樹木碳匯測量方法

邱祈榮

臺灣大學森林環境暨資源學系
臺灣大學生物多樣性研究中心

教育部氣候變遷教育推動計畫

環境部首屆環境影響評估委員
環境部抵換專案及自願減量專案審議委員
國際氣候發展智庫學會理事長

國內森林碳匯與抵換機制參與歷程

2005~2019參加COP會議12次

2008-2010環保署溫室氣體指導委員會
2011-2017環保署先期專案暨抵換專案審議會
2012-2016環保署國家溫室氣體排放清冊審議會
2019-2024環境部溫室氣體減量成效認可審議會
2023-2025環境部第一屆環境影響評估委員

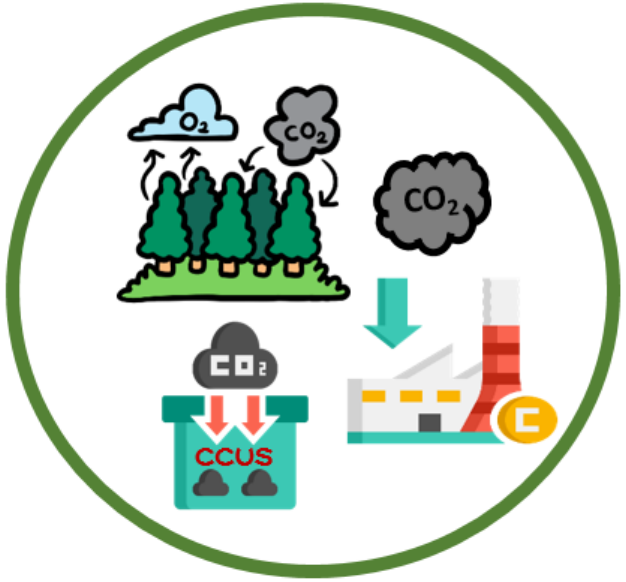
2004-2005 森林資源碳吸存資料庫建置計畫
2006-2008 森林永續經營對CO2吸存量之研究-森林碳管理資訊系統建置
2008 植林減碳計畫撰寫及審議規範研究計畫
2009-2012 建置森林生長量與蓄積量分析系統暨碳吸存估計之研究
2009 溫室氣體國家清冊林業活動碳量估算及驗證機制之研究
2013 建置符合MRV原則林業溫室氣體清冊編制機制及試算(1/2)
2014 建置符合MRV原則林業溫室氣體清冊編制機制及試算(2/2)
2015 國家溫度氣體清冊林業部門計算研習
2016 建置森林長期監測調查資料整合分析機制及國家林業溫室氣體清冊報告編製(1/2)
2017 我國農林部門溫室氣體排放趨勢推估及減量影響評估研究
2018 建置森林長期監測調查資料整合分析機制及國家林業溫室氣體清冊報告編製(2/2)
2019 森林碳管理行動方案研擬及國家林業溫室氣體清冊報告編製
2019 國家溫室氣體清冊LULUCF部門土地利用轉換矩陣建立之研究(科技部)
2020 國家林業碳匯管理精進計畫
2021 林業部門溫室氣體排放清冊報告編製計畫

2009出版植林碳匯專案管理
2022出版森林碳匯與抵換機制
2014起參與國家溫室氣體林業部門排放清冊編撰

什麼是淨零net zero？

所有人為活動排放的
溫室氣體

－



植樹造林或負碳技術
移除的溫室氣體

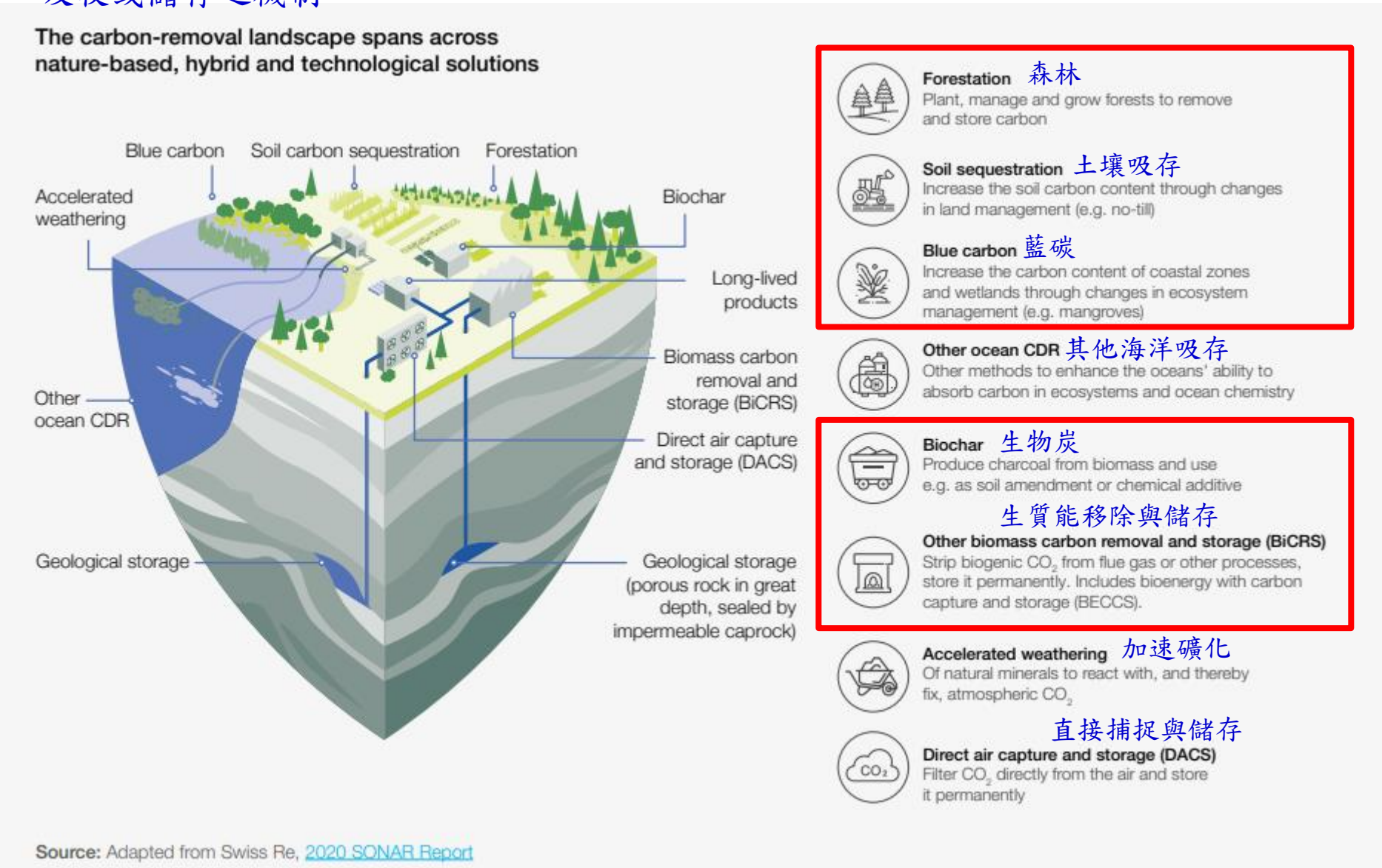
＝ 0
(淨零)

© 財團法人台灣綠色生產力基金會 2022 ALL RIGHTS RESERVED

https://ghg.tgpf.org.tw/ZeroKnowledge/ZeroKnowledge_more?id=ee789c430ad147ca8c497d10f91eff0d

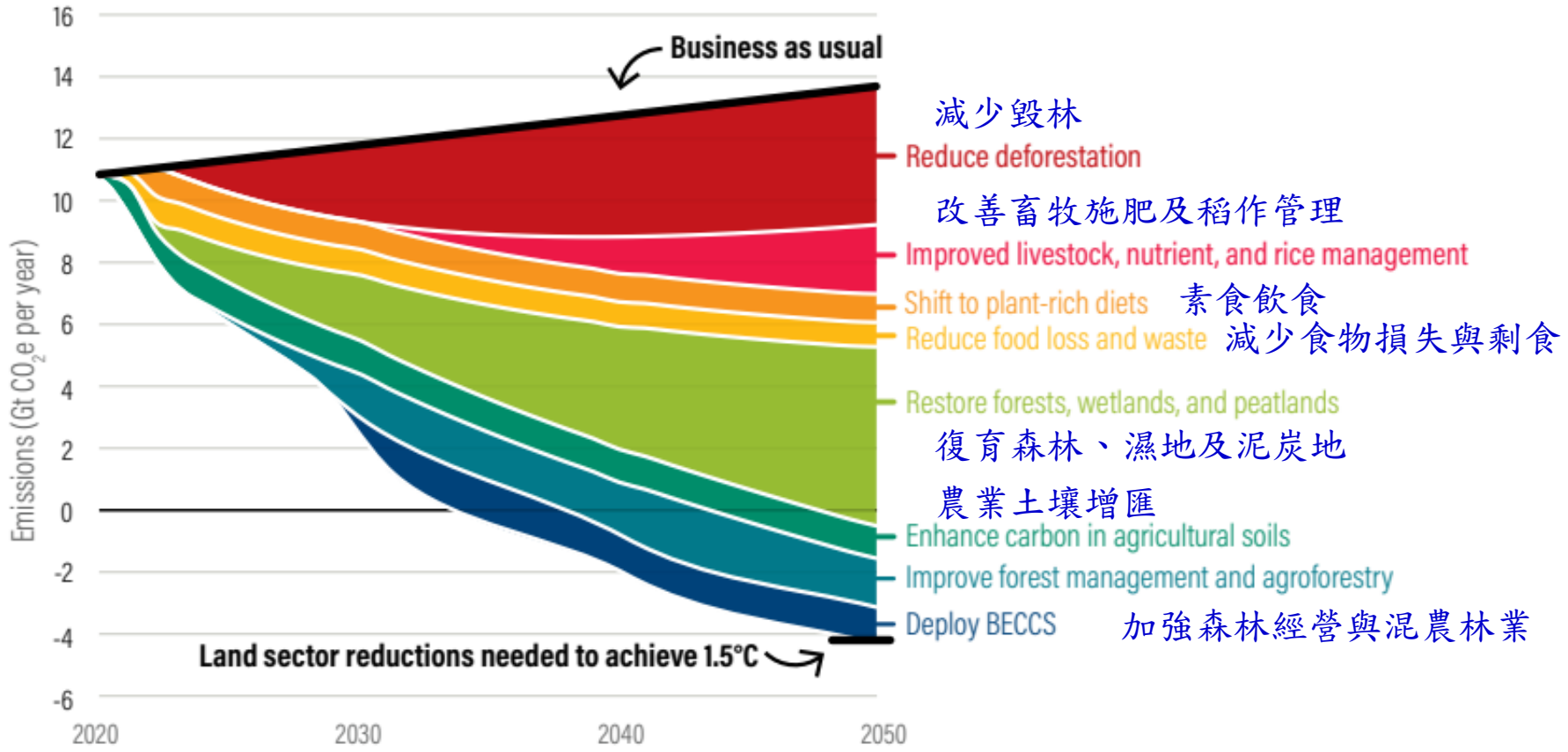
依據氣候變遷因應法第3條定義：

負排放技術：指將二氧化碳或其他溫室氣體自排放源或大氣中以自然碳循環或人為方式移除、吸收或儲存之機制。



(Net-Zero to Net-Negative: A Guide for Leaders on Carbon Removal, 2021)

