

社團法人台灣環境資訊協會

受託環境保護公益信託自然谷環境教育基地



## 第一次碳儲存量調查計畫 (2023)

### 結案報告書

執行單位：自然谷環境信託團隊

執行時間：2023年1月 ~ 2023年8月

## 目錄

一、	計畫緣起.....	3
二、	調查流程.....	4
三、	調查範圍與樣區設置.....	4
四、	調查方法.....	6
1.	生物量調查方法.....	6
2.	碳儲存量換算.....	7
五、	結果與討論.....	8
1.	樣區樹種調查.....	8
2.	樣區樹木型態.....	8
3.	樣區生物多樣性.....	10
4.	樣區樹種儲碳能力.....	11
5.	自然谷碳儲存量.....	12
六、	結論.....	14
	參考文獻.....	15
	附錄.....	17
附錄 1	自然谷次生林樣區調查資料.....	17
附錄 2	自然谷次生林樣區樹種名錄與分布.....	23
附錄 3	自然谷次生林樣區樹種密度與碳含量資料.....	25

## 一、計畫緣起

森林是生態系中重要的一環，除了提供林產品，亦有許多環境服務，像是可以淨化空氣、涵養水源、調節氣溫、療癒身心等，其中固碳這一功能，在「京都議定書」訂定減碳目標後，儼然成為全球各界最重視的一項。根據林俊成等（2008）研究，碳吸存是最被國人最重視的森林生態系服務之一。

自然谷自 2007 年由委託人買下後，持續整地並移除外來種。2014 年信託予社團法人台灣環境資訊協會，聘請經營團隊透過低度干擾的經營方針讓森林恢復，至今已經逐漸成為蔥鬱的次生林林相。這裡每季都有大樹傾倒，它們通常是十多年前在這裡開疆闢土的先驅樹，不過它們的倒下也總是讓更多中層樹木，因為獲得更多陽光而快速生長，自己也化作養分供給真菌、植物與動物生活。

作為台灣目前唯一能被永久保育的民間淺山森林，自然谷環境信託經營團隊除了以圖文告訴大家森林的故事，也希望透過數據化的方式，將森林存在的意義與價值跟社會分享。根據行政院農業委員會林業試驗所 2020 的研究，國人認為森林眾多生態系服務中，最重要的前三名依序為水土保持、調節氣候以及固碳能力。其中，又以固碳能力最易於進行量化呈現，只需要透過調查森林裡的林木資料，就可以將森林裡的生物量（biomass）換算成森林碳儲存量（carbon stock），能讓大眾明確地知道棲地存在的價值。也許大家無法在參與活動時看見自動相機才捕捉得到的動物，也或許還沒有機會參加志工體驗棲地深處的樣貌，但透過這項調查可以讓大家確定的是，支持這樣一片淺山森林的存在，就是讓地球在暖化的路上稍微減速。未來，自然谷環境信託團隊將以五年一次的頻率，持續監測棲地內碳儲存量的變化，因為有環境信託的存在，我們預見這個數據可以長期累積，成為未來淺山森林復育重要的參考依據。

## 二、 調查流程

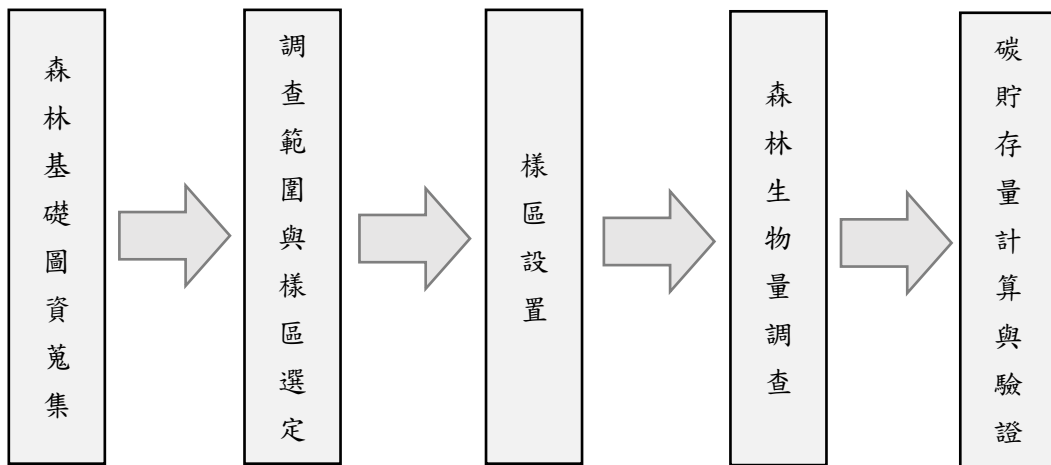


圖 1 自然谷環境信託棲地碳儲存調查流程

## 三、 調查範圍與樣區設置

本次調查範圍設定自然谷環境信託之林地，這是一片被永久保護下來的森林，能長期觀察森林的演替與變化。這片森林的範圍在環境信託契約中被定義為：新竹縣芎林鄉鹿寮坑段地號 57-5 及 57-6（以下統稱自然谷）。自然谷是一塊面積大約 1.5 公頃的山坡谷地，海拔高度介於 300-365 公尺，東側與南何山稜線接鄰，南、北兩側地勢亦高。根據自然谷團隊的微氣象觀測資料，調查範圍年均溫 20.7°C，但冬夏有近 20°C 的溫差，年平均濕度約 85%。林相上以闊葉次生林及竹林為主，其中次生林面積約 1.05 公頃，植物類別與分布都較為雜異；竹林面積約 0.45 公頃，以桂竹林為主並有少數蓬萊竹。

