本效益之經濟分析。應用經濟論叢 (88): 61-102。
- 林裕仁 (2008) 森林減碳能力之推算方法。農政與農情 93： 77-81。
- 邱志明、鍾智昕、林謙佑、唐盛林、林振榮 (2010) 重要平地造林樹種林木生長特性之研究。林業研究專訊 17(6):10-16。
- 邱清安、藍梁文、徐憲生、陳韋志、楊佳蓉 (2021) 專家共同推薦適合臺灣都市林的 157 種原生景觀樹種，林業研究季刊 43(3): 113-146。
- 侯元照、吳水榮 (2008) 生態系統價值評估理論方法的最新進展及對我國流行概念的辨正，世界林業研究 21： 7-16。
- 柳婉郁、徐寬 (2017) 森林碳給付政策之經濟分析。農業與經濟 59: 1-48。
- 柳婉郁、劉哲良 (2016) 企業如何參與植林取得碳權額度。林業研究專訊 23(6): 70-73。
- 國立臺灣大學植物標本館 (1993) 臺灣植物誌第二版(植物電子書)，79 頁。
- 張坤城、邱清安 (2019) 108 年度臺北市大崙頭山林地示範區調查及營造委託專業服務案成果報告。國立嘉義大學。
- 陳玉蘭、曹素珍、武高林 (2005) 生態系服務評估研究。專業科學 22(11): 73-77。
- 童慶彬、李明旭(2013)水資源領域因應氣候變遷不確定性之決策機制研究。經濟部水利署水利規劃試驗所，400 頁。
- 黃裕星 (2010) 台灣綠色造林計畫之展望。林業研究專訊 17(6): 1-4。

- 
- 廖宜緯、陳美光、陳羽康、鍾玉龍、吳守從 (2011) 台糖公司屏東縣平地造林碳貯存量調查。中華林學季刊 44(3): 373-384。
- 臺灣植物誌第二版編輯委員會 (1994) 臺灣植物誌，第二版，第一卷，裸子植物。臺灣植物誌第二版編輯委員會，648 頁。
- 臺灣植物誌第二版編輯委員會 (1996) 臺灣植物誌，第二版，第二卷，雙子葉植物。臺灣植物誌第二版編輯委員會，855 頁。
- 劉宣誠、吳萬益 (1986) 蓮華池地區肖楠造林木之生長與材質之研究。臺灣省林業試驗所研究報告第 463 號。
- 劉慎孝、林子玉 (1968) 台灣中南部相思樹林分收穫表及材積表。中興大學農學院森林學系。47 頁。
- 鄭欽龍 (2009) 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。
- 謝敬華、柳婉郁 (2018) 臺灣國有森林資源水源涵養經濟效益之評估。應用經濟論叢 104: 185-228。
- Berndes G., *et al.* (2016) Forest biomass, carbon neutrality and climate change mitigation. *From Science to Policy* 3.
- Bonner M. T., Schmidt L., S., and L. P. Shoo (2013) A meta-analytical global comparison of aboveground biomass accumulation between tropical secondary forests and monoculture plantations. *Forest Ecology and Management*. 291: 73-86.
- Brienen R. J. W., *et al.* (2015) Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature* 519: 344-348.

- 
- California Environmental Protection Agency (2014) Compliance offset protocol U.S. forest projects.
- Chazdon R., and P. Brancalion (2019). Restoring forests as a means to many ends. *Science* 365, 24–25. doi: 10.1126/science.aax9539.
- Chazdon R. (2014) *The Promise of Tropical Forest Regeneration in an Age of Deforestation*. The University of Chicago Press Books.
- Chokkalingam U., and de Jong, W. (2001) Secondary forest: a working definition and typology. *International Forestry Review* 3(1) Center for International Forestry Research.
- Cook-Patton S. C., Leavitt S. M., and B. W. Griscom (2020) Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth. *Nature* 585: 545-550.
- Costanza R., *et al.* (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Daily G. C. (1997) *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Washington D.C.: Island Press.
- Ecosystem Marketplace (2019) *Financing emissions reductions for the future-state of the voluntary carbon markets report 2019*.
- Elias F., *et al.* (2020) Assessing the growth and climate sensitivity of secondary forests in highly deforested Amazonian landscapes. *Ecology* 101(3): 1-11.

- 
- Fantini A. C., Cristiano S., Alexandre S, and S. Ilyas (2019) Small-scale Management of Secondary Forests in the Brazilian Atlantic Forest. *Floresta e Ambiente* 26(4): e20170690.
- Forster E. J., Healey J. R., Dymond C., and D. Styles (2021) Commercial afforestation can deliver effective climate change mitigation under multiple decarbonisation pathways. *Nature Communications* 12, Article number: 3831 <https://www.nature.com/articles/s41467-021-24084-x>
- Goulder L. H., and D. Kennedy (1997) Valuing Ecosystems Services: Philosophical Bases and Empirical Methods. In Daily, G. C (ed) *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington D. C.
- Houghton R. A. (1996) Converting terrestrial ecosystems from source to sinks of carbon. *Ambio* 25(4): 267-72.
- IPCC (2006) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC/IGES. Hayama. Japan.
- Lal R. (2008) Sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> in global carbon pools. *Energy & Environmental Science* 1(1): 86-100.
- Martin A. R., Domke G. M., Doraisami M., and S. C. Thonmas (2021) Carbon fractions in the world's dead wood. *Nature Communications* 12(899): 1-9.
- Millennium Ecosystem Assessment, MA (2005) Guide to the Millennium Assessment Reports. <https://www.millenniumassessment.org/en/index.html>

- 
- Moura-Costa P., and M. D. Stuart (1998) Forestry based greenhouse gas mitigation: a story of market evolution. *Commonwealth Forest Revolution*77(3):191-201.
- Nabuurs G. J.,and M. J. Schelhaas (2002) Carbon profiles of typical forest types across Europe assessed with CO2FIX. *Ecological Indicators* 1 :213–223.
- Ninan K. N., and A. Kontoleon (2016) Valuing forest ecosystem services and disservices - Case study of a protected area in India. *Ecosystem Services* 20:1-14.
- Ninan K. N., and M. Inoue (2013) Valuing forest ecosystem services: What we know and what we don't. *Ecological Economics* 93:137-149.
- Nunes L. J. R., Meireles C. I. R., Gomes C. J. P., and N. M. C. A. Ribeiro (2020) Forest contribution to climate change mitigation: management oriented to carbon capture and storage. *Climate* 8(2):21. DOI:10.3390/cli8020021
- Organization for Economic Cooperation and Development, OECD (2009) *The Economics of Climate Change Mitigation: Policies and Options for Global Actions Beyond 2010*, ISBN 978-92-64-05606-0, OECD, Paris.
- Pacala S., and R. Socolow (2004) Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science* 350(5686) 968-972.
- Pedro M. C., Yap S. W., and G. Albert (1994) Large scale enrichment planting with Dipterocarps as an alternative for carbon offset. In IUFRO editor. *Proceedings of IUFRO International Workshop on Sustainable*

- 
- Forest managements. 1994 October 17-21 ; Furano, Hokkaido, Japan. 135-145.
- Poorter L. *et al.* (2016) Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*. 530: 211-214.
- Requena S. D. *et al.* (2019) Estimating aboveground net biomass change for tropical and subtropical forests: refinement of IPCC default rates using forest plot data. *Global Change Biology*. 25: 3609-3624.
- Seibold S. *et al.* (2021) The contribution of insects to global forest deadwood decomposition. *Nature* 597: 77-81.
- The American Carbon Registry (2018) Improved Forest Management Methodology for Quantifying GHG Removals and Emission Reductions through Increased Forest Carbon Sequestration on Non-Federal U.S. Forestlands.
- Totten M. (1999) Getting it right: emerging markets for storing carbon in forests. Washington, DC: World Resources Inst. 49 p.
- U.S. EPA (1992) Exposure Factors Handbook, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, Washington, DC.
- Verified Carbon Standard (2013) Approved VCS Methodology VM0005. 83.
- Yadanar Y. M., Sasaki N., Datta A., and T. W. Tsusaka (2021) Management of plantation forests for bioenergy generation, timber production, carbon emission reductions, and removals. *Cleaner Environmental Systems* 2.

## 附件一 專有名詞

### 碳吸存(Carbon sequestration)

亦稱為碳截存、碳封存或碳固定，是將大氣中的二氧化碳，以固態碳方式加以儲存，其與碳儲存的差異在於碳吸存通常止一年間之單位面積的碳吸存量，而碳儲存則指一年以上時間或一定面積之碳吸存累積量。

### 碳匯(Carbon sink)

是指通過植樹造林跟新或植被恢復跟新等方式，利用林木的光合作用機制吸收大氣中的二氧化碳，以達減碳的過程、活動或機制，皆稱之為碳匯。

### CO<sub>2</sub>排放量(Carbon dioxide emissions)

亦可簡稱為碳排放量，係指人類因為從事某種經濟活動，而直接或間接產生的 CO<sub>2</sub> 總重量。

### CO<sub>2</sub>移除量(Carbon dioxide removal)

亦可簡稱為碳移除量，是指利用各種操作方法，例如以植林或以改善森林經營方式，將二氧化碳從大氣中移除的總量。由於「移除」與「排放」為相反詞，移除二氧化碳的作法或技術，通常稱為達成「碳負排放」。

### 碳權額度(Carbon credit)

在碳交易平台上進行碳交易的買賣雙方(例如：一個國家或一間企業)所能被允許的碳排放量即為碳權額度，其計量單位為每噸二氧化碳當量(tCO<sub>2</sub>e)。

### 碳抵換(Carbon offset)

為抵消或抵減服務或活動過程中，無法避免的碳排放量，而透過減碳之專案活動所產生的減碳額度，使淨碳排放量降低或達到零碳排放(碳中和)。

### 京都議定書(Kyoto Protocol)

由於 1992 年簽訂「氣候變化綱要公約」後，全球二氧化碳濃度仍在不斷上升，原公約減量目標普遍認為並未被會員國認真執行，於是形成制定具有法律力的議定書的共識。於是，於 1997 年 12 月日本京都的「第三次締約國大會」(COP3)中簽署「京都議

---

定書」，規範38個國家及歐盟（即所謂附件B國家），以個別或共同的方式控制人為排放之溫室氣體數量，以期減少溫室效應對全球環境所造成的影響。

#### 新植造林(Afforestation)

為在沒有森林覆蓋的區域中，以林木栽植方式進行造林，使非森林使用之土地逐漸轉換成森林使用之土地。

#### 更新造林(Reforestation)

為林地復育又稱復舊造林，係指原本已是林地，經伐木後以造林更新方式，進行林相改良或林相變更的森林經營活動。

#### 毀林(Deforestation)

係指利用伐木作業，將原為森林覆蓋之林地轉變為無森林覆蓋之其他非林業用途之土地。

#### 認證碳標準(Verified Carbon Standard, VCS)

為全球最廣泛使用之自願性減碳標準，已有1,700個VCS認證之減碳計畫，減少約6.3億公噸之二氧化碳排放量。

#### 聯合國氣候變遷綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)

其為1992年5月在紐約聯合國總部，通過的一個與氣候變遷相關議題之國際公約，該公約於1992年6月於巴西里約熱內盧舉辦的聯合國環境與發展會議中進行簽署，該公約於1994年3月21日生效。

#### REDD+(Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation Plus)

藉由國際資金援助，提供開發中國家財務上的誘因，減少伐林造成的森林退化、促進森林保育、加強森林的碳儲存量以及永續管理森林，進而達到減少碳排放的目標。

#### 自願性減碳市場(Voluntary carbon market)

是一種碳交易之市場機制，企圖降低企業碳排成本的碳交易市場。自願減排市場起源於一些團體或個人，為自願抵消碳排放，而向可提供減碳項目之所有方(項目業主)購買減碳額度的行為。

#### 碳中和(Carbon neutral)

---

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總量，通過使用低碳能源取代化石燃料、植樹造林、節能減碳等形式，以抵消自身產生的二氧化碳排放量，達到「淨零碳排放量」。

#### 淨零碳排放量(Net-zero carbon emission)

是指在特定的一段時間內，某一種活動過程中所造成的碳排放量，扣除以人為之各種方式所移除之碳總量後等於零，即為淨零碳排放量。

#### 改善森林經營(Improved Forest Management, IFM)

係指進行妥善的森林經營規劃，進行計畫性的林地經營，使林地之單位面積之林木生長量較未經經營林地高，亦即利用森林經營手段提升林地生產力，在符合碳保存目標下，可促進森林中碳儲存量的增加，並防止森林碳儲存的減少或流失。

#### 可量測、可報告、可驗證(Measurement, Reporting, Verification, MRV)

是一種科學性的量測/監測方法，針對溫室氣體的排放和減量行動，進行監測、量化其成效，並加以揭露，以供驗證方對於成效，進行公正的評估。

#### 碳儲存(Carbon storage)

林木藉由本身生理特性，進行光合作用吸收大氣中二氧化碳，轉化有機碳形式儲存於林木體內，而碳儲存具有長時間及一定面積下所累積之碳量意涵。

#### 基線(Business As Usual, BAU)

溫室氣體基線(BAU)排放量，是假設在政府完全不採取任何溫室氣體減量要求的政策，任由自由市場力量引導的經濟成長下，因溫室氣體排放源的自發行為而增加的溫室氣體排放量。

#### 碳洩漏(Carbon leakage)

以全球尺度視之，是指當一個國家採用較嚴格的氣候政策而減少碳排放量，而導致另一個國家的碳排放量增加的情況，可定義為碳洩漏。而以區域尺度視之，當一種碳減量專案活動執行時，而導致專案邊界外另一個區域或活動的碳排放增加，亦可稱為該專案活動之碳洩漏。

#### CO<sub>2</sub>淨移除量(CO<sub>2</sub> net removals)

---

在特定期間內(衡量期間通常是一年)，移除大氣中 CO<sub>2</sub> 的總量。  
碳含量轉換係數(Carbon Fraction, CF)

為生物量轉換為碳含量的比值。

生物量擴展係數(Biomass Expansion Factor, BEF)

為林木材積轉換為生物量之比值。

未經營次生林(Unmanaged secondary forest)

以自然保育為目的，優先考慮次生林的自然演替，不進行任何更新、撫育的經營措施。

經營次生林(Managed secondary forest)

伐除大部分的次生林植被，而保留部分生長優質的林木，並進行林木的更新造林、撫育等經營措施。如果管理得當，次生林可以產生正向發展之生態環境和經濟效益。

不確定性(Uncertainty)

是一種用於表達測量值的統計離散度的參數。

風險管理行動(Risk management actions)

是一個管理過程，包括對風險的定義、測量、評估和發展因應風險的策略行動。

可信賴度(Credibility)

指在條件下和規定時間內，可達成預先設定目標或任務的概率。

森林生態系服務(Forest Ecosystem Services, FES)

為人類直接或間接從生態系功能(Ecosystem functions)獲得的效益，包括供給服務、支持服務、調節服務及文化服務。

波昂挑戰(Bonn Challenge)

「波昂挑戰(Bonn Challenge)」為 2015 年 3 月於德國波昂所召開第二屆國際研討會，宣示森林復育的新目標，「在 2020 年前重建 1 億 5 千萬公頃劣化和已砍伐的森林，並於 2030 年前完成至少 3 億 5 千萬公頃的森林復育」。

生命週期評估(Life cycle assessment)

是估計產品或服務在可用期間內對環境影響的重要工具，可協助產業了解自身碳排放量，進而可以針對主要耗損能源的製程或使用方法加以改良，透過價值分析、資源回收、重新使用等方式，

---

減少潛在成本與環境污染，既能減少碳排放量，亦能邁向綠色經濟。

#### 森林碳保存(Forest carbon conservation)

在於保存森林資源的碳庫(Carbon pool)，亦是防止或減少已經固定在碳匯(Carbon sink)中的碳釋放率。行動策略包含:保護區設置、森林火控制、減少林地破壞和改善森林經營、土壤保育等面向來達成。

#### 森林碳吸存(Forest Carbon sequestration)

係經由加強林地管理，擴大森林資源的碳儲存。其方式可藉由增加森林面積或提升天然和人工林的碳密度(Carbon density)，並且亦可增加耐久性林產品的使用來貯存。實際策略可透過加強造林、天然林更新、農地造林等森林永續發展的經營管理策略，增加森林資源的碳吸存。

#### 森林碳替代(Forest carbon substitution)

為將森林生質碳轉移至產品(如結構用材與生質燃料)，藉以替代石化製品的能源與產品、水泥製品和其他建築材料，此策略也包括栽植短伐期的森林。此外，增加耐久性林產品的使用，來取代鋼鐵及水泥等高耗能材料，或是使用生質燃料，皆可減少對化石燃料的需求。

#### 清潔發展機制(Clean Development Mechanism, CDM)

此機制是因應《聯合國氣候變化綱要公約的京都議定書》所發展出的機制。清潔發展機制協助不受減碳量限制的發展中國家(例如：多數的非洲或中南美洲國家)，在有具體減碳量限制的已開發國家的幫助下，達到永續發展，而已開發國家(例如：美國或歐盟國家)可藉由向開發中國家購買抵換額度 (offsets) 來達到減碳承諾。

---

附件二 複層林營造碳吸存推估與監測規劃書(5 ha 保留)

【臺北市立美術館「2020 台北雙年展」作品  
《儲回大地的藝術》碳中和複層林營造案】  
複層林營造碳吸存推估與監測規劃報告書

<https://www.taipeiennial.org/2020>



臺北市林業技師公會

理事 長：顏仁德

總 幹 事：陳阿興(計畫主持人)

中華民國 110 年 10 月 12 日

## 摘要

自 1997 年於日本京都召開 UNFCCC COP3，通過了「京都議定書(Kyoto Protocol, KP)」，作為世界具體推動減少溫室氣體排放的國際公約，而京都議定書亦正式將造林與再造林活動納入其清潔發展機制(Clean Development Mechanism, CDM)計畫中，其原意在於允許已開發國家，藉由於開發中國家實施造林與再造林等 CDM 計畫，來抵消其部分溫室氣體排放量。即人類生活所需之活動項目，包括交通、能源使用、農業以及工業生產等過程所產生之 CO<sub>2</sub> 排放(簡稱碳排放)，若想降低活動項目之碳排放量，除在能源使用或生產過程採取減排技術外，亦可透過碳抵換(碳補償)方式，達到中和碳排放量的目的。

實踐 2020 台北雙年展「你我不住在同一個星球上：外交新碰撞」的核心主題，以實踐植林減碳的複層林營造活動，並結合學術單位的調查研究，分析植林後之碳吸存功能，讓聯展活動能共同關切人類藝術、環境與生活的議題，宣揚「你我不住在同一個星球上，但對於生態環境的維護，有相同的理念，並貢獻心力」，而 2020 台北雙年展之 CO<sub>2</sub> 排放量，總計約為排放 390 ton CO<sub>2</sub> 量。如何達到碳中和除了通過使用低碳能源取代化石燃料及節能減排之外，透過植樹造林來抵消活動所產生的 CO<sub>2</sub> 的排放量為本計畫執行之目標。以原生樹種之臺灣肖楠(*Calocedrus formosana*)、楓香(*Liquidambar formosana*)及相思樹(*Acacia confusa*)進行整地造林，並透過撫育作業達到新植林木、留存木及未來下層木之林相改良目的，提升森林的碳吸存能力。

本計畫以國際間之碳減量方法(Approved VCS Methodology VM0005 1.2 )作為碳吸存推估之參考依據，並依照林地經營現況，透過改善森林經營計畫之減量措施架構與 MRV 精神，評估此展覽活動所產生之碳排放量(390 ton CO<sub>2</sub>)，在森林經營期間，何時可達到碳中和的目標。由林相改良及碳中和計算分析結果可知，本計畫以面積 52.70 ha 為規劃區，10.11 ha 作為專案經營活動範圍，其中 5.03 ha 作為人為經營區，5.08 ha 作為自然演替觀察區，四種不同基線情境下，藉由本專案活動(改善森林經營計畫)，得知 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，分別為 2,396.05 ton CO<sub>2</sub> 吸收量、2,219.31 ton CO<sub>2</sub> 吸收量、1,865.81 ton CO<sub>2</sub> 吸收量及 1,689.07 ton CO<sub>2</sub> 吸收量，而分別約於**第 10~13 年可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390**

ton CO<sub>2</sub> 量及專案活動中所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量，但現階段部分數據為本專案假設情境，故後續可藉由監測計畫，以滾動方式調整碳中和的情境。

以適度的植林及積極的森林經營管理方式，增加森林的多目標功能，除原有的涵養水源、水土保持及生物多樣性等功能外，未來預期可增加景觀美質、休閒遊憩、碳中和等功能，故選用生長期短之相思樹、中期楓香、生長期較長之臺灣肖楠，兼具碳固定與生態效益之平衡。森林經營係以多元目標為發展方向，並以實踐永續森林為宗旨。而臺灣肖楠的樹型優美，成林後呈現櫛比鱗次的景觀；楓香為變葉樹種，從春季新生枝桠的嫩綠、夏季的翠綠、秋季轉紅、冬季落葉，呈現四季不同的美感；相思樹為常綠喬木，夏季花期放眼望去一片金黃。未來從大崙頭山鄰近的步道遠望，可增添不同的視覺享受。林木修枝所得的枝條，可利用作為工藝品，或是做為菇類栽種的原料，可透過內雙溪自然教育中心辦理相關的課程活動，提供環境教育活動的素材。

## Abstract

Since the UNFCCC COP3 was held in Kyoto, Japan in 1997, the "Kyoto Protocol (KP)" was adopted as an international convention to specifically promote the reduction of greenhouse gas emissions of the world. It also officially included afforestation and reforestation activities in the Clean Development Mechanism (CDM) plan, its original intention is to allow developed countries to offset part of their greenhouse gas emissions by implementing CDM plans such as afforestation and reforestation in developing countries. Thus, the activities required for human life, including the CO<sub>2</sub> emissions produced by the processes of transportation, energy use, agriculture, and industrial production. As to reduce the carbon emissions of activities, in addition to energy use or production in addition to emission reduction technologies, carbon offsets can also be used to achieve the goal of neutralizing the carbon footprint.

To achieve the core theme of the Taipei Biennial 2020 " *You and I don't Live on the Same Plane: new diplomatic encounters* ", the project to implement the multi storied forest management system to reduce carbon emissions and combined the academic institutions to conduct research investigations and analyzing the carbon sequestration function after planting, so that the joint exhibition can jointly care about the issues of

human art, environment, life and to promote "" *You and I don't Live on the Same Plane, but we have the same concept and contribute our efforts to the maintenance of the ecological environment*". The emissions of the Taipei Biennial 2020 are approximately 390 ton CO<sub>2</sub>. To achieve carbon neutrality in addition to the use of low-carbon energy to replace fossil fuels and energy conservation and emission reduction, afforestation to offset the CO<sub>2</sub> emissions generated by activities is the goal of this project. The native species of *Calocedrus formosana*, *Liquidambar formosana* and *Acacia confusa* are used for afforestation, and through tending operations to achieve the purpose of improving carbon storage capacity of forests with the morphology of newly planted trees, remaining trees and underlayer vegetation.

This project uses the international carbon reduction methodology (Approved VCS Methodology VM0005 1.2) as the reference basis for carbon storage estimation and evaluates this exhibition by improving the forest management plan's reduction measures framework and MRV spirit in accordance with the status of forest management. The amount of carbon emissions (390 ton CO<sub>2</sub>) generated by the activity and when will the goal of carbon neutrality be reached during the forest management period? According to the results of forest improvement and carbon neutral calculation and analysis, this project set an area of 52.70 ha as the planning area, of which 10.11 ha (plantation forest area is 5.03 ha and ecological restoration area is 5.08 ha) with the scope of project management activities. Under four different baseline scenarios, this project activity (improvement of forest management plan), the results show that the CO<sub>2</sub> changes of the project activities in 25 years are 2,396.05 ton CO<sub>2</sub> absorption, 2,219.31 ton CO<sub>2</sub> absorption, 1,865.81 ton CO<sub>2</sub> absorption and 1,689.07 ton CO<sub>2</sub> absorption, which can be offset in the 10<sup>th</sup> to 13<sup>th</sup> year respectively. The amount of CO<sub>2</sub> generated by the Taipei Art Museum 390 ton CO<sub>2</sub> and the CO<sub>2</sub> emissions generated during the project activities. However, some of the data based on the project's hypothetical scenario, so the subsequent monitoring plan can be used to adjust the carbon emissions in a rolling manner and the situation.

Appropriate forest planting and active forest management methods are used to increase the multi-purpose functions of the forest. In addition to the original functions

of water and soil conservation and biodiversity, it is expected to increase landscape, leisure and carbon neutrality in the future. Therefore, the *Acacia confusa*, *Liquidambar formosana*, and *Calocedrus formosana* with short, mid, and long rotation age respectively are selected to have a balance of carbon sink and ecological benefits. The forest management act takes multiple goals as the direction and takes the sustainable forest management as the purpose. To that end, the trees of *Calocedrus formosana* are beautiful, showing a landscape with dense, tall that spring up thick and fast after it grown as a forest; *Liquidambar formosana* is a species of variable-leaf colors, from the tender green of new branches in spring, verdant green in summer, turning in red in autumn, and deciduous leaves in winter, presenting the beauty of different seasons; The *Acacia confusa* is an evergreen tree and looks golden during the summer flowering period. Looking at the trail near Daluntou Mountain in the future will add different visual enjoyment. In this forest management plan period, the branches obtained from tree pruning can be used as handicrafts or as raw materials for mushroom cultivation, and the Nei Shuangxi Nature Education Center can handle relevant courses and activities to provide materials for environmental education activities in this area.

## 目 錄

摘要 .....	I
Abstract .....	II
目 錄 .....	V
圖表目錄.....	VII
一、計畫緣起及背景.....	1
二、本案之碳中和減量架構.....	4
三、專案邊界及土地合格性.....	7
(一)計畫區森林經營規劃.....	7
(二)計畫區之基地分析.....	8
(三)計畫區森林資源現況調查.....	12
(四)複層林營造之規劃及成果.....	15
(五)整理伐及整地作業之成果.....	16
(六)造林作業及成果.....	19
四、專案活動之 CO <sub>2</sub> 排放量、移除量及基線 CO <sub>2</sub> 淨移除量之計算方法 .....	22
(一)基線 CO <sub>2</sub> 淨移除量之計算 .....	22
(二)專案排放(專案 CO <sub>2</sub> 淨移除量).....	24
(三) CO <sub>2</sub> 洩漏排放計算 .....	26
(四) CO <sub>2</sub> 淨值計算 .....	26

五、碳中和之計算結果.....	27
(一)基線 CO <sub>2</sub> 淨移除量 .....	27
(二)專案活動之 CO <sub>2</sub> 排放量 .....	32
(三)洩漏排放計算.....	40
(四) CO <sub>2</sub> 總淨值( $\Delta CFM, t$ )量之估算 .....	40
(五)監測計畫 .....	51
六、討論.....	55
(一)森林的生態服務價值.....	55
(二)以造林來達成碳中和之效應.....	57
(三)臺灣現階段碳中和所面臨之問題.....	62
七、結論.....	65
八、參考文獻.....	66
附件一 專有名詞.....	72
附件二 委員意見回覆.....	76

## 圖表目錄

圖 1 本案 CO <sub>2</sub> 移除量計算之操作流程.....	6
圖 2 計畫區之林地使用分區規劃圖.....	7
圖 3 計畫區之海拔分布圖.....	8
圖 4 計畫區之坡度分布圖.....	9
圖 5 計畫區之坡向分布圖.....	10
圖 6 計畫區之水系圖.....	11
圖 7 計畫區內樣區位置圖.....	12
圖 8 計畫區、規劃造林區及規劃保留區之胸徑級分布情形.....	13
圖 9 小規模塊狀整理伐之造林區位置圖.....	15
圖 10 整理伐作業前之林地現況示意圖.....	17
圖 11 整理伐作業後之林地現況示意圖.....	17
圖 12 造林區位置分布圖.....	20
圖 13 不同森林類型不同林齡之碳累積速率圖.....	27
圖 14 專案活動於 25 年間之 CO <sub>2</sub> 變化量(情境一).....	41
圖 15 專案活動於 25 年間之 CO <sub>2</sub> 變化量(情境二).....	43
圖 16 專案活動於 25 年間之 CO <sub>2</sub> 變化量(情境三).....	45
圖 17 專案活動於 25 年間之 CO <sub>2</sub> 變化量(情境四).....	47
圖 18 人工造林地(種植於 2020 年)與保育性森林每公頃累積 CO <sub>2</sub> 當量吸存比較 .....	60

圖 19 森林碳排放與碳固定抵銷.....	60
表 1 本專案活動之碳中和減量架構表.....	4
表 2 計畫區之坡度分級及所佔面積.....	9
表 3 計畫區之坡向分級及所佔面積.....	10
表 4 計畫區森林資源樣區調查表.....	14
表 5 造林區編號與面積對照表.....	16
表 6 造林區整理伐前後對照表.....	19
表 7 造林樹種生育特性及樹種選擇原因.....	20
表 8 造林面積、樹種及數量表.....	21
表 9 基線 CO <sub>2</sub> 淨移除量計算之參數表.....	23
表 10 $\Delta$ CBSL, tree, t參數表.....	23
表 11 本計畫所使用之各樹種生物量、碳吸存量推估之相關本土轉換係數.....	24
表 12 $\Delta$ CP, t參數表.....	25
表 13 $\Delta$ CFM, t參數表.....	26
表 14 基線(情境一)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO <sub>2</sub> 變化量表 ..	28
表 15 基線(情境二)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO <sub>2</sub> 變化量表 ..	29
表 16 基線(情境三)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO <sub>2</sub> 變化量表 ..	30
表 17 基線(情境四)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO <sub>2</sub> 變化量表 ..	31
表 18 留存木各專案年分之生長量、碳儲存量及 CO <sub>2</sub> 儲存量表.....	33

表 19 臺灣肖楠各專案年分之材積、碳儲存量、CO <sub>2</sub> 儲存量表 .....	34
表 20 楓香各專案年分之材積、碳儲存量、CO <sub>2</sub> 儲存量表 .....	35
表 21 相思樹各專案年分之材積、碳儲存量、CO <sub>2</sub> 儲存量表 .....	36
表 22 保留區蓄積量、碳儲存量及 CO <sub>2</sub> 排放量表 .....	37
表 23 伐倒木蓄積量、碳儲存量及 CO <sub>2</sub> 排放量表 .....	38
表 24 專案活動之油耗量及所產生之 CO <sub>2</sub> 排放量表 .....	39
表 25 未來專案活動之油耗量及所產生之 CO <sub>2</sub> 排放量表 .....	40
表 26 各專案年分 CO <sub>2</sub> 淨值總表(情境一) .....	42
表 27 各專案年分 CO <sub>2</sub> 淨值總表(情境二) .....	44
表 28 各專案年分 CO <sub>2</sub> 淨值總表(情境三) .....	46
表 29 各專案年分 CO <sub>2</sub> 淨值總表(情境四) .....	48
表 30 不確定性與風險管理所採取行動之操作模式 .....	49
表 31 不同種類動物監測方法建議說明 .....	54
表 32 專案區域及非專案區域所面臨的機會與風險 .....	56