The Climate Mitigation Potential of NBS



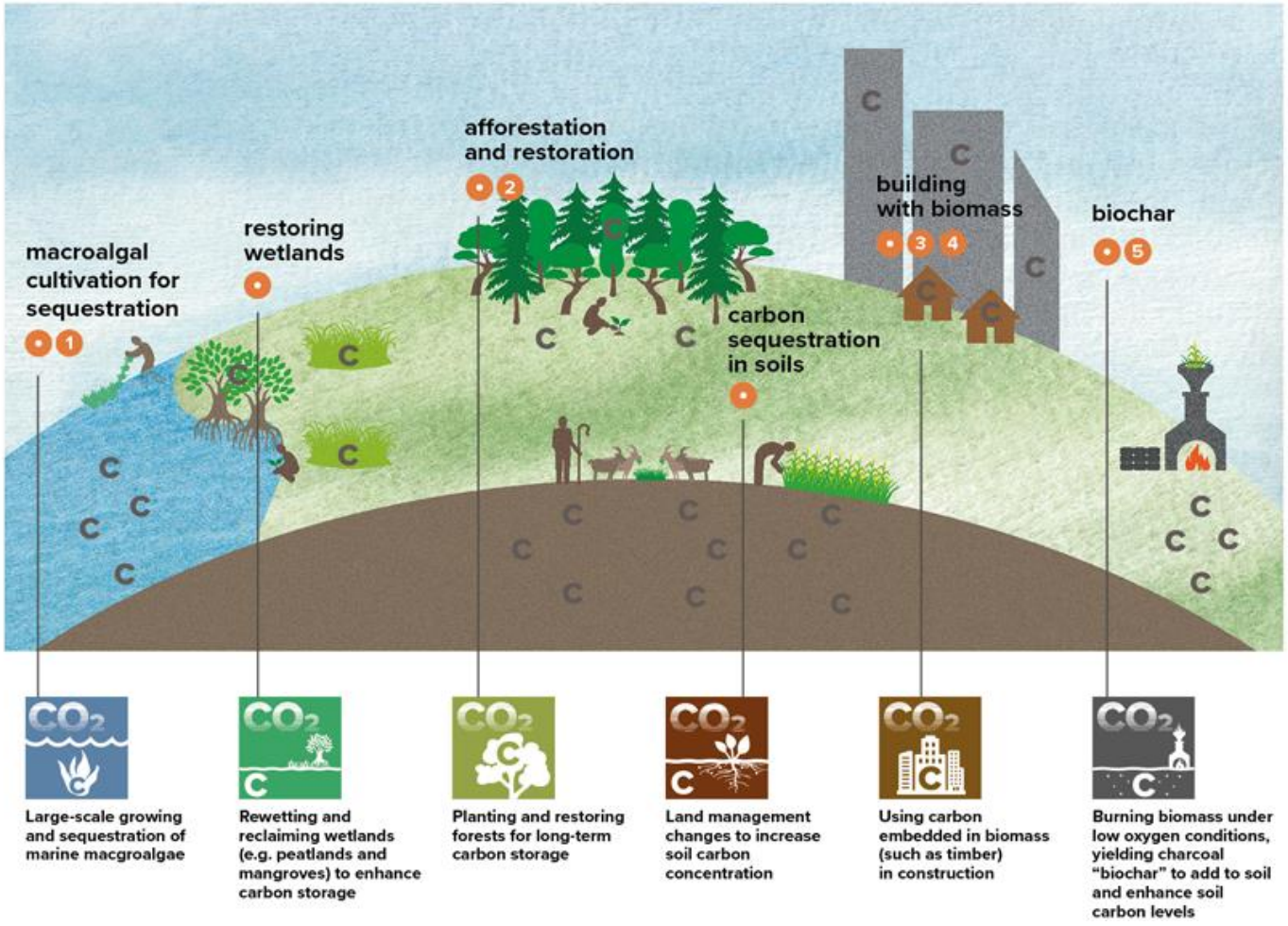
Note: BECCS = bioenergy with carbon capture and storage. Each wedge is accounted individually to avoid double counting. *Business as usual* assumes a continuation of current emissions from land-use change and median projected emissions from agriculture.
Source: Roe et al. 2019.

https://files.wri.org/d8/s3fs-public/consideration-nature-based-solutions-offsets-corporate-climate-change-mitigation-strategies.pdf

碳匯

- 依據氣候變遷因應法第3條定義：指將二氧化碳或其他溫室氣體自排放源或大氣中持續移除後，吸收或儲存之樹木、森林、土壤、海洋、地層、設施或場所。

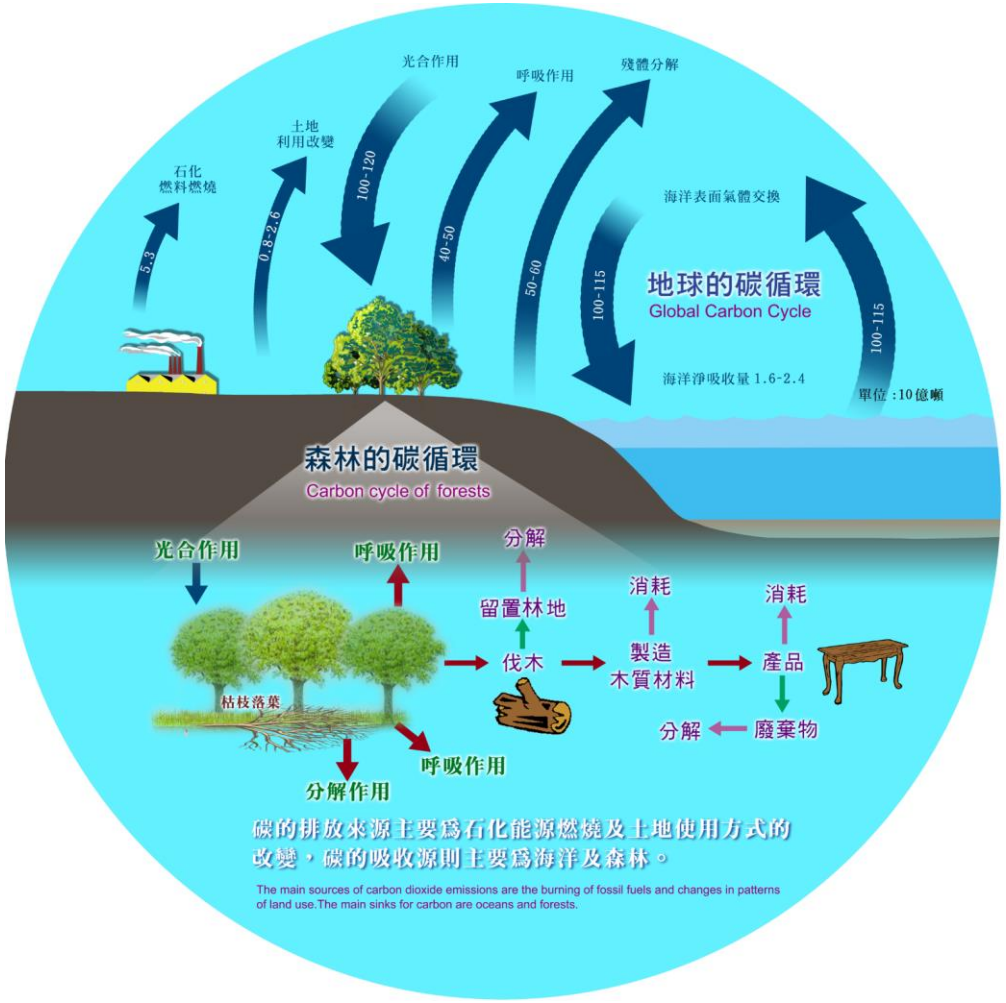
(自然碳匯)



https://www.c2g2.net/project/infographic-governing-nature-based-solutions-to-carbon-dioxide-removal/

碳循環（the carbon cycle）

- 碳於天空中成氣體狀之二氧化碳存在，其濃度平均為0.03%。葉部氣孔於開放以後，二氧化碳遂進入葉內，由陽光引發葉綠素之功能遂使與水混合而形成碳水化合物；惟氧則經細胞壁而自氣孔釋放。
- 環境因子如極適宜，光合作用之速率常受制於大氣中之二氧化碳的含量。
- 碳亦若水分者然，於生態系中形成循環。森林如遭火焚燬，大量之碳釋放於空中。自大氣中吸收之碳，經由森林之作用而轉變為植物組織者，每年每畝平均高達4噸。



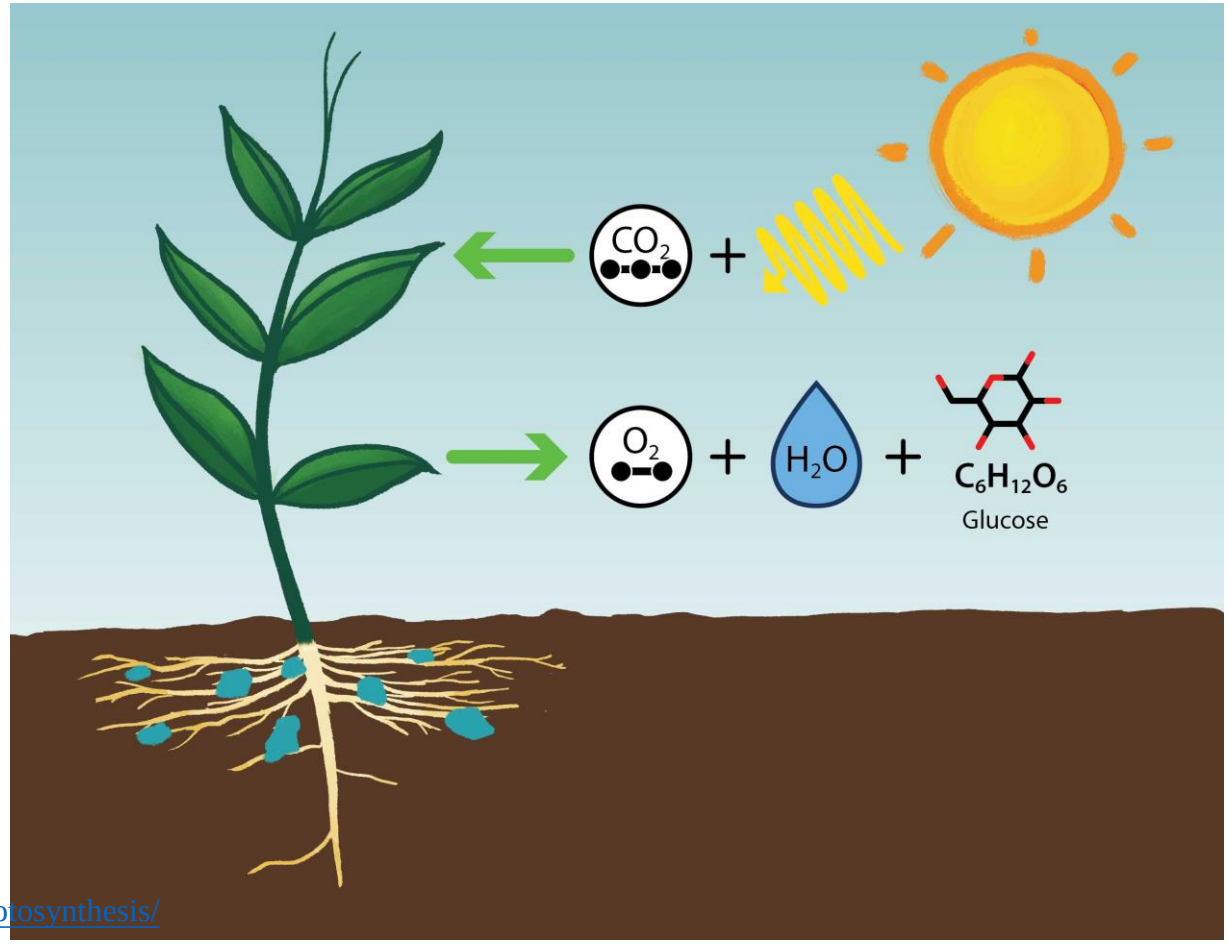
http://blog.yahoo.com/_U4DFJG46IZRSQTFLD56AJWLLSM/articles/58493