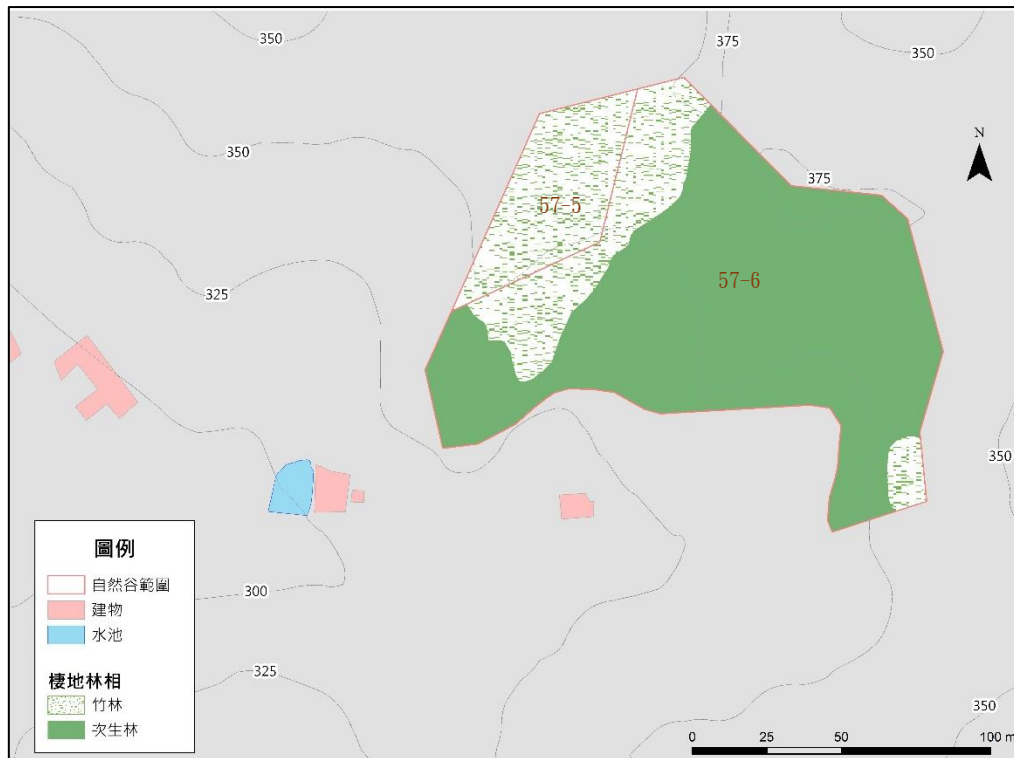


圖 2 自然谷信託地範圍與林相

由於自然谷土地過去作為茶園及果園使用，因此在區域裡仍可以發現階梯狀地形，步道兩側常是四、五級的陡坡；地質上自然谷多為大茅埔礫岩層，土石膠結程度相對較低，進行全區普查難度及作業成本過高，且低度干擾一直是自然谷的棲地經營方向，因此本次調查將以樣區抽樣方式推估自然谷碳儲存量。本次調查共在於自然谷次生林設置 5 個樣區，樣區為 10×10 平方公尺之矩形。樣區選取方式是利用 QGIS 軟體中的 Random points inside polygons 功能，在自然谷次生林的範圍裡，隨機產出 5 個點作為樣區的其中一角，以減少人擇產生的抽樣偏誤，抽樣後的五個樣區位置分佈及編號如下圖：

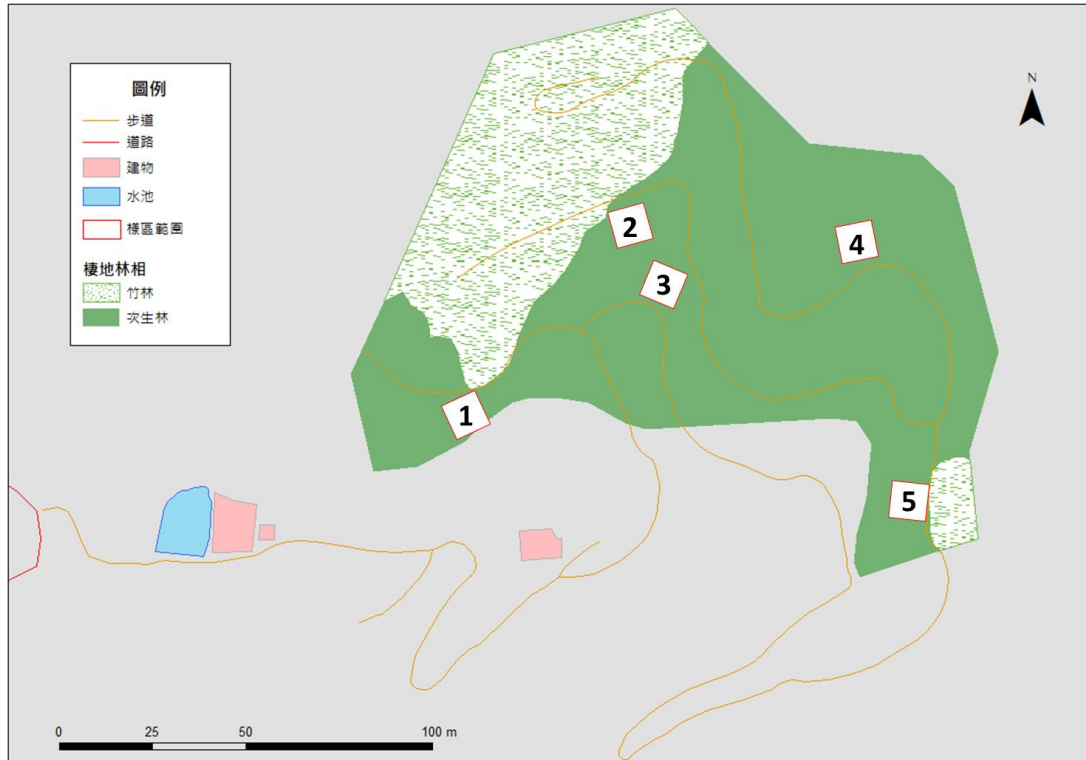


圖 3 自然谷碳儲存調查樣區位置圖

在地圖上選定位置後，會到現地將樣區範圍以紅色尼龍繩框定，並以營釘固定端點位置。劃設作業施作前會先確認周邊環境是否安全，擬定布點順序與羅盤儀擺放位置，分別拉出垂直坡向及平行坡向的 10 公尺邊線，以皮尺確認長度，輔以森林羅盤儀於四個角落相互量測與平差，以確認邊線之間的角度呈現垂直，避免樣區的面積誤差與目標植物匡列的偏誤。

#### 四、 調查方法

##### 1. 生物量調查方法

一般而言碳儲存量的推估方法是以生物量作為推估依據，生物量法是用來計算碳儲存量的基礎工作（高裕閔，2014）。透過計算森林裡的生物量及不同林木的碳含量，就可以得知森林碳儲存量，若是有完整或長期森林調查的林分，亦可以利用森林蓄積量進行換算。