## 一、計畫緣起及背景

我國「溫室氣體減量及管理法」於 2015 年 7 月由總統公布施行，明定我國溫室氣體減量目標為 2050 年溫室氣體排放量回到 2015 年排放量 50%以下(行政院環境保護署，2015)。環境保護署依溫室氣體減量及管理法第 9 條第 1 項規定，擬訂「溫室氣體減量推動方案」，於 2018 年 3 月 22 日奉行政院核定，其推動方案內容包括能源、製造、運輸、住商、農業及環境等六大部門別的減量策略及階段管制目標，其中農業部門的推動策略，為推廣友善的農、林、漁、牧的生產環境；加強農業能(資)源的循環利用；積極推動植樹造林及撫育；提高碳匯(Carbon sink)量並發揮碳吸存(Carbon sequestration)效益(行政院環境保護署，2018)。行政院農業委員會所擬定之農業部門溫室氣體排放管制行動推動方案，其中對於健全森林資源管理，厚植森林資源，提高林地碳匯量，提升森林碳吸存效益及造林與加強森林經營，均認為可進行碳排放改善，其中包括超限利用地可經由主管機關認定重新進行造林，而對於已缺乏經營管理之造林區域亦可進行復舊造林，以增進森林的碳匯能力(行政院農業委員會，2018)。臺灣目前雖然已訂出植林減碳之推動政策，但由於企業如何參與造林及如何取得碳權額度(Carbon credit)不太明確，且本土性森林之固碳效益資訊薄弱，因此企業參與自願性減碳之意願並不高(林俊成等，2010)。而柳婉郁、劉哲良(2016)則指出雖然溫室氣體減量及管理法雖已於 2015 年實施，但要達到國家整體的 CO<sub>2</sub> 減量目標，必須依靠碳匯、排放權交易、使用再生能源、清潔燃料代替、提高能源效率等機制來協助達成，其中利用植樹造林來取得碳抵換(Carbon offset)交易，被認為成本相對較低的減碳方式。另環境保護署於 2019 年公告「造林與植林碳匯專案活動」溫室氣體抵換專案減量方法，其為非林地轉換為林地的計算方法，而對於促進森林經營(林地維持林地)來進行減碳的架構或方法學，國內目前仍未公告相關的抵換專案減量方法。

國際間對於植林減碳之排放減量值計算之相關議題，已形成共識，例如京都議定書(Kyoto Protocol)中第 3.3 規範，所提及的三種方式，可併入排放減量值計算，包含新植造林(Afforestation)、更新造林(Reforestation)及毀林(Deforestation)之 CO<sub>2</sub> 吸收或排放淨值。而聯合國氣候變遷綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)不具有 REDD<sup>+</sup>(Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation Plus)計畫發放減量單位的機制，但在自願性減碳市場(Voluntary carbon market)，則已發展出許多不同的碳認證及減量單位發放(Emissions

units issued)方法，其中亦包含 REDD<sup>+</sup>類型計畫的方法學，其可依據自願性碳市場中的方法學與認證程序，產生自願性的碳減量單位，而具有認證碳標準(Verified Carbon Standard, VCS)方案，現階段亦成為 Verra 啟動與落實自願性碳市場交易(<https://verra.org/vcs-is-now-verra/>)活動的機制，即為目前多數人熟悉的 VCS 標準。有關於自願性碳交易市場 Ecosystem Marketplace (2019)將其涵蓋範圍包含所有非用於遵循強制性市場義務的交易，包括涉及為轉售或註銷以達成碳中和(Carbon neutral)或其他環境目標的抵換交易。

本計畫為實踐 2020 台北雙年展「你我不住在同一個星球上：外交新碰撞」的核心主題，以實踐植林減碳的複層林營造活動，並結合學術單位的調查研究，分析植林後之碳吸存功能，讓聯展活動能共同關切人類藝術、環境與生活的議題，宣揚「你我不住在同一個星球上，但對於生態環境的維護，有相同的理念，並貢獻心力」，而 2020 台北雙年展之 CO<sub>2</sub> 排放量，其計算單位為二氧化碳當量 (CO<sub>2</sub>-e) (簡稱為 CO<sub>2</sub> 量或碳量)，包含展館營運排放 295 ton CO<sub>2</sub> 量、人員差旅運輸排放 49 ton CO<sub>2</sub> 量、作品製作和運輸排放 45.6 ton CO<sub>2</sub> 量，總計約為排放 390 ton CO<sub>2</sub> 量。碳中和係指一定期間內，碳排放量與減少的碳排量或淨碳吸存量之間互相抵消，達到淨零碳排放量 (Net-zero carbon emission)的效果，其達成方式主要包括碳減量及碳抵換 (Berndes, *et al.*, 2016)。而如何達到碳中和除了通過使用低碳能源取代化石燃料及節能減排之外，其中植樹造林亦可用來抵消人類經濟活動所產生的 CO<sub>2</sub> 的排放量 (Pacala and Socolow, 2004；Lal, 2008；林俊成等，2012；Berndes, *et al.*, 2016)。本專案係屬實驗性質，以臺北市士林區翠山段一小段 81 號公有地之次生林(Secondary forest)為植樹造林活動範圍，使用友善環境方式，以不使用大型機具，僅以人力作業方式，將全區 52.70 ha 中 10.11 ha 作為基線面積，以原生樹種之臺灣肖楠 (*Calocedrus formosana*)、楓香(*Liquidambar formosana*)及相思樹(*Acacia confusa*)進行整地造林，並透過撫育作業達到新植林木、留存木及未來下層木之林相改良目的，提升森林的碳吸存能力。從次生林角度來看，較為年輕之次生林生長率會大於枯死率，但隨著次生林的演替階段的演進，林分生長率會逐漸降低，甚至小於枯死率，其森林的碳吸存力將大幅降低(Elias, *et al.*, 2020)，而對於如能進行局部更新造林，亦即透過增加 CO<sub>2</sub> 吸收量的森林管理活動，可提升植林減碳的貢獻(林俊成、柳婉郁，2010)。

目前我國環境保護署國家溫室氣體登錄平台([https://ghgregistry.epa.gov.tw/ghg\\_rwd/Main/Index](https://ghgregistry.epa.gov.tw/ghg_rwd/Main/Index))；針對國外減量方法提出幾種可操作之減量方法名稱(含基線與量測方法)，包括造林與再造林地(不含濕地)(AR-ACM0003)、棲息地退化的紅樹林的植林與再造林、應用於溼地之造林和再造林專案活動、不含濕地之造林與再造林專案活動(AR-AMS0007)、以及草地和農地之小規模造林和再造林清潔發展機制專案活動的簡化基線和監測方法(AR-AMS0001)，但上述方法學均不適用於本計畫，如 AR-AMS0001 此項目僅針對非森林轉變成森林之方案可使用，故不符合其他森林經營模式提高碳吸存能力之方法。

國際上已許多國際企業為善盡企業社會責任，透過不同方法進行排放減量的案例，如 Verra 項目編號 672(INFAPRO REHABILITATION OF LOGGED-OVER DIPTEROCARP FOREST IN SABAH, MALAYSIA)位於馬來西亞沙巴之案例，其透過改善森林經營管理活動，將伐採後被蔓藤攀附之森林(低產林)轉為高產林之方式進行碳排放減量；項目編號 2410(REFORESTATION OF DEGRADED FOREST RESERVE AREAS IN GHANA, WEST AFRICA)為西非加納之案例，將退化森林保護區透過再造林活動進行碳排放減量，這些案例皆以 VCS 標準取得認證。而透過森林經營進行造林、再造林及改善森林經營管理活動，在這些國家的溫室氣體減量中已扮演著關鍵角色。

本案乃參考國外 VCS 標準，針對造林/再造林(Afforestation and Reforestation, AR)及改善森林經營(Improved Forest Management, IFM)等森林碳匯計算方法學之精神，以本案計畫範圍之林地經營現況，參考 IFM 之低產量森林轉換為高產量森林(VM0005)及透過延長輪伐期時間改善森林經營 (VM0003)之方法學**為主要精神，並根據一般碳中和計算之概念，符合可量測、可報告、可驗證(Measurement, Reporting, Verification, MRV)之機制，並評估北美館辦理此次展覽活動所產生之碳排放，能否使其達到抵換因該展覽產生的碳排放目標。**

## 二、本案之碳中和減量架構

本案之碳中和減量架構，係參考 VCS 之改善森林經營(IFM)的相關方法學，並依照 MRV 精神，進行本案碳中和減量架構之設計，主要包括適用條件、專案邊界、基線計算、專案計算、洩漏排放、CO<sub>2</sub> 淨移除量及監測計畫，如下表 1 所示，其操作流程圖如圖 1。

表 1 本專案活動之碳中和減量架構表

減量措施	改善森林經營
適用條件	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.改善森林經營為屬於「森林」維持「森林」的活動。</li> <li>2.專案執行期間，不得在有目的情況下進行林產物收穫。</li> <li>3.本減量方式適用於次生林(過去曾有人為擾動，後續因缺乏經營所形成之森林)，若為次生林演替後期，基線假設為 0，若反之則需進行監測評估以修正基線值。</li> <li>4.基線及專案活動期間，不會發生生物質燃燒及清除枯木等情況，若有則須納入排放計算。</li> <li>4.林地與森林必須由管理單位認定為無違法伐木。</li> </ol>
專案邊界	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.專案邊界及土地合格性 專案區域需符合「森林」條件之土地，且未發生土地利用變化。進行<b>專案活動前</b>需取得<b>主管機關指定、認可或批准</b>，才可計入改善森林經營(IFM)類別。發起人需<b>明確界定專案的空間邊界</b>，以便對專案的 CO<sub>2</sub> 排放量(Carbon dioxide emissions)和 CO<sub>2</sub> 移除量(Carbon dioxide removal)進行<b>準確的計算、監測、核算和核査</b>。</li> <li>2.專案邊界內碳匯變化的計算項目 透過改善森林經營活動作為減量方式，而碳匯變化主要來自地上部、地下部生物量、枯死木及木產品納入計算項目，而廢棄物及土壤有機碳非主要碳庫，不納入計算項目。</li> <li>3.專案邊界內碳釋放源的計算項目 計算撫育造林活動所產生的車輛/機械使用化石燃料排放的 CO<sub>2</sub> 總量。</li> <li>4.專案邊界外之碳洩漏(Carbon leakage) 估算專案活動是否會造成專案邊界外 CO<sub>2</sub> 排放量的增加。</li> </ol>
基線計算	<p>為符合可操作之方法，以文獻蒐集所得資料或專案作業前之地面樣區調查資料，進行估算淨基準 CO<sub>2</sub> 排放量和 CO<sub>2</sub> 移除量。</p>

	$\Delta C_{BSL,t} = \Delta C_{BSL,tree,t} - GHG_{BSL-E,t}$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>參數</th> <th>定義</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\Delta C_{BSL,t}</math></td> <td>基線情境下，專案範圍內 t 年 CO<sub>2</sub> 淨移除量</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta C_{BSL,tree,t}</math></td> <td>基線情境下，專案範圍內第 t 年之林木的地上部、地下部 CO<sub>2</sub> 變化量</td> </tr> <tr> <td><math>GHG_{BSL-E,t}</math></td> <td>基線情境下，專案範圍內造成的專案邊界內的 CO<sub>2</sub> 排放量</td> </tr> </tbody> </table>	參數	定義	$\Delta C_{BSL,t}$	基線情境下，專案範圍內 t 年 CO <sub>2</sub> 淨移除量	$\Delta C_{BSL,tree,t}$	基線情境下，專案範圍內第 t 年之林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量	$GHG_{BSL-E,t}$	基線情境下，專案範圍內造成的專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量		
參數	定義										
$\Delta C_{BSL,t}$	基線情境下，專案範圍內 t 年 CO <sub>2</sub> 淨移除量										
$\Delta C_{BSL,tree,t}$	基線情境下，專案範圍內第 t 年之林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量										
$GHG_{BSL-E,t}$	基線情境下，專案範圍內造成的專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量										
專案計算	<p>計算專案情境下，對照區造林木、留存木及自然演替觀察區林木的地上、地下部 CO<sub>2</sub> 儲存變化量、森林經營活動留於專案邊界內而產生之 CO<sub>2</sub> 排放量(如：伐採之林木、撫育後枝條、以及撫育過程所造成之 CO<sub>2</sub> 排放量，如鏈鋸或割草機等使用汽油)及森林經營活動所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量。留存木之 CO<sub>2</sub> 儲存變化量，採用留存率進行估算，而留存率則以胸高斷面積保留率進行計算。</p> $\Delta C_{P,t} = \Delta C_{P,tree,t} - \Delta C_{Cut,tree,t} - GHG_{P,t}$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>參數</th> <th>定義</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\Delta C_{P,t}</math></td> <td>第 t 年專案情境下碳匯實際 CO<sub>2</sub> 淨移除量</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta C_{P,tree,t}</math></td> <td>第 t 年之對照區造林木、留存木及自然演替觀察區林木的地上部、地下部 CO<sub>2</sub> 變化量</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta C_{Cut,tree,t}</math></td> <td>專案活動實施 t 年後，因施行專案活動而造成專案邊界內的 CO<sub>2</sub> 排放量(如：伐倒木之 CO<sub>2</sub> 量)</td> </tr> <tr> <td><math>GHG_{P,t}</math></td> <td>專案活動實施 t 年後，因施行專案而造成專案邊界內的 CO<sub>2</sub> 排放量(如：汽油燃燒)</td> </tr> </tbody> </table>	參數	定義	$\Delta C_{P,t}$	第 t 年專案情境下碳匯實際 CO <sub>2</sub> 淨移除量	$\Delta C_{P,tree,t}$	第 t 年之對照區造林木、留存木及自然演替觀察區林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量	$\Delta C_{Cut,tree,t}$	專案活動實施 t 年後，因施行專案活動而造成專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量(如：伐倒木之 CO <sub>2</sub> 量)	$GHG_{P,t}$	專案活動實施 t 年後，因施行專案而造成專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量(如：汽油燃燒)
參數	定義										
$\Delta C_{P,t}$	第 t 年專案情境下碳匯實際 CO <sub>2</sub> 淨移除量										
$\Delta C_{P,tree,t}$	第 t 年之對照區造林木、留存木及自然演替觀察區林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量										
$\Delta C_{Cut,tree,t}$	專案活動實施 t 年後，因施行專案活動而造成專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量(如：伐倒木之 CO <sub>2</sub> 量)										
$GHG_{P,t}$	專案活動實施 t 年後，因施行專案而造成專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量(如：汽油燃燒)										
CO <sub>2</sub> 洩漏	適用條件，因改善森林經營活動(如：整理伐、造林、撫育)無潛在性的碳洩漏，CO <sub>2</sub> 洩漏量可設為 0。										

CO <sub>2</sub> 淨移 除量	$\Delta C_{FM,t} = \Delta C_{p,t} - \Delta C_{BSL,t} - LK$	
	參數	定義
	$\Delta C_{FM,t}$	第 t 年(專案活動實施 t 年後)之 CO <sub>2</sub> 淨移除量
	$\Delta C_{p,t}$	第 t 年之專案情境下實際 CO <sub>2</sub> 淨移除量
	$\Delta C_{BSL,t}$	第 t 年之基線情境下 CO <sub>2</sub> 淨移除量
	$LK$	第 t 年，因專案導致於專案邊界外 CO <sub>2</sub> 洩漏
監測方法	基線位置及專案邊界內設置永久監測樣區，並透過長期監測資料，以便進行碳庫碳儲存變化之監測。	

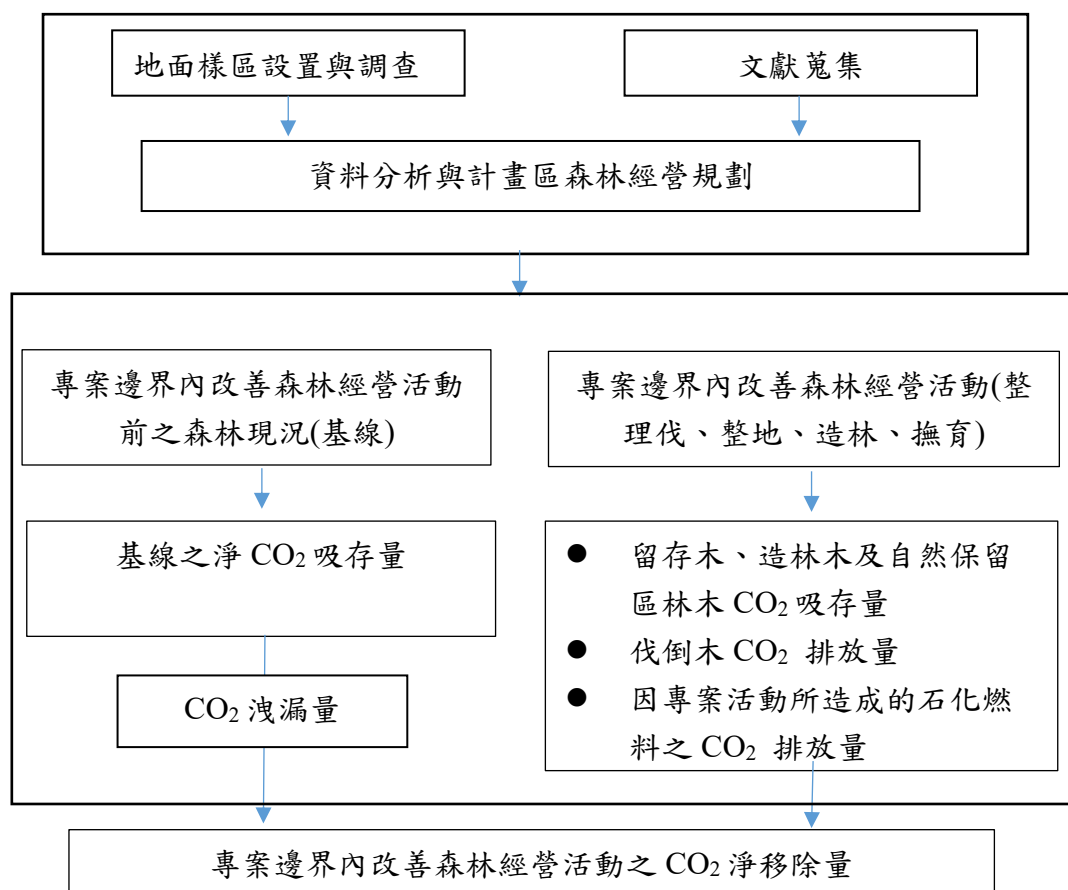


圖 1 本案 CO<sub>2</sub> 移除量計算之操作流程

### 三、專案邊界及土地合格性

#### (一)計畫區森林經營規劃

本案以提升森林的碳吸存為規劃理念，配合森林資源之現況及周遭環境，進行計畫區(52.70 ha)之土地使用規劃，規劃方法係以地理資訊系統(Geographic Information Systems, GIS)將計畫區之步道系統、地文及水文資料，進行環域分析(Buffer analysis)及套疊分析(Overlay analysis)，並依據山坡地土地可利用限度分類標準，進行坡度分級，屬5級至6級坡及溪流、步道兩旁之20 m緩衝帶，將不列入造林範圍，其面積為20.84 ha(以下稱規劃保留區)，可供複層林營造之面積為31.86 ha(以下稱可規劃造林區)(圖2)。

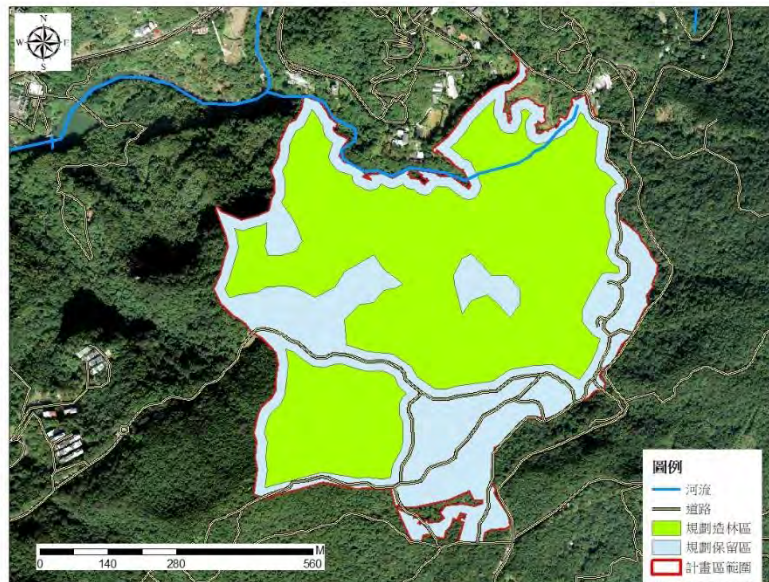


圖 2 計畫區之林地使用分區規劃圖

## (二)計畫區之基地分析

利用數位航空影像、數位高程及相關之地理圖資，進行計畫區之海拔高、坡度、坡向、水系、地質及土壤資料之分析，其結果分述如下：

### 1.地形分析

計畫區海拔高度範圍約 150-450 m，高低差約 300 m，屬於低海拔山區地形(圖 3)；坡度介於 0-55%之間，大部分地區屬於三級坡，佔總面積 66.03%，坡度分布表(圖 4 與表 2)。

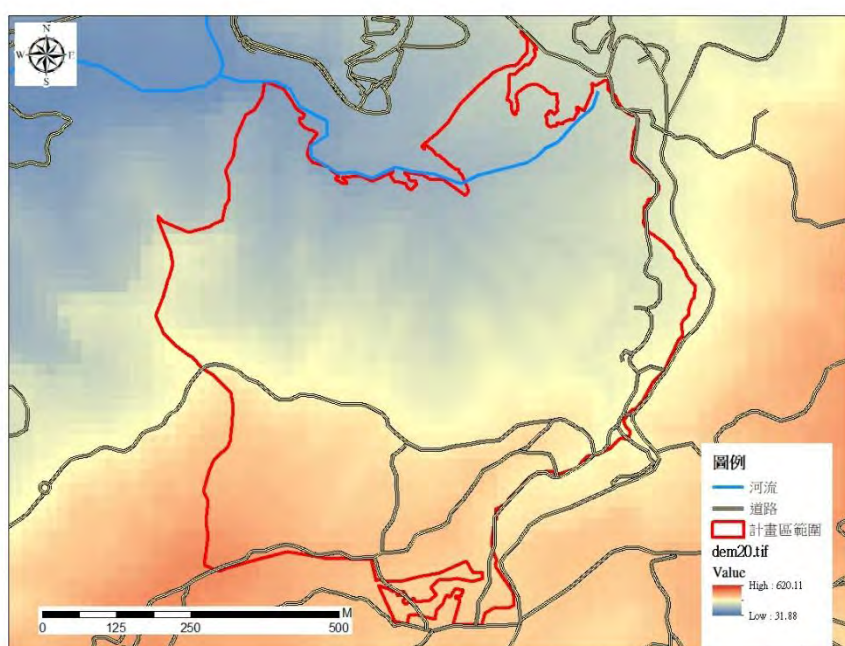


表 2 計畫區之坡度分級及所佔面積

坡地分級	坡度	面積(ha)	百分比(%)
一級坡	小於 5%	0.46	0.88
二級坡	5%-15%	5.96	11.31
三級坡	15%-30%	34.80	66.03
四級坡	30%-40%	10.98	20.84
五級坡	40%-55%	0.50	0.94
六級坡	大於 55%	0.00	0.00
總計		52.70	100.00

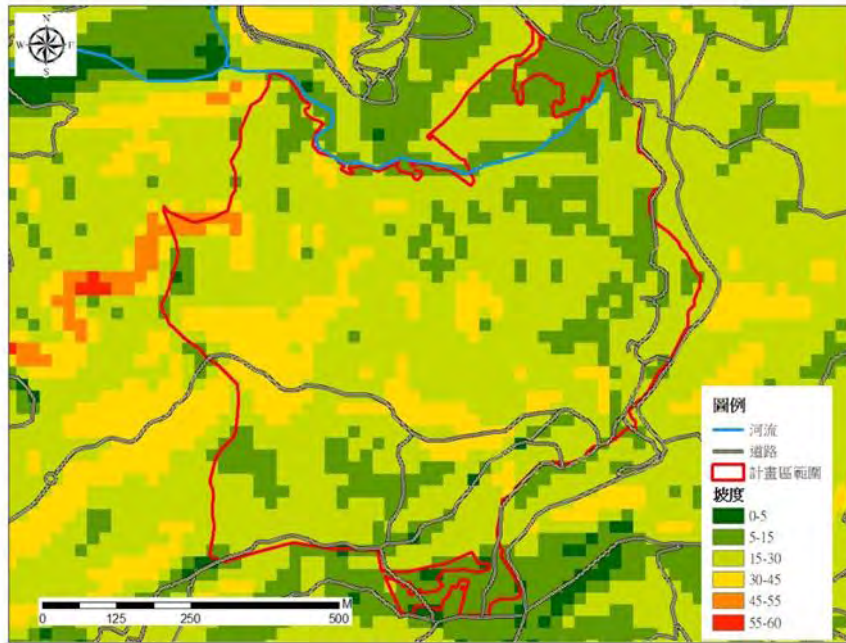
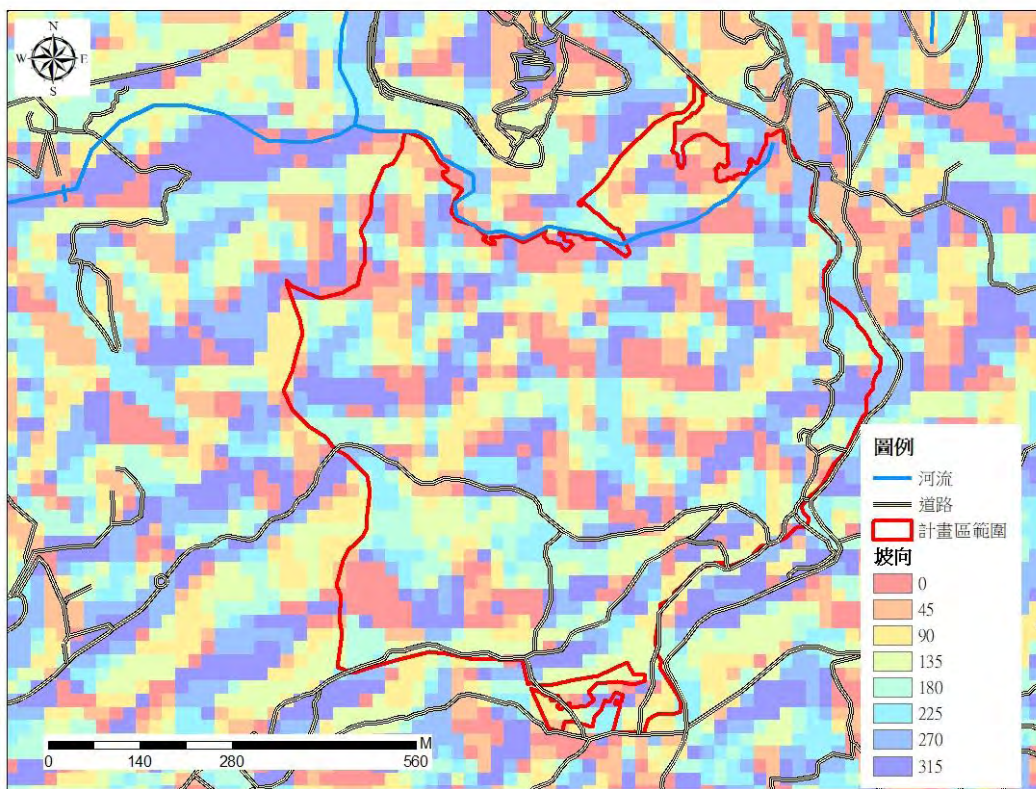


圖 4 計畫區之坡度分布圖

計畫區之坡向以東南向所佔面積最大(8.21 ha, 佔 15.58%), 北坡及西北向次之, 分別為 7.94 ha 及 7.71 ha, 如表 3 與圖 5 所示。

表 3 計畫區之坡向分級及所佔面積

坡向	面積(ha)	佔全區百分率(%)
北向	7.94	15.07
東北向	5.00	9.49
東向	6.21	11.78
東南向	8.21	15.58
南向	6.39	12.13
西南向	5.74	10.89
西向	5.50	10.44
西北向	7.71	14.63
總計	52.70	100.00



## 2.水系

計畫區屬於內雙溪支線流域，其流域經計畫區北處流向內雙溪，如圖 6 所示。

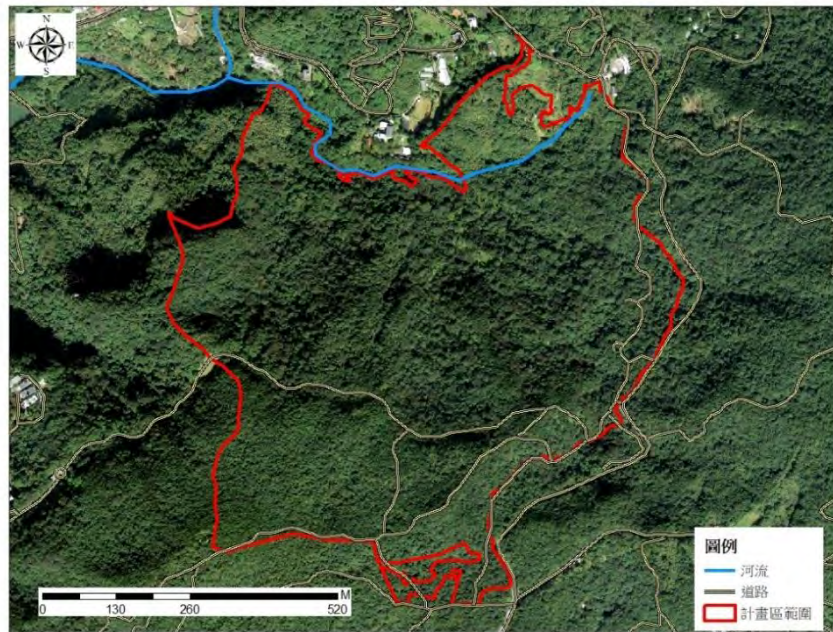


圖 6 計畫區之水系圖

## 3.地質及土壤

計畫區內屬於古老之沉積岩，於雙溪河床為大寮層可見由厚層塊狀砂岩和頁岩或砂岩、頁岩互層所組成，而主要土壤以幼黃壤土為主。

### (三)計畫區森林資源現況調查

為有效掌握目前計畫區林分狀況，進行範圍內森林資源調查，並考量等高線、坡度及坡向等因子，進行立意取樣(立意取樣為由調查人員之主觀經驗，從總樣本中選擇可代表總體的單位，進行樣本抽樣)，每一樣區面積為 0.05 ha，共計 20 個樣區 (圖 7)，其中 17 個位於規劃造林區，3 個位於規劃保留區，總面積為 1 ha。調查項目包括：樹種、胸徑及樹高，樣區分析內容包括樹種組成及林分結構分析，以供為整理伐之參考。