植物生長：光合作用

二氧化碳+水+陽光 ➡ 植物體+氧

$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

- 把一棵樹想像成一個太陽能電池。
- 隨著樹木的生長，陽光、水和從大氣中吸收的二氧化碳結合在一起，儲存了太陽能。



https://ugc.berkeley.edu/background-content/photosynthesis/

綠色植物之關鍵角色～～光合作用

● 天然高效率能源轉換器

植物是地球上唯一能吸收太陽能並且能將此「光能」轉換成生物可以利用的「化學能」的生物，其所產生的能量，除了提供自身生長所需，且將二氧化碳以有機碳的形式貯存固定於植物體中。亦為其他生物的能量來源。

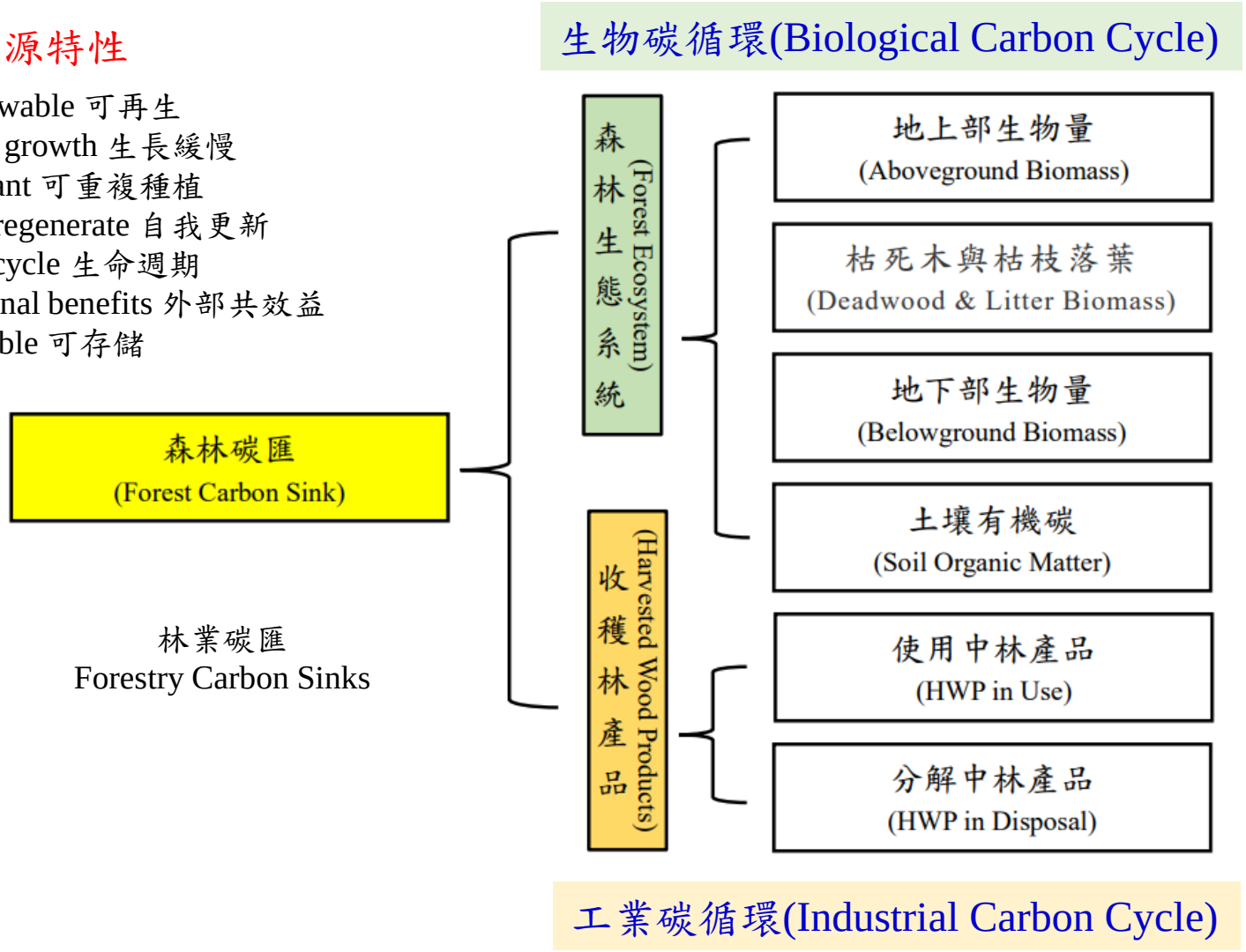
●生產者

進行光合作用的植物被稱為*生態系*中的*生產者*，即植物是地球上的生產者。

森林碳匯內涵與管理

森林資源特性

- Renewable 可再生
- Slow growth 生長緩慢
- Replant 可重複種植
- Self-regenerate 自我更新
- Life cycle 生命週期
- External benefits 外部共效益
- Storable 可存儲



- 自然為本解方

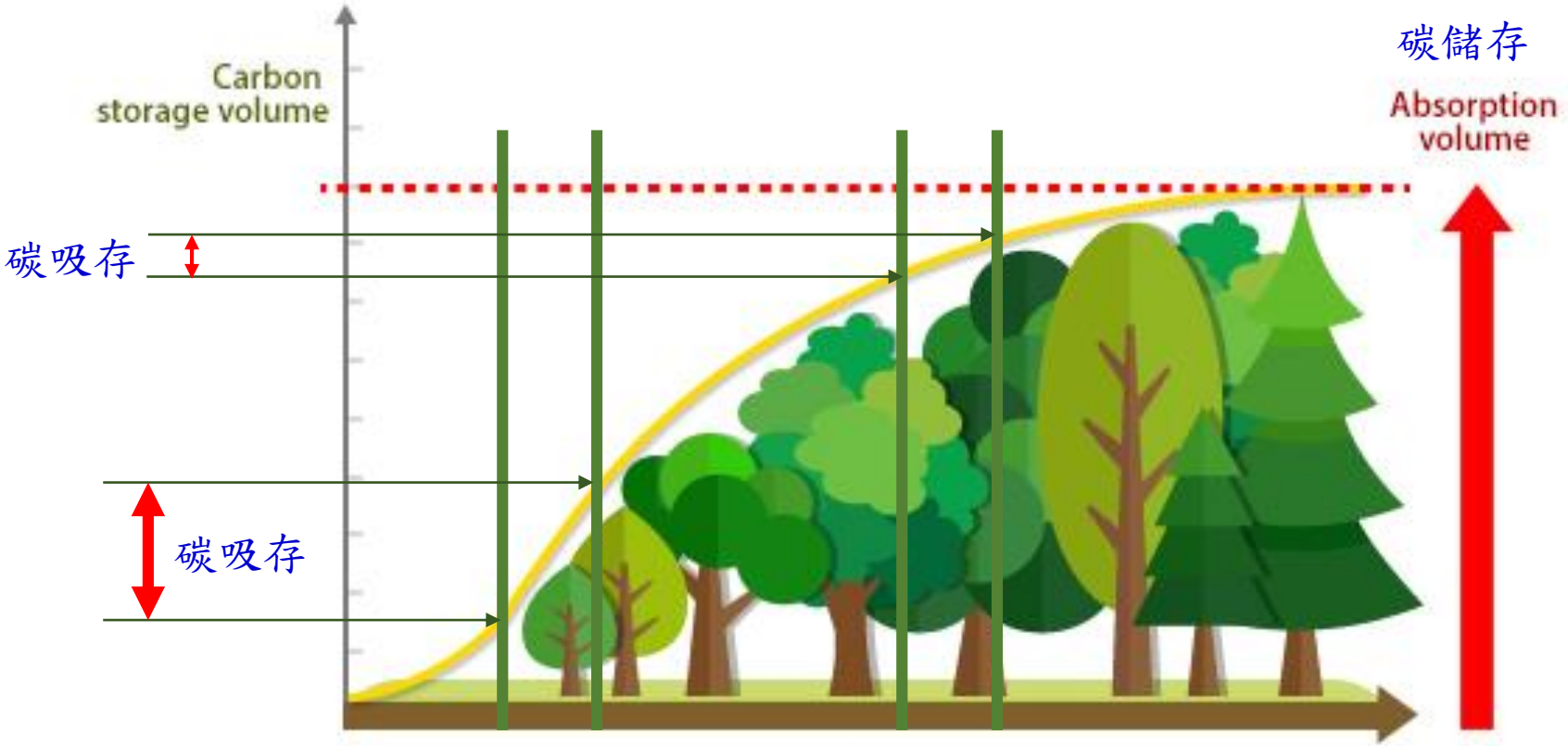
❑ 增加碳匯
新植造林
加強森林經營

❑ 減少排放
REDD+
減少森林擾動
(減少盜伐、森林火災及病蟲害)
降低土壤擾動

❑ 收穫林產品
回收木產品延長使用
生質燃料
建築負碳建材

碳儲存：特定時間之內的碳儲存總量(一般從林分建造開始累積)

碳吸存：特定時間之內的碳儲存變化量(一般以年度變化量為基準)