本次的調查將以生物量法作為碳儲存量推估之依據，將自然谷地上部之樹木材積，作為調查目標進行碳儲量換算，因此會記錄 5 個樣區中，所有樹徑 3 公分以上的木本植物。是否為樣區框設範圍之認定，係依照植物主幹與泥土交界位置判定，若不在樣區邊線內或邊線上，則認定不為目標植物。樣區內所有目標植物都有編號，並釘上塑膠牌作為之後每五年一次

的調查使用，逐一測量目標植物的樹高與胸高直徑，並判別種類以作為碳匯換算之基礎。

- (1). 植物編號與標示：每棵植物的編號一共 4 碼，第一碼為樣區編號，由西至東分別為 1~5；後三碼依照各樣區內調查次序，從 001 排序至 999。
- (2). 樹高：植物主幹與地面接觸點至樹冠頂端之垂直距離，若主幹生長方向與垂直方向差異過大，則另外備註樹體歪斜。樹高以樹木測高桿量測，由測高手操作測高桿，量測起點應於坡地的高側，過程應盡量貼平主幹並避免彎曲，觀測手至遠處找尋觀測點，該點可以同時觀察樹頭與樹梢，且與離樹木距離應等於與測高桿距離，以減少角度造成數據誤差。本次使用工具量測高度上限為 12 公尺，若樹高高於此高度，則請觀測手找尋樹高一半處，量測其高度後以兩倍作為樹高，並填寫於備註欄。
- (3). 胸高直徑：即樹木胸高部位之直徑，但由於每個人的胸高有所差異，因此在操作慣例上會訂定一個明確高度，以台灣而言通常以 1.3 公尺為標準，本計畫測量亦以 1.3 公尺為標準，並利用測高桿比對，確保每次量測高度。樹木直徑以周長換算，係將斷面樹木假定為正圓形，因此將周長除以圓周率即可得知直徑。確定量測位置後，以樹徑捲尺進行量測，樹徑捲尺可以透過量測樹木周長，直接將數值換算成直徑讀取，周長的量測應垂直主幹方向，並避免捲尺扭曲。如遇到胸高以下即有分支，應分別量測胸高直徑；胸高處有膨大或分叉點，則應上移至恢復正常處量測。

## 2. 碳儲存量換算

根據趙國容等（2022）的研究指出，木材材積可以透過木材密度、碳含量等資訊，換算成碳儲存量。本計畫亦採該研究建議，根據 Chave et al.（2014）以全球熱帶樹種推估的數據，並參考 IPCC（2006）中的建議修正，得到的換算公式如下：

$$C = 0.0673 \times (\rho \times H \times DBH^2)^{0.967} \times BEF \times (1 + R) \times CF \quad \text{eqn1}$$

C：碳儲存量（kg）

$\rho$ ：木材密度（g/cm<sup>3</sup>）

H：樹高（m）

DBH：胸高直徑（cm）

BEF：生物量擴展係數（本計畫以 1 計算（趙國容等，2022））

R：根莖比（本計畫以 0.24 計算（趙國容等，2022））

CF：樹木碳含量（%）

透過上列之碳儲存量計算公式，可以計算出自然谷樣區總碳儲存量。公式需要的參數中：樹高及胸高直徑需由團隊進行現地調查得知，生物量擴展係數及根莖比為固定常數，常數數值本計畫均參考趙國容等 2022 年研究，木材密度及樹木碳含量大部分引用趙國容 (2019) 針對台灣常見水土保持樹種進行測量與推估之係數，部分缺值則參考該研究建議之推估方法，由團隊另行換算，完整數值可參考附錄三。

## 五、 結果與討論

### 1. 樣區樹種調查

本次調查共在自然谷劃設 5 個樣區，樣區共計有胸高直徑大於 3 公分的木本植物 14 科 19 種，數量共有 127 株，分別有：鵝掌柴 (31 株)、九節木 (23 株)、白匏子 (21 株)、短柱山茶 (9 株)、三角鰲 (7 株)、杜英 (7 株)、山紅柿 (5 株)、狗骨仔 (4 株)、薯豆 (3 株)、台灣山桂花 (3 株)、水金京 (3 株)、香楠 (3 株)、九芎 (2 株)、黃肉樹 (1 株)、長尾尖葉楮 (1 株)、油桐 (1 株)、水同木 (1 株)、水冬瓜 (1 株)、山豬肝 (1 株)。其中又以鵝掌柴、九節木、白匏子在數量上最具優勢，三者相加共佔所有目標植物的 59%，並且所有樣區中都有三者的分布。

### 2. 樣區樹木型態

本次調查發現到，所有植物有明顯的分層，像是九節木的胸高直徑皆不足 5 公分，樹高亦多介於 3~4 公尺，屬於灌木層物種；冠層則多是高大的白匏子，本次測量的樹木中，樹高最高者就是編號 2-009 的白匏子，樹高達 22.0 公尺；中間層則是鵝掌柴的天下，高度多落在 8~15 公尺。

但若是將各個樣區分別檢視，可以發現這些樹種在各個樣區之間的分布並不平均，像是樣區 1 就出現較大量的九節木，且白匏子的樹高僅十公尺左右。而樣區 2 的樹木有約四成的數量高度達 10 公尺以上，顯示自然谷內雖然海拔、氣溫相近，但可能因為坡向、濕度、日照等差異，導致植物分布仍有其不同區位。

郭耀綸等 (2021) 曾將台灣 440 種木本植物，進行耐陰程度的分級，該研究依照植物的光和潛力，將植物的耐陰程度分為五級，分別為先驅樹種、陽性樹種、中等耐陰樹種、耐陰樹種、極度耐陰樹種。其中自然谷樣區 127 株植物中，有 1 種先驅樹種 (白匏子) 共計 21 株、陽性樹種 2 種 (九芎、油桐) 共計 3 株、中等耐陰樹種 6 種 (鵝掌柴、杜英、台灣山桂花、香楠、黃肉樹、水同木) 共計 46 株、耐陰樹種 8 種 (九節木、短柱山茶、山紅柿、狗骨仔、薯豆、長尾尖葉楮、水冬瓜、山豬肝) 共計 47 株、