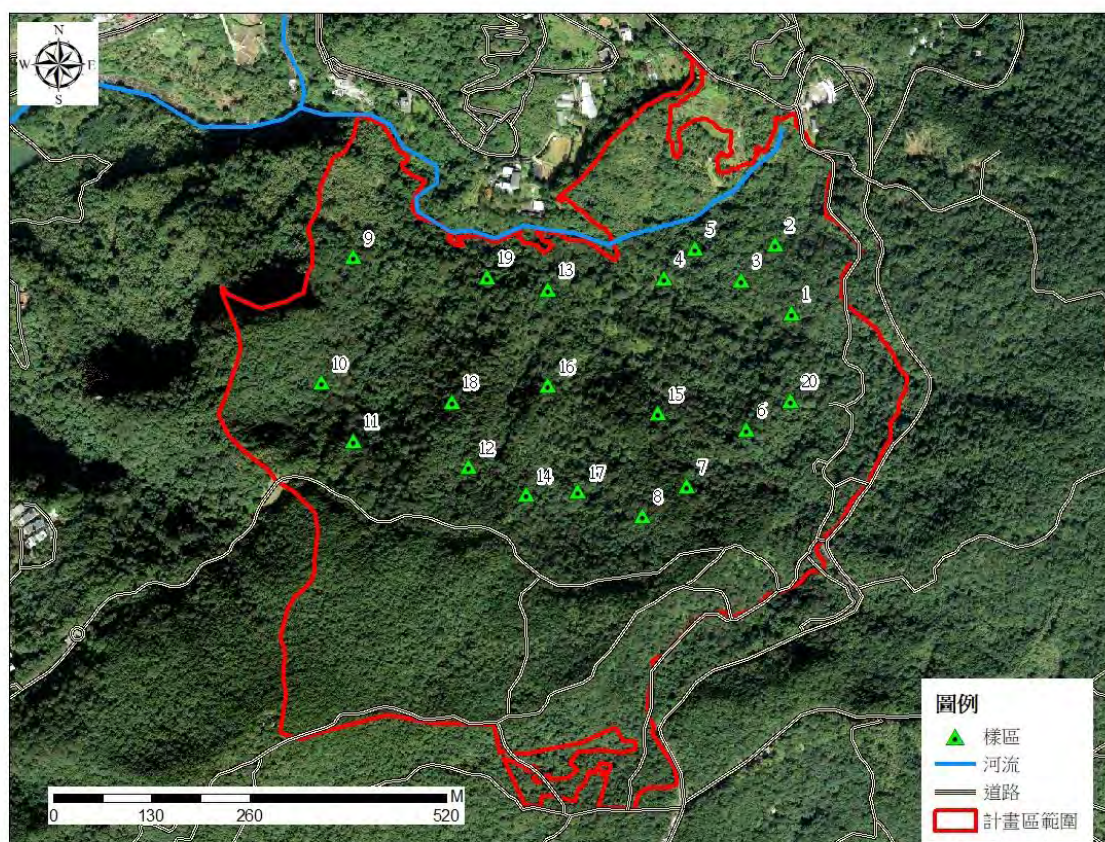


圖 7 計畫區內樣區位置圖

經由本次調查發現計畫區內有少數小面積草生地，推測過去於計畫區內有小型崩塌所導致，而樹種組成以油桐(*Vernicia fordii*)、白柏(*Triadica cochinchinensis*)、大明橘(*Myrsine seguinii*)、豬腳楠(*Machilus thunbergii*)及鵝掌柴(*Schefflera octophylla*)等為優勢木，燈稱花(*Ilex asprella*)及茜草樹(*Randia cochinchinensis*)等為次優勢木，灌木層以燈稱花、鵝掌柴等為主要樹種。地被因受林冠鬱閉度之影響，林冠鬱閉度高之區域，以鬼桫欏(*Alsophila podophylla*)為優勢樹種；林冠鬱閉度低之區域，以芒

其(*Dicranopteris pedata*)為優勢。依據樣區每木調查分析結果顯示，林分之胸高直徑(Diameter at Breast Height, DBH)多數以 5-10 cm 之林木組成，少數林木胸徑大於 25 cm，林分平均胸徑約為  $11.75 \pm 6.54$  cm、樹高約為  $6.54 \pm 1.84$  m、平均每公頃蓄積量約為  $96.18 \text{ m}^3$ (表 4)，其林分結構分析如圖 7 所示。而 2019 年林業試驗所執行「臺北市林地整體發展建議委託專業服務案」，由其調查及最新的航空照片判釋，顯示計畫區內，早期曾為開發造林及農作之林地，現已逐步演替為闊葉樹次生林，屬於非保安林坡度 35 度以下，且覆蓋度 70% 以上之林地，林地內 5 cm 以上林木密度推估約每公頃 1,660 株，樣區內樹種以山红柿(*Diospyros morrisiana*)、小葉杞(*Ardisia quinquegona*)、茜草樹及鵝掌柴為優勢(林試所，2019)，樹種均勻分布，因株數密度高，樹型呈現細高狀態，超過 50% 之樣木胸徑介於 5-15 cm，而胸徑小於 5 cm 之苗木數量僅約佔 1/6，林地透空性不足，地被植物更新不佳，碳吸存能力較差。另張坤城、邱清安(2019)針對大崙頭山林地，進行地面樣區植物調查，其植物社會組成與林業試驗所調查之結果差異不大，亦屬林木株數多且密度高，樹型呈現細高狀態。

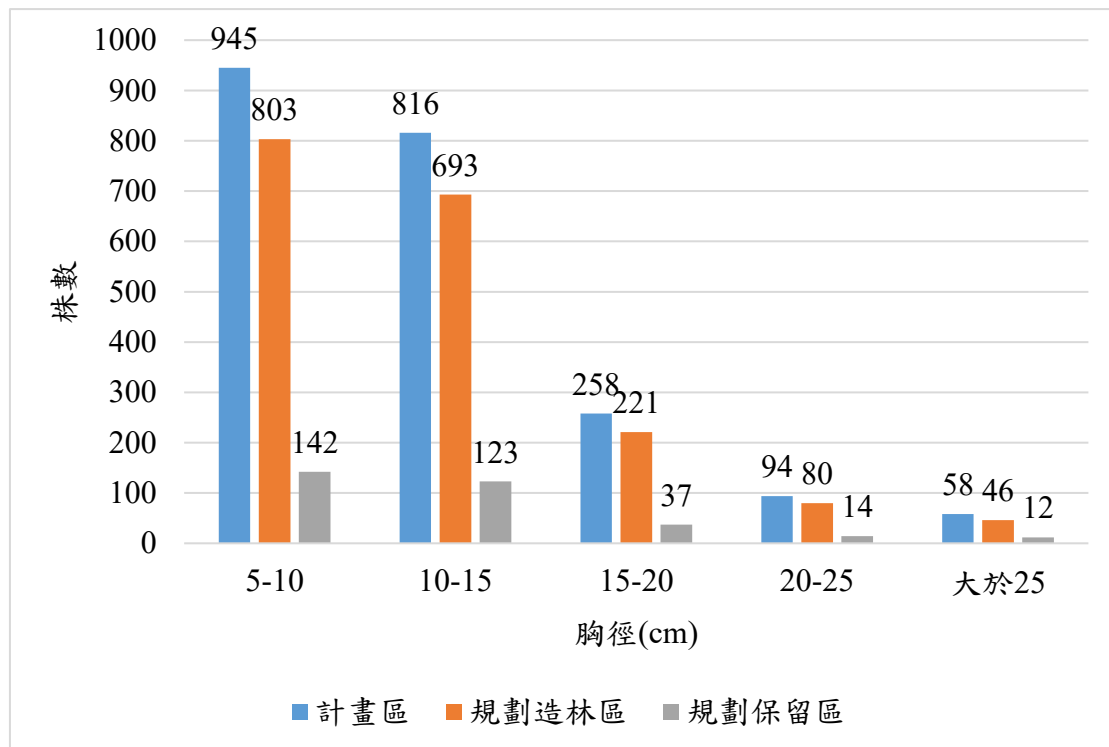


圖 8 計畫區、規劃造林區及規劃保留區之胸徑級分布情形

表 4 計畫區森林資源樣區調查表

樣區編號	樣區位置(TWD 97 坐標)		林型	平均胸徑 (cm)±平均 值標準差	平均樹高 (m)±平均 值標準差	每公頃 株數	蓄積量 (m <sup>3</sup> /ha)
1	308551	2778270	闊葉次生林	10.70±5.21	5.98±1.01	2,160	81.88
2	308529	2778360	闊葉次生林	11.58±5.89	6.03±1.30	2,200	81.40
3	308485	2778310	闊葉次生林	11.56±5.28	6.15±1.33	2,060	81.67
4	308383	2778310	草生地				
5	308424	2778350	闊葉次生林	12.21±4.94	6.58±1.12	2,400	91.77
6	308492	2778110	闊葉次生林	12.41±4.38	6.11±1.77	2,280	99.55
7	308413	2778040	闊葉次生林	10.56±5.78	6.10±1.50	1,920	80.93
8	308355	2778000	闊葉次生林	10.39±4.72	5.94±1.11	2,160	97.56
9	307974	2778340	闊葉次生林	11.52±4.93	7.90±1.57	2,220	99.21
10	307931	2778170	闊葉次生林	11.10±4.13	7.35±1.10	2,140	83.93
11*	307973	2778100	闊葉次生林	12.86±5.26	7.71±1.73	2,160	110.01
12	308125	2778060	闊葉次生林	13.08±4.32	6.74±1.23	1,880	113.11
13	308229	2778300	闊葉次生林	10.38±4.39	7.44±1.60	2,200	103.27
14	308201	2778030	闊葉次生林	12.12±4.02	5.14±1.06	2,060	86.90
15*	308374	2778130	闊葉次生林	10.91±4.90	6.16±1.49	2,300	99.71
16	308230	2778170	闊葉次生林	11.13±5.43	6.08±1.18	2,100	100.16
17	308270	2778030	闊葉次生林	13.68±5.21	7.90±1.80	2,140	111.65
18*	308103	2778150	闊葉次生林	12.47±5.65	5.41±1.75	2,100	84.62
19	308150	2778310	闊葉次生林	12.95±4.39	6.19±1.42	2,360	101.64
20	308551	2778150	闊葉次生林	11.57±5.54	7.26±1.62	2,400	118.41

註：\*為規劃保留區，其餘皆為規劃造林區

#### (四)復層林營造之規劃及成果

以小規模塊狀整理伐之更新作業方式，進行造林區之復層林營造，經現場勘查後，發現部分區域地形落差變化較大、地表石塊多、有溪溝穿越及有護坡工程等，不適宜整地造林，故經與委託單位討論後，以不違反規劃原則下，針對規劃造林區位置，進行滾動式調整(調整後之造林區位置如圖 9、表 5)。經調整後，以計畫區總面積 52.70 ha 與造林區面積 10.11 ha(含 5.03 人為經營區及 5.08 自然演替觀察區)，造林區面積占計畫區總面積的 19.18%，若依造林區立木度，表示整理強度為 16.92% (造林區胸高斷面積合計/計畫區胸高斷面積合計) $\times 100\%$ 。

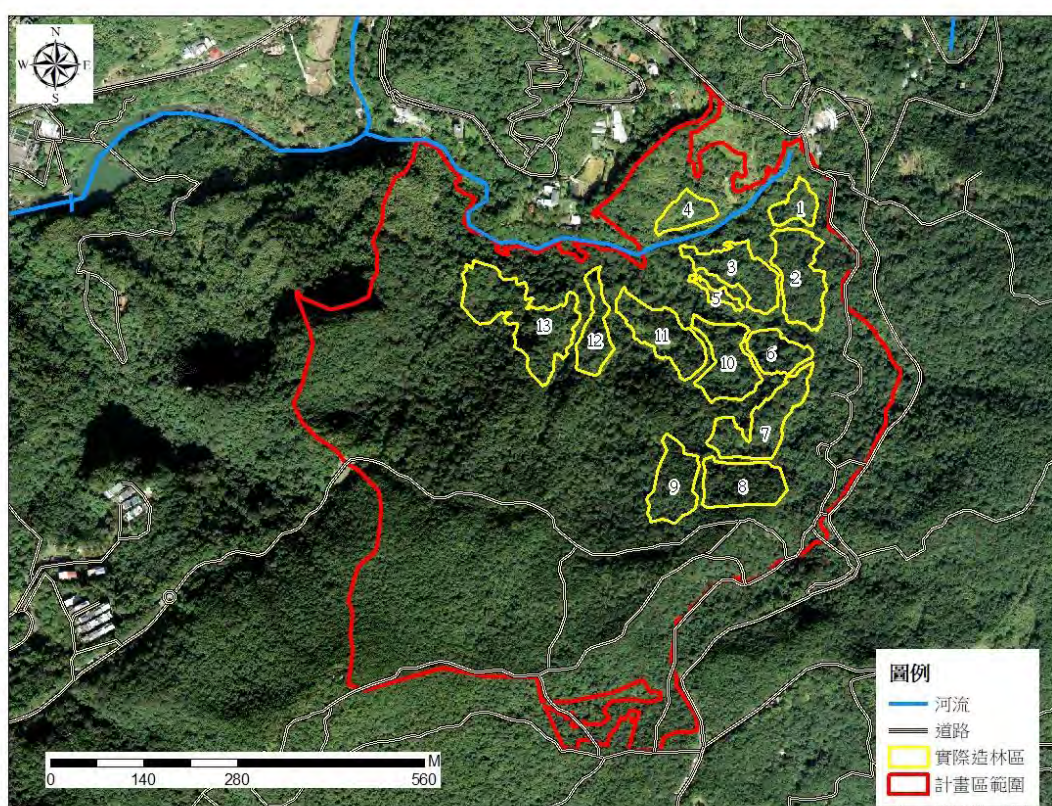


表 5 造林區編號與面積對照表

編號	分區	面積(ha)	造林區編號	面積(ha)	備註
1	實際造林區	10.11	1	0.35	自然演替觀察區
			2	1.03	自然演替觀察區
			3	0.87	自然演替觀察區
			4	0.40	人為經營區
			5	0.13	自然演替觀察區
			6	0.51	人為經營區
			7	1.03	人為經營區
			8	0.90	自然演替觀察區
			9	0.85	自然演替觀察區
			10	0.91	人為經營區
			11	0.95	人為經營區
			12	0.61	人為經營區
			13	1.57	人為經營區
小計		10.11	---	10.11	
2	規劃保留區	42.59	---	---	
合計		52.70	---	---	

#### (五)整理伐及整地作業之成果

造林區以橫坡整地方式進行作業。整理伐對象為闊葉次生林小徑木及形質不良木、被壓木及生長不良木。伐倒木以分段(1-1.5 m)處理，並堆置於保留帶，以增進造林區之水土保持功能。

##### 1.整地作業規範

(1)以橫坡整地造林為原則，但如遇空地內陡坡或殘木過多，致整地困難時，經機關及監工人員核實後，始得按地形以順坡整地造林。

(2)橫坡整地工作：依等高線每隔 2-3 m 開設橫帶，植林帶寬度 1.5 m 以上，地被植物高度不得超過 10 cm、樹頭高度不得超過 20 cm；列間帶寬度 1.5 m 以下，如整地時伐除竹木過多，無法按規定進行整地或植列內遇樹頭或岩石或保留木，無法按規定株距栽植時，得酌量增減寬度，地被植物及樹頭高度 30 cm 以下，伐除之竹、木及枝條，整齊堆放於植林帶上下側，形成保留帶寬度約 1.5 m，以增加造林區對水土保持之功能。

(3) 砍除之草、竹木須分段整齊堆置排於植林帶上下側之保留帶。

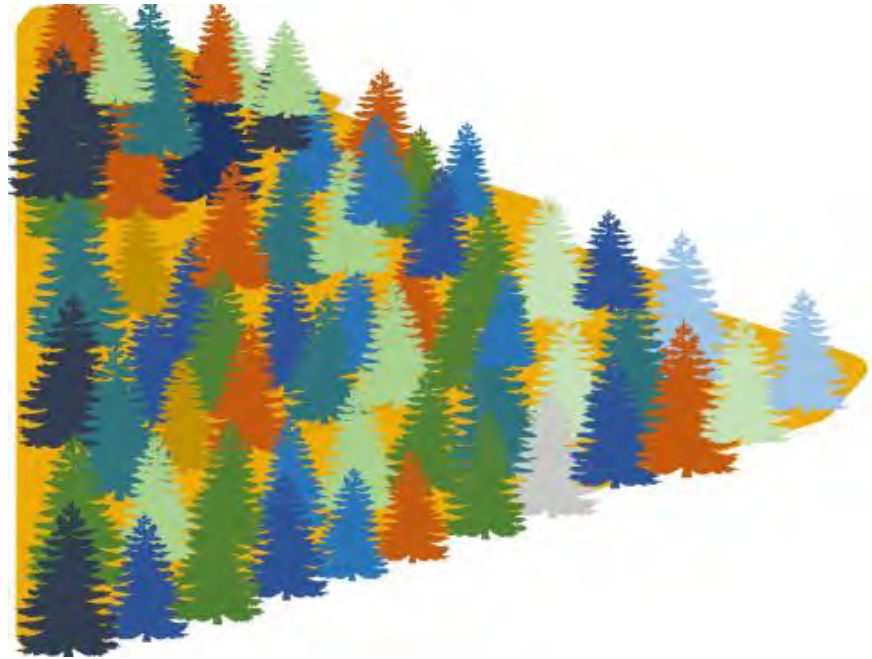


圖 10 整理伐作業前之林地現況示意圖

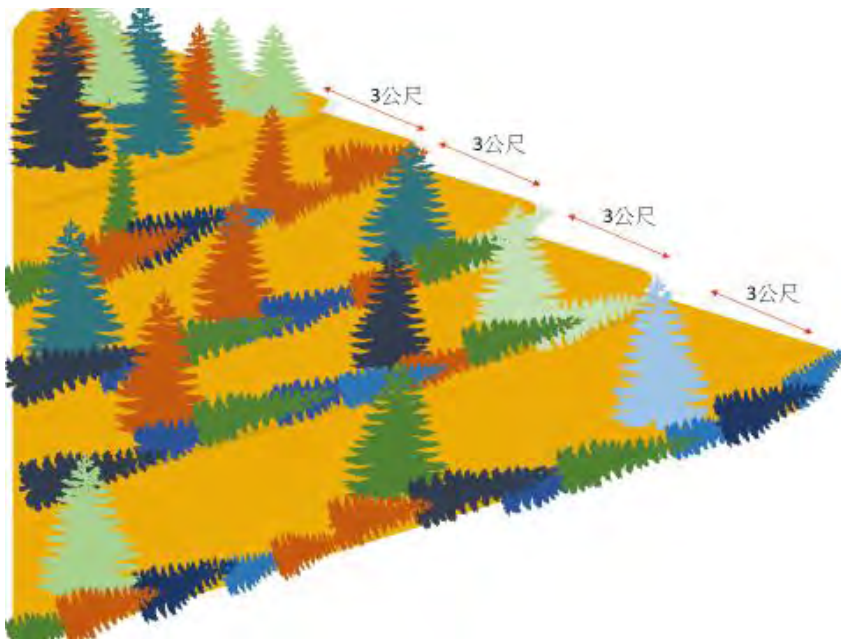


圖 11 整理伐作業後之林地現況示意圖

## 2.整理伐作業規範及程序

(1)造林區之邊界經確認後，於區內伐除形質不良木、被壓木及生長不良木，如經監工確認之珍貴稀有樹種或徑級大於 25 cm 以上者，具有保留價值之林木，不得砍除，但徑級大於 25 cm 以上，屬於斷頭或風折等不良木，則予以伐除(珍貴稀有樹種除外)。

(2)整理伐順序：自林分之下坡向嶺線方向依序整理，伐除不良木、被壓木及生長不良木。

(3)伐倒前準備：倒木方向之地表如有突起物、灌叢、根株或岩塊等障礙物時，應先清除，以免危險及倒木損傷。

(4)伐採完成後的木材不搬出利用，且殘存樹頭應低於 20 cm 以下，並將枝條及殘材分段並妥善排列整齊置放於保留帶。

## 3.整理伐及整地成果

根據本計畫之整地作業規範及整理伐作業規範，在造林區內進行伐木整地，完成 10.11 ha 的整理伐與整地作業，各造林區之整理伐前與整理伐後對照表(表 6)，整理伐前株數以每公頃株數換算，整理伐後株數於現場量測而得，造林區編號 6、11、13 為草木雜生之林地，而造林編號 6 因周遭具有較多小徑木，因此每公頃株數較編號 7 之造林地株數為多。

表 6 造林區整理伐前後對照表

造林區編號	面積(ha)	整理伐前蓄積量 (m <sup>3</sup> )	整理伐後蓄積量 (m <sup>3</sup> )	整理伐前株數	整理伐後株數
1	0.35	33.66	20.32	760	132
2	1.03	99.06	45.72	2,236	293
3	0.87	83.67	33.47	1,889	182
4	0.40	38.47	19.39	868	86
5	0.13	12.50	6.30	282	20
6*	0.51	49.05	24.38	1,107	158
7	1.03	99.06	43.63	2,236	221
8	0.90	86.56	34.62	1,954	192
9	0.85	81.75	39.70	1,845	156
10	0.91	87.52	51.65	1,976	372
11*	0.95	91.37	29.82	2,062	167
12	0.61	58.66	35.47	1,324	220
13*	1.57	151.00	91.54	3,408	570
合計	10.11	972.33	476.01	21,947	2,769

註：整理伐前蓄積量以每公頃蓄積量換算，整理伐後蓄積量係依現場取樣計算而得；整理伐前株數以每公頃株數換算，整理伐後株數以現場而得。\*該造林區多屬草本雜生地，以高莖草類伴生小徑木為主。

#### (六)造林作業及成果

##### 1.造林樹種選擇

造林樹種之選擇以適地適木之本土樹種為主，並參考 20 種臺北市坡地適生樹種推薦，本案選定之主要造林樹種以臺灣肖楠、相思樹、楓香等本土樹種。以臺灣肖楠為例，依臺灣植物誌(Flora of Taiwan)內容，臺灣肖楠分布於臺灣中北部海拔 300-1,900 m，加上北部植物因氣候北降現象，常會分布於相對更低海拔處，而各樹種特性及選擇原因(表 7)。

表 7 造林樹種生育特性及樹種選擇原因(臺灣植物誌第二版，1993)

樹種	生育特性	樹種選擇原因
臺灣肖楠	臺灣特有種為臺灣針葉樹一級木之一，為臺灣北區與中區適生樹種，其海拔分布(中北部海拔 300-1,900 m)，其材質密緻優良且生長良好，具高經濟及生態價值，且樹型優美具觀賞價值。	其生長迅速、樹幹通直及樹型優美，兼具經濟、碳吸存及景觀之功能，因此本案選擇此樹作為主要造林樹種。
相思樹	常綠喬木，分布海拔於 100 -600 m 之低、中海拔地區，其根系發達生長快速，達到水土保持之效，且為林務局造林樹種之一。	其生長快速、木材質地良好，且可有效改良土壤，可供增加碳吸存量，因此本案選擇此樹作為造林樹種，並主要栽植於土壤貧脊區域(草地)。
楓香	落葉喬木，分布於 1,500 m 以下，其根系擴張良好、生長快速，且樹型優美具觀賞價值，且為公私有林重要造林樹種之一。	其生長快速、樹型優美，可增加碳吸存量並兼具景觀，因此本案選擇此樹種作為造林樹種。

邱清安等(2021)指出臺灣原生植物超過 4 千餘種，但在都市林推廣應用原生樹種切缺乏完整資料，該研究過專家共同推薦，並配合原生樹種名錄、圖鑑等，進行 157 種臺灣都市林原生栽植樹種推薦，其中臺灣肖楠、相思樹、以及楓香均屬於 157 種推薦名單中之樹種。

## 2.造林區位置及密度

根據平地造林直接給付及種苗配撥實施要點中，平地造林樹種及每公頃栽植株數基準表指出，臺灣肖楠適生區域為臺灣北區與中區、相思樹與楓香為臺灣全區，每公頃栽植株數基準，一般農牧用地之木材利用及景觀造林其造林株數為每公頃 1,500 株，而本計畫屬小規模塊狀整理伐，造林區面積合計 10.11 ha，依合約規定造林密度為每公頃 1,000 株(不包含留存木株數)，故保有更多生長空間給予栽植林木。造林區位置及樹種配置如圖 12 及表 8。

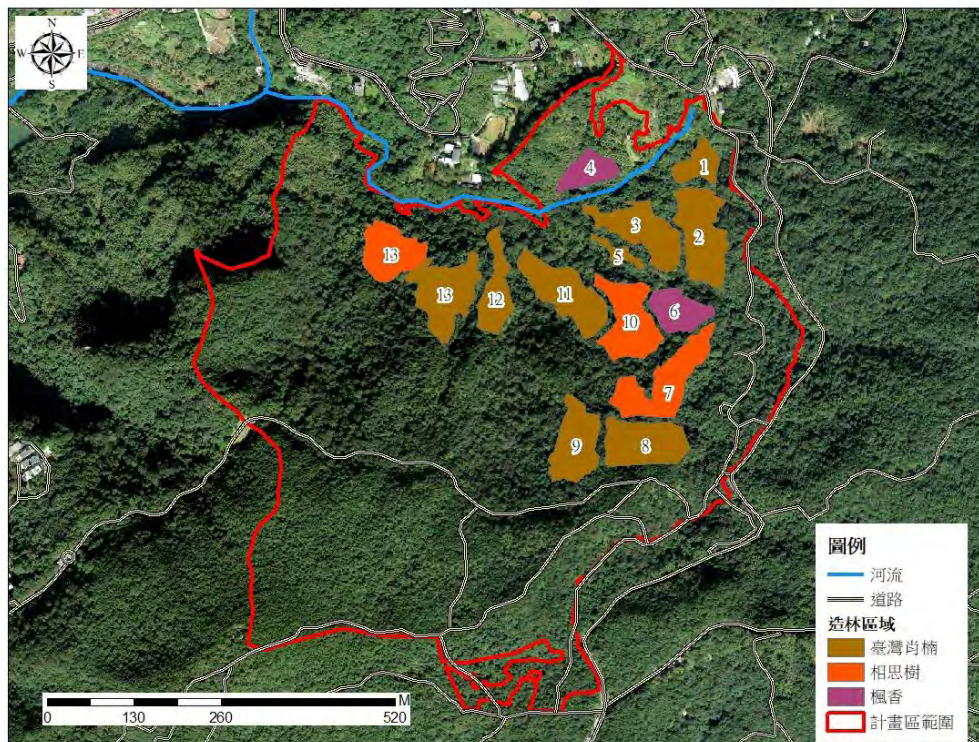


圖 12 造林區位置分布圖

表 8 造林面積、樹種及數量表

造林區編號	面積(ha)	造林樹種	造林株數(不含留存木株數)
1	0.35	臺灣肖楠	350
2	1.03	臺灣肖楠	1,030
3	0.87	臺灣肖楠	870
4	0.40	楓香	400
5	0.13	臺灣肖楠	130
6	0.51	楓香	510
7	1.03	相思樹	1,030
8	0.90	臺灣肖楠	900
9	0.85	臺灣肖楠	850
10	0.91	相思樹	910
11	0.95	臺灣肖楠	950
12	0.61	臺灣肖楠	610
13	0.89	臺灣肖楠	890
	0.68	相思樹	680
合計	10.11	臺灣肖楠 6,580 株 楓香 910 株 相思樹 2,620 株	10,110

#### 四、專案活動之 CO<sub>2</sub> 排放量、移除量及基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量之計算方法

##### (一)基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量之計算

基線(Business As Usual, BAU)為「CO<sub>2</sub> 排放基線」，實質上為「什麼都不做」，亦即完全不採取任何溫室氣體減量的情境(OECD, 2009)。本計畫之基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量(CO<sub>2</sub> net removals)計算，係以專案作業前之地面樣區調查資料，估算基線之 CO<sub>2</sub> 排放量(CO<sub>2</sub> emissions)、移除量及淨移除量，此方法參數包含地上部生物量、地下部生物量、枯死木與林產品。

基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量計算，以加州環境保護署(California Environmental Protection Agency, CEPA)空氣資源局的履約抵換計畫為例，該計畫認為基線設定，會因計畫性質而有所不同 (CEPA, 2014)。如依據經濟理論，並沒有說明設立基線的根據，基線可以因為要減少給林主給付之經濟考量而有所改變。此外若是沒有 CO<sub>2</sub> 儲存量基線的設定，執行 CO<sub>2</sub> 排放抵換計畫時，CO<sub>2</sub> 排放交易市場將會有過多的森林碳匯供給。若是 CO<sub>2</sub> 儲存量基線應用於 CO<sub>2</sub> 排放抵換計畫時，則 CO<sub>2</sub> 儲存量基線應以森林碳政策執行之前的砍伐行為為基準。柳婉郁、徐寬(2017)認為 CO<sub>2</sub> 儲存量如果基線制定能更具彈性，其可以減少一些資訊需求，進而減少政策執行的管理花費。

為符合本案可操作之方法，以全區 52.70 ha 中 10.11 ha 作為基線面積，由於計畫區過去無長期生長的監測資料，因此依據地理位置及林相較為接近之福山動態樣區複查計畫(行政院農業委員會林業試驗所, 2009)及 Elias *et al.*(2020) 的研究報告，彙整基線之年平均生長量推估值，以供為本案(式 1)基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量之估算，相關參數如表 9、表 10。

$$\Delta C_{BSL,t} = \Delta C_{BSL,tree,t} - GHG_{BSL-E,t} \text{ --- (式 1)}$$

表 9 基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量計算之參數表

參數	定義	單位
$\Delta C_{BSL,t}$	基線情境下，專案範圍內 t 年 CO <sub>2</sub> 淨移除量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$\Delta C_{BSL,tree,t}$	基線情境下，專案範圍內第 t 年之林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$GHG_{BSL-E,t}$	基線情境下，專案範圍內造成的專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量	tCO <sub>2</sub> -e/yr

1.  $\Delta C_{BSL,tree,t}$  之計算

針對式(1)中  $\Delta C_{BSL}$  進行計算，其計算式如下：

$$\Delta C_{(BSL,tree,t)} = (C_{(BSL,tree,t)} - C_{(BSL,tree,t-1)}) \text{-----} \text{(式 2)}$$

表 10  $\Delta C_{BSL,tree,t}$  參數表

參數	定義	單位
$\Delta C_{BSL,tree,t}$	基線情境下，專案範圍內第 t 年之林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$C_{BSL,tree,t}$	基線情境下，t 年林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$C_{BSL,tree,t-1}$	基線情境下，t-1 年林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 量	tCO <sub>2</sub> -e/yr

$C_{BSL,tree,t}$  之計算分為林木的地上部及地下部生物量，並以生物量擴展係數法，透過測定林木胸高直徑、樹高(Height, H)，依材積式計算單株林木樹幹材積(式 3)，後續根據 IPCC 規範的計算公式，由林分材積生長，估算生物量增加所致的碳儲存量變化。樹種的「地上部材積與生物量轉換係數(Biomass Conversion and Expansion Factors, BCEF)」、「地下部生物量與地上部生物量比例(Shoot ratio, R)」、「碳含量轉換係數(Carbon Fraction, CF)」三項參數有關，亦即將林分每公頃「樹幹材積年淨生長量」乘以[BCEF×(1+R)×CF]即能算出其每公頃每年的碳變化量。其中 BCEF 亦可以用地上部生物量擴展係數(Biomass Expansion Factor, BEF)與基礎密度(D)相乘而得(式 4)，其係數表如表 11。

$$V_{\text{一般闊葉樹}} = 0.00008626 \times D^{1.8742} \times H^{0.8671} \text{ --- (式 3)}$$

註：V：為該樹種單株樹幹材積(m<sup>3</sup>)；D為林木胸徑(cm)；H為林木樹高(m)

$$\sum_{i=1}^n C = V \times BEF \times D \times (1 + R) \times CF \text{ --- (式4)}$$

註：C：單株碳吸存量 (ton)；V：單株樹幹材積 (m<sup>3</sup>)；D為基礎密度(g/cm<sup>3</sup>) (樹幹絕乾重量/樹幹生材體積)；地上部生物量擴展係數 (BEF)；地上部材積與生物量轉換係數(BCEF)為 BEF×D；地下部生物量與地上部生物量比例(R)；CF：碳含量轉換係數。