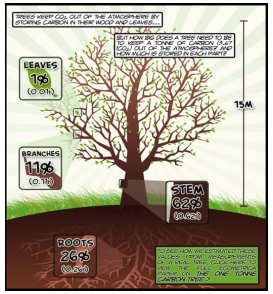


時間

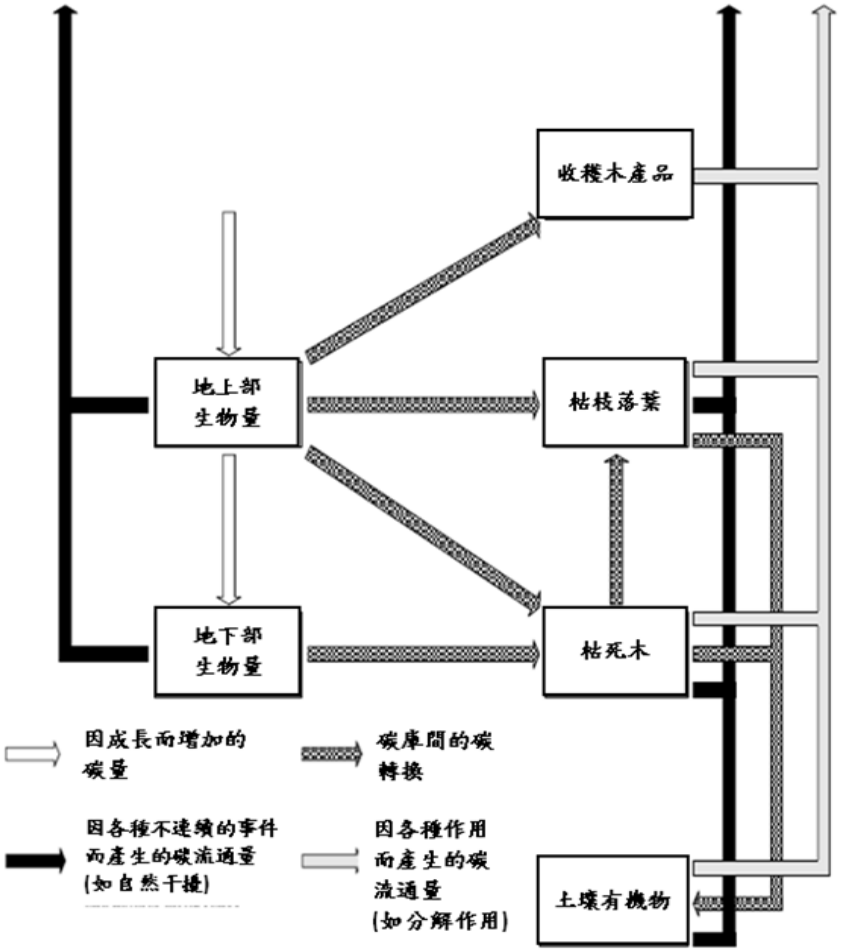
https://www.forest.go.kr/newkfsweb/html/HtmlPage.do?pg=/fcme/UI_FCS_161000.html&mn=KFS_35_16_10&orgId=fcme

碳庫類別

- 2006年IPCC溫室氣體盤查指南土地碳庫類別生物量、死有機質以及土壤等



碳　　庫		說　　明
生物量（Biomass）	地上部生物量（Aboveground biomass）	土壤以上所有活的生物量，包括莖、殘幹（stump）、枝、樹皮、種子和葉。註：如果下層林木占地上部生物量碳庫的比例較小，在某些層級中可接受將這部份排除，但在整個調查時間中應一致。
	地下部生物量（Belowground biomass）	活根的全部生物量。建議直徑小於2mm的細根不計入在內。因為只憑經驗往往無法區分直徑低於2mm的細根與土壤有機質或枯落物。
死有機質(Dead organic matter)	枯死木（Dead wood）	除枯落物外的所有非活的木質生物量，無論是直立的、橫躺在地面上的，或者在土壤中的。包括枯倒木、死根和直徑大於或等於10cm的殘幹。
	枯枝落葉（Litter）	包括小於死木所定義的10cm最小直徑，在礦質或有機質土壤上所有已經死亡、各種腐朽程度的非活生物量。這包括枯落物層、礦質層與機質土壤層。另外也包括直徑小於2mm的活細根。
土壤（Soils）	土壤有機物（Soil organic matter）	包括達到所選擇深度的礦質土壤和有機土中的有機碳。包括直徑小於2mm而不能憑經驗加以區分的根。土壤深度預設值為30cm。



樹木碳匯計量方法：碳儲存量(總蓄積) VS 碳吸存量(生長量)

體積（材積） → IPCC 0.5 → 生物量 → IPCC 0.5 → 碳量 → 44/12 → 二氧化碳當量

生物量轉換係數
基礎木材密度
生物量擴展係數
根莖比

絕乾生物量

碳含量比例

碳儲存量(固碳量)

Vol = f(DBH, H, Density, Site …..)

生材含水率
平衡含水率
絕乾含水率

材積：幹部 ➡ 地上部(幹+枝+葉) ➡ 生物量(幹+枝+葉+根)

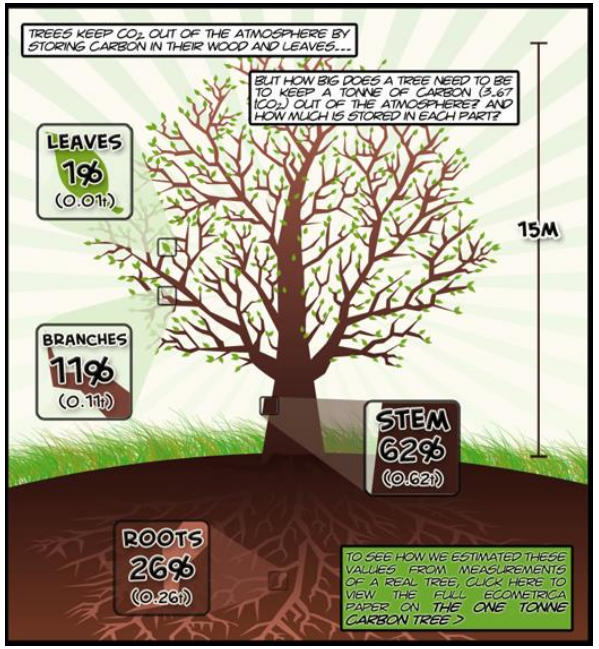
生物量擴展係數　　根莖比

- 單期樹木總固碳量稱為碳儲存量
- 兩期碳儲存量變化量即為兩期間碳吸存量(生長量)

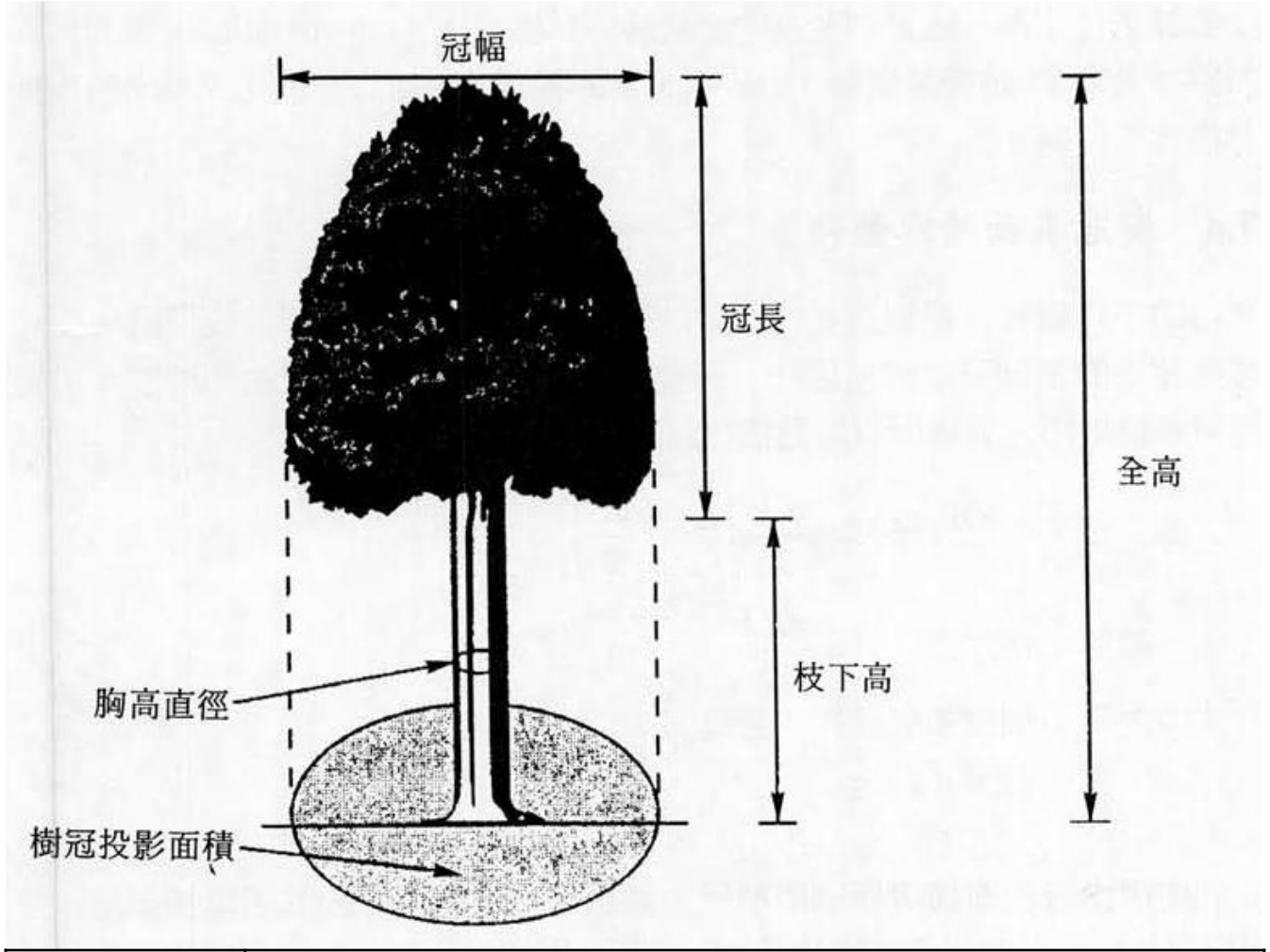
碳儲存量

$$C = V \times D \times BEF \times (1+R) \times CF$$

C	林木每公頃碳貯量(公噸-碳)
V	每公頃林木材積(m^3/ha)
D	基礎木材密度(公噸/m^3)
BEF	生物量擴展係數，林木生物量與地上部生物量之轉換係數
R	根莖比，全株材積與幹材材積的轉換係數，即地上部生物量與地下部生物量之比例
CF	碳含量比例，即乾物(dry matter)的碳含量轉換係數(預設值為0.5) (公噸-碳/公噸-乾物)