極度耐陰物種 2 種（三腳驚、水金京）共計 10 株。可以發現自然谷樣區多為中等或更耐陰的樹種，共佔所有樹木數量的 81%，顯示有了白袍子、油桐等陽性樹種作為樹冠層，導致底層陽光較少的情況下，耐陰樹種在自然谷中有較多優勢。

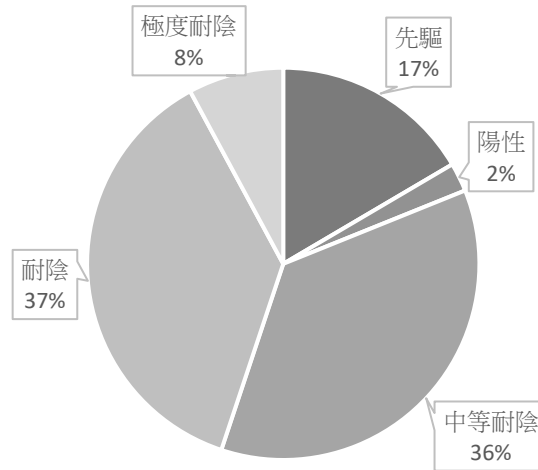


圖 4 自然谷不同程度耐陰樹種比例

將所有樹木的主幹高度與樹徑分別作為兩軸，並以散佈圖的方式呈現將可以發現，樣區裡現階段仍有許多樹徑小於 5 公分之小喬木，大多數都是九節木；而所有樹木當中，樹徑 7~13 公分的個體們，在高度的表現上有較大的離群值。我們可以找到一條對數迴歸式來作為自然谷的樹高曲線：

$$\text{樹高} = 5.096 \ln(\text{胸高直徑}) - 2.0461 \quad \text{eqn2}$$

這個迴歸式的  $R^2$  為 0.80，若未來統計母體增加，可以進行分組計算，得到解釋度更高的迴歸式，若未來樹木高度難以透過測高桿或雷達等技術量測時，就可以透過持續累積數據後的樹高曲線，以胸高直徑推估可能的樹木高度。

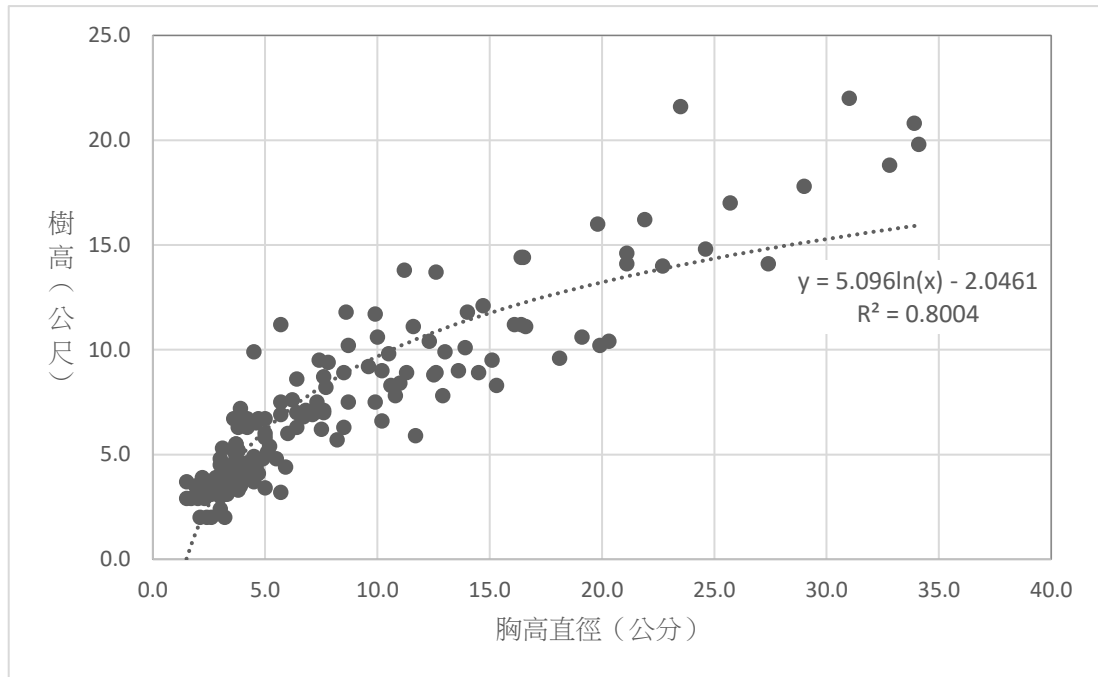


圖 5 自然谷樹木高度與胸高直徑散佈圖

### 3. 樣區生物多樣性

生物多樣性(biodiversity)一詞，根據聯合國生物多樣性公約(1992)指出，可以指涉所有來源的生物體，其多樣性包含物種內、物種間、與生態系之間。為了將生物多樣性量化呈現，學界根據歧異度、豐富度等面向發展出不同指標，常見的包含物種數 (species richness)、香儂指數 (Shannon' s index) 以及辛普森指數 (Simpson' s index)。另外，Hill 數值指標族由於具備「倍增性質」(doubling property) 能呈現出「有效物種數」，也就是說在不同的生態系之間進行直接的換算與比較，因此被不少生態學者認定為最值得考慮的生物多樣性指標 (邱春火，2010)。

本次調查團隊也根據樣區植物資料，計算出各樣區及全區的生物多樣性指數，除了能解釋棲地內的生態豐富度、歧異度，也能與不同地區的森林進行有效物種數的比較。香儂指數概念為在一地區隨機遇到一隻生物，該生物屬於某物種的不確定程度 (uncertainty)，因此若該生態系僅一種生物，則該指數值為 0，沒有任何不確定度，隨著物種數越多且個體數越平均該值越大；辛普森指數概念為從一地區隨機抽取兩生物，兩生物為同一物種的機率，因此數值會介於 0-1 之間，0 表示多樣性無限，1 則表示毫無多樣性，所以無論如何抽取兩生物都會是同一物種；而透過 Hill 數值指標族換算後的有效物種數，則能夠解釋為該地區的生態，是相當於分