表 11 本計畫所使用之各樹種生物量、碳吸存量推估之相關本土轉換係數(林裕仁，2008)

樹種	D	BEF	R	CF
臺灣肖楠	0.54	1.23	0.28	0.4857
楓香	0.56	1.20	0.21	0.4691
相思樹	0.77	1.24	0.24	0.4717
其他闊葉林	0.56	1,20	0.21	0.4691

註：D：基礎密度(g/cm<sup>3</sup>) (樹幹絕乾重量/樹幹生材體積)；BEF：地上部生物量擴展係數；R：地下部生物量與地上部生物量比例；CF：碳含量轉換係數

透過式 4 計算單株碳吸存量，再利用 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比，將碳含量轉換成 CO<sub>2</sub> 當量，即為 C<sub>BSL,tree,t</sub>；GHG<sub>BSL-E,t</sub> 因在基線情境下無造成碳排放即為 0。

## (二)專案排放(專案 CO<sub>2</sub> 淨移除量)

本案於計畫全區 52.7 ha 內，設置 10.11 ha 作為專案面積，並進行促進森林管理活動，其中 5.03 ha 為人為經營區及 5.08 ha 為自然觀察保留區，而實施專案後之實際 CO<sub>2</sub> 淨移除量計算如式 5，相關參數如表 12：

$$\Delta C_{P,t} = \Delta C_{P,tree,t} - C_{Cut,tree,t} - GHG_{p,t} \text{ --- (式 5)}$$

表 12  $\Delta C_{p,t}$  參數表

參數	定義	單位
$\Delta C_{p,t}$	第 t 年專案情境下碳匯實際 CO <sub>2</sub> 淨移除量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$\Delta C_{p,tree,t}$	第 t 年之對照區造林木、留存木及自然演替觀察區林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$C_{cut,tree,t}$	專案活動實施 t 年後，因施行專案活動而造成專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量(如:伐倒木之 CO <sub>2</sub> 量)	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$GHG_{p,t}$	專案活動實施 t 年後，因施行專案而造成專案邊界內的 CO <sub>2</sub> 排放量(如：汽油燃燒)	tCO <sub>2</sub> -e/yr

### 1. $C_{p,tree,t}$ 之計算

$C_{p,tree,t}$  之計算，主要分為對照區造林木的生長量、留存木及自然演替觀察區林木的地上部與地下部生物量。造林木之生長量計算，係藉由各造林樹種生長收穫模式的研究文獻蒐集，取得以林齡為獨立變數的林分單位蓄積量推估模式，進行臺灣肖楠、楓香及相思樹造林木在不同林齡情境下之生長量估算。而留存木及保留區林木之地上部及地下部生物量估算，係以 Fantini *et al.* (2019) 對於未經營次生林 (Unmanaged secondary forest) 與經營次生林 (Managed secondary forest) 的生長量比較研究，作為參考依據，並按留存比例進行估算。

### 2. $C_{cut,tree,t}$ 之計算

$C_{cut,tree,t}$  之計算係以(式 3)進行伐倒木蓄積量推估，並以表 11 之其他闊葉林生物量轉換係數為依據，推估伐倒木的生物量。由於本案之伐倒木置放於專案邊界內，不搬出利用，因此伐倒木所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量，將延遲分年於專案邊界內釋放，本案將參考 Martin *et al.* (2021) 及 Seibold *et al.* (2021) 研究的數據，進行伐倒木 CO<sub>2</sub> 排放量之年度推估。Martin *et al.* (2021) 提出伐倒木置放於林間之生物量轉換為 CO<sub>2</sub> 排放量之轉換係數為 0.485，而 Seibold *et al.* (2021) 針對闊葉樹林伐倒木，置放於林間之 CO<sub>2</sub> 排放量速率進行研究，發現 CO<sub>2</sub> 排放量將以每年 15% 的速率逐年遞減。

### 3. $GHG_{p,t}$ 之計算

為施行專案而造成專案邊界內的 CO<sub>2</sub> 排放，係指營造複層林伐木、造林及刈草撫育所使用之油料量，計算基準以環境保護署公告之「固定源與移動源(燃料)CO<sub>2</sub> 排放係數」(溫室氣體排放係數管理表 6.0.4 版)作為依據，1 L 汽油燃燒產生 2.26 Kg CO<sub>2</sub> 計算之，相關油耗於各項作業時紀錄之。

#### (三) CO<sub>2</sub> 洩漏排放計算

CO<sub>2</sub> 洩漏係指實施溫室氣體管制，可能導致產業外移至其他碳管制較為寬鬆國家，反而增加全球排碳量之情況。本案為促進森林經營管理活動(如：林相改良、整理伐、造林)，不會產生潛在的 CO<sub>2</sub> 洩漏，因此在本案之 CO<sub>2</sub> 洩漏為 0。

#### (四) CO<sub>2</sub> 淨值計算

$$\Delta C_{FM,t} = \Delta C_{p,t} - \Delta C_{BSL,t} - LK \text{ ----- (式 6)}$$

改善森林經營管理活動的 CO<sub>2</sub> 量總淨值( $\Delta C_{FM,t}$ )是根據專案活動下改善森林經營管理活動後產生的 CO<sub>2</sub> 變化量( $\Delta C_{p,t}$ )減去基線情境中的林木的地上部、地下部 CO<sub>2</sub> 變化量( $\Delta C_{BSL,t}$ )及可能發生的任何潛在洩漏量(LK)的結果而計算。

表 13  $\Delta C_{FM,t}$  參數表

參數	定義	單位
$\Delta C_{FM,t}$	第 t 年(專案活動實施 t 年後)之 CO <sub>2</sub> 淨移除量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$\Delta C_{p,t}$	第 t 年之專案情境下實際 CO <sub>2</sub> 淨移除量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
$\Delta C_{BSL,t}$	第 t 年之基線情境下 CO <sub>2</sub> 淨移除量	tCO <sub>2</sub> -e/yr
LK	第 t 年，因專案導致於專案邊界外碳洩漏	tCO <sub>2</sub> -e/yr

## 五、碳中和之計算結果

### (一)基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量

依基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量計算方式(式 1)，可得知在專案作業前 CO<sub>2</sub> 變化量，依據林務局福山動態樣區複查計畫，臺灣東北部低海拔闊葉林所設置之 25 ha 動態樣區，其每年的胸高斷面積之生長率為 4.28%(行政院農業委員會林業試驗所，2009)，以胸高斷面積之生長率為 4.28%，利用本案所調查之樣區，估算基線年平均生長量約為 0.5-3.91 m<sup>3</sup>/ha。而透過 Elias *et al.*(2020)所彙整之次生林年平均生長量，如圖 13，若為 20 年以下之次生林為 2.9-4.1 m<sup>3</sup>/ha 不等(Bonner *et al.*, 2013; Poorter *et al.*, 2016; Requena Suarez *et al.*, 2019)，若大於 20 年則為 1.2-2.6 m<sup>3</sup>/ha 不等(Bonner *et al.*, 2013; Requena Suarez *et al.*, 2019)，老熟林更低於 0.5 m<sup>3</sup>/ha(Brienen *et al.*, 2015; Requena Suarez *et al.*, 2019)。由國內外相關文獻研究所得之次生林年生長量數據，設計四種情境進行基線 CO<sub>2</sub> 淨移除量計算，包括 1.情境(一)年平均生長量為 0.5 m<sup>3</sup>/ha、2.情境(二)年平均生長量為 1 m<sup>3</sup>/ha、3.情境(三)年平均生長量為 2 m<sup>3</sup>/ha、以及 4.情境(四)年平均生長量為 2.5 m<sup>3</sup>/ha 等四種。而因在基線情境下無造成碳排放即為 0，結果如表 14-17 所示。

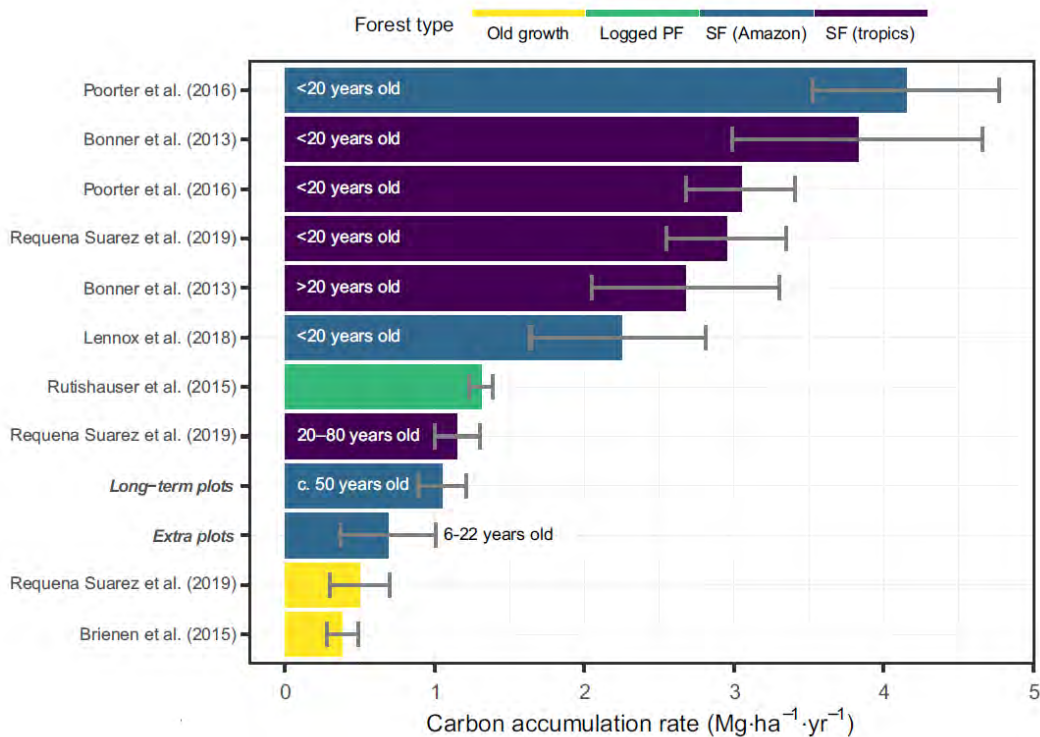


圖 13 不同森林類型不同林齡之碳累積速率圖(Elias *et al.*, 2020)

表 14 基線(情境一)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO<sub>2</sub> 變化量表

專案年分 (t)	基線面積 (ha)	平均年生長量 (m <sup>3</sup> /ha/year)	生長量 (m <sup>3</sup> )	碳儲存量 (ton)	基線 CO <sub>2</sub> 量* (C <sub>BSL,tree,t</sub> )( tCO <sub>2</sub> -e )
1	10.11	0.5	5.06	1.93	7.07(0.70 /ha)
2			10.11	3.86	14.14(1.40 /ha)
3			15.17	5.78	21.21(2.10 /ha)
4			20.22	7.71	28.28(2.80 /ha)
5			25.28	9.64	35.35(3.50 /ha)
6			30.33	11.57	42.42(4.20 /ha)
7			35.39	13.50	49.49(4.90 /ha)
8			40.44	15.43	56.56(5.59 /ha)
9			45.50	17.35	63.63(6.29 /ha)
10			50.55	19.28	70.70(6.99 /ha)
11			55.61	21.21	77.77(7.69 /ha)
12			60.66	23.14	84.84(8.39 /ha)
13			65.72	25.07	91.91(9.09 /ha)
14			70.77	26.99	98.98(9.79 /ha)
15			75.83	28.92	106.05(10.49 /ha)
16			80.88	30.85	113.12(11.19 /ha)
17			85.94	32.78	120.19(11.89 /ha)
18			90.99	34.71	127.26(12.59 /ha)
19			96.05	36.63	134.33(13.29 /ha)
20			101.10	38.56	141.40(13.99 /ha)
21			106.16	40.49	148.47(14.69 /ha)
22			111.21	42.42	155.54(15.38 /ha)
23			116.27	44.35	162.61(16.08 /ha)
24			121.32	46.28	169.68(16.78 /ha)
25			126.38	48.20	176.75(17.48 /ha)

註: \*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

表 15 基線(情境二)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO<sub>2</sub> 變化量表

專案年分(t)	基線面積(ha)	平均年生長量(m <sup>3</sup> /ha/year)	生長量(m <sup>3</sup> )	碳儲存量(ton)	基線 CO <sub>2</sub> 量* (C <sub>BSL,tree,t</sub> )( tCO <sub>2</sub> -e )
1	10.11	1	10.11	3.86	14.14(1.40 /ha)
2			20.22	7.71	28.28(2.80 /ha)
3			30.33	11.57	42.42(4.20 /ha)
4			40.44	15.43	56.56(5.59 /ha)
5			50.55	19.28	70.7(6.99 /ha)
6			60.66	23.14	84.84(8.39 /ha)
7			70.77	26.99	98.98(9.79 /ha)
8			80.88	30.85	113.12(11.19 /ha)
9			90.99	34.71	127.26(12.59 /ha)
10			101.10	38.56	141.4(13.99 /ha)
11			111.21	42.42	155.54(15.38 /ha)
12			121.32	46.28	169.68(16.78 /ha)
13			131.43	50.13	183.82(18.18 /ha)
14			141.54	53.99	197.96(19.58 /ha)
15			151.65	57.84	212.1(20.98 /ha)
16			161.76	61.70	226.24(22.38 /ha)
17			171.87	65.56	240.38(23.78 /ha)
18			181.98	69.41	254.52(25.17 /ha)
19			192.09	73.27	268.66(26.57 /ha)
20			202.20	77.13	282.8(27.97 /ha)
21			212.31	80.98	296.94(29.37 /ha)
22			222.42	84.84	311.08(30.77 /ha)
23			232.53	88.69	325.21(32.17 /ha)
24			242.64	92.55	339.35(33.57 /ha)
25			252.75	96.41	353.49(34.96 /ha)

註: \*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

表 16 基線(情境三)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO<sub>2</sub> 變化量表

專案年分(t)	基線面積(ha)	平均年生長量(m <sup>3</sup> /ha/year)	生長量(m <sup>3</sup> )	碳儲存量(ton)	基線 CO <sub>2</sub> 量* (C <sub>BSL,tree,t</sub> )(tCO <sub>2</sub> -e)
1	10.11	2	20.22	7.71	28.28(2.80 /ha)
2			40.44	15.43	56.56(5.59 /ha)
3			60.66	23.14	84.84(8.39 /ha)
4			80.88	30.85	113.12(11.19 /ha)
5			101.10	38.56	141.4(13.99 /ha)
6			121.32	46.28	169.68(16.78 /ha)
7			141.54	53.99	197.96(19.58 /ha)
8			161.76	61.70	226.24(22.38 /ha)
9			181.98	69.41	254.52(25.17 /ha)
10			202.20	77.13	282.8(27.97 /ha)
11			222.42	84.84	311.08(30.77 /ha)
12			242.64	92.55	339.35(33.57 /ha)
13			262.86	100.26	367.63(36.36 /ha)
14			283.08	107.98	395.91(39.16 /ha)
15			303.30	115.69	424.19(41.96 /ha)
16			323.52	123.40	452.47(44.75 /ha)
17			343.74	131.11	480.75(47.55 /ha)
18			363.96	138.83	509.03(50.35 /ha)
19			384.18	146.54	537.31(53.15 /ha)
20			404.40	154.25	565.59(55.94 /ha)
21			424.62	161.96	593.87(58.74 /ha)
22			444.84	169.68	622.15(61.54 /ha)
23			465.06	177.39	650.43(64.34 /ha)
24			485.28	185.10	678.71(67.13 /ha)
25			505.50	192.82	706.99(69.93 /ha)

註: \*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

表 17 基線(情境四)之各專案年林木生長量、碳儲存量及基線 CO<sub>2</sub> 變化量表

專案年分(t)	基線面積 (ha)	平均年生長量 (m <sup>3</sup> /ha/year)	生長量 (m <sup>3</sup> )	碳儲存量 (ton)	基線 CO <sub>2</sub> 量* (C <sub>BSL,tree,t</sub> ) (tCO <sub>2</sub> -e)
1	10.11	2.5	25.28	9.64	35.35(3.50 /ha)
2			50.55	19.28	70.7(6.99 /ha)
3			75.83	28.92	106.05(10.49 /ha)
4			101.10	38.56	141.4(13.99 /ha)
5			126.38	48.20	176.75(17.48 /ha)
6			151.65	57.84	212.1(20.98 /ha)
7			176.93	67.49	247.45(24.48 /ha)
8			202.20	77.13	282.8(27.97 /ha)
9			227.48	86.77	318.15(31.47 /ha)
10			252.75	96.41	353.49(34.96 /ha)
11			278.03	106.05	388.84(38.46 /ha)
12			303.30	115.69	424.19(41.96 /ha)
13			328.58	125.33	459.54(45.45 /ha)
14			353.85	134.97	494.89(48.95 /ha)
15			379.13	144.61	530.24(52.45 /ha)
16			404.40	154.25	565.59(55.94 /ha)
17			429.68	163.89	600.94(59.44 /ha)
18			454.95	173.53	636.29(62.94 /ha)
19			480.23	183.17	671.64(66.43 /ha)
20			505.50	192.82	706.99(69.93 /ha)
21			530.78	202.46	742.34(73.43 /ha)
22			556.05	212.10	777.69(76.92 /ha)
23			581.33	221.74	813.04(80.42 /ha)
24			606.60	231.38	848.39(83.92 /ha)
25			631.88	241.02	883.74(87.41 /ha)

註: \*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

## (二)專案活動之 CO<sub>2</sub> 排放量

本計畫以 10.11 ha 作為專案面積，進行改善森林經營活動，其專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量估算，包括對照區留存木、造林木及自然演替觀察區林木之 CO<sub>2</sub> 變化量 ( $C_{P,tree,t}$ )、伐倒木之 CO<sub>2</sub> 排放量 ( $C_{Cut,tree,t}$ ) 及實施專案所產生之 CO<sub>2</sub> 量 ( $GHG_{p,t}$ )，並計算專案情境下之 CO<sub>2</sub> 淨移除量 ( $\Delta C_{p,t}$ )。

### 1. 對照區留存木、造林木及自然演替觀察區林木之 CO<sub>2</sub> 變化量 ( $C_{P,tree,t}$ )

#### (1) 留存木

本計畫留存木 CO<sub>2</sub> 變化量係參考臺灣東北部低海拔闊葉林所設置之 25 ha 動態樣區之複查資料(林務局，2019)及 Fantini *et al.* (2019) 針對次生林之經營與未經營之林木生長量比較研究，推估經營的次生林，其平均生長量約為 3.7 m<sup>3</sup>/ha/year，本專案活動留存木之材積比例約為 49%，留存木以專案面積 10.11 ha 之 49% 計算平均生長量，其平均年生長量約為 17.96 m<sup>3</sup>/year，再轉換成 CO<sub>2</sub> 量，如表 18 所示。

表 18 留存木各專案年分之生長量、碳儲存量及 CO<sub>2</sub> 儲存量表

專案年分 (t)	留存木生長量 (m <sup>3</sup> )	留存木碳儲存量 (ton)	留存木 CO <sub>2</sub> 儲存量* ( tCO <sub>2</sub> -e )
1	8.93	3.41	12.49(1.24 /ha)
2	17.87	6.81	24.99(2.47 /ha)
3	26.80	10.22	37.48(3.71 /ha)
4	35.73	13.63	49.98(4.94 /ha)
5	44.67	17.04	62.47(6.18 /ha)
6	53.60	20.44	74.96(7.41 /ha)
7	62.53	23.85	87.46(8.65 /ha)
8	71.47	27.26	99.95(9.89 /ha)
9	80.40	30.67	112.45(11.12 /ha)
10	89.33	34.07	124.94(12.36 /ha)
11	98.27	37.48	137.43(13.59 /ha)
12	107.20	40.89	149.93(14.83 /ha)
13	116.13	44.30	162.42(16.07 /ha)
14	125.07	47.70	174.92(17.30 /ha)
15	134.00	51.11	187.41(18.54 /ha)
16	142.93	54.52	199.90(19.77 /ha)
17	151.87	57.93	212.40(21.01 /ha)
18	160.80	61.33	224.89(22.24 /ha)
19	169.73	64.74	237.39(23.48 /ha)
20	178.67	68.15	249.88(24.72 /ha)
21	187.60	71.56	262.37(25.95 /ha)
22	196.53	74.96	274.87(27.19 /ha)
23	205.47	78.37	287.36(28.42 /ha)
24	214.40	81.78	299.86(29.66 /ha)
25	223.33	85.19	312.35(30.90 /ha)

註: \*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

## (2) 臺灣肖楠

臺灣肖楠造林木之生長量估算，係參考劉宣誠、吳萬益(1986)針對蓮華池地區臺灣肖楠造林木之生長研究中，以樹幹解析研究所得之生長資料，本計畫加以整理，並建構以林齡為基礎之蓄積量推估模式(式 7)，並依據臺灣肖楠之造林面積(1.50 ha)，計算不同林齡之蓄積量，並依該樹種之生物量及碳量之轉換係數估算 CO<sub>2</sub> 儲存量，如表 19。

$$V = -30.19 + 5.5772A + 0.2917A^2 \text{ --- (式 7)}$$

註：V 為每公頃材積(m<sup>3</sup>/ha)，A 為林齡(year)。

表 19 臺灣肖楠各專案年分之材積、碳儲存量、CO<sub>2</sub> 儲存量表

專案年分(t)	專案面積(ha)	材積(m <sup>3</sup> )	碳儲存量(ton)	CO <sub>2</sub> 儲存量(tCO <sub>2</sub> -e)**
1-4*	1.50	---	---	---
5		7.34	11.11	11.11(7.41 /ha)
6		20.49	31.03	31.03(20.68 /ha)
7		34.52	52.27	52.27(34.85 /ha)
8		49.43	74.84	74.84(49.90 /ha)
9		65.22	98.75	98.75(65.83 /ha)
10		81.88	123.97	123.97(82.65 /ha)
11		99.42	150.53	150.53(100.35 /ha)
12		117.84	178.41	178.41(118.94 /ha)
13		137.13	207.63	207.63(138.42 /ha)
14		157.30	238.16	238.16(158.78 /ha)
15		178.35	270.03	270.03(180.02 /ha)
16		200.27	303.23	303.23(202.15 /ha)
17		223.07	337.75	337.75(225.17 /ha)
18		246.75	373.60	373.60(249.07 /ha)
19		271.30	410.78	410.78(273.85 /ha)
20		296.74	449.28	449.28(299.52 /ha)
21		323.04	489.11	489.11(326.08 /ha)
22		350.23	530.28	530.28(353.52 /ha)
23		378.29	572.76	572.76(381.84 /ha)
24		407.23	616.58	616.58(411.05 /ha)
25	437.05	661.72	661.72(441.15 /ha)	

註：\*幼樹(1~4 年生)林木測計精度較難掌握，易造成估計上之誤差，不宜估算。

\*\*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

### (3) 楓香

本計畫楓香生長量係參考鄭欽龍(2009)國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃，以報告中針對楓香所建立之公式，並加以整理並建構以林齡推估材積之迴歸方程式(式 8)，並依據楓香之造林面積(0.91 ha)，計算不同林齡之蓄積量，並依該樹種之生物量及碳量之轉換係數，估算 CO<sub>2</sub> 儲存量，如表 20。

$$V = 52.427 + 4.9119A + 0.0442A^2 \text{ --- (式 8)}$$

註：V 為每公頃材積(m<sup>3</sup>/ha)，A 為林齡(year)。

表 20 楓香各專案年分之材積、碳儲存量、CO<sub>2</sub> 儲存量表

專案年分(t)	面積(ha)	材積(m <sup>3</sup> )	碳儲存量(ton)	CO <sub>2</sub> 儲存量(tCO <sub>2</sub> -e)**
1-4*	0.91	---	---	---
5		71.06	27.11	99.39(109.22 /ha)
6		75.98	28.98	106.26(116.77 /ha)
7		80.97	30.88	113.24(124.44 /ha)
8		86.04	32.82	120.34(132.24 /ha)
9		91.20	34.78	127.54(140.16 /ha)
10		96.43	36.78	134.87(148.20 /ha)
11		101.74	38.81	142.30(156.37 /ha)
12		107.14	40.87	149.84(164.66 /ha)
13		112.61	42.95	157.50(173.08 /ha)
14		118.17	45.07	165.27(181.62 /ha)
15		123.81	47.22	173.15(190.28 /ha)
16		129.52	49.40	181.15(199.07 /ha)
17		135.32	51.62	189.26(207.98 /ha)
18		141.20	53.86	197.48(217.01 /ha)
19		147.16	56.13	205.81(226.17 /ha)
20		153.19	58.43	214.26(235.45 /ha)
21		159.31	60.77	222.81(244.85 /ha)
22		165.51	63.13	231.48(254.38 /ha)
23		171.79	65.53	240.27(264.03 /ha)
24		178.15	67.95	249.16(273.81 /ha)
25		184.59	70.41	258.17(283.70 /ha)

註：\*幼樹(1~4 年生)林木測計精度較難掌握，易造成估計上之誤差，不宜估算。

\*\*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

#### (4)相思樹

相思樹之生長量推估，係參考鄭欽龍(2009)國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃，以報告中針對楓香所建立之生長模式，本計畫加以整理，並建構以林齡為基礎之蓄積量推估模式(式 9)，並依相思樹之造林面積(2.62 ha)，估算不同林齡之蓄積量，並依該樹種之生物量及碳量之轉換係數，估算 CO<sub>2</sub> 儲存量，如表 21。

$$V = -17.515 + 6.5991A + 0.1549A^2 \text{ --- (式 9)}$$

註：V 為每公頃材積(m<sup>3</sup>)，A 為林齡(year)。

表 21 相思樹各專案年分之材積、碳儲存量、CO<sub>2</sub> 儲存量表

專案年分(t)	專案面積(ha)	專案材積(m <sup>3</sup> )	專案碳儲存量(ton)	專案 CO <sub>2</sub> 儲存量(tCO <sub>2</sub> -e)**
1-4*	2.62	---	---	---
5		50.70	28.32	103.83(39.63 /ha)
6		72.46	40.47	148.38(56.63 /ha)
7		95.02	53.07	194.58(74.27 /ha)
8		118.40	66.12	242.45(92.54 /ha)
9		142.59	79.63	291.99(111.44 /ha)
10		167.59	93.59	343.18(130.98 /ha)
11		193.40	108.01	396.04(151.16 /ha)
12		220.03	122.88	450.55(171.97 /ha)
13		247.46	138.20	506.74(193.41 /ha)
14		275.71	153.98	564.58(215.49 /ha)
15		304.77	170.20	624.08(238.20 /ha)
16		334.64	186.89	685.25(261.55 /ha)
17		365.32	204.02	748.08(285.53 /ha)
18		396.82	221.61	812.57(310.14 /ha)
19		429.12	239.65	878.72(335.39 /ha)
20		462.24	258.15	946.54(361.27 /ha)
21		496.17	277.09	1,016.01(387.79 /ha)
22		530.91	296.50	1,087.15(414.94 /ha)
23		566.46	316.35	1,159.96(442.73 /ha)
24		602.82	336.66	1,234.42(471.15 /ha)
25		640.00	357.42	1,310.54(500.21 /ha)

註：\*幼樹(1~4 年生)林木測計精度較難掌握，易造成估計上之誤差，不宜估算。

\*\*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

(5)自然演替觀察區林木

本計畫自然演替觀察區林木 CO<sub>2</sub> 變化量係參考 Fantini *et al.* (2019)針對次生林之經營與未經營之林木生長量比較研究，推估經伐採後未進行人工經營之區域林木生長量，其平均生長量約為 2.4 m<sup>3</sup>/ha/year，本專案活動以保留區面積為 5.08 ha 計算其平均生長量，其平均年生長量約為 12.19 m<sup>3</sup>/year，再轉換成 CO<sub>2</sub> 量，如表 22 所示。

表 22 保留區蓄積量、碳儲存量及 CO<sub>2</sub> 排放量表

專案年分(t)	保留區生長量(m <sup>3</sup> )	保留區碳儲存量(ton)	保留區 CO <sub>2</sub> 儲存量*( tCO <sub>2</sub> -e )
1	12.19	4.65	17.05(1.69 /ha)
2	24.38	9.30	34.10(3.37 /ha)
3	36.58	13.95	51.15(5.06 /ha)
4	48.77	18.60	68.21(6.75 /ha)
5	60.96	23.25	85.26(8.43 /ha)
6	73.15	27.90	102.31(10.12 /ha)
7	85.34	32.55	119.36(11.81 /ha)
8	97.54	37.20	136.41(13.49 /ha)
9	109.73	41.85	153.46(15.18 /ha)
10	121.92	46.50	170.52(16.87 /ha)
11	134.11	51.15	187.57(18.55 /ha)
12	146.30	55.81	204.62(20.24 /ha)
13	158.50	60.46	221.67(21.93 /ha)
14	170.69	65.11	238.72(23.61 /ha)
15	182.88	69.76	255.77(25.30 /ha)
16	195.07	74.41	272.83(26.99 /ha)
17	207.26	79.06	289.88(28.67 /ha)
18	219.46	83.71	306.93(30.36 /ha)
19	231.65	88.36	323.98(32.05 /ha)
20	243.84	93.01	341.03(33.73 /ha)
21	256.03	97.66	358.08(35.42 /ha)
22	268.22	102.31	375.14(37.11 /ha)
23	280.42	106.96	392.19(38.79 /ha)
24	292.61	111.61	409.24(40.48 /ha)
25	304.80	116.26	426.29(42.17 /ha)

註: \*以 CO<sub>2</sub> 與碳的分子量(44/12)比轉換碳含量為 CO<sub>2</sub> 量

## 2. 伐倒木之 CO<sub>2</sub> 排放量( $C_{Cut,tree,t}$ )

伐倒木之 CO<sub>2</sub> 排放量，係依據整理伐前後之蓄積量，計算伐倒木蓄積量，生物量轉換係數係以表 11 之其他闊葉林為依據，本案因伐倒木放置於專案邊界不搬出利用，未來將逐年腐朽釋放 CO<sub>2</sub>，且會有部分木質殘留於土壤中，而參考 Martin *et al.*(2021)針對闊葉林林木置放於林間之碳轉換係數，可依生物量乘以 0.485 為伐倒木之 CO<sub>2</sub> 總排放量( $C_{Cut,tree,t}$ )，其結果如表 23。

表 23 伐倒木蓄積量、碳儲存量及 CO<sub>2</sub> 排放量表

造林區編號	面積(ha)	整理伐前蓄積量(m <sup>3</sup> )	整理伐後蓄積量(m <sup>3</sup> )	伐倒木蓄積量(m <sup>3</sup> )	伐倒木 CO <sub>2</sub> 排放量( $C_{Cut,tree,t}$ )(tCO <sub>2</sub> -e)
1	0.35	33.66	20.32	13.34	6.47(18.49 /ha)
2	1.03	99.06	45.72	53.34	25.87(25.12 /ha)
3	0.87	83.67	33.47	50.20	24.35(27.99 /ha)
4	0.40	38.47	19.39	19.08	9.25(23.13 /ha)
5	0.13	12.50	6.30	6.20	3.01(23.13 /ha)
6	0.51	49.05	24.38	24.67	11.96(23.46 /ha)
7	1.03	99.06	43.63	55.43	26.88(26.10 /ha)
8	0.90	86.56	34.62	51.94	25.19(27.99 /ha)
9	0.85	81.75	39.70	42.05	20.39(23.99 /ha)
10	0.91	87.52	51.65	35.87	17.40(19.12 /ha)
11	0.95	91.37	29.82	61.55	29.85(31.42 /ha)
12	0.61	58.66	35.47	23.19	11.25(18.44 /ha)
13	1.57	151.00	91.54	59.46	28.84(18.37 /ha)
合計	10.11	972.33	476.01	496.32	240.72(23.81 /ha)