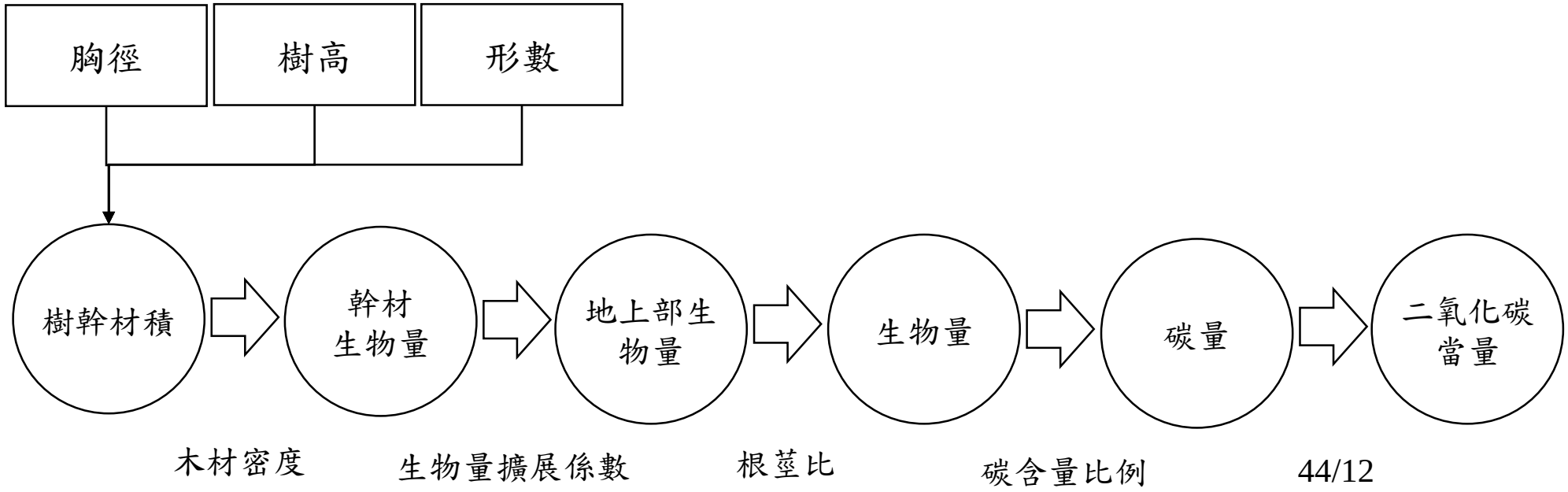


- IPCCIPCC 2006 Guidelines中公佈「生物量轉換與擴展係數」(BCEF)，為了配合以材積為主要測量對象的森林調查方法，並簡便估算過程，將原來的生物量擴展係數(BEF)和基礎密度(D)合併，亦即以BCEF係數來取代BEF和D的乘積，直接將材積轉換成生物量



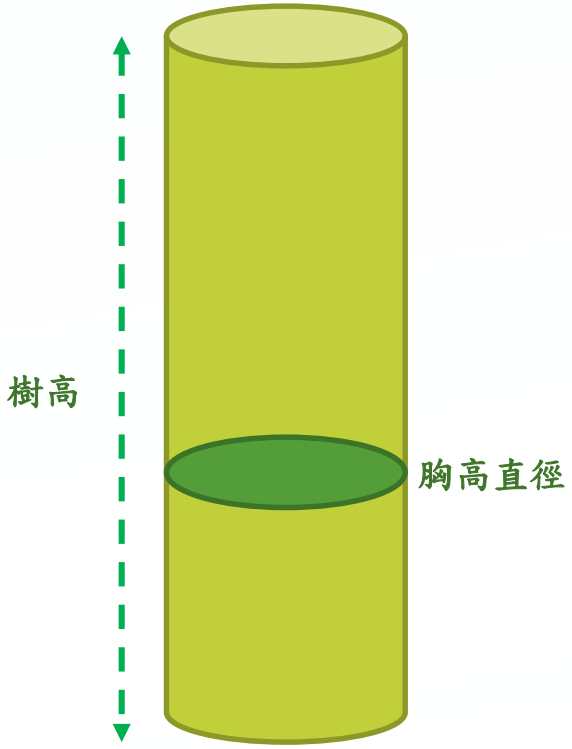
空間維度	樹木調查項目
零度空間	樹種、樹形、形數、健康狀態、GPS座標
一度空間	胸徑、樹高、冠高
二度空間	胸高斷面積
三度空間	材積
比重	密度、生物量
碳含量	碳量

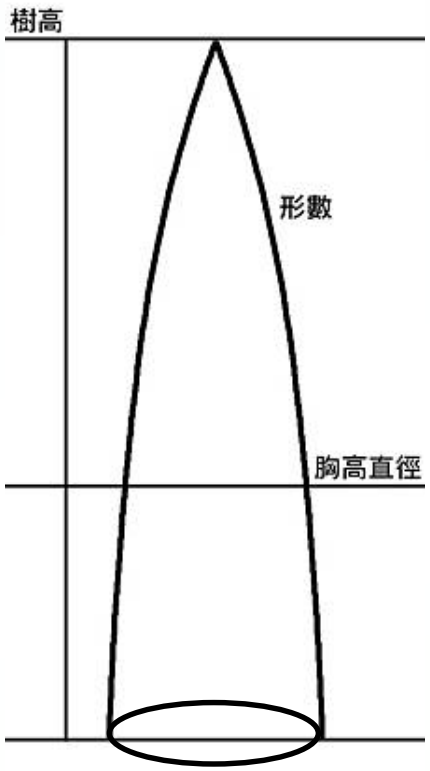
樹木碳匯估算程序


胸徑
樹高
形數
樹幹材積
幹材
生物量
地上部生
物量
生物量
碳量
二氧化碳
當量
木材密度
生物量擴展係數
根莖比
碳含量比例
44/12

師生版校園樹木測量調查平臺

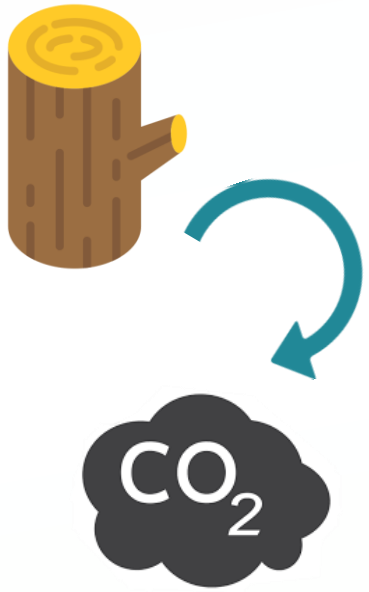
樹木外形特徵 → 體積換算 → 累積CO_2換算 → 校園碳匯



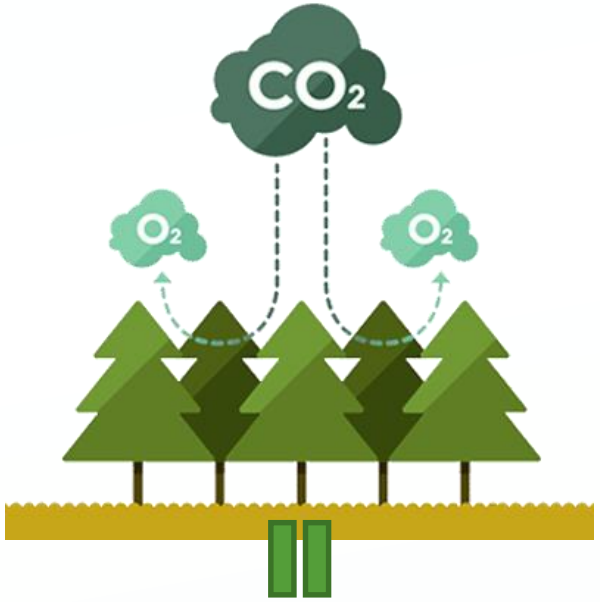


近似圓錐體

生物量



二氧化碳當量



總二氧化碳當量

胸徑、樹高測量工具

胸徑尺

量角器

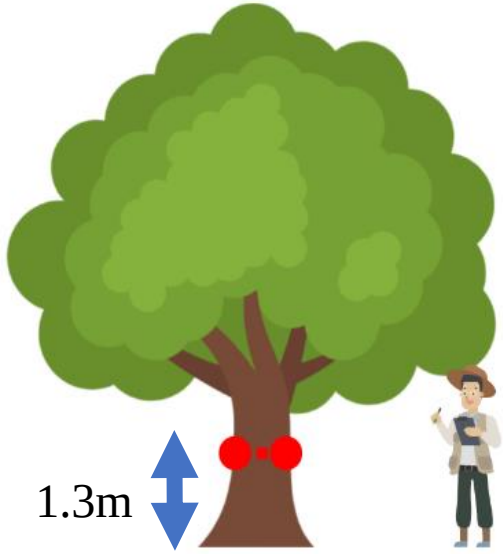
皮尺/捲尺

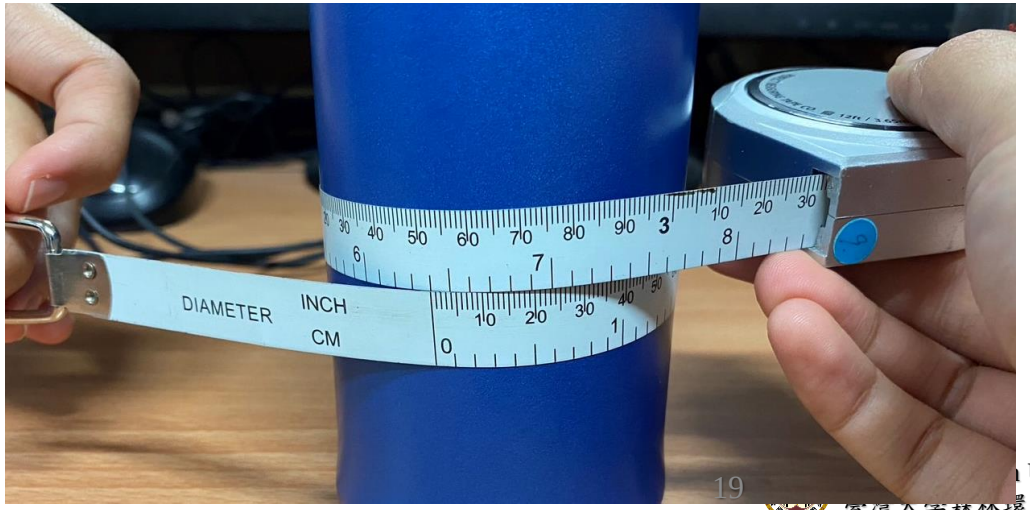
手持式
傾斜儀

測高桿

測量方法 - 胸高直徑

- 胸高直徑：樹在離地1.3公尺處 (胸高) 的直徑。
- 測量方法：以捲尺繞樹木一圈，若使用一般捲尺，量出的數值除以π即為直徑；若用直徑捲尺，量出的數值即為直徑。
- 原理：直徑捲尺每一單位為π (約3.14) 公分，圓周長公式是2rπ，故以直徑捲尺繞樹一圈，量出的數值即為樹木之直徑 (2r)。
- 胸徑測量示範影片：
  https://youtu.be/y2b0Oaamjco





測量位置判定—胸高定位桿使用

- 為判定測量位置（1.3 公尺），以確保每次測量皆在同一位置，此次調查需使用**胸高定位桿**。
- 胸高定位桿為 1.3 公尺高的桿子，上方配有指北針、水平儀。
- 地面平坦、樹幹垂直地面時，統一規範站在樹木正南側面對北向，以定位桿比對測量位置對樹木進行測定。

胸高定位桿製作

胸高定位桿製作教學影片：https://youtu.be/-NzubbtEAVY

- 製作胸高定位桿一共五個步驟
- 內容物包含：直向PVC管、橫向PVC管、T通管、壓克力平台、指北針、水平儀
- 第一步 將壓克力平台卡進T通管的上方處。 如果壓克力平台會晃動，則以黏著劑，將平台固定在T通管的上方。
- 第二步 將指北針黏於橫向T通管開口的另一側平台上，north字體朝橫向PVC管方向擺放，將水平儀同樣黏著至平台上。
- 第三步 將T通管裝在直向PVC管上。
- 第四步 將橫向PVC管裝進橫向T通管內。
- 第五步 組裝完成後量測橫向PVC管的上緣是否離地130CM高。 確認後在直向PVC管與T通管交接處黏上一圈膠帶。 以便重新組裝時，T通管可以裝到正確位置。