布平均的多少物種數生態系，因此不同地區間的數值能透過互相乘除，找出 A 地區的生物多樣性相當於 B 地區的多少倍。相關數據如下表所示：

表 1 自然谷各樣區及全區生物多樣性指數

指數類別	計算方式	樣區 1	樣區 2	樣區 3	樣區 4	樣區 5	全區
物種數	S	8	5	12	9	9	19
香儂指數	$H' = -\sum_{i=1}^S p_i \log p_i$	1.61	1.44	2.37	1.99	1.64	2.34
辛普森指數	$D = \sum_{i=1}^S p_i^2$	0.26	0.27	0.11	0.16	0.28	0.14
有效物種數	$q=1D = \exp(H')$	5.01	4.22	10.68	7.34	5.18	10.41

S : 物種數(種)

$p_i$  : 第 i 種物種數量佔所有物種數量的比例

$H'$  : 香儂指數

D : 辛普森指數

$q=1D$  : 有效物種數

我們從以上資料可以發現，本次調查的五個樣區中，不論是物種數或是有效物種數，都以樣區 3 最為豐富。而樣區 4 及樣區 5，雖然物種數都是 9 種，但因為樣區 5 有 6 種物種都只有發現一株個體，在物種分布較不均勻，因此可以發現有效物種數明顯較低。若以五處樣區數居推估全區的有效物種數，可以知道以次生林中胸高直徑達 3 公分之植物種類而言，自然谷棲地中相當於均勻分佈著 10.41 種物種。

#### 4. 樣區樹種儲碳能力

在本次調查使用的計算公式中，影響樹木儲碳能力的因子除了生物量外，不同的樹木亦皆有不同的密度與碳含量，是影響每棵樹木碳儲量的重要因子。本次調查所有樣區的目標植物共有 19 種樹，其中有 18 種都可以在行政院農業委員會水土保持局建置的「水土保持樹種固碳能力資料庫」中，找到其密度與碳含量資訊，唯短柱山茶一種未列入其中，根據趙國容 2019 年結案報告顯示，該資料庫中的密度及碳含量部分為文獻蒐集或該計畫實驗所得，若無相關數據但有已知其他同屬或同科的植物資料，則以所有同屬或同科數據平均代表，並分別標注之。

本次調查到的植物當中，有 17 種植物的密度資料是該資料庫中的種階層資料、1 種屬階層資料（黃肉樹）、1 種未列入（短柱山茶）；碳含量

則有 15 種植物是種階層資料、1 種屬階層資料（黃肉樹）、1 種科階層資料（油桐）、2 種未列入（短柱山茶、水冬瓜）。其中資料庫中有恆春山茶的密度及碳含量，兩數據階層皆為屬資料，顯示該值是集合多個同屬資料的平均結果，因此判定可以直接代用為同屬的短柱山茶數值。水冬瓜在資料庫中無有同科物種，該資料庫建議，缺值可以採用資料庫中所有種階層資料的平均值，因此將水冬瓜的碳含量以該值表示。

以樹高 10m 及胸高直徑 5 公分作為假定的樹木大小，可以比較出各個不同樹種之間的儲碳能力差異，以本次調查到的 19 種樹木為例，在相同的樹高與胸高直徑條件下，九節木儲碳能力最佳；而水冬瓜則最差。狗骨仔、短柱山茶……等樹種也都有不錯的儲碳能力，不過鑒於九節木通常無法生長為高大的喬木，因此可以猜測自然谷儲碳量最多的植物不會是九節木，反倒是高大的白匏子、鵝掌柴較有可能儲存較多碳。

表 2 自然谷樹種碳儲存量比較（假定樹高 10 公尺、胸高直徑 5 公分）

能力 排序	樹種	密度 (克/立方公分)	碳含量 (%)	碳儲存量 (公斤)
1	九節木	0.67	46.95	554.24
2	狗骨仔	0.62	46.39	508.06
3	短柱山茶	0.55	51.21	499.49
4	九芎	0.60	45.05	477.98
5	三腳蟹	0.60	44.49	472.04
能力 排序	樹種	密度 (克/立方公分)	碳含量 (%)	碳儲存量 (公斤)
6	油桐	0.57	46.43	468.79
7	薯豆	0.58	45.62	468.42
8	山豬肝	0.57	44.45	448.79
9	山红柿	0.56	44.92	445.84
10	長尾尖葉槲	0.54	45.27	433.79
11	白匏子	0.51	44.61	404.48
12	鵝掌柴	0.51	44.26	401.31
13	杜英	0.51	44.22	400.94
14	香楠	0.48	44.64	381.71
15	台灣山桂花	0.46	46.32	380.10
16	黃肉樹	0.43	46.66	358.72
17	水金京	0.46	45.73	375.26
18	水同木	0.44	44.53	350.04
19	水冬瓜	0.38	46.20	315.16

##### 5. 自然谷環境信託棲地碳儲存量

本次計畫量測五處樣區之碳儲存量分別如下表，由於自然谷屬於較年輕的森林，因此可以發現各個樣區之間，樹木的數量、樹高或是胸高直徑的變異量都比較大。像植物數量最多的樣區 1，因為有許多直徑不到 5 公分的九節木，因此在經過運算後生物量明顯較低，導致整體碳儲存量較少；而碳儲存量次高的樣區 2 雖然僅有 13 株植物，卻包含 3 株樹高 20 公尺左右的白匏子，提供大量的生物量，因此碳儲存量最多。

表 3 自然谷各樣區植物數、碳儲存量、平均胸高直徑與平均樹高

	目標植物數 (株)	碳儲存量 (公斤)	平均胸高直徑 (公分)	平均樹高 (公尺)
樣區 1	35	831.82	8.0	7.0
樣區 2	13	1167.37	12.4	9.4
樣區 3	29	641.93	7.7	7.5
樣區 4	24	202.67	5.1	5.1
樣區 5	26	1355.69	10.8	8.6
所有 樣區	67	4199.49	8.8	7.5

在雜異的次生林中，樹木的大小經常有巨大的差異，雖然不同樹種因密度、碳含量等因素有不同的儲碳能力，但平均的樹高與胸高直徑差異，往往才是左右該樹種在自然谷儲碳量的關鍵因素，經統計後自然谷樣區中碳儲存量最多的樹種是白匏子，有將近所有樣區 65% 的碳儲存量，接著依序為鵝掌柴、水金京與油桐，本次調查樣區裡樹高超過 10 公尺的樹共計 30 株，除了香楠、短柱山茶與杜英各一株外，其餘皆為白匏子、鵝掌柴、水金京與油桐，顯見在自然谷，樹木碳儲存量仍與植株大小有密切關聯。