表 23 所估算之伐倒木之 CO<sub>2</sub> 總排放量( $C_{Cut,tree,t}$ )，依據 Seibold *et al.*, (2021) 針對闊葉樹伐倒木置放於林間，腐朽釋放 CO<sub>2</sub> 之速率為每年 CO<sub>2</sub> 總排放量( $C_{Cut,tree,t}$ ) 的 15%，並逐年遞減。

### 3. 專案活動所產生之 CO<sub>2</sub> 量( $GHG_{p,t}$ )

專案活動所造成之專案邊界內的 CO<sub>2</sub> 排放量之計算，係根據營造複層林期間及未來造林區刈草撫育作業所使用之油料量，專案活動包括整地、整理伐及造林作業，作業期間記錄每日所消耗之油料，並轉化為公頃消耗油料量，統計結果為每公頃需消耗油料 110 L，而未來造林區刈草作業預計每公頃之消耗油量為每公頃 25 L，汽油燃燒計算基準以 1 L 產生 2.26 Kg CO<sub>2</sub> 計算之，結果如表 24、表 25。

表 24 專案活動之油耗量及所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量表

造林區編號	面積(ha)	油耗量(L)	實施專案所產生之 CO <sub>2</sub> 量 ( $GHG_{p,t}$ )( tCO <sub>2</sub> -e )
1	0.35	38.50	0.09
2	1.03	113.30	0.26
3	0.87	95.70	0.22
4	0.40	44.00	0.10
5	0.13	14.30	0.03
6	0.51	56.10	0.13
7	1.03	113.30	0.26
8	0.90	99.00	0.22
9	0.85	93.50	0.21
10	0.91	100.10	0.23
11	0.95	104.50	0.24
12	0.61	67.10	0.15
13	1.57	172.70	0.39
合計	10.11	1,112.10	2.51

表 25 未來專案活動之油耗量及所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量表

專案年分 (t)	撫育次數	面積(ha)	每公頃油耗(L)	所產生 CO <sub>2</sub> 量 (tCO <sub>2</sub> -e)
1	1	5.03	25	0.28
2	3			0.85
3	2			0.57
4	2			0.57
5	1			0.28
6	1			0.28
總計				2.84

註：依據林務局刈草作業標準前六年次數為 3 次、3 次、2 次、2 次、1 次、1 次，但本計畫因特殊情況導致第一年無法符合 3 次標準，以實際可操作之次數計算。

### (三) 洩漏排放計算

本案無潛在的碳洩漏，CO<sub>2</sub> 洩漏量視為 0。

### (四) CO<sub>2</sub> 總淨值( $\Delta C_{FM,t}$ )量之估算

以改善森林經營管理之專案活動，其 CO<sub>2</sub> 總淨值( $\Delta C_{FM,t}$ ) 是根據專案活動後，所產生的 CO<sub>2</sub> 變化量( $\Delta C_{P,tree,t}$ ) 減去基線情境中的林木的地上部、地下部 CO<sub>2</sub> 儲存量( $\Delta C_{BSL,tree,t}$ ) 及可能發生的任何潛在洩漏量(LK)為基礎，進行估算。為分析本案對於抵銷北美館辦理此展覽活動，所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量及專案活動中所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量，依據四種不同基線情境，估算專案活動後 25 年間該專案之 CO<sub>2</sub> 變化量，其結果分述如下：

1.情境一(基線平均生長量 0.5 m<sup>3</sup>/ha/year)

情境一為基線平均生長量以 0.5 m<sup>3</sup>/ha/year 作為依據，估算透過專案活動(改善森林經營計畫)於 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，如圖 14，其結果於第 25 年可增加 2,396.05 ton CO<sub>2</sub> 吸收量，各年變化量如表 26，且於第 10 年可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量。

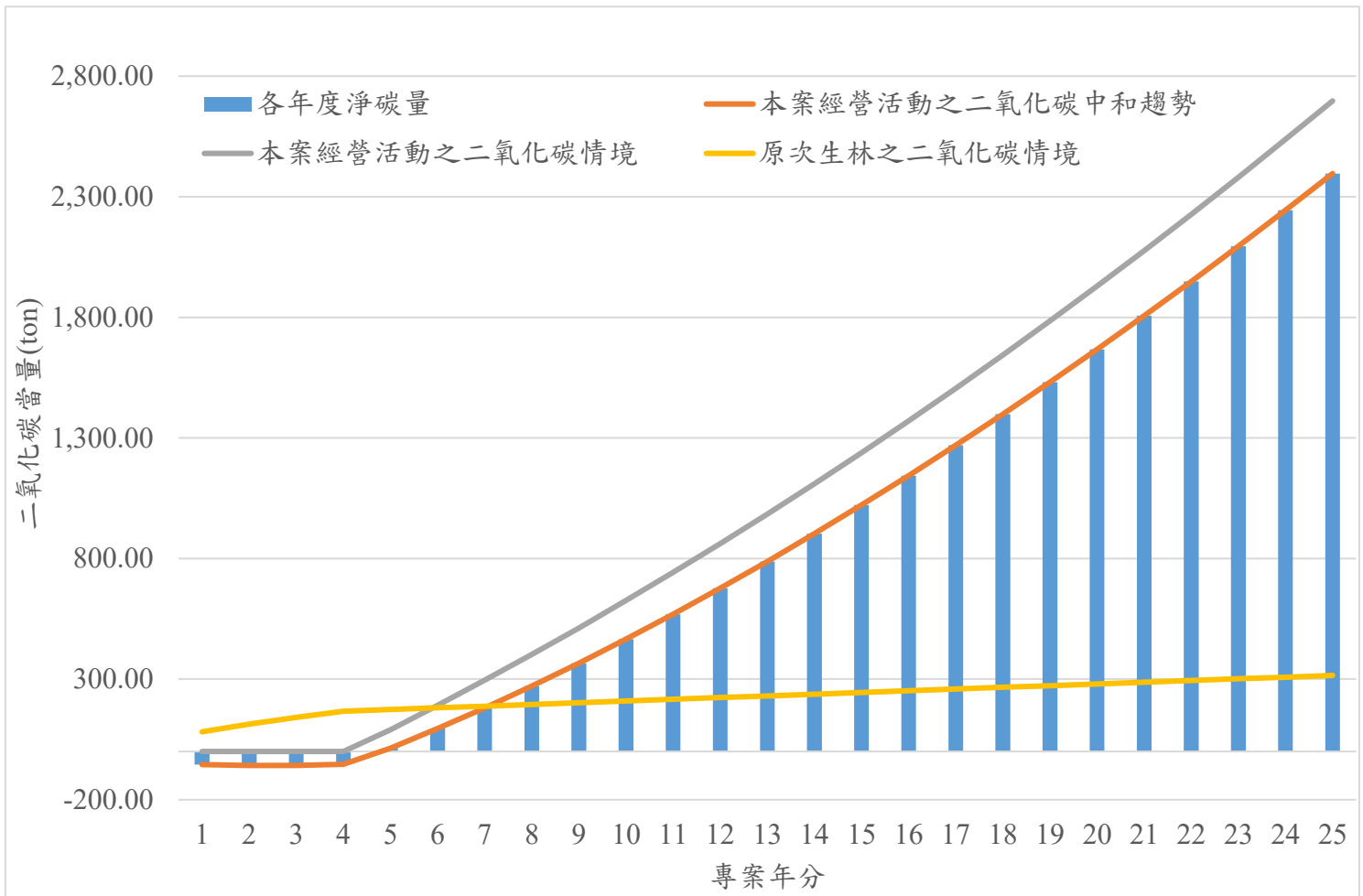


圖 14 專案活動於 25 年間之 CO<sub>2</sub> 變化量(情境一)

表 26 各專案年分 CO<sub>2</sub> 淨值總表(情境一)單位：(tCO<sub>2</sub>-e)

專案 年分 (t)	基線 CO <sub>2</sub> 儲存量 (C <sub>BSL,tree,t</sub> )	CO <sub>2</sub> 淨移除量(ΔC <sub>p,t</sub> )							合計 (T)	CO <sub>2</sub> 淨值 變化量 (ΔC <sub>FM,t</sub> )*
		人為經營區(C <sub>p,tree,t</sub> )				自然演替 觀察區	伐倒木 CO <sub>2</sub> 排放 量 (C <sub>Cut,tree,t</sub> )	實施專案所 產生之 CO <sub>2</sub> 排放量 (GHG <sub>p,t</sub> )		
		留存木	臺灣肖楠	楓香	相思樹					
1	-7.07	12.49	---	---	---	17.05	-74.45	-2.79	-54.77	-54.77
2	-14.14	24.99	---	---	---	34.10	-99.39	-3.65	-58.08	-3.32
3	-21.21	37.48	---	---	---	51.15	-120.59	-4.22	-57.37	0.71
4	-28.28	49.98	---	---	---	68.21	-138.61	-4.78	-53.49	3.89
5	-35.35	62.47	11.11	6.76	42.88	85.26	-153.92	-5.07	14.14	67.62
6	-42.42	74.96	31.03	13.63	87.43	102.31	-166.94	-5.35	94.64	80.51
7	-49.49	87.46	52.27	20.61	133.64	119.36	-178.01	-5.35	180.49	85.85
8	-56.56	99.95	74.84	27.71	181.51	136.41	-187.41	-5.35	271.10	90.61
9	-63.63	112.45	98.75	34.91	231.04	153.46	-195.41	-5.35	366.22	95.12
10	-70.70	124.94	123.97	42.23	282.23	170.52	-202.20	-5.35	465.64	99.42
11	-77.77	137.43	150.53	49.67	335.09	187.57	-207.98	-5.35	569.19	103.54
12	-84.84	149.93	178.41	57.21	389.61	204.62	-212.89	-5.35	676.70	107.51
13	-91.91	162.42	207.63	64.87	445.79	221.67	-217.07	-5.35	788.05	111.35
14	-98.98	174.92	238.16	72.64	503.63	238.72	-220.61	-5.35	903.13	115.08
15	-106.05	187.41	270.03	80.52	563.14	255.77	-223.63	-5.35	1,021.85	118.71
16	-113.12	199.90	303.23	88.52	624.30	272.83	-226.19	-5.35	1,144.12	122.27
17	-120.19	212.40	337.75	96.63	687.13	289.88	-228.37	-5.35	1,269.87	125.76
18	-127.26	224.89	373.60	104.85	751.62	306.93	-230.22	-5.35	1,399.06	129.19
19	-134.33	237.39	410.78	113.18	817.78	323.98	-231.80	-5.35	1,531.62	132.57
20	-141.40	249.88	449.28	121.63	885.59	341.03	-233.13	-5.35	1,667.53	135.90
21	-148.47	262.37	489.11	130.18	955.07	358.08	-234.27	-5.35	1,806.74	139.21
22	-155.54	274.87	530.28	138.85	1,026.21	375.14	-235.24	-5.35	1,949.22	142.48
23	-162.61	287.36	572.76	147.64	1,099.01	392.19	-236.06	-5.35	2,094.94	145.73
24	-169.68	299.86	616.58	156.53	1,173.47	409.24	-236.76	-5.35	2,243.89	148.95
25	-176.75	312.35	661.72	165.54	1,249.60	426.29	-237.35	-5.35	2,396.05	152.16

註\*CO<sub>2</sub> 淨值變化量(ΔC<sub>FM,t</sub>)為 T<sub>t+1</sub>-T<sub>t</sub>

## 2.情境二(基線平均生長量 1 m<sup>3</sup>/ha/year)

情境二為基線平均生長量以 1 m<sup>3</sup>/ha/year 作為依據，估算透過專案活動(改善森林經營計畫)於 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，如圖 15，其結果於第 25 年可增加 2,219.31 ton CO<sub>2</sub> 吸收量，各年變化量如表 27，且於第 10 年可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量。

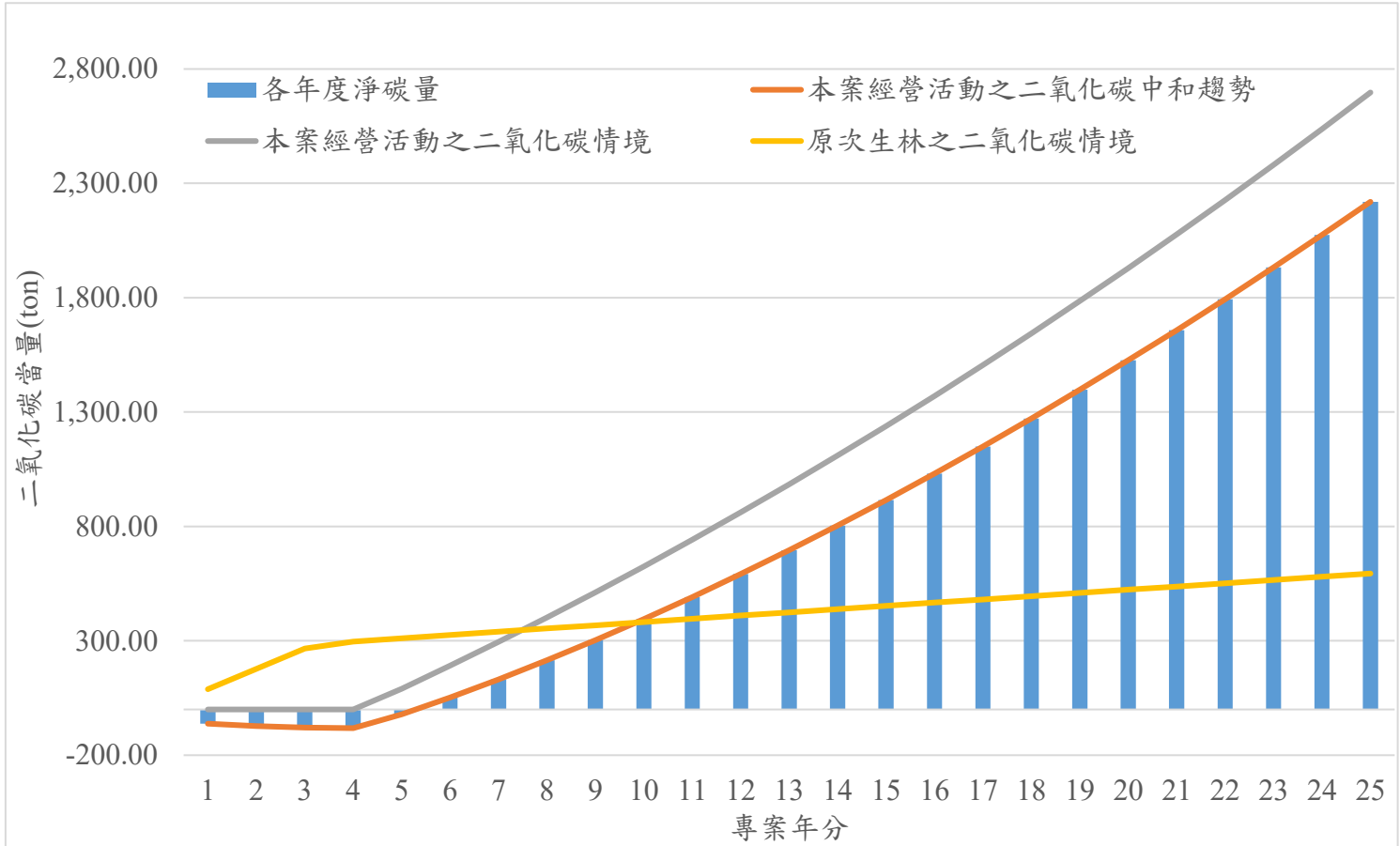


圖 15 專案活動於 25 年間之 CO<sub>2</sub> 變化量(情境二)

表 27 各專案年分 CO<sub>2</sub> 淨值總表(情境二)單位：(tCO<sub>2</sub>-e)

專案 年分 (t)	基線 CO <sub>2</sub> 儲存量 (C <sub>BSL,tree,t</sub> )	CO <sub>2</sub> 淨移除量(ΔC <sub>p,t</sub> )							合計 (T)	CO <sub>2</sub> 淨值 變化量 (ΔC <sub>FM,t</sub> )*
		人為經營區(C <sub>p,tree,t</sub> )				自然演替 觀察區	伐倒木 CO <sub>2</sub> 排放 量 (C <sub>Cut,tree,t</sub> )	實施專案所 產生之 CO <sub>2</sub> 排放量 (GHG <sub>p,t</sub> )		
		留存木	臺灣肖楠	楓香	相思樹					
1	-14.14	12.49	---	---	---	17.05	-74.45	-2.79	-61.84	-61.84
2	-28.28	24.99	---	---	---	34.10	-99.39	-3.65	-72.22	-10.39
3	-42.42	37.48	---	---	---	51.15	-120.59	-4.22	-78.58	-6.36
4	-56.56	49.98	---	---	---	68.21	-138.61	-4.78	-81.77	-3.18
5	-70.70	62.47	11.11	6.76	42.88	85.26	-153.92	-5.07	-21.21	60.55
6	-84.84	74.96	31.03	13.63	87.43	102.31	-166.94	-5.35	52.23	73.44
7	-98.98	87.46	52.27	20.61	133.64	119.36	-178.01	-5.35	131.00	78.78
8	-113.12	99.95	74.84	27.71	181.51	136.41	-187.41	-5.35	214.54	83.54
9	-127.26	112.45	98.75	34.91	231.04	153.46	-195.41	-5.35	302.59	88.05
10	-141.40	124.94	123.97	42.23	282.23	170.52	-202.20	-5.35	394.94	92.35
11	-155.54	137.43	150.53	49.67	335.09	187.57	-207.98	-5.35	491.42	96.47
12	-169.68	149.93	178.41	57.21	389.61	204.62	-212.89	-5.35	591.86	100.44
13	-183.82	162.42	207.63	64.87	445.79	221.67	-217.07	-5.35	696.14	104.28
14	-197.96	174.92	238.16	72.64	503.63	238.72	-220.61	-5.35	804.16	108.01
15	-212.10	187.41	270.03	80.52	563.14	255.77	-223.63	-5.35	915.80	111.65
16	-226.24	199.90	303.23	88.52	624.30	272.83	-226.19	-5.35	1,031.00	115.20
17	-240.38	212.40	337.75	96.63	687.13	289.88	-228.37	-5.35	1,149.69	118.69
18	-254.52	224.89	373.60	104.85	751.62	306.93	-230.22	-5.35	1,271.80	122.12
19	-268.66	237.39	410.78	113.18	817.78	323.98	-231.80	-5.35	1,397.30	125.50
20	-282.80	249.88	449.28	121.63	885.59	341.03	-233.13	-5.35	1,526.13	128.83
21	-296.94	262.37	489.11	130.18	955.07	358.08	-234.27	-5.35	1,658.27	132.14
22	-311.08	274.87	530.28	138.85	1,026.21	375.14	-235.24	-5.35	1,793.68	135.41
23	-325.21	287.36	572.76	147.64	1,099.01	392.19	-236.06	-5.35	1,932.33	138.66
24	-339.35	299.86	616.58	156.53	1,173.47	409.24	-236.76	-5.35	2,074.22	141.88
25	-353.49	312.35	661.72	165.54	1,249.60	426.29	-237.35	-5.35	2,219.31	145.09

註\*CO<sub>2</sub> 淨值變化量(ΔC<sub>FM,t</sub>)為 T<sub>t+1</sub>-T<sub>t</sub>

### 3.情境三(基線平均生長量 2 m<sup>3</sup>/ha/year)

情境三為基線平均生長量以 2 m<sup>3</sup>/ha/year 作為依據，估算透過專案活動(改善森林經營計畫)於 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，如圖 16，其結果於第 25 年可增加 1,865.81 ton CO<sub>2</sub> 吸收量，各年變化量如表 28，且於第 12 年可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量。

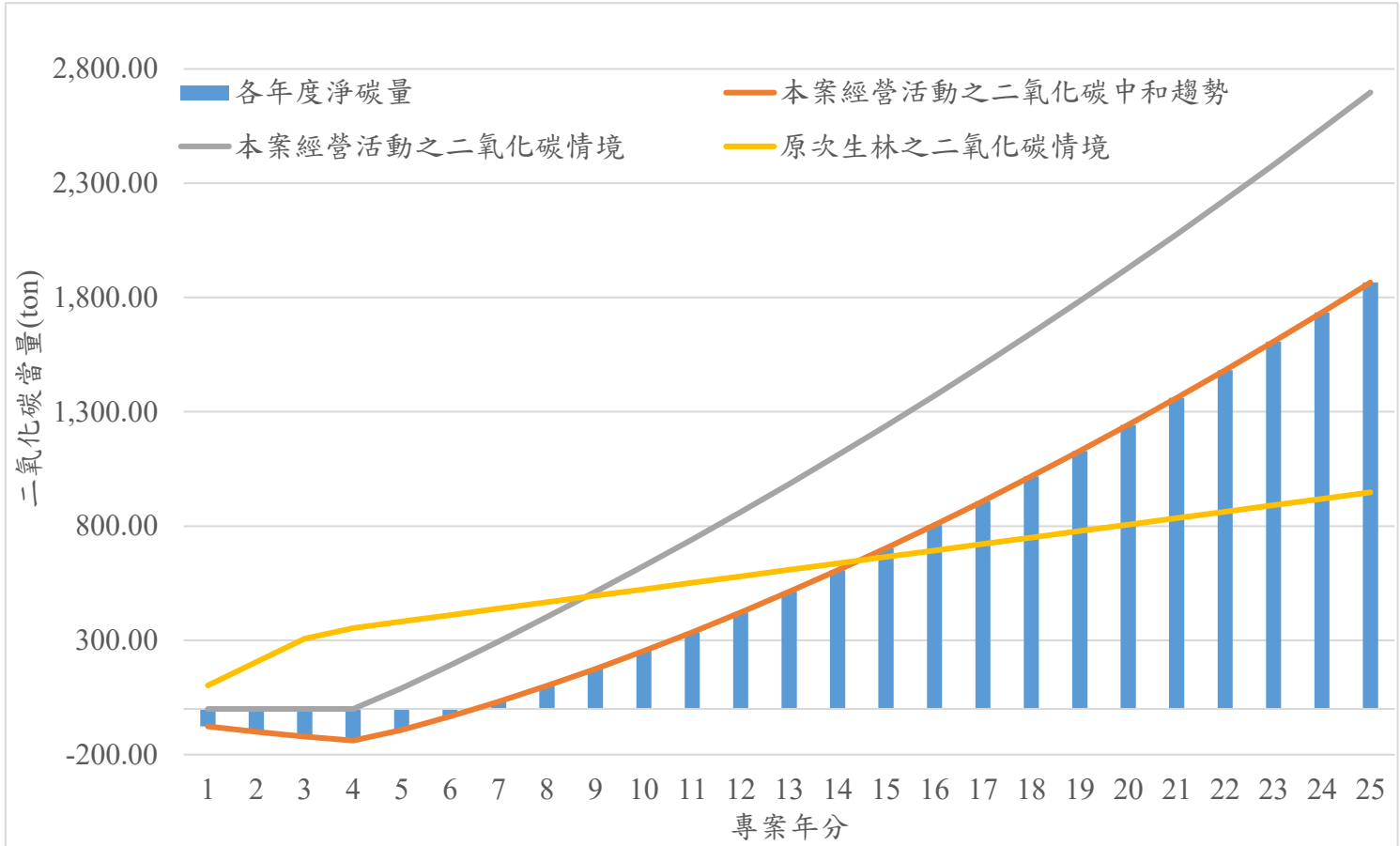


圖 16 專案活動於 25 年間之 CO<sub>2</sub> 變化量(情境三)

表 28 各專案年分 CO<sub>2</sub> 淨值總表(情境三)

單位：ton

專案 年分 (t)	基線 CO <sub>2</sub> 儲存量 (C <sub>BSL,tree,t</sub> )	CO <sub>2</sub> 淨移除量(ΔC <sub>p,t</sub> )							合計 (T)	CO <sub>2</sub> 淨值 變化量 (ΔC <sub>FM,t</sub> )*
		人為經營區(C <sub>p,tree,t</sub> )				自然演替 觀察區	伐倒木 CO <sub>2</sub> 排放 量 (C <sub>Cut,tree,t</sub> )	實施專案所 產生之 CO <sub>2</sub> 排放量 (GHG <sub>p,t</sub> )		
		留存木	臺灣肖楠	楓香	相思樹					
1	-28.28	12.49	---	---	---	17.05	-74.45	-2.79	-75.98	-75.98
2	-56.56	24.99	---	---	---	34.10	-99.39	-3.65	-100.50	-24.53
3	-84.84	37.48	---	---	---	51.15	-120.59	-4.22	-121.00	-20.50
4	-113.12	49.98	---	---	---	68.21	-138.61	-4.78	-138.33	-17.32
5	-141.40	62.47	11.11	6.76	42.88	85.26	-153.92	-5.07	-91.91	46.42
6	-169.68	74.96	31.03	13.63	87.43	102.31	-166.94	-5.35	-32.61	59.30
7	-197.96	87.46	52.27	20.61	133.64	119.36	-178.01	-5.35	32.02	64.64
8	-226.24	99.95	74.84	27.71	181.51	136.41	-187.41	-5.35	101.42	69.40
9	-254.52	112.45	98.75	34.91	231.04	153.46	-195.41	-5.35	175.33	73.91
10	-282.80	124.94	123.97	42.23	282.23	170.52	-202.20	-5.35	253.55	78.21
11	-311.08	137.43	150.53	49.67	335.09	187.57	-207.98	-5.35	335.88	82.33
12	-339.35	149.93	178.41	57.21	389.61	204.62	-212.89	-5.35	422.18	86.30
13	-367.63	162.42	207.63	64.87	445.79	221.67	-217.07	-5.35	512.33	90.14
14	-395.91	174.92	238.16	72.64	503.63	238.72	-220.61	-5.35	606.20	93.87
15	-424.19	187.41	270.03	80.52	563.14	255.77	-223.63	-5.35	703.70	97.51
16	-452.47	199.90	303.23	88.52	624.30	272.83	-226.19	-5.35	804.76	101.06
17	-480.75	212.40	337.75	96.63	687.13	289.88	-228.37	-5.35	909.31	104.55
18	-509.03	224.89	373.60	104.85	751.62	306.93	-230.22	-5.35	1,017.29	107.98
19	-537.31	237.39	410.78	113.18	817.78	323.98	-231.80	-5.35	1,128.64	111.36
20	-565.59	249.88	449.28	121.63	885.59	341.03	-233.13	-5.35	1,243.34	114.69
21	-593.87	262.37	489.11	130.18	955.07	358.08	-234.27	-5.35	1,361.33	118.00
22	-622.15	274.87	530.28	138.85	1,026.21	375.14	-235.24	-5.35	1,482.60	121.27
23	-650.43	287.36	572.76	147.64	1,099.01	392.19	-236.06	-5.35	1,607.12	124.52
24	-678.71	299.86	616.58	156.53	1,173.47	409.24	-236.76	-5.35	1,734.86	127.74
25	-706.99	312.35	661.72	165.54	1,249.60	426.29	-237.35	-5.35	1,865.81	130.95

註\*CO<sub>2</sub> 淨值變化量(ΔC<sub>FM,t</sub>)為 T<sub>t+1</sub>-T<sub>t</sub>

#### 4.情境四(基線平均生長量 2.5 m<sup>3</sup>/ha/year)

情境四為基線平均生長量以 2.5 m<sup>3</sup>/ha/year 作為依據，估算透過專案活動(改善森林經營計畫)於 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，如圖 17，其結果於第 25 年可增加 1,689.07 ton CO<sub>2</sub> 吸收量，各年變化量如表 29，且於第 13 年可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量。

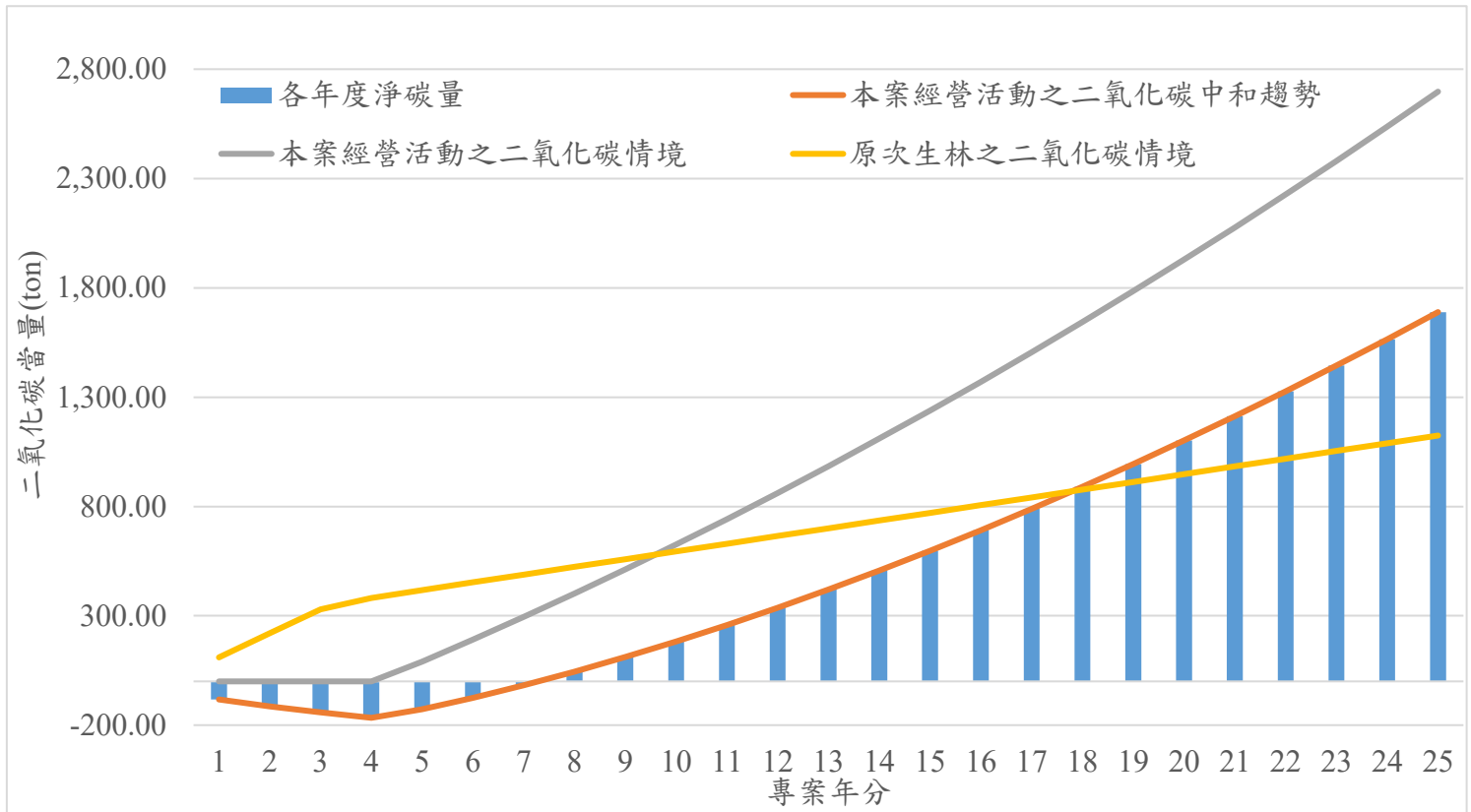


圖 17 專案活動於 25 年間之 CO<sub>2</sub> 變化量(情境四)