測量位置判定

A、B：一般於平坦地形量測時的位置。若樹傾斜，則由樹的下方判定1.3m。

C、D：當遇見分叉木(fork tree)時。(C) 若1.3處剛好遇到分叉，則往下找到樹幹還沒有膨大的地方測量。(D) 若分支在1.3m以下，測量2或多個分枝。

E、F：在1.3 m處有不規則樹幹型態，例如分枝造成膨大，凹陷、傷口、腫瘤突起等情形。往下或往上找到樹幹正常的地方測量。

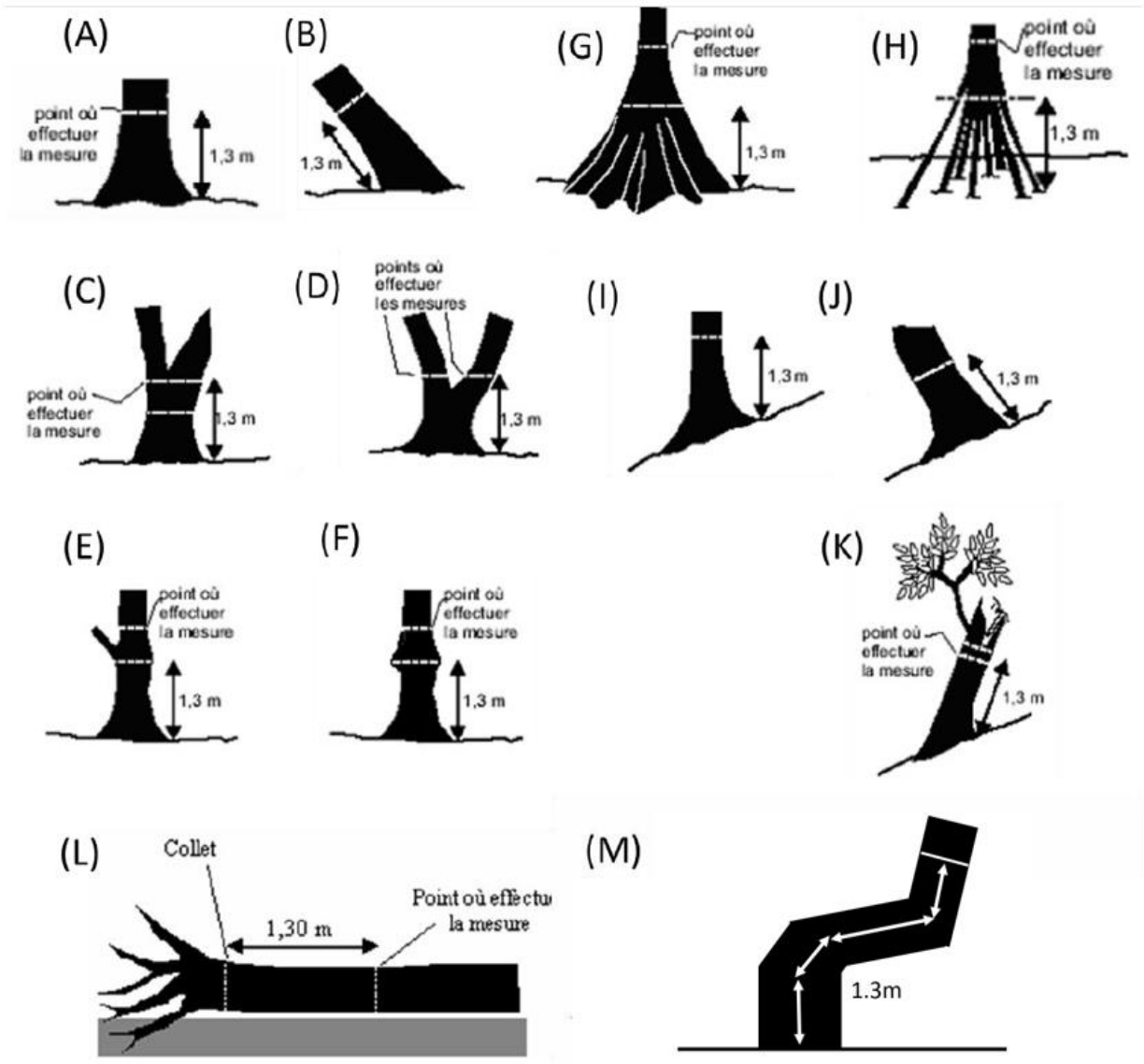
G、H：當量測的樹木有高而隆起的根張或是板根時，往上找到樹幹沒有膨大的地方測量。

I、J、K：當樹木位於傾斜的地形上，站在上坡處判定1.3m。

L：當樹木可能因為風害而倒在地面時，由根部最上方開始算1.3m測量。

M：當樹幹明顯彎折，則從樹基開始順著樹幹形狀測量長度，長度1.3m處為測量點。

※ 如果不是在1.3公尺處測量，務必於備註寫上「測量點上移/下移XX公分」

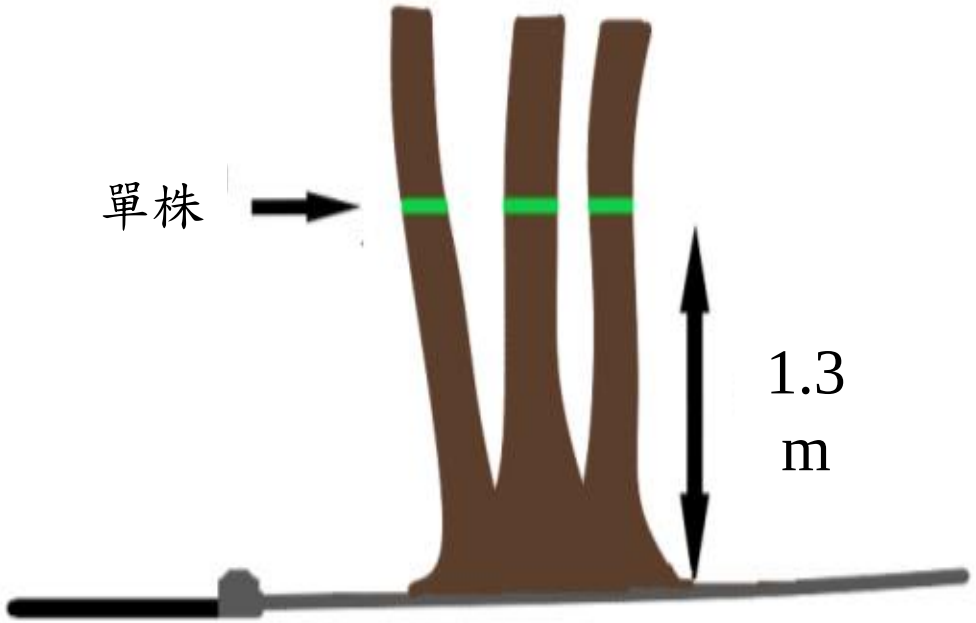


圖片來源：Forest Research & Training Center (FRTC). 2022. Field Manual, 2022 (Remeasurement of Permanent Sample Plot), Forest Resource Assessment (FRA), Forest Research & Training Center (FRTC), Nepal

叢生多株的測量方式

1.3 m 以下分叉或叢生多株的統計方式依目的有所不同，在林業上常用的測計方式為記錄成數株林木，如左圖計算分叉木或叢生多株的狀態，其將每個單株分別測定後，先將各DBH值平方相加後，再開平方根。計算公式如下：

$$DBH = \sqrt{(DBH_1^2 + DBH_2^2 + DBH_3^2)}$$

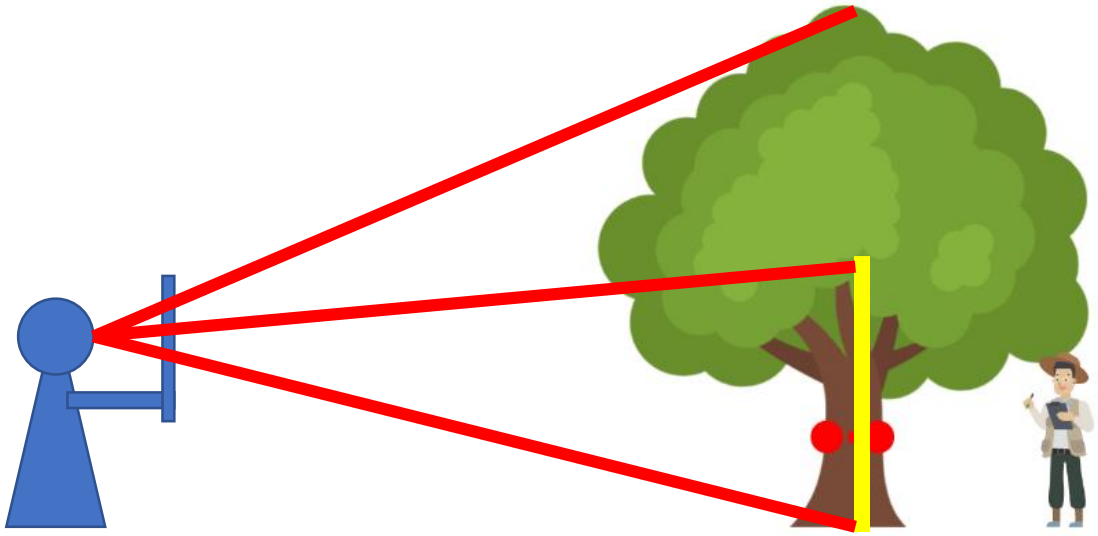


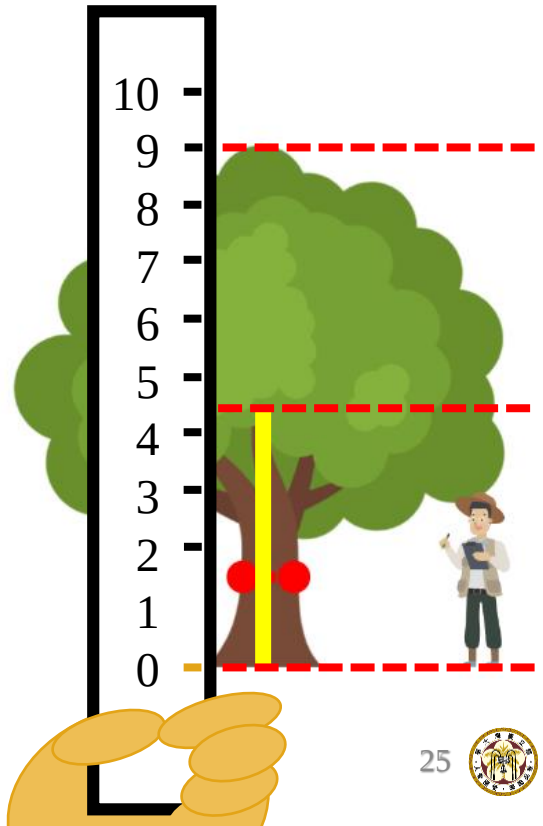
測量方法 - 樹高　直接測量

- 測高桿是最直觀的測量工具，全長為12m或15m，由頂端一節逐步往上拉伸，另一人站在遠處觀看，當測桿與樹同高，讀取桿上數值即得樹高
- 缺點：貴重、有時長度不足
- 樹高測量教學影片：https://youtu.be/rmSR94iZzZM