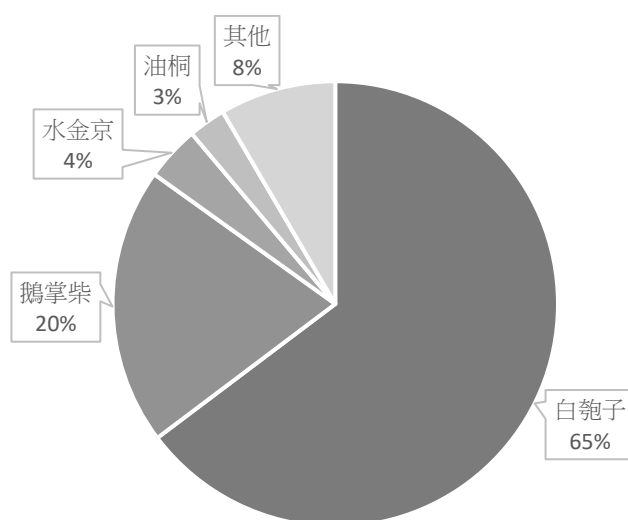


圖 6 自然谷環境信託棲地碳儲存調查各樹種碳儲存量分布

由於自然谷面積僅 1.5 公頃，因此在多數的公開地理資訊中皆被視為單一網格，在無其他環境因子的數據支持下，本計畫以線性迴歸的方式推估自然谷次生林碳儲存量。欲以線性迴歸方法推估自然谷次生林碳儲存量，可以利用以下公式進行計算：

$$\text{自然谷次生林碳儲存量} = \frac{\text{樣區總碳儲存量}}{\text{樣區總面積}} \times \text{自然谷次生林面積} \quad \text{eqn3}$$

從公式換算後可以得知自然谷次生林碳儲存量約為 88.19 公噸，以每公頃碳儲存量計即 83.99 公噸/公頃。若碳(C)原子量以 12 計；二氧化碳(CO<sub>2</sub>)分子量以 44 計，則森林儲存的二氧化碳當量約為 83.99 ÷ 12 × 44 = 307.96，即表示每公頃儲存了相當於 307.96 公噸的二氧化碳。

這樣的碳儲存量多嗎？根據研究 (Dixon *et al.* 1994)，亞洲的亞熱帶天然林的森林碳儲存量，應可以達到每公頃 132-174 公噸的水準。若與台灣森林現況相比較，林務局 2015 年的森林調查資料顯示，台灣森林總面積 2,197,090 公頃，二氧化碳儲存量推估達 75,418 萬公噸，也就是說台灣的森林碳儲存量平均為每公頃 93.62 公噸。另外也可以比較國內其他研究的碳儲存量，位於高雄的鳳崗山與多納兩個樣區，在林國銓等(2006) 研究中分別有 153.7 公噸/公頃及 199.0 公噸/公頃；高裕閔(2014) 研究則是將林務局和平事業區的 101 個永久樣區數據進行整理，全區平均碳儲存量約為 166.1 公噸/公頃；李國忠等(2004) 則調查台大實驗林碳儲存量約為 44.26 公噸/公頃。雖說以上研究在儲存量計算的方法學有所不同，沒辦法直接作為量化比較的基礎，但仍可以從中看出，自然谷在歷經多年努力後，碳儲存量已接近全台平均水準，但相較於多數保護區仍有不小差距，應是棲地內許多樹木都比較年輕的關係，未來若長期且持續記地錄自然谷的碳儲存量變化，將可以作為我們理解淺山森林自然演替過程的輔助。

## 六、 結論

營造並保護低海拔次生林是自然谷環境信託的三個重要目標之一，過往團隊以圖像呈現森林變化，能輕易且直觀地感受到，自然谷從荒廢多年的果園轉變為次生林的巨大轉變，但不容易將變化程度數據化呈現。透過本次計畫調查自然谷次生林碳儲存量，能將生物量具體呈現，與國內調查資料比較後，也發現自然谷生物量約略低於全國森林平均水準，未來有持續增加的空間。這樣的調查結果也顯現，森林演替需要較長時間，透過物種間交互作用與其他隨機因素耦合發生，方能在生物量、生物多樣性等面上成長，若能透過環境信託將森林永久保存，將可以確保森林在未來較長時間，被以相近的經營方針永久保育，而碳儲存調查將可以利用相近研究方法，監測並量化森林複雜的漸變過程。未來，自然谷環境信託基地將以五年一次的頻率，進行森林碳儲存量調查，量化呈現自然谷森林的長期變化。

## 參考文獻

Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B.C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W., Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Pélissier, R., Ploton, P., Ryan, C.M., Saldarriaga, J.G., and Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20 : 3177-3190.

R. K. Dixon, A. M. Solomon, S. Brown, R. A. Houghton, M. C. Trexler, and J. Wisniewski. (1994). Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, 263 : 185-190.

Simon, E., Leandro, B., Kyoko, M., Todd, N., and Kiyoto, T. (2006). 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol 4 : Agriculture, Forestry, and Other Land Use. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

United Nations (1992). The Convention on Biological Diversity (CBD). 2023/12/6, Retrieved from <https://conservation.forest.gov.tw/0000429>.

行政院農業委員會林務局(2015)。第四次森林資源調查報告。2023年3月25日，取自 <https://www.forest.gov.tw/0002393>。

李國忠、林俊成、賴建興、林麗貞(2004)。台大實驗林森林生態系不同林分經營策略之碳儲存效果。 *臺大實驗林研究報告*, 18(4) : 261-242。

邱春火 (2010)。系統演化多樣性指標之建立與統計估計。博士論文，國立交通大學統計學研究所。

林國銓、杜清澤、徐嘉君、黃菊美(2006)。六龜試驗林亞熱帶天然闊葉林地上部碳儲存量之估算。 *臺大實驗林研究報告*, 20(3) : 153-164。

林俊成、王培蓉、陳麗琴、林裕仁 (2008)。環境態度類型對森林生態系服務重要性認知之研究。 *台灣林業科學*, 23 : 51-62。

吳孟珊 (2020)。「森林生態系服務」重要性排名出爐，水土保持榮登榜首！。行政院農業委員會林業試驗所新聞稿。2023年4月22日，取自 [https://www.tfri.gov.tw/News\\_Content.aspx?n=7495&s=3092](https://www.tfri.gov.tw/News_Content.aspx?n=7495&s=3092)。