表 29 各專案年分 CO<sub>2</sub> 淨值總表(情境四)

單位：ton

專案 年分 (t)	基線 CO <sub>2</sub> 儲存量 (C <sub>BSL,tree,t</sub> )	CO <sub>2</sub> 淨移除量(ΔC <sub>p,t</sub> )							合計 (T)	CO <sub>2</sub> 淨值 變化量 (ΔC <sub>FM,t</sub> )*
		人為經營區(C <sub>p,tree,t</sub> )				自然演替 觀察區	伐倒木 CO <sub>2</sub> 排放 量 (C <sub>Cut,tree,t</sub> )	實施專案所 產生之 CO <sub>2</sub> 排放量 (GHG <sub>p,t</sub> )		
		留存木	臺灣肖楠	楓香	相思樹					
1	-35.35	12.49	---	---	---	17.05	-74.45	-2.79	-83.05	-87.77
2	-70.70	24.99	---	---	---	34.10	-99.39	-3.65	-114.64	-31.60
3	-106.05	37.48	---	---	---	51.15	-120.59	-4.22	-142.21	-27.57
4	-141.40	49.98	---	---	---	68.21	-138.61	-4.78	-166.61	-24.39
5	-176.75	62.47	11.11	6.76	42.88	85.26	-153.92	-5.07	-127.26	39.35
6	-212.10	74.96	31.03	13.63	87.43	102.31	-166.94	-5.35	-75.03	52.23
7	-247.45	87.46	52.27	20.61	133.64	119.36	-178.01	-5.35	-17.47	57.57
8	-282.80	99.95	74.84	27.71	181.51	136.41	-187.41	-5.35	44.86	62.33
9	-318.15	112.45	98.75	34.91	231.04	153.46	-195.41	-5.35	111.70	66.84
10	-353.49	124.94	123.97	42.23	282.23	170.52	-202.20	-5.35	182.85	71.14
11	-388.84	137.43	150.53	49.67	335.09	187.57	-207.98	-5.35	258.11	75.27
12	-424.19	149.93	178.41	57.21	389.61	204.62	-212.89	-5.35	337.35	79.23
13	-459.54	162.42	207.63	64.87	445.79	221.67	-217.07	-5.35	420.42	83.07
14	-494.89	174.92	238.16	72.64	503.63	238.72	-220.61	-5.35	507.22	86.80
15	-530.24	187.41	270.03	80.52	563.14	255.77	-223.63	-5.35	597.65	90.44
16	-565.59	199.90	303.23	88.52	624.30	272.83	-226.19	-5.35	691.64	93.99
17	-600.94	212.40	337.75	96.63	687.13	289.88	-228.37	-5.35	789.12	97.48
18	-636.29	224.89	373.60	104.85	751.62	306.93	-230.22	-5.35	890.03	100.91
19	-671.64	237.39	410.78	113.18	817.78	323.98	-231.80	-5.35	994.31	104.29
20	-706.99	249.88	449.28	121.63	885.59	341.03	-233.13	-5.35	1,101.94	107.62
21	-742.34	262.37	489.11	130.18	955.07	358.08	-234.27	-5.35	1,212.86	110.93
22	-777.69	274.87	530.28	138.85	1,026.21	375.14	-235.24	-5.35	1,327.06	114.20
23	-813.04	287.36	572.76	147.64	1,099.01	392.19	-236.06	-5.35	1,444.51	117.45
24	-848.39	299.86	616.58	156.53	1,173.47	409.24	-236.76	-5.35	1,565.19	120.67
25	-883.74	312.35	661.72	165.54	1,249.60	426.29	-237.35	-5.35	1,689.07	123.88

註\*CO<sub>2</sub> 淨值變化量(ΔC<sub>FM,t</sub>)為 T<sub>t+1</sub>-T<sub>t</sub>

根據上述四種情境可知，其基線平均生長量由 0.5 -2.5 m<sup>3</sup>/ha/year，其 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，於第 25 年四種情境均可增加 1,600 ton 以上之 CO<sub>2</sub> 吸收量，而為抵減北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 排放量，四種情境均於 13 年內可完成抵減。

綜觀國際間對於碳中和之分析過程，均容許其有不確定性(Uncertainty)或稱不確定度，不確定性是風險估計過程中之可信賴度(Credibility)，其為對於未來環境之改變或推估所採用之參數，因有不可掌握及量測技術的限制等因素，會造成推估結果的不確定性。童慶彬、李明旭(2013)指出因應氣候變遷所產生之不確定性，必須有相關對策，如資料不正確性、模式不正確性、未來不確定性與環境不確定性等，而針對不確定性必須產生對應之風險管理行動(Risk Management Actions)如表 30。

表 30 不確定性與風險管理所採取行動之操作模式(童慶彬、李明旭，2013)

不確定性 (Uncertainty)	衝擊程度 (Impact)	風險管理採取行動(Risk Management Actions)		
	顯著	可考慮採取管理行動	一定採取管理行動並監測風險	最積極的管理行動
一般	一般	可能接受與持續監測風險	值得努力推動管理行動	必須努力推動管理行動
	不顯著	接受風險	接受與持續監測風險	管理與監測風險
		低	中	高
		可能性		

依上述概念對於本計畫中相關資料、模式及未來與環境不確定性進行分析，在資料面本計畫採取國內同地區或同樹種資料為主，若無則以國外相關資料或參數進行選用，在碳中和計算之方法學上，因國內目前尚未發展公布有關 IFM 的操作方法，故依照 VCS 架構與 MRV 精神，建立本專案活動之碳匯推估架構，而針對未來與環境之不確定性，以不同情境所產生之結果進行呈現，後續可藉由監測計畫，以監測風險的管理方式，降低不確定性的產生。

根據 U.S. EPA(1992)指出不確定性之產生可能有情境、參數或模式而來，如不正確或不充足之資訊、不精確或偏頗度量、以及選取不正確模式等。對於本案而言，主要不確定性在於評估方法及所採用的參數，如材積式與生長量參數在地區上會有差異，主要影響因素為環境所帶來的生長差異，但無論差異變化如何，均會位於該樹種之生長區間內，如生育環境的調適或適度的撫育措施，即可提升林木生長量，若環境嚴苛產生逆境，對林木而言會產生生長停滯或緩慢生長等現象，在這樣的背景之下，則需藉由監測資料來修正參生長模式，以降低推估結果的不確定性。伐倒木腐爛的部分，根據伐倒木置放於林間 CO<sub>2</sub> 會自然釋放，其速率亦與未來環境有關，且會因不同樹種、氣候條件具有腐爛速率之不確定性，故亦建議未來有需要進行在地的調查研究與監測來降低其不確定性。

惟本計畫之不確定性因子，未來可透過監測計畫進行調查，包括次生林的生長監測，其生長資料可供為基線修正之參考；造林木和留存木監測計畫，可調整或修正目前參數；動物監測計畫則可了解以碳中和為目標之森林生態價值；以及水土保持監測計畫，可供為了解植林減碳所造成水土保持衝擊及其恢復情形，如此進行模式逐步修正及滾動式的調整所採用之參數，即可符合 MRV 之架構與精神，進而達到與實際狀況相同之情境。

## (五)監測計畫

本案監測計畫以碳庫之 CO<sub>2</sub> 儲存變化量、排放量及生態環境狀況，為監測計畫之兩大主軸。碳庫之 CO<sub>2</sub> 儲存變化量及排放量的修正，主要以次生林監測計畫、造林木和留存木監測計畫以及自然保留區林木監測計畫來達成，而生態環境狀況的變化，主要以動植物監測計畫及水土保持監測計畫來達成。

### 1.次生林生長監測計畫

次生林監測計畫為監測實際保留區之次生林 CO<sub>2</sub> 儲存變化量，藉由每期監測調查資料，分析修正基線之碳儲存量，以建立該地區更具參考之基線 CO<sub>2</sub> 儲存變化量推測之參數。

**樣區設置數量及大小:**於 52.70 ha 計畫區中 42.70 ha 之規劃保留內，逢機設置 5 個 0.05 ha 永久監測樣區。

**樣區監測頻度:**專案活動之前 10 年，每年監測一次，10 年後以每 2 年監測調查一次，至達成本案碳中和之目標後，以每 5 年監測調查一次。

**樣區調查項目:**於樣區內進行每木之胸高直徑、樹高及樹種的調查，並記錄樣區內之地被植物樣態(包括覆蓋度及植物種類)，以利於未來進行查驗及詳細記錄相關變化量。

### 2.造林木與留存木之生長監測計畫

造林木與留存木監測計畫，需包含專案活動實施後造林木及留存木之 CO<sub>2</sub> 吸存變化量監測，利用每一期的樣區監測調查資料，分析造林木及留存木之年平均生長量，以供地區性林木生長模式之修正，並可查驗及記錄 CO<sub>2</sub> 吸存的變化量。

**樣區設置數量及大小:**於 5.03 ha 內設置 5 個 0.05 ha 的永久監測樣區，包括 1 個楓香樣區、2 個相思樹樣區及 2 個臺灣肖楠樣區。

**樣區監測頻度:**前 10 年每年監測調查一次，10 年後以每 2 年監測調查一次，至達成本案碳中和之目標後，再以每 5 年監測調查一次。

**樣區調查項目:**於監測樣區內進行每株造林木及留存木之胸高直徑、樹高及樹種等項目之調查。

### 3.自然演替觀察區林木監測計畫

主要針對該區域未經人工撫育措施後的林木 CO<sub>2</sub> 儲存變化量，藉由每期監測調查資料，了解未經人工經營撫育與經人工經營撫育之區域之變化。

**樣區設置數量及大小:**於 5.08 ha 內設置 5 個 0.05 ha 的永久監測樣區。

**樣區監測頻度:**前 10 年每年監測調查一次，10 年後以每 2 年監測調查一次，至達成本案碳中和之目標後，再以每 5 年監測調查一次。

**樣區調查項目:**於監測樣區內進行每株造林木及留存木之胸高直徑、樹高及樹種等項目之調查。

### 4.動物監測計畫

目前國內並無針對動物環境監測訂定相關法規，僅符合《開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準》第十六條中所列之情形者，依法須實施環境影響評估，行政院環境保護署亦公告《動物生態評估技術規範》，故計畫團隊建議未來依照《動物生態評估技術規範》於規劃保留區與造林區域，進行動物調查並進行比較，動物監測種類及調查方法可參考表 31。而本區域於上述規範中屬於第二級區域，因此最低調查頻度，建議 1 年約 2 季~4 季，調查時間則依照物種之生活習性不同而進行調整。調查後可藉由「行政院農業委員會特有生物研究保育中心臺灣野生動物資料庫查詢系統」及「行政院農業委員會公告之保育類野生動物名錄」，進行物種與保育等級確定。

## 5.水土保持監測計畫

為確保案址水土保持及坡地安全，已於施業後每個月，由水土保持服務團專業技師定期現勘一次，刈草撫育期間建議定期勘查監測，林地植生覆蓋達 60%以上後即可停止監測。

監測計畫之實施，建議委託具備林業專長，如符合國家法定資格之具有林業技術專業執業之林業技師、水土保持技師或相關背景之森林、動植物相關科系之學者專家，進行更詳細監測計畫之設計、調查與分析。

表 31 不同種類動物監測方法建議說明

監測類群	調查方法	調查方法說明
鳥類	沿線調查法	於監測樣區範圍內設置等長的監測樣線，以8-10倍的雙筒望遠鏡觀察沿線鳥類，輔以鳴叫聲音辨別，記錄實際保留區與實際造林區之棲地類型中看到和聽到的鳥類種類。
哺乳類	紅外線 自動照相機	<p>永久監測樣區100 m範圍內架設紅外線自動照相機，進行連續性拍攝，每季至少有30天以上之紀錄，並每月進行巡視確保照相機作業無誤。</p> <p>透過所收集之野生動物出現種類及出現次數資料，並透過標準化活動指標亦稱出現頻度指數 (Occurrence Index, OI)，可作為族群豐富度指標，其計算公式如下：</p> $OI = \frac{\text{一物種在該樣點的有效影片或照片總數量}}{\text{該樣點的相機總工作時數}} \times 1000 \text{ hrs}$ <p>相機工作時數為相機開機後至最後1張照片拍攝時間的間隔時間，以小時為計算單位，總工作時數則是各次工作時數的加總。有效照片為1 hr內同一隻個體的連拍，只視為1張有效照片紀錄；不同個體，即使同1 hr內連拍，也當作不同的有效紀錄，若1張內有2隻以上個體，每隻都視為1筆有效紀錄。</p>
爬蟲類	沿線調查法	利用目視遇測法(Visual Encounter Survey)於樣區內進行調查，調查主要針對飛蜥、草蜥和石龍子科或其他關注物種等。調查沿線進行，輔以徒手或使用工具翻動地表或枯枝落葉進行檢視，並針對關注物種進行族群數量監測。
蜂蝶類	沿線調查法	於監測樣區範圍內設置等長的監測樣線，調查時沿線以目視和利用8-10 倍的雙筒望遠鏡觀察，記錄沿線兩側各5 m範圍內發現的種類，輔以昆蟲網進行捕捉，鑑定種類後立即釋放，並針對關注物種(如：臺灣小灰蛺蝶 <i>Dodona eugenes</i> )進行族群數量監測。

## 六、討論

### (一)森林的生態服務價值

森林具備多目標經營之效益以及森林生態系服務(Forest Ecosystem Services, FES)之功能，所謂森林生態系服務功能，係指森林生態系在整體生態系循環過程中所維持生態環境、氣候調節的功能與效用，森林生態系所提供之功能及服務種類繁多，除了供給人類基本生活物質，如木材、燃料(生產功能)及遊憩服務(休閒遊憩功能)等；更提供環境廢棄物之分解、養分循環的場所(環境功能)；此外還可做為生命存續的基礎，如物種基因庫(生物性功能)、環境氣候調節與水源涵養(調節與水源涵養功能)、提供動植物棲息所(生態功能)及碳吸存(碳中和功能)等(Ninan and Kontoleon, 2016; 陳玉蘭等，2005；吳孟珊，2014；謝敬華、柳婉郁，2018)。

自然環境所提供的生態系服務功能可分兩層面來討論，一是作用於動植物之存續，包含生產投入的供應、生物生命的維持；另一是非因社會經濟使用而實現之價值(Ninan and Inoue, 2013)。首先在生產投入的供應、生物生命的維持等作用於動植物之存續，生產投入的供應係指自然界在病蟲害控制、洪澇控制、土壤肥力的養成、水的過濾等方面的服務，這些服務支持生態系的生產活動；而生物生命的維持方面，乃主要描述生態系提供了動植物食物來源、棲地、風景欣賞或間接作用於食物鏈之串聯上的服務。另外在非使用性的價值上，生態系提供存在的價值與選擇的價值，對物種存在的本身、生物多樣性的組成、環境適宜性的維持等賦予價值(李宣德、馮豐隆，2005；侯元照、吳水榮，2008；Goulder and Kennedy, 1997；Costanza *et al.*, 1997)。

一般普遍認同生態系服務具有之供給服務、調節服務、支持服務與文化服務四大類服務中，亦含有從使用上至存在上的價值，也就是由人為使用、加工，直接或間接投入於社會經濟的供給服務、調節與支持生物生命之延續到文化或未來價值的保存等四大類生態系服務內容(Daily, 1997; MA, 2005)。

王培蓉與鄭欽龍(2005)指出，不同經營模式下，經營管理者認知會有所差異，但符合 Thomas Kuhn 的科學典範理論。即「森林經營是人類與森林資源之間的互動關係，資源條件變化以及社會變遷，都會導致此一關係的改變。人類如何看

待森林因時因地而異。人類為何而經營森林以及應如何經營森林，此即森林經營典範，也隨時空環境而變。但在改變的過程，因受不同專業養成教育影響，而使不同學科的專家，對於森林經營典範的認知並非一致。」。雖然不同經營管理者認知有所差異，但亦無法否定森林多目標經營之生態服務價值，如都市林、次生林、人工林及天然林，皆具備生態性、社會性及經濟性等多元價值，當然不可否認不同類型之森林皆具有碳吸存的價值，只是會有不同碳吸存能力，而森林之不同活動的導入將面臨著正面發展的機會，同時亦面臨著負面影響之風險。

本案針對專案區域(改善森林經營管理活動區域)及非專案區域(未經改善森林經營管理活動區域)，以機會與風險，進行分析比較如表 32。

表 32 專案區域及非專案區域所面臨的機會與風險

	機會	風險
非專案區域	樹種豐富	高度破碎化
	具有可用的生態知識	很少有良好的管理經驗
	具有良好的林木更新條件	某些因素(如火災、病蟲害)的風險出現的可能性
	可作為生態教學之區域	較高林地使用的壓力
	存在營運的組織(林業合作社)	較低的生長率
		對私營部門、社區和政府機構為一高度變革的經營策略
專案區域	具良好管理經營模式	較低樹種的多樣性
	林木生長率佳	需較多人力及金錢經營的投入
	具有景觀及遊憩之功能	
	可作為教學之區域	
	具較佳碳吸存能力	

## (二)以造林來達成碳中和之效應

碳中和意指將人類活動的碳排放量，以吸收並儲存大氣中碳素的方式加以平衡；儲存碳的森林碳庫包括地上生物量、地下生物量、枯落物、枯死木和土壤有機質等(IPCC, 2006)。而碳中和指的是一定期間內，碳排放量與減少的碳排量或淨碳儲存量之間互相抵消，達到淨零碳排放量的效果，其達成方式主要包括碳減量及碳抵換。

由於森林碳吸存效益的高低，取決於森林的年生長量，不同的森林結構(天然林、次生林、人工林)、不同的生態區位(氣候、地形、土壤)及不同的經營方式(經營與未經營)，皆會影響森林的碳吸存功能，但唯一不變的趨勢是各種類型的森林，隨著林齡的增加，其森林的碳匯功能，會有下降之趨勢，(Nabuurs and Schelhaas, 2002)曾針對歐洲 16 種森林類型，進行碳匯功能的研究，發現雖然各森林類型間之碳匯功能變異大，但達到碳封存率最高峰值，平均大約為 38 年，且可延續 15 年，平均碳匯值每年約為 2.98 Mg C /ha(森林類型介於 4.1 至 1.15 Mg C/ha 之間)，但林齡達到 200 年時，碳淨封存率達到飽和，平均碳匯值每年約為 0.8 Mg C/ha(森林類型從 1.4 到 0.13 Mg C/ha)。以未受干擾的天然林而言，老齡的天然林雖具有大量的碳儲存量，但森林群落中的其他植物、動物和微生物呼吸量大，枯枝落葉大量分解而消耗有機質，會釋排放 CO<sub>2</sub>，因此演替後期之天然林，其 CO<sub>2</sub> 吸存能力將會降低 (Cook-Patton *et al.*, 2020)。

次生林是指在一個時間點或一段時間內，原始森林植被受到顯著(甚至全部)人為或自然干擾後，經過自然過程而形成的再生森林。依據世界糧農組織的統計，次生林是地球上的主要森林類型，長期而言，次生林與類似地點附近的原始森林，其森林結構或冠層物種組成，具有重大的差異性(Chokkalingam and de Jong, 2001)，次生林的演替時間長短是森林結構與物種變化的重要關鍵。正如 Chazdon (2016) 所說：次生林與恢復森林是森林保護與發展、社會科學與自然科學之間的紐帶，次生林是波昂挑戰(Bonn Challenge)等倡議的絕佳機會，因為次生林的經營，將代表著森林的恢復行動，甚至是生產性林業的振興。在適當森林管理的下，將退化中的次生林地加以轉變，是恢復土地生產力和恢復森林的替代方案。良好的次生林經營管理亦為碳儲存的重要貢獻者，因此也是 REDD+ 的重要貢獻者 (Chazdon and Brancalion, 2019)。而透過提高人工林的經營效率，增加林地的生產

力，在增加生長量之餘，也相對提高碳儲存量；在做法上，可藉延長輪伐期，以增加森林林地碳量的蓄積；在適地適木的原則下選擇適當樹種種植，改善林木育種技術、林下栽植等，以達成最適生產力和林地碳密度的增加。林俊成等(1999)估算柳杉人工林，依生物量變化做計量上分析，估算結果每公頃可儲存 CO<sub>2</sub> 量為 591.21 ton。Pedro *et al.* (1994)分析馬來西亞 Sabah 地區大規模種植龍腦香科林木對碳的吸存效果，初步估計輪伐期如為 60 年，每公頃可吸存 195 ton 的碳。

Nunes *et al.* (2020) 透過 136 篇文獻，進行森林對減緩氣候變遷之貢獻，並討論森林碳捕獲與碳儲存之相關模式，其中森林經營之模式包括，森林碳保存 (Forest carbon conservation)、森林碳吸存 (Forest Carbon sequestration) 及森林碳替代 (Forest carbon substitution)，其中有關森林碳保存模式包括控制伐採、森林保護、以及控制火災與病蟲害；森林碳保存模式透過經營手段延長輪伐期、減低林木危害，可將大氣中的 CO<sub>2</sub> 吸存於木材及土壤中，即可由森林碳保存模式轉變為森林碳吸存模式，導向森林更新、森林撫育、跡地造林以及增加木材生產等；最後則是森林碳替代模式，其為整合森林碳吸存模式與碳保護模式，透過擴大木材和燃料產品之利用，以林業管理程序，促進森林生長以及建造綠色能源等，延伸石化燃料替換為生物質衍生燃料，以短輪伐期作業增加綠色能源產品，最後則可增加由非林地轉為林地之面積。

而不同的森林減碳策略具有不同的碳匯能力，以上述三者而言，最高為碳替代模式，碳吸存模式次之，而碳保存模式最低。而不同的樹種、林相具有不同的碳捕獲與儲存能力，且不同樹種之林相，亦會提供不同林產品。在裸露地或農地及林相遭破壞之土地，以造林或進行森林更新演替，或兩者兼用，以擴大造林面積，經由都市林和社區林的營造，也可擴大造林面積以增加吸存大氣 CO<sub>2</sub>，均具有良好之價值。森林中的植物藉行使光合作用，將大氣中的 CO<sub>2</sub> 加以吸收，轉化為有機碳的形式儲存於植物體內，而成為生物量的一部分；其林下的枯枝落葉層及森林土壤也有儲存碳的能力；大規模毀林之原始林(天然林)破壞是造成森林 CO<sub>2</sub> 釋放的重大原因，故於合適位置(如原土地非原始林或林相生長較差之林地)進行計畫性的伐採利用與更新，才能達成碳保護的永續性。林木屆伐期而伐採，便將林木狀態所儲存的碳加以收穫，林木收穫後，將原先所儲存的碳，以林產品的形式固定。

Houghton (1996)認為提高林木收穫過程之生產效率、延長林產品使用壽命等，皆會降低碳的釋放速率。因此在伐採集運時，提高林木收穫和過程的效率，改良收穫技術，可避免碳的損失。林產品不僅可固定碳，同時在製程上所排放的 CO<sub>2</sub> 與能源消耗，與其他材料而言相對為少。如用木材原料替代其他原料，不僅在能源消耗上節省，木質材料的利用可延遲碳釋放於大氣中，因此使用林產品以替代鋼鐵、鋁、混凝土和其他材料，可減少能源的消耗和減少化石能源的消費。

人工林的營造對於碳固定有積極之效應，以臺灣平地景觀造林來說，平地造林具國土保安、資源保育等功能，而造林木可從空氣中吸收 CO<sub>2</sub>，達到降低溫室效應，此法為最環保、最低成本與最有效的降低大氣 CO<sub>2</sub> 濃度之方法(邱志明等，2010；黃裕星，2010)，而近年來有相當多針對不同平地景觀造林樹種估算碳儲存量之報告，以台糖公司於屏東縣平地造林碳儲存量調查之研究，幼齡林以光蠟樹 (*Fraxinus griffithii*)(10.63±2.96 Mg C/ha)、欖仁(*Terminalia catappa*)(8.76±2.79 Mg C/ha)、苦楝(*Melia azedarach* L.)(8.55±2.2 Mg C/ha)等三種樹種碳儲存能力較佳(廖宜緯等，2011)；以 Yadanar *et al.* (2021)於緬甸進行人工林營造為例，其研究結果發現人工林之營造可有效降低 82%其他能源使用之碳排放；另針對不同輪伐期森林之營造，在樹種選擇上有速生及慢生樹種，除對於碳固定外，亦有其生態之效益。

Forster *et al.* (2021)研究人工林與次生林下種之林相，相較之下，人工林具備顯著減少溫室氣體排放之功能(圖 18)，主要因人工林乃基於對林木生長收穫的預期，故與次生林相比，人工林可提供更多、更長期的溫室氣體減排。該報告利用碳足跡生命週期評估(Life cycle assessment)，探討每公頃人工造林於百年內所能達成吸存二氧化碳量，相較於半天然次生林林分而言，自 2020 年起算至 2120 年止，包含收穫林木產品(Harvest wood product)等，100 年間次生林碳吸收量為 0.41-0.82 Gg CO<sub>2</sub>-e/ha 區間，而人工林碳吸存量為 1.36-2.96 Gg CO<sub>2</sub>-e/ha 區間，因此人工林之碳吸存能力相較次生林而言，能有更佳良好的效果，將生質能源與其他木材利用之效益帶入，讓碳吸存能力能達到事半功倍的提升(Forster *et al.*, 2021)。以人工林作為減少溫室氣體排放之手段，屬於強而有力之策略，並明顯於氣候變遷政策中發揮效果，包括根據《巴黎協定》(Paris Agreement)和即將公告的歐盟森林戰略政策。

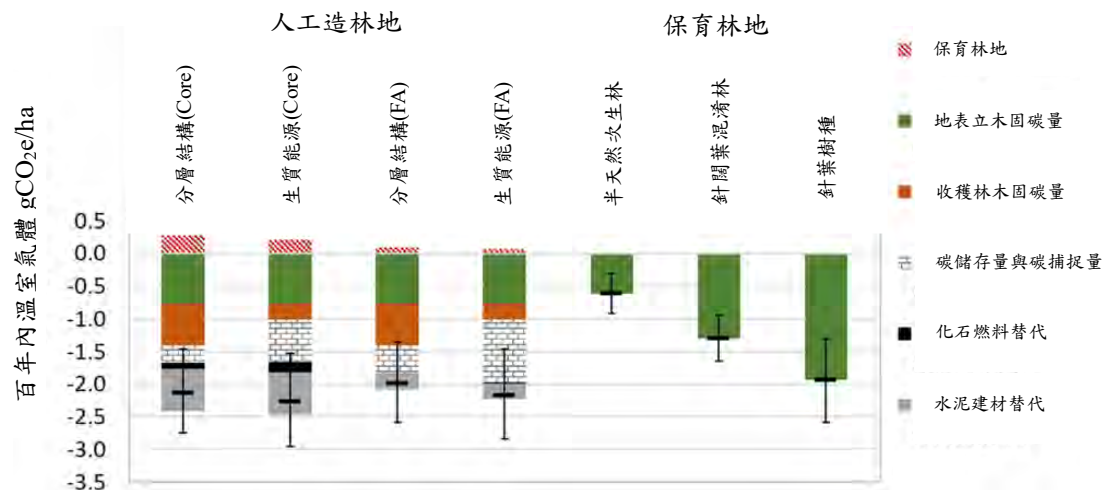


圖 18 人工造林地(種植於 2020 年)與保育性森林每公頃累積 CO<sub>2</sub> 當量吸存比較 (轉譯自 Forster *et al.*, 2021)。註：Further Ambition 簡稱 FA， Core and Further Ambition 為不同碳足跡生命週期評估之路徑方法差異。分層結構(Hierarchical)與生質能源(Bioenergy)為評估方法內之項目細節。

Berndes *et al.* (2016)指出，有效的森林經營透過全林分的森林經營規劃，可提供多樣且連續的生物碳流動。如圖 19 顯示碳平衡可能從封存轉變為突然發生森林火災或計畫內的收穫林分時的碳排放(紅色箭頭)，但碳排放活動可被其他林分的碳固定抵銷(綠色箭頭，以不同大小說明碳固定的變化率)，因此在整個地景中，森林碳儲存量圍繞趨勢線波動，該趨勢線可以增加、減少或大致穩定。地景層級的碳平衡受多種因素影響，但綜合起來，這些積極森林經營活動對森林碳的發展均產生平衡的影響。

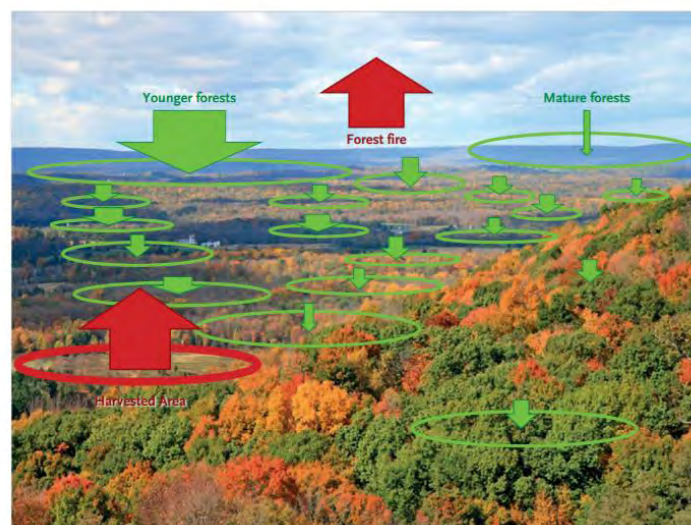


圖 19 森林碳排放與碳固定抵銷

次生林雖有碳固定抵銷效益但能力有限，若以具規劃性造林來達成碳中和之效應，一方面可透過人工林的經營提高林地的生產力，並在增加生長量之餘，也相對提高碳吸存量，即達到碳中和之目標。故做法上，可藉延長輪伐期，如本計畫栽植短中長輪伐期之樹種，以增加森林碳量的蓄積，並在適地適木的原則下選擇適當樹種種植、林下栽植等，以達成最適生產力和林地碳密度的增加。

### (三)臺灣現階段碳中和所面臨之問題

自 1972 年聯合國於斯德哥爾摩召開人類環境會議，即為首次全球共同討論環境議題，會議中並通過《人類環境宣言(Declaration on the Human Environment，或稱「斯德哥爾摩宣言」)》。宣言指出：「所有政府與人民為維護與增進人類環境並為全人類與其子孫的福祉而共同努力」。而於 20 年後的 1992 年，聯合國於巴西里約召開了「聯合國環境與發展大會(United Nations Conference on Environment and Development, UNCED)」，會議中提出許多重要環境相關規範或準則，如「里約環境與發展宣言(Rio Declaration on Environment and Development, RDED)」、「二十一世紀議程(Agenda 21)」及「森林原則(Forest Principles, FP)」等文件，以及「生物多樣性公約(Convention on Biological Diversity, CBD)」和「聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)」。聯合國氣候變化綱要公約主要的重要原則包括共同但有差別的責任(Common but differentiated responsibilities)、充分考慮開發中國家之需要和特殊情況、預防措施、永續發展、國際合作等。

1995 年於德國柏林召開並擬定相關的法律，最後於 1997 年於日本京都召開 UNFCCC COP3，通過了著名的「京都議定書(Kyoto Protocol, KP)」，此為第一個具體推動減少溫室氣體排放的國際公約。京都議定書正式將造林與再造林活動納入其清潔發展機制(Clean Development Mechanism, CDM)計畫中，原始的用意是允許已開發國家透過在開發中國家實施造林與再造林等 CDM 計畫來抵消其部分溫室氣體排放量，但京都議定書規範過於理想，造成多國無法形成共識，故 2009 年於丹麥哥本哈根舉辦的 UNFCCC COP18 僅談出不具法律效力的政治性協議「哥本哈根協議(Copenhagen Accord, CA)」。