測量可能遇到的問題

- 如果樹超過測高桿的長度怎麼辦？
- 量一半，再將數據乘以二。可將尺或記錄版舉在眼前，做為參考物來判定測高桿是否在一半的位置。

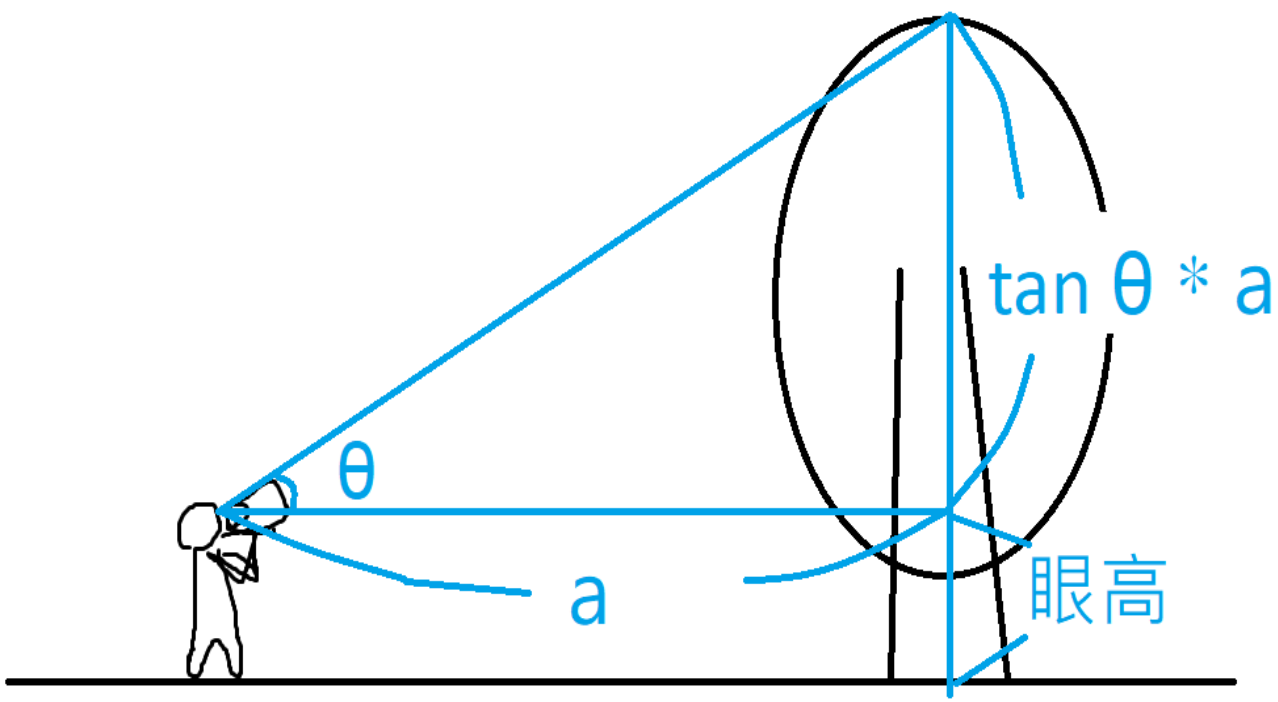




測量方法 - 樹高　三角法

測量：
我們和樹的距離（a）、
樹頂的仰角（θ），
還有自己的眼睛高度，
就能算出樹高
樹高 = tanθ*a + 眼高

※ 距離可以利用皮尺直接測量

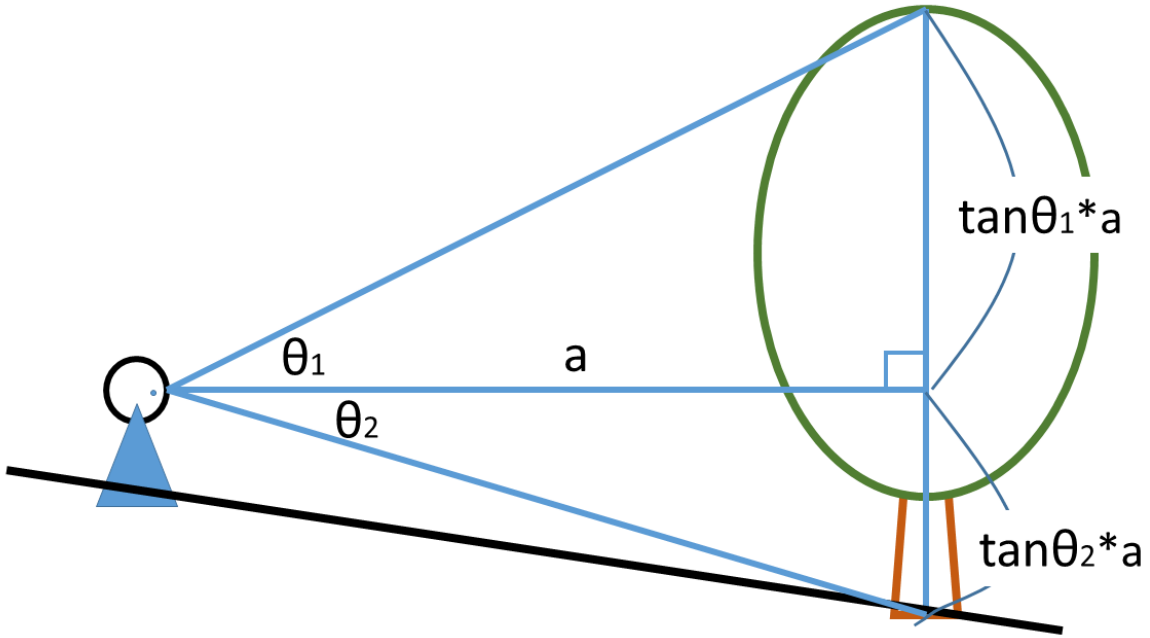


註：僅能於平地使用，若測量者與樹不在同一平面，
建議測量樹頂仰角及樹基俯角（參考下頁投影片）

測量方法 - 樹高　三角法

測量：
我們和樹的距離（a）、
樹頂的仰角（θ_1）、
樹幹基部俯角（ θ_2 ），
就能算出樹高
樹高 = $(\tan\theta_1+\tan\theta_2)*a$

※ 距離可以利用皮尺直接測量



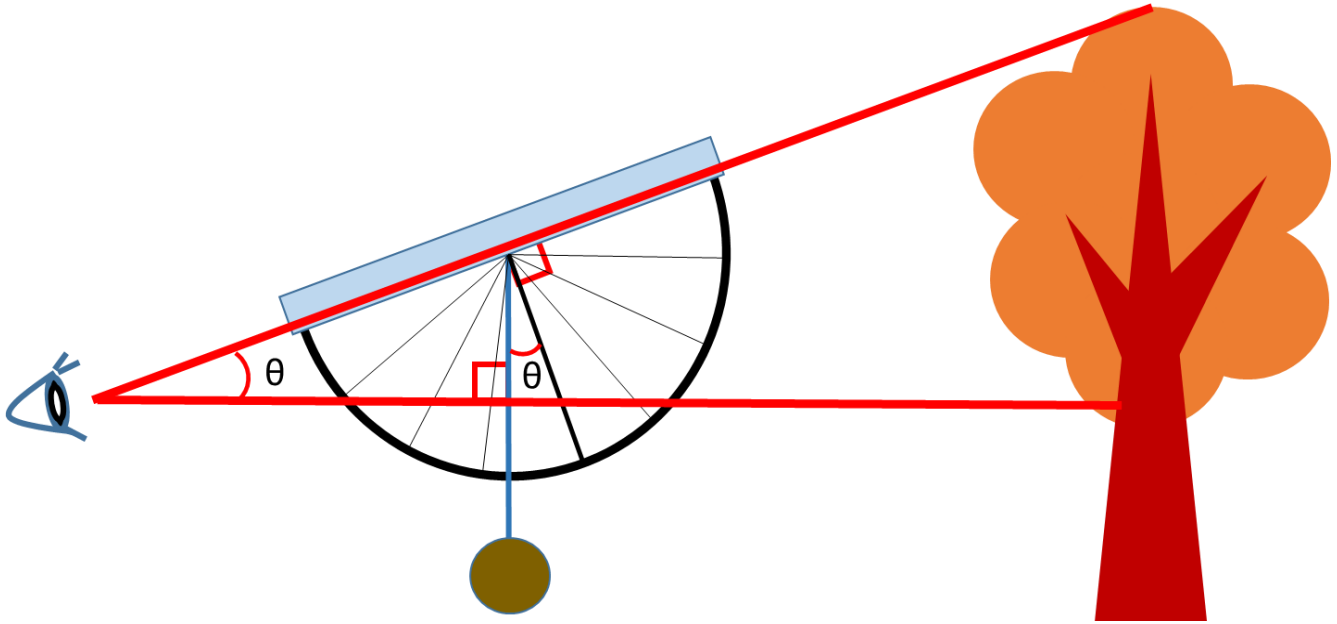
註：若測量者與樹不在同一平面，建議使用此法

測量方法 - 樹高　三角法

利用身邊的素材自製仰角測量儀器

- 製做方法：在量角器中心黏上繩子，在繩子末端綁上重錘，並在平邊上黏貼吸管。

- 使用方法：透過量角器平邊的吸管中間，看向欲測量處（樹頂或樹底），讓重錘自然下垂。再用手指按住繩子，讀取量角器讀數，此讀數即為該測量處的仰角或俯角（θ）。



測量方法 - 樹高　比例法

(圖、文：林政融)