高裕閔(2014)。和平事業區森林永久樣區調查與分析吸存CO<sub>2</sub>效應。碩士論文，國立宜蘭大學森林暨自然資源學系碩士班。

郭耀綸、林倉億、楊宜穎、陳海琳、楊智凱、余尚鈺 (2021)。臺灣原生 440 種木本植物的光合作用性狀及耐陰性。 *台灣林業科學*, 36 (3) : 189-220。

趙國容(2019)。水土保持樹種固碳能力與儲碳潛力計算資料庫之建置。行政院農業委員會水土保持局結案報告書。

趙國容、李侷儒、宋國彰、趙偉村、張楊家豪、江智民(2022)。水土保持樹種碳存量估算參數之資料庫。中華水土保持學報，53(2)：100-110。



## 附錄

附錄 1 自然谷次生林樣區調查資料

編號	樹種	胸高直徑 (公分)	樹高 (公尺)	備註
1-001	薯豆	7.7	8.2	
1-002	九節木	3.7	3.9	下移 10 公分
1-003	鵝掌柴	20.3	10.4	上移 25 公分、歪斜
		12.3	10.4	
1-004	九節木	3.8	3.3	
1-005	九節木	3.1	3.4	
		2.4	3.4	
1-006	九節木	4.7	4.1	
1-007	薯豆	10.2	9.0	
1-008	白匏子	14.7	12.1	
1-009	台灣山桂花	3.3	3.1	
1-010	杜英	5.2	5.4	
1-011	九節木	3.2	3.2	
1-012	九節木	3.9	3.7	
1-013	九節木	3.0	3.2	
1-014	九節木	3.2	3.7	
1-015	鵝掌柴	13.0	9.9	上移 4 公分
		4.5	9.9	
1-016	白匏子	16.6	11.1	歪斜
1-017	九節木	4.5	3.7	
1-018	油桐	19.8	16.0	樹高 2 倍估算
1-019	白匏子	16.1	11.2	上移 20 公分
1-020	九節木	3.2	3.1	
		2.6	3.1	
1-021	九節木	3.6	3.6	
		2.4	3.6	
		2.7	3.6	

編號	樹種	胸高直徑 (公分)	樹高 (公尺)	備註
1-022	鵝掌柴	3.9	4.3	
1-023	九節木	4.2	4.6	
1-024	鵝掌柴	16.4	14.4	
		16.5	14.4	
1-025	薯豆	3.0	3.0	歪斜
1-026	鵝掌柴	11.6	11.1	上移 10 公分
		11.0	8.4	
		5.9	4.4	
1-027	白匏子	8.5	8.9	歪斜
1-028	鵝掌柴	8.5	6.3	
		7.6	8.7	
1-029	鵝掌柴	14.5	8.9	
		11.3	8.9	
		12.6	8.9	
1-030	鵝掌柴	4.5	4.8	
1-031	白匏子	8.7	10.2	
1-032	鵝掌柴	3.5	4.0	
1-033	九節木	4.0	4.0	下移 5 公分
1-034	九節木	3.8	4.4	
1-035	水金京	24.6	14.8	樹高 2 倍計算
2-001	水同木	8.7	7.5	
2-002	鵝掌柴	19.9	10.2	歪斜
		3.7	4.9	
2-003	白匏子	33.9	20.8	歪斜、樹高 2 倍估算
2-004	短柱山茶	3.0	2.4	
		2.1	2.0	
2-005	白匏子	34.1	19.8	樹高 2 倍估算
2-006	鵝掌柴	7.1	6.9	
2-007	短柱山茶	6.4	8.6	
2-008	短柱山茶	7.2	7.0	

編號	樹種	胸高直徑 (公分)	樹高 (公尺)	備註
2-009	白匏子	31.0	22.0	樹高 2 倍估算
2-010	九節木	3.8	4.1	下移 10 公分
2-011	短柱山茶	8.6	11.8	
2-012	短柱山茶	3.2	4.5	
2-013	鵝掌柴	12.9	7.8	
3-001	山红柿	6.4	7.0	
3-002	九節木	3.0	3.9	
		2.2	3.9	
3-003	三腳鯨	5.1	5.1	上移 30 公分
3-004	白匏子	27.4	14.1	上移 25 公分
		21.1	14.1	
3-005	長尾尖葉楮	3.7	5.5	
3-006	白匏子	7.8	9.4	
3-007	山豬肝	3.9	6.6	
3-008	白匏子	22.7	14.0	
3-009	水冬瓜	4.6	4.4	
3-010	三腳鯨	4.5	4.9	
3-011	香楠	9.9	11.7	
3-012	鵝掌柴	16.4	11.2	
		5.7	11.2	
3-013	白匏子	7.4	9.5	
3-014	三腳鯨	3.9	3.5	斷頭
3-015	白匏子	14.0	11.8	
3-016	山红柿	9.9	7.5	有粗藤下移 40 公分
3-017	白匏子	5.7	6.9	
3-018	山红柿	6.2	7.6	
3-019	杜英	15.3	8.3	
		10.6	8.3	
3-020	杜英	7.3	7.5	
		5.7	7.5	

編號	樹種	胸高直徑 (公分)	樹高 (公尺)	備註
3-021	台灣山桂花	4.2	4.1	下移 10 公分
3-022	山紅柿	9.6	9.2	
3-023	短柱山茶	3.7	4.7	
3-024	短柱山茶	5.0	6.7	
		3.9	6.7	
		4.2	6.7	
		3.6	6.7	
		4.7	6.7	
3-025	短柱山茶	4.4	4.6	
3-026	鵝掌柴	5.0	6.0	
3-027	鵝掌柴	3.6	5.2	
3-028	狗骨仔	6.8	7.1	
3-029	香楠	3.8	5.2	
4-001	山紅柿	3.9	7.2	
4-002	台灣山桂花	3.1	5.3	
4-003	三腳鰲	3.2	4.3	
4-004	三腳鰲	2.3	3.7	斷頭
		1.5	3.7	
4-005	九節木	2.3	3.5	
		1.9	3.5	
4-006	鵝掌柴	6.7	6.8	
4-007	九芎	3.2	3.7	
4-008	白匏子	12.6	13.7	
4-009	鵝掌柴	5.5	4.8	
4-010	杜英	3.7	5.5	
4-011	九節木	1.7	2.9	
		2.3	2.9	
		2.0	2.9	
		1.5	2.9	