為持續解決全球暖化問題，2015 年於巴黎舉行的 COP21 最終達成共識，196 個國家一致通過以「巴黎協定」取代京都議定書。巴黎協定容易獲得各國的共識，或許是因為協定並無嚴格限制各國的溫室氣體排放量，而有「國家自主貢獻(Intended Nationally Defined Contributions, INDCs)」條款，各國得評估自己國內的條件後，承諾自己的減排目標。巴黎協定與京都議定書最大之差異為，不再以強制手法賦予各國減碳的義務，且減碳也不再僅為附件一國家之責任與任務，而是世界各國必須自主提出自願減碳貢獻，來達到目標。

目前評估全球各國對於 CO<sub>2</sub> 減量的方式大概可分為三類，第一對排放超過額度之廠商徵收碳稅；第二由廠商自行造林或提供資金於國外進行造林；第三則是透過碳排放權的交易來讓廠商可以自由分配其排放量。國外也有許多國家，如美國、俄羅斯、澳洲、巴西、馬來西亞、哥斯大黎加、百里斯、玻利維亞、墨西哥與巴拉圭等，均有建立森林資源碳交易制度(Moura-Costa and Stuart, 1998；Totten, 1999)。

本計畫藝術家的初衷在於期望臺灣大型藝文機構以身作則，實踐減碳行動，並以「在地行動」喚起藝術圈及大眾認知，所以工作坊和研討會也是作品計畫的一環。CO<sub>2</sub> 抵銷的研究與第三方驗證，並非藝術家計畫的重點，除因本案碳排放量也僅止於藝術家的估算之外，同時也不希望將環境責任外部化，進而走上國際碳權交易的捷徑，故仍以碳減量「在地行動」為計畫主要內容，而大至國家、企業，小至機構、活動，均可對碳中和有所貢獻。

2020 年 11 月 24 日臺灣六都之中的新北市率先宣示進入「氣候緊急狀態」，簽署《氣候緊急宣言》(Climate Emergency Declaration, CED)，並承諾在 2030 年減少碳排放 30%；這將超越中央訂定的減碳 20%目標。我國於 2015 年通過《溫室氣體減量與管理法》，即期盼 2050 年溫室氣體排放量必須降為 2005 年排放量的一半，而碳中和之概念也在 2020 年不斷被世界各國提出，包括歐盟、加拿大、南非已承諾到 2050 年實現碳中和；紐西蘭、智利、丹麥、法國、匈牙利和英國等，已進一步將 2050 年目標納入法律；奧地利、冰島、與芬蘭將碳中和目標提前，均為世界各國之努力方式。國內於 2020 年開始啟動溫室氣體減量及管理法的修正草案，擬升級我國氣候變遷應對措施，如行政院將設「氣候會報」，提升氣候政策指揮層級；增訂「碳費」徵收機制與「調適專章」，加強氣候變遷風險評估等。

根據林俊成等(2010)指出，部分企業認為林務局雖認定造林可做減碳標準，但環境保護署是否認可，以及是否有完整機制，現階段均無明確資訊，而臺灣在推動造林減碳還面臨土地取得不易、政府政策不確定性、認證成本過高等困難，皆降低企業將造林作為減碳策略之意願。若可突破造林地取得不易之問題，企業均有高度意願進行海外造林投資計畫，故應該正視森林作為碳匯之商品化功能。

臺灣現階段並非聯合國成員，故在國際上任何活動均可能受到不公平對待，碳中和三大步驟包括碳足跡盤查、碳減量行動、碳權抵換。目前國內碳權交易並未有成熟市場，故致力於碳減量(減少碳排放及增加碳吸存)應是當前應積極採取的行動，並非主管機關無標準方法學就不得計算，甚至阻礙整體發展。為了達到本案初衷，即透過植樹造林增加碳吸存，且具有一般碳交易計畫碳權額度計算，符合可量測、可報告、可驗證(MRV)之機制，使其達到抵換因展覽產生的碳排放目標，並無所謂基線排放過多，反造成碳排放之問題。

一般而言，林木於生長期間吸存大量的碳，輪伐期屆齡即透過伐採利用，成為木材製品後仍可固定碳，不會分解成 CO<sub>2</sub> 進入大氣層中。林地空間重新造林即可持續不斷吸存碳，除供其他人類活動之碳中和之外，亦可持續降低大氣碳含量(減碳)。但本案雖為複層林營造，原環境屬於次生林，過去為農業使用，廢耕後自然演替為闊葉樹次生林；現階段透過適當營林方式，可使栽植樹種碳吸存能力大於原生的次生林，碳蓄積能力增加之森林等同碳庫量變大，循環時間拉長，故總蓄積亦大於次生林，即使未來不考慮伐除利用，其碳吸存總量亦可大於原生的次生林。

本案在施作手法上皆考慮生態層面施作，非如一般人工經濟林的皆伐且種植單一樹種；作業方式包含規劃鑲嵌塊狀複層林營造、留存生物廊道及棲息空間，以及多樹種營造。雖本案新植苗木為經濟樹種，適當撫育亦有收穫可能性；惟本案現行營造方式並非純經濟造林模式。複層林為就現有造林地(包括人工造林或天然更新造林地)，於中、後期撫育階段，分年實施造林木之疏伐或整理伐，除去生長過密及形質不良的樹木，目的為促進留存林木生長；伐採後之空隙地另選擇較耐陰的樹種實施林下栽植，以改良林相及林分結構。如此多層次的森林結構，可增加對病蟲害的抗性，促進森林健康。

本案是全臺灣次生林以林相改良實施植林減碳之首例，將於全區(含保留區)規劃設立永久樣區，監測計畫區 52.70 ha 範圍內的森林動態變化，不僅可獲取相關生長資訊，也能瞭解林地變化情形，滾動式調整經營計畫，作為後續臺北市政府經營管理公有林的參考。

## 七、結論

人類於生活所需要之活動項目，包括交通、能源使用、農業以及工業生產等過程所釋放之 CO<sub>2</sub> 均是碳排放，若想降低碳排量，除在能源使用或生產過程採取減排技術外，亦可透過碳抵換(碳補償)方式，達到中和碳排放量的作用。故森林碳中和意味著人類活動所產生碳排放，合理的森林經營將具備碳中和的能力。

本案以國際間之碳減量方法(Approved VCS Methodology VM0005 1.2 )作為碳吸存推估之參考依據，而計畫範圍之林地經營現況，透過改善森林經營計畫之減量措施架構與 MRV 精神，評估北美館辦理此展覽活動所產生之碳排放(390 ton CO<sub>2</sub>)，在森林經營期間何時可達到碳中和的目標。由林相改良及碳中和計算分析結果可知，於計畫面積 52.70 ha 中 10.11 ha 作為專案範圍，其中 5.03 ha 作為人為經營區，5.08 ha 作為自然演替觀察區，並依四種不同基線情境下透過本專案活動(改善森林經營計畫)，得知 25 年間專案活動之 CO<sub>2</sub> 變化量，分別為 2,396.05 ton CO<sub>2</sub> 吸收量、2,219.31 ton CO<sub>2</sub> 吸收量、1,865.81 ton CO<sub>2</sub> 吸收量及 1,689.07 ton CO<sub>2</sub> 吸收量，而分別約於**第 10~13 年可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO<sub>2</sub> 量及專案活動中所產生之 CO<sub>2</sub> 排放量**，但現階段部分數據為本專案假設情境，故後續可藉由監測計畫，以滾動方式調整碳中和的情境。

本案初衷係以適度的植林及積極的森林經營管理方式，增加森林的多目標功能，除原有的涵養水源、水土保持及生物多樣性等功能外，未來預期可增加景觀美質、休閒遊憩、碳中和等功能，故選用生長期短之相思樹、中期楓香、生長期較長之臺灣肖楠，兼具碳固定與生態效益之平衡。

森林經營係以多元目標為發展方向，並以實踐永續森林為宗旨。而臺灣肖楠的樹型優美，成林後呈現櫛比鱗次的景觀；楓香為變葉樹種，從春季新生枝桠的嫩綠、夏季的翠綠、秋季轉紅、冬季落葉，呈現四季不同的美感；相思樹為常綠喬木，夏季花期放眼望去一片金黃。未來從大崙頭山鄰近的步道遠望，可增添不同的視覺享受。林木修枝所得的枝條，可利用作為工藝品，或是做為菇類栽種的原料，可透過內雙溪自然教育中心辦理相關的課程活動，提供環境教育活動的素材。

## 八、參考文獻

- 王培蓉、鄭欽龍 (2005) 臺灣森林與保育專家對於森林經營典範認知之差異。中華林學季刊 38(4): 437-447。
- 行政院農業委員會 (2018) 農業部門溫室氣體排放管制行動方案(第一期階段)。
- 行政院農業委員會林業試驗所 (2009) 福山闊葉林長期動態研究(3/3)。
- 行政院環境保護署 (2015) 溫室氣體減量及管理法。
- 行政院環境保護署 (2018) 溫室氣體減量推動方案。
- 行政院環境保護署 (2019) 造林與植林碳匯專案活動。
- 林務局 (2019) 福山動態樣區複查計畫。
- 吳孟珊 (2014) 生態系服務的定義與特性。林業研究專訊 21(5): 54-57。
- 吳俊賢 (1999) 臺灣林業政策之發展與展望，國立東華大學專題演講。
- 李宣德、馮豐隆 (2005) 臺灣森林永續經營之生態指標。森林生態系永續經營研討會。
- 林俊成、王培蓉、李俊志 (2010) 臺灣地區造林減碳之需求面向及參與途徑分析。林業研究季刊 32(2): 49-58。
- 林俊成、吳俊賢、柳婉郁、李俊志 (2012) 民眾對全球暖化知覺、態度與植林減碳意願之研究。臺灣林業科學 27(1): 59-79。
- 林俊成、李國忠、林裕仁 (1999) 柳杉人工林碳儲存效果與適應成本研究。臺大實驗林研究報告 13(1): 51-60。
- 林俊成、柳婉郁 (2010) 考慮機會成本下碳吸存成本效益之經濟分析。應用經濟論叢 (88): 61-102。
- 林裕仁 (2008) 森林減碳能力之推算方法。農政與農情 93: 77-81。

- 邱志明、鍾智昕、林謙佑、唐盛林、林振榮 (2010) 重要平地造林樹種林木生長特性之研究。林業研究專訊 17(6):10-16。
- 邱清安、藍梁文、徐憲生、陳韋志、楊佳蓉 (2021) 專家共同推薦適合臺灣都市林的 157 種原生景觀樹種，林業研究季刊 43(3): 113-146。
- 侯元照、吳水榮 (2008) 生態系統價值評估理論方法的最新進展及對我國流行概念的辨正，世界林業研究 21： 7-16。
- 柳婉郁、徐寬 (2017) 森林碳給付政策之經濟分析。農業與經濟 59: 1-48。
- 柳婉郁、劉哲良 (2016) 企業如何參與植林取得碳權額度。林業研究專訊 23(6): 70-73。
- 國立臺灣大學植物標本館 (1993) 臺灣植物誌第二版(植物電子書)，79 頁。
- 張坤城、邱清安 (2019) 108 年度臺北市大崙頭山林地示範區調查及營造委託專業服務案成果報告。國立嘉義大學。
- 陳玉蘭、曹素珍、武高林 (2005) 生態系服務評估研究。專業科學 22(11): 73-77。
- 童慶彬、李明旭(2013)水資源領域因應氣候變遷不確定性之決策機制研究。經濟部水利署水利規劃試驗所，400 頁。
- 黃裕星 (2010) 台灣綠色造林計畫之展望。林業研究專訊 17(6): 1-4。
- 廖宜緯、陳美光、陳羽康、鍾玉龍、吳守從 (2011) 台糖公司屏東縣平地造林碳貯存量調查。中華林學季刊 44(3): 373-384。
- 臺灣植物誌第二版編輯委員會 (1994) 臺灣植物誌，第二版，第一卷，裸子植物。臺灣植物誌第二版編輯委員會，648 頁。
- 臺灣植物誌第二版編輯委員會 (1996) 臺灣植物誌，第二版，第二卷，雙子葉植物。臺灣植物誌第二版編輯委員會，855 頁。
- 劉宣誠、吳萬益 (1986) 蓮華池地區肖楠造林木之生長與材質之研究。臺灣省林

業試驗所研究報告第 463 號。

劉慎孝、林子玉 (1968) 台灣中南部相思樹林分收穫表及材積表。中興大學農學院森林學系。47 頁。

鄭欽龍 (2009) 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。

謝敬華、柳婉郁 (2018) 臺灣國有森林資源水源涵養經濟效益之評估。應用經濟論叢 104: 185-228。

Berndes G., *et al.* (2016) Forest biomass, carbon neutrality and climate change mitigation. From Science to Policy 3.

Bonner M. T., Schmidt L., S., and L. P. Shoo (2013) A meta-analytical global comparison of aboveground biomass accumulation between tropical secondary forests and monoculture plantations. *Forest Ecology and Management*. 291: 73-86.

Brienen R. J. W., *et al.* (2015) Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature* 519: 344-348.

California Environmental Protection Agency (2014) Compliance offset protocol U.S. forest projects.

Chazdon R., and P. Brancalion (2019). Restoring forests as a means to many ends. *Science* 365, 24–25. doi: 10.1126/science.aax9539.

Chazdon R. (2014) *The Promise of Tropical Forest Regeneration in an Age of Deforestation*. The University of Chicago Press Books.

Chokkalingam U., and de Jong, W. (2001) Secondary forest: a working definition and typology. *International Forestry Review* 3(1) Center for International Forestry Research.

Cook-Patton S. C., Leavitt S. M., and B. W. Griscom (2020) Mapping carbon

- accumulation potential from global natural forest regrowth. *Nature* 585: 545-550.
- Costanza R., *et al.* (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Daily G. C. (1997) *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Washington D.C.: Island Press.
- Ecosystem Marketplace (2019) Financing emissions reductions for the future-state of the voluntary carbon markets report 2019.
- Elias F., *et al.* (2020) Assessing the growth and climate sensitivity of secondary forests in highly deforested Amazonian landscapes. *Ecology* 101(3): 1-11.
- Fantini A. C., Cristiano S., Alexandre S, and S. Ilyas (2019) Small-scale Management of Secondary Forests in the Brazilian Atlantic Forest. *Floresta e Ambiente* 26(4): e20170690.
- Forster E. J., Healey J. R., Dymond C., and D. Styles (2021) Commercial afforestation can deliver effective climate change mitigation under multiple decarbonisation pathways. *Nature Communications* 12, Article number: 3831 <https://www.nature.com/articles/s41467-021-24084-x>
- Goulder L. H., and D. Kennedy (1997) Valuing Ecosystems Services: Philosophical Bases and Empirical Methods. In Daily, G. C (ed) *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington D. C.
- Houghton R. A. (1996) Converting terrestrial ecosystems from source to sinks of carbon. *Ambio* 25(4): 267-72.
- IPCC (2006) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC/IGES. Hayama. Japan.
- Lal R. (2008) Sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> in global carbon pools. *Energy & Environmental Science* 1(1): 86-100.

- Martin A. R., Domke G. M., Doraisami M., and S. C. Thonmas (2021) Carbon fractions in the world's dead wood. *Nature Communications* 12(899): 1-9.
- Millennium Ecosystem Assessment, MA (2005) Guide to the Millennium Assessment Reports. <https://www.millenniumassessment.org/en/index.html>
- Moura-Costa P., and M. D. Stuart (1998) Forestry based greenhouse gas mitigation: a story of market evolution. *Commonwealth Forest Revolution* 77(3):191-201.
- Nabuurs G. J., and M. J. Schelhaas (2002) Carbon profiles of typical forest types across Europe assessed with CO2FIX. *Ecological Indicators* 1 :213–223.
- Ninan K. N., and A. Kontoleon (2016) Valuing forest ecosystem services and disservices - Case study of a protected area in India. *Ecosystem Services* 20:1-14.
- Ninan K. N., and M. Inoue (2013) Valuing forest ecosystem services: What we know and what we don't. *Ecological Economics* 93:137-149.
- Nunes L. J. R., Meireles C. I. R., Gomes C. J. P., and N. M. C. A. Ribeiro (2020) Forest contribution to climate change mitigation: management oriented to carbon capture and storage. *Climate* 8(2):21. DOI:10.3390/cli8020021
- Organization for Economic Cooperation and Development, OECD (2009) *The Economics of Climate Change Mitigation: Policies and Options for Global Actions Beyond 2010*, ISBN 978-92-64-05606-0, OECD, Paris.
- Pacala S., and R. Socolow (2004) Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science* 350(5686) 968-972.
- Pedro M. C., Yap S. W., and G. Albert (1994) Large scale enrichment planting with Dipterocarps as an alternative for carbon offset. In IUFRO editor. *Proceedings of IUFRO International Workshop on Sustainable Forest managements*. 1994 October 17-21 ; Furano, Hokkaido, Japan. 135-145.
- Poorter L. *et al.* (2016) Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*.

530: 211-214.

Requena S. D. *et al.* (2019) Estimating aboveground net biomass change for tropical and subtropical forests: refinement of IPCC default rates using forest plot data. *Global Change Biology*. 25: 3609-3624.

Seibold S. *et al.* (2021) The contribution of insects to global forest deadwood decomposition. *Nature* 597: 77-81.

The American Carbon Registry (2018) Improved Forest Management Methodology for Quantifying GHG Removals and Emission Reductions through Increased Forest Carbon Sequestration on Non-Federal U.S. Forestlands.

Totten M. (1999) Getting it right: emerging markets for storing carbon in forests. Washington, DC: World Resources Inst. 49 p.

U.S. EPA (1992) Exposure Factors Handbook, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, Washington, DC.

Verified Carbon Standard (2013) Approved VCS Methodology VM0005. 83.

Yadanar Y. M., Sasaki N., Datta A., and T. W. Tsusaka (2021) Management of plantation forests for bioenergy generation, timber production, carbon emission reductions, and removals. *Cleaner Environmental Systems* 2.

## 附件一 專有名詞

### 碳吸存(Carbon sequestration)

亦稱為碳截存、碳封存或碳固定，是將大氣中的二氧化碳，以固態碳方式加以儲存，其與碳儲存的差異在於碳吸存通常止一年間之單位面積的碳吸存量，而碳儲存則指一年以上時間或一定面積之碳吸存累積量。

### 碳匯(Carbon sink)

是指通過植樹造林跟新或植被恢復跟新等方式，利用林木的光合作用機制吸收大氣中的二氧化碳，以達減碳的過程、活動或機制，皆稱之為碳匯。

### CO<sub>2</sub> 排放量(Carbon dioxide emissions)

亦可簡稱為碳排放量，係指人類因為從事某種經濟活動，而直接或間接產生的 CO<sub>2</sub> 總重量。

### CO<sub>2</sub> 移除量(Carbon dioxide removal)

亦可簡稱為碳移除量，是指利用各種操作方法，例如以植林或以改善森林經營方式，將二氧化碳從大氣中移除的總量。由於「移除」與「排放」為相反詞，移除二氧化碳的作法或技術，通常稱為達成「碳負排放」。

### 碳權額度(Carbon credit)

在碳交易平台上進行碳交易的買賣雙方(例如：一個國家或一間企業)所能被允許的碳排放量即為碳權額度，其計量單位為每噸二氧化碳當量(tCO<sub>2</sub>-e)。

### 碳抵換(Carbon offset)

為抵消或抵減服務或活動過程中，無法避免的碳排放量，而透過減碳之專案活動所產生的減碳額度，使淨碳排放量降低或達到零碳排放(碳中和)。

### 京都議定書(Kyoto Protocol)

由於 1992 年簽訂「氣候變化綱要公約」後，全球二氧化碳濃度仍在不斷上升，原公約減量目標普遍認為並未被會員國認真執行，於是形成制定具有法律力的議定書的共識。於是，於 1997 年 12 月日本京都的「第三次締約國大會」(COP3) 中簽署「京都議定書」，規範 38 個國家及歐盟(即所謂附件 B 國家)，以個別或共同的方式控制人為排放之溫室氣體數量，以期減少溫室效應對全球環境所造成的影響。

### 新植造林(Afforestation)

為在沒有森林覆蓋的區域中，以林木栽植方式進行造林，使非森林使用之土地逐漸轉換成森林使用之土地。

### 更新造林(Reforestation)

為林地復育又稱復舊造林，係指原本已是林地，經伐木後以造林更新方式，進行林相改良或林相變更的森林經營活動。

#### 毀林(Deforestation)

係指利用伐木作業，將原為森林覆蓋之林地轉變為無森林覆蓋之其他非林業用途之土地。

#### 認證碳標準(Verified Carbon Standard, VCS)

為全球最廣泛使用之自願性減碳標準，已有 1,700 個 VCS 認證之減碳計畫，減少約 6.3 億公噸之二氧化碳排放量。

#### 聯合國氣候變遷綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)

其為 1992 年 5 月在紐約聯合國總部，通過的一個與氣候變遷相關議題之國際公約，該公約於 1992 年 6 月於巴西里約熱內盧舉辦的聯合國環境與發展會議中進行簽署，該公約於 1994 年 3 月 21 日生效。

#### REDD+(Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation Plus)

藉由國際資金援助，提供開發中國家財務上的誘因，減少伐林造成的森林退化、促進森林保育、加強森林的碳儲存量以及永續管理森林，進而達到減少碳排放的目標。

#### 自願性減碳市場(Voluntary carbon market)

是一種碳交易之市場機制，企圖降低企業碳排成本的碳交易市場。自願減排市場起源於一些團體或個人，為自願抵消碳排放，而向可提供減碳項目之所有方(項目業主)購買減碳額度的行為。

#### 碳中和(Carbon neutral)

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總量，通過使用低碳能源取代化石燃料、植樹造林、節能減碳等形式，以抵消自身產生的二氧化碳排放量，達到「淨零碳排放量」。

#### 淨零碳排放量(Net-zero carbon emission)

是指在特定的一段時間內，某一種活動過程中所造成的碳排放量，扣除以人為之各種方式所移除之碳總量後等於零，即為淨零碳排放量。

#### 改善森林經營(Improved Forest Management, IFM)

係指進行妥善的森林經營規劃，進行計畫性的林地經營，使林地之單位面積之林木生長量較未經經營林地高，亦即利用森林經營手段提升林地生產力，在符合碳保存目標下，可促進森林中碳儲存量的增加，並防止森林碳儲存的減少或流失。

#### 可量測、可報告、可驗證(Measurement, Reporting, Verification, MRV)

是一種科學性的量測/監測方法，針對溫室氣體的排放和減量行動，進行監測、量化其成效，並加以揭露，以供驗證方對於成效，進行公正的評估。

#### 碳儲存(Carbon storage)

林木藉由本身生理特性，進行光合作用吸收大氣中二氧化碳，轉化為有機碳形式儲存於林木體內，而碳儲存具有長時間及一定面積下所累積之碳量意涵。

#### 基線(Business As Usual, BAU)

溫室氣體基線(BAU)排放量，是假設在政府完全不採取任何溫室氣體減量要求的政策，任由自由市場力量引導的經濟成長下，因溫室氣體排放源的自發行為而增加的溫室氣體排放量。

#### 碳洩漏(Carbon leakage)

以全球尺度視之，是指當一個國家採用較嚴格的氣候政策而減少碳排放量，而導致另一個國家的碳排放量增加的情況，可定義為碳洩漏。而以區域尺度視之，當一種碳減量專案活動執行時，而導致專案邊界外另一個區域或活動的碳排放增加，亦可稱為該專案活動之碳洩漏。

#### CO<sub>2</sub> 淨移除量(CO<sub>2</sub> net removals)

在特定期間內(衡量期間通常是一年)，移除大氣中 CO<sub>2</sub> 的總量。

#### 碳含量轉換係數(Carbon Fraction, CF)

為生物量轉換為碳含量的比值。

#### 生物量擴展係數(Biomass Expansion Factor, BEF)

為林木材積轉換為生物量之比值。

#### 未經營次生林(Unmanaged secondary forest)

以自然保育為目的，優先考慮次生林的自然演替，不進行任何更新、撫育的經營措施。

#### 經營次生林(Managed secondary forest)

伐除大部分的次生林植被，而保留部分生長優質的林木，並進行林木的更新造林、撫育等經營措施。如果管理得當，次生林可以產生正向發展之生態環境和經濟效益。

#### 不確定性(Uncertainty)

是一種用於表達測量值的統計離散度的參數。

#### 風險管理行動(Risk management actions)

是一個管理過程，包括對風險的定義、測量、評估和發展因應風險的策略行動。

#### 可信賴度(Credibility)

指在條件下和規定時間內，可達成預先設定目標或任務的概率。

#### 森林生態系服務(Forest Ecosystem Services, FES)

為人類直接或間接從生態系功能(Ecosystem functions)獲得的效益，包括供給服務、支持服務、調節服務及文化服務。

#### 波昂挑戰(Bonn Challenge)

「波昂挑戰(Bonn Challenge)」為 2015 年 3 月於德國波昂所召開第二屆國際研討會，宣示森林復育的新目標，「在 2020 年前重建 1 億 5 千萬公頃劣化和已砍伐的森林，並於 2030 年前完成至少 3 億 5 千萬公頃的森林復育」。

#### 生命週期評估(Life cycle assessment)

是估計產品或服務在可用期間內對環境影響的重要工具，可協助產業了解自身碳排放量，進而可以針對主要耗損能源的製程或使用方法加以改良，透過價值分析、資源回收、重新使用等方式，減少潛在成本與環境污染，既能減少碳排放量，亦能邁向綠色經濟。

#### 森林碳保存(Forest carbon conservation)

在於保存森林資源的碳庫(Carbon pool)，亦是防止或減少已經固定在碳匯(Carbon sink)中的碳釋放率。行動策略包含:保護區設置、森林火控制、減少林地破壞和改善森林經營、土壤保育等面向來達成。

#### 森林碳吸存(Forest Carbon sequestration)

係經由加強林地管理，擴大森林資源的碳儲存。其方式可藉由增加森林面積或提升天然和人工林的碳密度(Carbon density)，並且亦可增加耐久性林產品的使用來貯存。實際策略可透過加強造林、天然林更新、農地造林等森林永續發展的經營管理策略，增加森林資源的碳吸存。

#### 森林碳替代(Forest carbon substitution)

為將森林生質碳轉移至產品(如結構用材與生質燃料)，藉以替代石化製品的能源與產品、水泥製品和其他建築材料，此策略也包括栽植短伐期的森林。此外，增加耐久性林產品的使用，來取代鋼鐵及水泥等高耗能材料，或是使用生質燃料，皆可減少對化石燃料的需求。

#### 清潔發展機制(Clean Development Mechanism, CDM)

此機制是因應《聯合國氣候變化綱要公約的京都議定書》所發展出的機制。清潔發展機制協助不受減碳量限制的發展中國家(例如：多數的非洲或中南美洲國家)，在有具體減碳量限制的已開發國家的幫助下，達到永續發展，而已開發國家(例如：美國或歐盟國家)可藉由向開發中國家購買抵換額度 (offsets) 來達到減碳承諾。

## 附件二 委員意見回覆

### (一)第一次審查意見(8月30日)

#### 委員一、

審查意見	意見回覆
本計畫最後以低產量森林轉換為高產量森林之方法(VM0005)為主，其適用條件是否符合？另其他方法如沒使用，建議不用特別列出，以免有需差異性比較的疑問，如 ACR 及 J-VER(應為 J-Credit)等方法學為何不適用等問題？實際上，反而 J-Credit 更簡單易操作。	本案參考 VCS 中不同之方法學，以本案計畫範圍之林地經營現況，改善森林經營較為相似，而以 IFM 作為目標之方法學有許多，包括將低產量森林轉換為高產量森林之方法(VM0005)、透過延長輪伐期時間改善森林經營之方法(VM0003)等，而本案由 VCS 中之方法學作為架構以及 MRV 之精神，評估北美館辦理此次展覽活動所產生之碳排放能否以 IFM 進行抵銷。(P. 3)
改善森林管理(IFM)活動或增進森林經營計畫(Improved Forest Management Projects, IFMP)? 說法應一致，本計畫僅估算造林的 10.11 ha，似為再造林是否符合 VM0005，請再思考	本案改善森林管理活動或增進森林經營計畫統一修正為改善森林經營(Improved Forest Management, IFM)(P. 3)；本案以全區 52.70 ha 中 10.11 ha 作為本次專案面積，並進行改善森林經營(IFM)活動發展本案架構，而 42.59 ha 以建議方式，可納入未來改善森林經營(IFM)活動之專案。
在計畫區進行調查後結果顯示其胸徑多數以 5-10 cm 之林木組成，胸徑大於 25 cm 者為少數，平均每公頃蓄積量約為 96.18 m <sup>3</sup> (表 3)，由圖 8 所示胸徑大於 25 cm 者有 58 株占全部 2,171 株，2.67%。但由作業區整理伐前後對照表，整理伐前後蓄積量，可知伐採 972.33-476.01=496.32，伐採量超過一半，而整理伐前後株數 21,947-2,769=19,178，伐採株數約 87%，與上面資料相比，應有不少胸徑小於 25 cm 者留存。因此在留存木的依據，應有較為明確的判定標準	本案主要係針對該區域內形質不良木、被壓木及生長不良木進行整理(P.16-19)，而主要留存木以 25 cm 以上為主，但亦考量其生長是否會影響造林木，因此胸徑小於 25 cm 尚有留存。而部分胸徑大於 25 cm 予以伐除者，以於 P17 補充條件說明。
不知有沒有留存木的資料?建議可調查留存木後續的生長表現?	本案針對留存木有進行盤點，再透過監測計畫亦會針對留存木進行調查，並了解後續生長狀況。
本計畫在專案作業前 CO <sub>2</sub> 變化量，第四次森林資源調查之闊葉林平均生長量 3.6 m <sup>3</sup> /ha/year 為	針對基線生長量之參考依據，本案將以福山闊葉林長期動態研究之研究成果作為基線生長