估計結果：
3.65 m × 2.85支路燈 =10.40 m

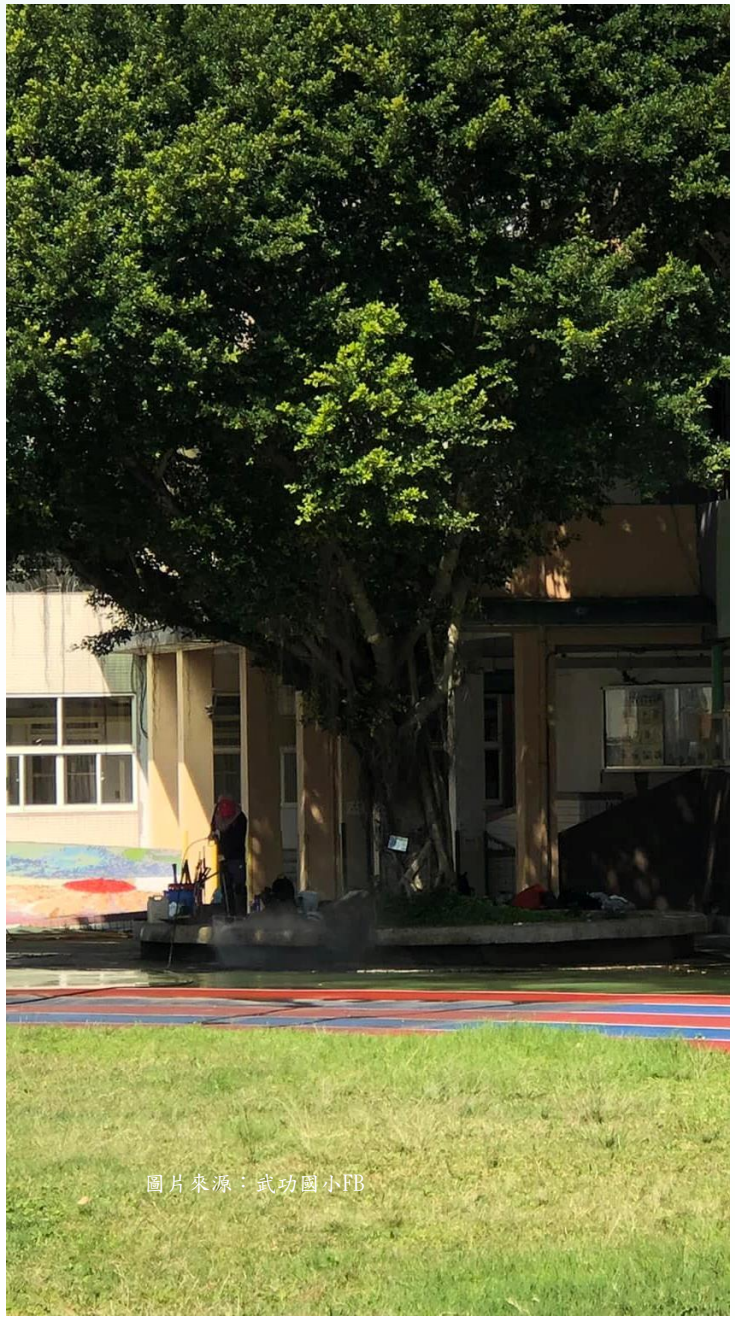
估計結果：
3.65 m × 4.45支路燈 =16.24 m

估計結果：
3.65 m × 4.44支路燈 =16.19 m

拍攝位置	距離	推估結果	誤差
近	10 m	10.40 m	43%
中	25 m	16.24 m	11%
中高	25 m 3F	16.19 m	12%
遠	65 m	17.70 m	3%

- 一般誤差需小於10 %
- 影像等比推估方式建議需離測量樹木25 m以上進行

(圖、文：林政融)



校園溫室氣體盤查實務觀摩交流

武功國小
校園樹木碳匯估算

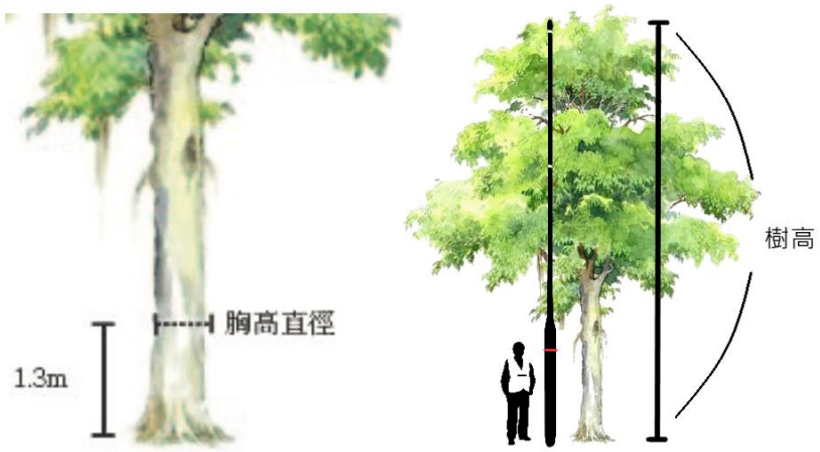
日期：2022/06/09

調查項目：胸高直徑、樹高

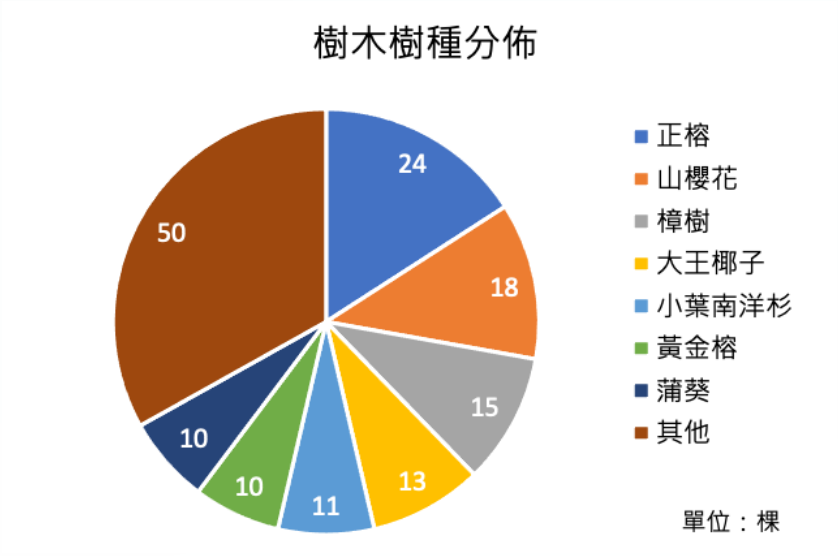
工具：直徑捲尺、測高桿

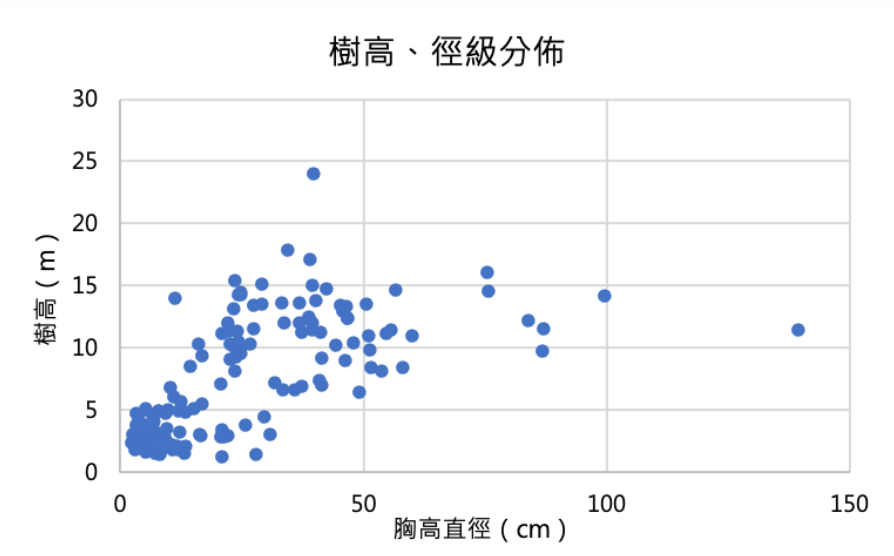
樹木總計：對照教育部校園樹木資訊平台資料，共調查151棵樹木、32個樹種。

武功國小樹木地圖



調查結果

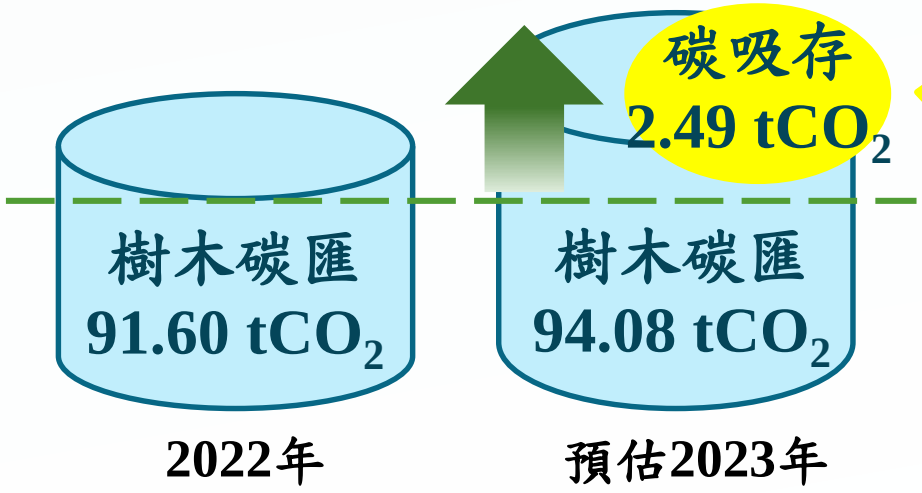




針對移植、移除樹木，完成資料更新。

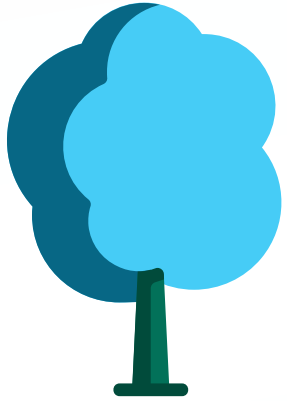
武功校園樹木**平均胸高直徑為25.4 cm**、**平均樹高為7.5 m**，小型灌木如黃金榕樹高較低，而部分山櫻花胸徑細小。

武功國小校園樹木預估年碳吸存量



以電力碳排放係數
0.509 $kgCO_2$/每度為例

相當於 4893.38 度電之碳排放



每棵樹當年平均碳吸存 16.5 $kgCO_2$

相當於 32.41 度電之碳排放

校園樹木年碳吸存量與碳排放盤查關係

校園樹木碳吸存約為學校碳排放1.314%

武功國小溫室氣體盤查案例 189.500tCO_2e

範疇 1

緊急發電機(柴油/汽油)

割草機(汽油)

瓦斯爐(LPG)

空調/冷凍設備(冷媒)

類別 1：直接GHG排放與移除 11.8936tCO_2e

範疇2

外購電力(國小)

外購電力(公托班)

外購電力(幼稚園)

類別2：輸入能源之間接GHG排放 124.0311tCO_2e

範疇 3

員工通

畢業旅行/校外教學

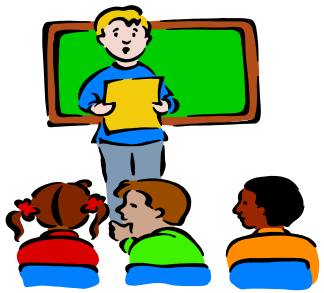
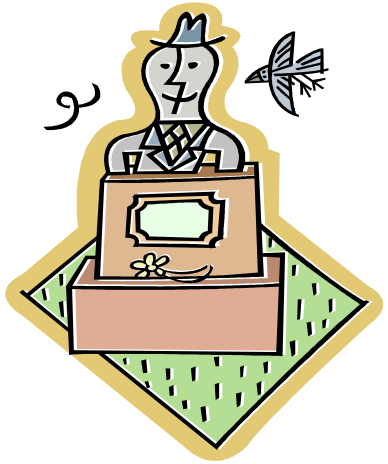
購買食材

購買課本

購買水

生活垃圾

類別3：運輸造成之間接GHG排放 類別4：組織使用產品造成之間接GHG排放

53.5707tCO_2e

～謝謝聆聽～敬請指教～