編號	樹種	胸高直徑 (公分)	樹高 (公尺)	備註
4-012	九節木	3.2	2.0	歪斜 (主幹近乎平伏)
		2.4	2.0	
		2.6	2.0	
4-013	鵝掌柴	13.9	10.1	
		2.1	3.2	
4-014	杜英	11.2	13.8	
4-015	狗骨仔	5.0	5.8	
4-016	狗骨仔	3.4	3.6	
4-017	杜英	10.2	6.6	藤蔓、歪斜
4-018	九節木	3.7	4.4	歪斜
4-019	九節木	5.0	3.4	藤蔓、歪斜
4-020	三腳鰲	4.3	4.3	嚴重歪斜
4-021	三腳鰲	5.7	3.2	嚴重歪斜
4-022	鵝掌柴	18.1	9.6	
4-023	狗骨仔	10.8	7.8	
4-024	九節木	3.1	3.6	
5-001	短柱山茶	6.4	6.3	
		4.2	6.3	
		3.8	6.3	
5-002	鵝掌柴	3.5	3.9	
		2.8	3.9	
5-003	白匏子	21.9	16.2	頂部歪斜、樹高 2 倍估算
5-004	鵝掌柴	6.0	6.0	
5-005	鵝掌柴	12.5	8.8	
5-006	九芎	4.2	4.4	
5-007	鵝掌柴	3.8	3.9	斷頭
5-008	水金京	15.1	9.5	
5-009	白匏子	32.8	18.8	樹高 2 倍估算
5-010	杜英	11.7	5.9	下移 5 公分、歪斜

編號	樹種	胸高直徑 (公分)	樹高 (公尺)	備註
5-011	白匏子	25.7	17.0	頂部歪斜、樹高 2 倍估算
		13.6	9.0	
5-012	白匏子	29.0	17.8	樹高 2 倍估算
5-013	鵝掌柴	8.2	5.7	
5-014	香楠	3.0	4.8	
5-015	鵝掌柴	4.6	6.5	
5-016	九節木	3.0	4.5	
5-017	鵝掌柴	7.6	7.0	
		4.9	4.8	
5-018	黃肉樹	3.9	4.6	
5-019	鵝掌柴	19.1	10.6	
5-020	鵝掌柴	3.0	3.5	
5-021	鵝掌柴	21.1	14.6	樹高 2 倍估算
5-022	白匏子	23.5	21.6	
5-023	鵝掌柴	7.6	7.1	
5-024	白匏子	10.0	10.6	
5-025	水金京	7.5	6.2	
5-026	鵝掌柴	10.5	9.8	

附錄 2 自然谷次生林樣區樹種名錄與分布

樹種名(常見異名)	學名	科名	屬名	樣區 1	樣區 2	樣區 3	樣區 4	樣區 5
短柱山茶(細葉山茶、苦茶)	<i>Camellia brevistyla</i>	茶科	茶屬		◎	◎		◎
長尾尖葉槲	<i>Castanopsis cuspidata</i>	殼斗科	栲屬			◎		
山红柿	<i>Diospyros morrisiana</i>	柿樹科	柿樹屬			◎	◎	
狗骨仔	<i>Diplospora dubia</i>	茜草科	狗骨柴屬			◎	◎	
薯豆(日本杜英)	<i>Elaeocarpus japonicus</i>	杜英科	杜英屬	◎				
杜英	<i>Elaeocarpus sylvestris</i>	杜英科	杜英屬	◎		◎	◎	◎
水同木	<i>Ficus fistulosa</i>	桑科	榕屬		◎			
鵝掌柴(江某)	<i>Heptapleurum heptaphyllum</i>	五加科	鵝掌柴屬	◎	◎	◎	◎	◎
九芎	<i>Lagerstoemia subcostata</i>	千屈菜科	紫薇屬				◎	◎
黃肉樹(小梗木薑子)	<i>Litsea hypophaea</i> Hayata	樟科	木薑子屬					◎
香楠(瑞芳楠)	<i>Machilus zuihoensis</i>	樟科	楨楠屬			◎		◎
台灣山桂花	<i>Maesa formosana</i>	紫金牛科	山桂花屬	◎		◎	◎	
白匏子	<i>Mallotus paniculatus</i>	大戟科	野桐屬	◎	◎	◎	◎	◎
三腳鰲	<i>Melicope pteleifolia</i>	芸香科	三腳鰲屬			◎	◎	
九節木	<i>Psychotria rubra</i>	茜草科	九節木屬	◎	◎	◎	◎	◎
水冬瓜	<i>Saurauia tristyla oldhamii</i>	獼猴桃科	水冬瓜屬			◎		
山豬肝	<i>Symplocos theophrastifolia</i>	灰木科	灰木屬			◎		
油桐(千年桐)	<i>Vernicia fordii</i>	大戟科	油桐屬	◎				

---

水金京

*Wendlandia formosana*

茜草科

水錦樹屬

◎

◎

---

註：◎表示在樣區中有該物種出現



附錄 3 自然谷次生林樣區樹種密度與碳含量資料

樹種	密度 (克/立方公分)	密度 階層	碳含量 (%)	碳含量 階層
短柱山茶(細葉山茶、苦茶)	0.55	*屬	51.21	*屬
長尾尖葉槲	0.54	種	45.27	種
山红柿	0.56	種	44.92	種
狗骨仔	0.62	種	46.39	種
薯豆(日本杜英)	0.58	種	45.62	種
杜英	0.51	種	44.22	種
水同木	0.44	種	44.53	種
鵝掌柴(江某)	0.51	種	44.26	種
九芎	0.6	種	45.05	種
黃肉樹(小梗木薑子)	0.43	屬	46.66	屬
香楠(瑞芳楠)	0.48	種	44.64	種
台灣山桂花	0.46	種	46.32	種
白匏子	0.51	種	44.61	種
三腳鰲	0.6	種	44.49	種
九節木	0.67	種	46.95	種
水冬瓜	0.38	種	46.2	*均
山豬肝	0.57	種	44.45	種
油桐(千年桐)	0.57	種	46.43	科
水金京	0.46	種	45.73	種

註：\*由本計畫自行推算。