<p>基線生長量，此為天然闊葉林的數值，是否符合現地情形？</p>	<p>量參考依據。(P. 22、P. 27)</p>
<p>依第四次森林資源調查天然闊葉林 198.95m<sup>3</sup>/ha,而本計畫樣區為平均每公頃蓄積量約為 96.18 m<sup>3</sup>(表 3)，蓄積少一半，但用相同的生長量，在生長率就多了不少，營造前後的留存木生長表現相同似不合理，可能因疏開而增加，是否合理，請再思考，另外留存木在伐採後，生長情形應會比較好，但仍沿用 3.6 m<sup>3</sup>/ha/year 為生長量是否合理？</p>	<p>本案將以福山闊葉林長期動態研究之研究成果作為留存木生長量之參考依據。(P. 29、P. 30)後續將透過造林木和留存木之監測計畫，針對疏開之留存木進行調查，取得更準確之留存木生長量資料，再進行滾動式修正。</p>
<p>文中有引用 Forster et al. (2021)人工林與次生林下種之林相比較，是個可參考的結果，可就內容納入加強說明。</p>	<p>本案依據 Forster et al. (2021)新增圖 13 人工造林地(種植於 2020 年)與保育性森林每公頃累積 CO<sub>2</sub> 當量吸存比較圖，顯示推估 100 年間次生林碳吸收量為 0.41-0.82 Gg CO<sub>2</sub>e ha<sup>-1</sup> 區間，而人工林碳吸存量為 1.36-2.96 Gg CO<sub>2</sub>e ha<sup>-1</sup> 區間，加強人工林之碳吸存能力相較次生林而言，能有更佳良好的效果，將生質能源與其他木材利用之效益帶入，讓碳吸存能力能達到事半功倍的提升。(P. 45-46)</p>
<p>各樹種株數以存活率 70%作為專案估算之依據，似不符合合約，如第一年即要 100%，建議前 6 年可調高些，如第一年為 100%之後遞減，第 6 年後為 70%，另 7-20 年任何撫育措施都不用嗎？</p>	<p>本案造林木碳吸存之估算，經修正後以鄭欽龍(2009)國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃，其報告中針對臺灣肖楠、楓香及相思樹之林齡與材積之迴歸方程式進行估算。該迴歸方程式因含蓋不同林齡、密度等資料，因此不考慮其存活率(P. 31-33)。一般山坡地造林與平地造林株數為每公頃 1,500-2,000 株，而本案栽植密度為每公頃 1,000 株，故以保有更多生長空間，因此尚無考慮進行 6 年之後撫育作業。</p>
<p>專案活動下每公頃消耗油料為 110 L，應說明做了什麼，如整地，運苗等，以符合 MRV，另計算基準以 1 L 汽油燃燒產生 2.2 Kg CO<sub>2</sub> 計算之資料來源為何？</p>	<p>專案活動包括整地、整理伐及造林作業，並以三種作業統計每公頃消耗之鏈條油為 25 L、汽油為 75 L，總消耗油量為每公頃消耗油料為 110 L(P. 35)；汽油燃燒產生 2.2 Kg CO<sub>2</sub>，係參考環境保護署公告之「固定源與移動源(燃料)CO<sub>2</sub> 排放係數」(溫室氣體排放係數管理表 6.0.4 版)作為依據(P. 26)。</p>
<p>監測計畫的用意，主要是在藉由監測計畫的實施，來看前後之差異性，了解預估與實際的數</p>	<p>本案監測計畫為兼具生態環境狀況，除專案活動之相關監測，故增加動物及水土保持監測。</p>

值是否相近，建議可參考 AR-AMS0001 小規模減量方法-造林與植林碳匯專案活動之監測計畫概念，故動物等監測意義何在？如要後續監測，應有基線資料，如此才可比較	(P. 38-41)
就數字上，肖楠的單株碳存量高於楓香及相思樹 2-3 倍，是否符合，請再檢視	針對造林樹種之生長量計算，本案經修正後以鄭欽龍(2009)國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃，其報告中針對臺灣肖楠、楓香及相思樹之林齡與材積之迴歸方程式進行估算。(P. 31-33)
本計畫應為藝術理念的延伸(碳中和)，其重點在於在如何於現場操作，並非未來在碳市場進行交易，因此，似乎不一定要使用特定的方法學，因為專案的適用條件將是一個變數，本計畫是屬 IFM 或 AR 即有不同，故不一定是使用那一個方法學，而是要有專案活動設計書(PDD)的架構的主要內涵。	遵照辦理。

委員二、

審查意見	意見回覆
盤附植物是否用林業常用攀附植物	針對盤附植物已修正為攀附植物。(P. 4)
“牧”產物與”木”產物是否錯字	牧產物已修正為木產物。(P. 5)
“環境周遭環境”詞重複	本案已進行修正。(P. 7)
表 1 坡度分級中，坡度用百分比而非度數是否非常用法	坡度分級所使用之百分比為山坡地土地可利用限度分類標準，其標準係以百分比呈現。(P. 10)
計畫總面積 52.07ha，作業區 10.11ha，作業區比率應該不是 23.48%，請確認	謝謝委員意見，本案已進行修正，其作業區比率為 19.18%。(P. 15)
計畫區森林資源現況調查後結果抒寫太簡略，無法說明此結果是否有林相更新需求性。應再多著墨以利說服民眾。	謝謝委員意見，本案將 2019 年林業試驗所及嘉義大學所做之研究成果納入。(P. 12-13)
表 6 本計畫造林種選擇與碳儲存量相關，建議加入每樹種碳儲存量(雖然後續已說明，但加入表格會更清楚)	謝謝委員意見，表 6 為選擇造林木之原因及其特性，而樹種碳儲存量於報告 P.31-33。
造林樹種 7077 棵，排版錯置	已進行修正。(P. 30)
公式 H 非 Ht	已進行修正。(P. 33)

委員三、

審查意見	意見回覆
建議計畫書的每個表格應予以檢核。如第 25 頁出現表 1，第 11 頁也有表 1，內文有許多表格未列表標題，應加入表標題且表的編號也應重	本案已重新檢視表格並修正。

新檢視。	
P.24, 本表之定義「基線情境下, 專案範圍內 t 年之林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量」是否應為「基線情境下, 專案範圍內第 t 年之林木的地上部、地下部 CO <sub>2</sub> 變化量」, 請查證。	定義已進行修正。(P. 23)
P. 24, 「樹幹材積年淨生長量」乘以 [BCEF×(1+R)×CF] 即能算出其每公頃每年的碳變化量。其中 BCEF 亦可以用地上部生物量擴展係數(Biomass Expansion Factor, BEF)與基礎密度(D)相乘而得(式 4), 其係數表如表 2。經對應表 2 並非上述內容, 請予以檢核對應關係。	係數表如表 2 已修正為表 11。(P. 23)
P.24-25, 公式編碼請重新檢查, 第 24 頁公式(4), 第 25 頁公式(6), 但中間缺公式(5)。	已重新檢視公式編碼, 並進行修正。P.24 式 6 修正為式 5, P. 26 式 7 修正為式 6。
P.28-36, 對於碳量的表示除了列出專案面積的總量外, 建議可以加列每公頃的量, 較容易進行標準化的比對。	本案已加列每公頃 CO <sub>2</sub> 量。(P. 28-35)
就本次所列之方法學, 建議在對外進行解說明時, 能製作一簡單易於讓民眾瞭解的圖表, 讓民眾能易於瞭解其內容, 另外, 此方法學的應用, 如有國際上的案例, 也可增列說明, 以強調及適用性及並普及性。	本案參考以低產量森林轉換為高產量森林之方法(VM0005)做為本案減量方法之依據, 並整理及調整其內容, 為符合本案所適用並整理於表 1。(P. 4)
最後, 建議可以整理近年來平地景觀造林不同樹種碳吸存的資料, 讓大家瞭解造林樹種的碳吸存能力的, 也可解答民眾對於部份碳吸存的存疑。	針對平地造林不同樹種碳吸存資料於 P. 45 進行補充及說明。

委員四、

審查意見	意見回覆
IV, 表 6 造林樹種特性及選擇原因表(臺灣植物誌第二版, 1993)修正為 表 6 造林樹種特性及選擇原因	已重新檢視並進行修正。(IV)
P. 9, 「環境周遭環境」, 修正為「周遭環境」。「作業」範圍修正為「造林」範圍。	已重新檢視並進行修正。(P. 7)
P. 9, 「可作業區」建議修正為「規劃造林區」, 「不可作業區」建議修正為「規劃保留區」。	已重新檢視並進行修正。(P. 7)
P. 12, 表 2 坡向分 6 類, 但圖 4 坡向分 7 類, 如何正確對應請修正	本案已將坡向圖重新分類且統計, 修正於 P. 10。
P. 13, 計畫區內主為幼黃壤土, 因無其他土壤可資分辨, 圖 6 是否要列	本案因無其他土壤可資分辨, 圖 6 將移除。(P. 11)
P. 14, 20 個臨時樣區, 規劃造林區分布那幾個? 規劃保留區分布那幾個?	本案 20 個臨時樣區分別為 17 個位於規劃造林區, 3 個位於規劃保留區。(P. 12)
P. 15, 圖 8 樣區徑級分布, 請以規劃造林區、保留區、計畫區顯示	本案將規劃造林區、保留區及計畫區之徑級分布圖於圖 7。(P. 13)

P. 16, 表 3, 樣區編號加註規劃造林區或保留區	本案於表 4 註增加*為規劃保留區, 其餘皆為規劃造林區。(P. 14)
P. 17, 針對作業區, 修正針對規劃造林區。調整後作業區, 修正調整後實際造林區。作業區(修正為實際造林區)10.11 ha 作為計算, 其作業區(修正為實際造林區)面積比率為 23.48%。若依作業區(修正為實際造林區)立木度表示, (作業區(修正為實際造林區)胸高斷面積/計畫區胸高斷面積)。	作業區已修正為實際造林區。(P. 15)
圖 20 小規模塊狀整理伐作業區(修正為實際造林區)位置圖	作業區已修正為實際造林區。(P. 15)
表 33 作業區(修正為實際造林區)對照表, 分區(作業區修正為實際造林區), 未作業區(修正為實際保留區)。	作業區已修正為實際造林區。(P. 16)
P.20, 作業區編號(修正為實際造林區編號)	已重新檢視並進行修正。(P. 19)
2. 整理伐作業程序及規範(修正為規範及程序)	已修正為整理伐作業規範及程序。(P. 17)
(2)整理伐順序: 自林分之下坡向嶺線方向依序整理伐除不良木(修正為不良木、被壓木及生長不良木)。	已修正為不良木、被壓木及生長不良木。(P. 18)
根據本計畫之整地作業規範及整理伐作業程序及規範(修正為規範及程序), 在作業區(修正為實際造林區)內進行伐木整地, 並已完成 10.11 ha 的整理伐與整地作業, 各作業區(修正為實際造林區)之整理伐前與整理伐後對照表如表 5。	程序及規範已修正為規範及程序, 作業區已修正為實際造林區。(P.17-19)
表 34 作業區(修正為實際造林區)整理伐前後對照表。表內作業區編號(修正為實際造林區編號)。*為該作業區(修正為實際造林區)多屬草生地。	作業區已修正為實際造林區。(P.19)
P. 22, 小規模塊狀整理伐作業區(修正為實際造林區)面積合計 10.11 ha	作業區已修正為實際造林區。(P.20)
P. 23, 圖 21 作業區(修正為實際造林區)實施造林之位置圖	作業區已修正為實際造林區。(P.21)
表 7 實際造林區編號 6 為草生地, 為何種植	實際造林區編號 7、10 雖非草生地, 但現場 7、

<p>楓香而非相思樹；編號 7、10 為非草生地，為何種植相思樹；編號 11 為草生地，為何種植臺灣肖楠。因表 6 顯示相思樹適合種植植於草生地</p>	<p>10 號區域相較 6、11 號潮濕，考量樹種特性，相思樹相較另外兩種物種較耐旱耐短期水淹，因此將相思樹種植於 7、10 號，而 6 號屬草生地該區域較為空曠，考量未來楓香具景觀之功能，因此將其種植於 6 號；11 號種植臺灣肖楠係考量其坡面為緩坡，排水功能相較 7、10 號佳，而臺灣肖楠怕積水，因此於此種植臺灣肖楠。</p>
<p>P. 25，表 1 本計畫所使用之各樹種生物量碳儲存量推估之相關本土轉換係數，本表並未列入圖表目錄？表的編號為 1 可能有誤？</p>	<p>本案所使用之各樹種生物量碳儲存量推估之相關本土轉換係數已修正為表 11，並列入圖表目錄。(P.24)</p>
<p>P. 27，而伐倒木蓄積量以式 3 進行計算，轉換係數以表 2，請查明表 2 是否正確？</p>	<p>本案表 2 已修正為表 11。(P. 25)</p>
<p>P. 30，造林木之.....，與造林木之枯死量有關。依據林務局頒布「獎勵輔導造林辦法(103 年 7 月 7 日)」第九條第一項第二款「林木成活株數達百分之七十以上；自造林第七年起，每年造林成活率得扣除自然枯死率百分之二」。獎勵輔導造林期限為 20 年，本專案預設 CO<sub>2</sub> 變化量之估算為 25 年，故本專案之造林木留存數量是否依該辦法調整之。</p>	<p>本案造林木碳吸存之估算，經修正後以鄭欽龍(2009)國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃，其報告中針對臺灣肖楠、楓香及相思樹之林齡與材積之迴歸方程式進行估算。該迴歸方程式因含蓋不同林齡、密度等資料，因此不考慮其存活率。(P. 31-33)</p>
<p>P. 48，因此在整個地景中，森林碳儲存輛(量)圍繞趨勢線波動，</p>	<p>已重新檢視並進行修正。(P. 45)</p>

委員五、

審查意見	意見回覆
<p>營造兼具有生產性與景觀性之「複層林林相」，所指之複層林為何？是包含保留木及新植苗木之複層林？抑或是未來包含上層喬木及下層灌木及地被植物之複層林？建議略加說明。</p>	<p>本案為透過撫育作業達到新植林木、留存木及未來下層木，營造兼具有生產性與景觀性之複層林林相。(P. 2)</p>
<p>第 2 頁提及之「現存林分過密之次生林」，依現地勘查情形建議加註其為過去未加以撫育之油桐、白柏造林地所組成之次生林。</p>	<p>本案已修正為藉由人為方式將過去未經撫育之油桐及白柏造林地所組成之次生林，亦為現存林分過密之次生林，透過整理伐的方式，將林地進行整理後進行造林，以達林相改良。(P. 2)</p>
<p>本案之碳減量方法與國際間既有減量方法之差異比較章節中，建議先有文字說明再進行列表比較，另比較表中本案之碳減量方法出處建議可增列參考了那些項目(文獻或規範)。</p>	<p>本案參考以低產量森林轉換為高產量森林之方法(VM0005)做為本案減量方法之依據，於 P. 4 進行適用條件說明，並針對本案之碳減量方法調整於整理於表 1。(P.4)</p>
<p>本案坡度分析整體平均坡度不高，所建議水土保持技師每月進行水土保持現地會勘，如此高頻度是否有其必要性？建議可於雨季或颱風來</p>	<p>針對水土保持技師每月進行水土保持現地會勘，將會再與臺北市立美術館及台北市政府工</p>

臨前、颱風災後及致災性豪大雨災後進行現勘較有實質意義。	務局大地工程處進行討論。未來亦可建議於雨季或有強降雨之時進行現勘。而針對水土保持，本案於監測計畫亦有建議之水土保持監測計畫。(P. 40)
第 15 頁現地樹種組成不應僅列原生樹種，現勘發現也有油桐、白柏等樹種應一併列出，否則容易讓外界誤解為區域內屬於組成均為原生種之天然林。	本案於現勘及調查時也有發現油桐及白柏等樹種，因此樹種組成有再補上該樹種。(P. 13)
生長量估算以第四次森林資源調查之闊葉林平均生長量資料作為依據，是國內較常用也較被接受的參考依據，但團隊也有針對已知樹種生長量更精確之資料，或許可一併列出提供參考。	本案為使更貼近現況，將以福山闊葉林長期動態研究之研究成果作為留存木生長量之參考依據(P. 22)。而後續生長量更精確之資料，亦可透過造林木及次生林監測計畫取得，並滾動式修正。(P. 38)
後續監測計畫如僅於未作業區進行永久樣區設置，未來與其比對之對照組為何？是否亦應有樣區設置於作業區？另未作業區是指有整理伐作業但未進行後續撫育的區域，還是指完全未進行整理伐的次生林區域？需再清楚說明。如有需要估算不同處理方式林地之碳儲存量，則建議增加鄰近有作業及未進行整理伐作業的區域一併監測。	本案後續監測計畫，將於實際保留區設置永久樣區，進行次生林監測。未作業區本案修改為實際保留區，該區域為未整理伐之次生林區域(P. 38)。未來若需要估算不同處理方式林地之碳儲存量，將會將其意見納入考量。
動物監測建議亦應有作業區內及非作業區之監測對照，可能出現之物種種類可參考大地工程處鄰近場域之相關調查報告，另以大明橋為食草之臺灣小灰蛺蝶的數量建議納入監測項目。	本案動物監測計畫之表 23，監測類群含鳥類、哺乳類、爬蟲類、蜂蝶類，針對不同類群其調查方法有所不同，而針對關注物種進行族群數量之監測。(P. 40)

委員六、

審查意見	意見回覆
P. 1，認證碳標準(Voluntary Carbon Standard, VCS)應更正為認證碳標準(Verified Carbon Standard, VCS)。	認證碳標準已修正 Verified Carbon Standard。(P. 1)
P. 2，碳中和(Carbon Neutral)的意涵，與 p.45 碳中和(Carbon Neutrality)的定義並不一致；本案主題為碳中和，故用詞上建議更精確調整。	已針對 P. 2 碳中和(Carbon Neutral)的意涵進行修正，修正為碳中和(Carbon Neutrality)。
P. 3-4，Improved Forest Management(IFM)建議統一翻譯為「改善森林經營」。	遵照辦理。
P. 20，表 5 本案作業區的伐採強度，以材積而言為 51%，尚屬合理；但以株數而言為 87.4%，確屬偏高。林相改良作業鮮少伐木株數達 60% 以上者。本案伐採計畫既為配合複層林造林、	本案將以福山闊葉林長期動態研究之研究成果作為留存木生長量之參考依據，但將透過造林木和留存木之監測計畫，針對疏開之留存木進行調查，取得更準確之留存木生長量資料，

提升林木生長量以達成雙年展活動碳中和為目標，則合理留存原生樹、促進受光生長，應能加速碳中和達成年限，何以於規劃之初即忽略留存木疏開後加速生長之效應，似應有合理的說明。	再進行滾動式修正。(P. 38)
P. 20，表 5 註：6*、11*、13*說明為該作業區多屬草生地，因此林木少地被居多；但表中各區株數換算每公頃均為 2,170 株，並非實際調查數值；第 6 區換算每公頃留存株數亦較第 7 區為多，請加強說明。	各作業區整理前蓄積量及伐採前株數，係以每公頃蓄積量及每公頃株數進行估算之，而留存木之株數係以現場而得。實地造林編號 6 周遭含蓋較多胸徑較小之林木，因此每公頃株數較旁邊編號 7 之造林地株數為多。(P. 18)
P. 39，表 16 楓香生長量自第 18 年開始下降，相思樹在第 22 年生長下降，與報告中 p.52 所說明之中輪伐期、短輪伐期概念不一致，與表 11、12 亦有矛盾之處。請說明所依據之文獻。	本案針對造林樹種之生長量計算，本案經修正後以鄭欽龍(2009)國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃，其報告中針對臺灣肖楠、楓香及相思樹之林齡與材積之迴歸方程式進行估算。(P. 31-33)
P. 40，次生林監測及林木生長監測，因屬樣區調查，工作量不大，建請於前 10 年每年監測調查，至達成碳中和目標後再延長調查年限。	本案已針對次生林監測及造林木和留存木監測進行修正，並以前 10 年每年監測一次，10 年後每 2 年監測一次，至達成本案碳中和之目標再以每 5 年監測一次。(P. 38)
P. 43，DEM 請寫出全名數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)。	已重新檢視並修正於 P. 41。

委員七、

審查意見	意見回覆
P.6，專案研究等 t 年專案情境下造林枯死木及留存木枯死，保留區 t 年因競爭或其他原因而枯死之林木，應放於何項？	本案因 t 年情境下造林枯死木及留存木枯死，反應其留存木及造林木之生長量(株數)，依滾動式修正於及；而保留區 t 年因競爭或其他原因而枯死之林木，因保留區於專案邊界外，其不考慮枯死之林木。
臨時樣區 20 個和規劃造林區、規劃保留區關係如何？	本案 20 個臨時樣區分別為 17 個位於規劃造林區，3 個位於規劃保留區。(P. 12)
P.19 圖 11，伐倒木分段(1-1.5 m)放於植林帶兩旁，建議修正為放於植林帶上下側，才能配合橫坡帶狀整地，發揮水土保持功效。	已將其修正為植林帶上下側。(P.16)
P.20，表 5 整理伐前每一作業區蓄積量，若有樣區調查，建議以該樣區蓄積量推算，不要以平均蓄積量(20 個樣區)推算，較能精確反映該作業區狀況。	本案樣區調查為計畫區(52.70 ha)森林資源現況調查，因此未全針對每一實際造林區進行樣區調查，係以平均蓄積量進行推估各實際造林區蓄積量。
P.26，之計算，應為。	遵照委員意見，已修正為。(P. 25)
留存木地上部生物量計算，本計畫以第四次森	本案將以福山闊葉林長期動態研究之研究成果

<p>林資源調查之闊葉樹林平均生長量 3.6 m<sup>3</sup>/ha/yr 計算，建議將來以該專案實際生長量計算，因林況地況差異太大。</p>	<p>作為留存木生長量之參考依據，但將透過造林木和留存木之監測計畫，針對疏開之留存木進行調查，取得更準確之留存木生長量資料，再進行滾動式修正。(P. 38)</p>
<p>基線碳量，也應分作業區及非作業區之實際林木生長量計算，因林分密度不同，生長量有差異。</p>	<p>為 10.11 ha 之基線碳量，因此未將保留區進行計算。</p>
<p>P.31，式 8 和表 10，肖楠材積估算有問題，請檢查。</p>	<p>本案針對造林樹種之生長量計算，本案經修正後以鄭欽龍(2009)國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃，其報告中針對臺灣肖楠之林齡與材積之迴歸方程式進行估算。(P. 31-33)</p>
<p>表 8、表 9，本案 CO<sub>2</sub> 減量估算，留存木每年生長量，碳儲存量皆相同，臺灣肖楠、楓香、相思樹則以林齡估算單株胸徑、樹高，再計算材積生長量，乘總株數換算專案生物量、碳量及 CO<sub>2</sub> 量，建議監測樣區設立後應以專案區內實際值取代較為精確。</p>	<p>本案於造林木和留存木監測計畫，將會針對留存木及造林木進行永久樣區監測，透過每期調查資料，針對造林木及留存木之生長量滾動式修正，以達更精確之數據。(P. 38)</p>
<p>表 16 為何楓香、相思樹 CO<sub>2</sub> 淨移除量，專案年分 7-25 年，會有高高低低情形，尤其楓香，原因為何？</p>	<p>本案針對造林樹種之生長量計算，本案經修正後以鄭欽龍(2009)國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃，其報告中針對臺灣肖楠之林齡與材積之迴歸方程式進行估算。(P. 31-33)</p>

(二)第二次審查意見(9月10日)

委員 A

審查意見/提問	意見回覆
基線的估算用福山的數據，但仍建議調整敘述，因疏開後留存木生長量應較原次生林高。	本案以 Fantini <i>et al.</i> (2019)於巴西大西洋森林對於經營之次生林生長量之研究作為參考依據，其平均生長量 3.7 m <sup>3</sup> /ha/year 作為疏開後留存木生長量之估算。(P. 25)
生長模式主要引述之報告數據也是引用別人的報告，建議應找最原始的文獻；臺灣肖楠的吸存量有低估，建議再檢視。	臺灣肖楠生長量參考劉宣誠、吳萬益(1986)針對蓮華池地區臺灣肖楠造林木之生長研究，透過樹幹解析研究所得資料，並加以整理並建構以林齡推估材積之迴歸方程式，作為臺灣肖楠之估算依據。(P. 34)
展覽排放之 390 噸應不屬洩漏的範疇。	依委員建議修正。

委員 B

審查意見/提問	意見回覆
推估 20 年已屬保守。本案重點「碳中和推估」及「複層林營造規劃」，目前看起來像伐除量過高，導致要長時間去彌補。針對移除量要有論述支撐，否則有反客為主的質疑。	本案經文獻蒐集後進行修正，以四種不同平均生長量之基線情境進行推估，分別為第 8 年、第 8 年、第 9 年、第 9 年，可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO <sub>2</sub> 量。(P.40-50)
三種樹種的生長量推估偏低，特別是臺灣肖楠生長量有低估。	臺灣肖楠生長量參考劉宣誠、吳萬益(1986)針對蓮華池地區臺灣肖楠造林木之生長研究，透過樹幹解析研究所得資料，並加以整理並建構以林齡推估材積之迴歸方程式，作為臺灣肖楠之估算依據。而楓香及相思樹係參考鄭欽龍(2009)國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃，其報告中針對楓香及相思樹之林齡與材積之迴歸方程式進行估算。(P.34-36)
伐除木保留在林地，非全部分解，若形成腐殖質留在林地，是否要扣除。	本案針對伐倒木之 CO <sub>2</sub> 排放量參考 Martin <i>et al.</i> (2021)針對枯死木質量轉為碳量之比例研究中，枯死木排放於大氣中二氧化碳係依生物量乘以 0.485 作為估算，而依每年排放率以 15%進行排放(Seibold <i>et al.</i> , 2021)。(P.25)

福山是屬於永久動態樣區，是否適合援用可再討論。除了福山之外，全臺灣有 6 個林相改良先驅計畫，可以參考是否有相關文獻，或可降低達成年限。	本案以 Fantini <i>et al.</i> (2019)於巴西大西洋森林對於經營之次生林生長量之研究作為參考依據，其平均生長量 3.7 m <sup>3</sup> /ha/year 作為疏開後留存木生長量之估算。(P. 25)
楓香在報告中表達為中等輪伐期，相思為短輪伐期，但楓香生長量在第 18 年下降、相思在第 22 年下降，是否矛盾？	本案原以台東楓香及相思樹之幼齡林研究報告作為，兩者生長量推估之依據，因此生長量於 18、22 年有下降，但本案在經文獻蒐集，以鄭欽龍(2009)國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃，其報告中針對楓香及相思樹之林齡與材積之迴歸方程式進行估算。(P. 35-36)
2020 IPCC 就碳庫有規範，可供參考。	本案針對伐倒木之 CO <sub>2</sub> 排放量係參考 Martin <i>et al.</i> (2021)針對枯死木質量轉為碳量之比例研究中，枯死木排放於大氣中二氧化碳係依生物量乘以 0.485 作為估算。(P.25)

#### 委員 C

審查意見/提問	意見回覆
推估太保守，造林木、留存木的枯死量是否應該依樣區的數據實際算出，並且可以依時間修正驗證數值。	本案所引用的生長模式已考慮枯死木及林木競爭，後續也將透過監測計畫設立，可以獲得長期的數據，並進行滾動式修正，以利後續查驗及監測。(P.51)
基線碳量應分區推估，作業區與非作業區生長量應不會完全相同。	未來會透過監測計畫監測留存木及實際保留區之次生林之生長量，以利滾動修正基線碳量及留存木碳量。(P.51)
臺灣肖楠的生長量有疑慮，可參考林試所蓮華池的臺灣肖楠研究。	臺灣肖楠生長量參考劉宣誠、吳萬益(1986)針對蓮華池地區臺灣肖楠造林木之生長研究，透過樹幹解析研究所得資料，並加以整理並建構以林齡推估材積之迴歸方程式，作為臺灣肖楠之估算依據。(P. 34)
楓香一般也是可作為長伐期的樹種。	依委員意見辦理。

#### 委員 D

審查意見/提問	意見回覆
針對民眾或議員之溝通，是否有簡單圖表能一目瞭然。	針對本案碳減量流程圖於圖 1。(P. 6)
公式和圖表編排要再整理過。	依委員意見辦理。

建議找國外已運用方法學之案例補充佐證。	本案於 P.3 增加 Verra 項目編號 672 及編號 2410 之案例，兩者皆是透過改善森林經營管理活動之案例。
簡報最後說明森林多目標用意為何？建議應就森林經營區域與非經營區域的公益性差異做比較，例如達成碳中和的速率差異等。除了森林健康，林政學亦在探討合乎人類目標的森林為何。	本案多元目標主要說明除了碳儲存、碳替代之外，同時也建構了可用之材等，而針對森林經營區域與非經營區域之機會與風險進行比較。表 31

委員 E

審查意見/提問	意見回覆
針對碳中和部分，各位老師提供的修正建議應已足夠。	依委員意見辦理。
適度經營管理的森林比放任不管的森林好，溝通的方式應再構思。	依委員意見辦理。
建議可依機關溝通結果，在保留區做讓步，本案收尾較容易。	依機關指示辦理。

委員 F

審查意見/提問	意見回覆
目前報告撰寫內容中規中矩，但建議仍應納入環團關注的議題，修正敘述方式。	依委員意見辦理。
可考慮製作便於民眾閱讀的報告版本。	在報告書審查通過後，可以配合機關需要提出相關說明圖表資料，以備溝通。
影響的物種有哪些，應如何監測，均應納入報告。	本案針對不同動物監測類型有不同調查方法，鳥類將透過沿線調查法、哺乳類內將透過紅外線自動照相機進行監測調查、爬蟲類透過沿線調查法及蜂蝶類透過沿線調查法，進行族群數量之監測，若該區域有關注物種，將會在特別注意其物種族群數量，以利了解其族群數量。(P.51-54)
北美館請提供目前已對外回應的資訊給委員會參考。	北美館：會後提供給委員目前已公開資訊。

委員 G

審查意見/提問	意見回覆
以目前計算結果，過於保守，宜再評估。	本案經文獻蒐集後進行修正，以四種不同平均生長量之基線情境進行推估，分別為第 10 年、第 10 年、第 12 年、第 13 年，可抵銷北美館辦理此展覽活動所產生之 390 ton CO <sub>2</sub> 量。(P. 40-50)
以森林效益論之，都市林與淺山次生林有連帶關係，可以補充論述。	不同的樹種、林相具有不同的碳捕獲與儲存能力。在裸露地或農地及林相遭破壞之土地，以造林或進行森林更新演替，或兩者兼用，以擴大造林面積，經由都市林和社區林的營造，也可擴大造林面積以增加吸存大氣 CO <sub>2</sub> ，均具有良好之價值。(P. 57)
動物監測部分，應與前人研究做對照。	本案會建議未來執行單位與大崙頭前期動物監測資料作對照。
錯字應再注意。	會再檢視修正。

委員 H

審查意見/提問	意見回覆
肖楠非中高海拔樹種(簡報 14)	文字誤植，會再檢視修正。
依現場調查，大明橘數量很多，應不至於影響小灰蛺蝶生態，但應納入監測。	本案針對關注物種(如：臺灣小灰蛺蝶)進行族群數量之監測，以利了解其族群數量。(P.51-54)
大崙頭的動物監測可以作為對照。	本案會建議未來執行單位與大崙頭前期動物監測資料作對照。
福山的林相與大崙尾的林相不太相似，是否適合可再評估。	本案將以林務局福山動態樣區複查計畫及國際上所蒐集之文獻，針對本案基線生長量作為依據，並後續將透過次生林及留存木監測計畫，所得之監測資料進行滾動式修正，以利碳吸存估算更佳精確。(P.22)

委員 I

審查意見/提問	意見回覆
林業界應都可充分理解木材利用是完整的永續產業鏈，但本區仍應澄清並非以林木生產為目標，而是以造林示範的環境教育為主，以傳遞觀念為本案優先考量。	對外報告不會強調林木生產。所選擇的造林樹種除碳吸存效果外，也是符合其他多元價值。
水保部分因本案未改變地形地貌，建議不納入地面光達，而是以水保技師現勘為主。	依委員建議辦理。
水土保持計畫是法定用語，在此案應是監測為主。	依委員建議辦理。
是否每 5 年做詳細調查，2-3 年做基礎監測。	本案監測主要以次生林之林木、造林木及留存木進行監測計畫，而分別針對次生林及造林木和留存木，各設置 5 個 0.05 ha 永久監測樣區，其頻度為前 10 年每年進行一次監測調查，10 年後以每 2 年進行一次監測調查，至達成本案碳中和之目標再以每 5 年進行一次監測調查，以利後續滾動式修正並更精確之驗證。(P.51)
歡迎後續調查研究，延續本案價值。	依委員建議辦理。