



公開
 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：180203G100

農業部林業試驗所112年度科技計畫研究報告

計畫名稱：**精進森林碳匯轉換係數與專案活動數據資料庫** (第1年/全程4年)

(英文名稱) **Establishing a database of activity data and removal factors of forest carbon sink**

計畫編號：112前瞻-18.2.3-森-G1

全程計畫期間：自 112年1月1日 至 115年12月31日

本年計畫期間：自 112年1月1日 至 112年12月31日

計畫主持人：**詹為巽**

研究人員：**吳孟珊、陳溢宏、王培蓉、李隆恩、婁安琪**

執行機關：**行政院農業委員會林業試驗所**



1122438



一、執行成果中文摘要：

為計算森林對於二氧化碳的固定的碳匯功能，需要透過準確之森林蓄積量估算以及各種轉換係數，而臺灣因森林之樹種及林型眾多，需針對不同物種蒐集相關推估式與係數，本研究蒐集台灣林木與竹林之材積或生物量推估模式269筆，以及各類型碳轉換係數(包含生物量擴展係數(Biomass expansion factor, BEF)、生物量轉換與擴展係數(Biomass conversion and expansion factor, BCEF)、基本密度(Density, D)、根莖比(root-shoot ratio, R)、碳含量(Carbon fraction, CF)等共1454筆，建立森林碳匯轉換係數與數據資料庫提供未來森林碳匯估算之參考依據。另外，國內雖訂有木、竹製板材碳足跡產品類別規則，但對於原料取得過程並無詳細的規範。本計畫利用文獻分析，建立木材原材料生產過程生命週期評估數據蒐集項目、蒐集方法與碳足跡係數。國內目前僅有伐木與集材活動的調查數據，關於苗木生產、場地準備、種植、除草、修枝等活動過程的碳足跡並無實際的調查研究；此外，有關伐木與集材活動未紀錄人員通勤交通、機械運輸或道路維護等次要過程，可能會低估原料生產過程中的碳排放。

二、執行成果英文摘要：

Forests play an important role in the sequestration of carbon dioxide. In order to calculate the carbon sequestration of forests for CO₂, accurate estimation of forest volume and various types of conversion factors are required. In Taiwan, due to the diversity of tree species and forest types, it is necessary to collect growth models and conversion factors for different species. A total of 269 models were collected for tree volume or biomass estimation, as well as total of 1,454 various types of carbon conversion factors (including biomass expansion factor (BEF), biomass conversion and expansion factor (BCEF), density (D), root-shoot ratio (R) and carbon fraction (CF) were collected to establish a database of activity data and emission factors of forest carbon sink. Furthermore, although there are domestic product category rules for carbon footprint products made of wood and bamboo, there are no detailed regulations on the process of obtaining raw materials. The study uses literature analysis to establish data collection items, collection methods, and carbon footprint coefficients for the life cycle assessment of the wood material production process. Domestic survey data are only available for logging and timber harvesting activities, and there is no actual survey research on the carbon footprint of the processes of seedling production, site preparation, planting, weeding, pruning, etc. In addition, the logging and timber harvesting activities do not record secondary processes such as commuter transportation of people, mechanical transportation, or road maintenance, which may underestimate the carbon emissions in the raw material production process.

三、計畫目的：

由於受氣候與地理因素影響，我國擁有豐富之氣候帶環境，各類林型亦有不同的樹種組成，進而增加了碳匯推估之複雜度，而國內目前尚無針對不同樹種、林型之蓄積量、年生長量推估式，以及各樹種之不同轉換係數之統一參考資料庫，各界於進行計算時可能產生差異，因此實應建立可提供不同林型、樹種之森林碳匯轉換係數與數據資料庫，以提供各界估算森林碳匯時之參數標準與引用依據，減少因採用係數不同導致之計算差異。另外，林業由於原材料(木材)的生產過程長，以及森林環境因素具有高度複雜性，如何將所有森林經營活動包括在林產





品生命週期評估目前尚無普遍被接受的系統性方法。雖然一般普遍認為木材作為原材料不會導致高溫室氣體排放，但木材作為原材料的碳中和性仍有待證明。本計畫擬確認林業部門生命週期評估的方法，計算林業部門於不同經營作業模式下的碳足跡，並評估場地特徵、作業行為與運輸活動的影響，明確計算並掌握森林經營作業過程的產品碳足跡。因此，本研究之主要目的如下：

1. 確認IPCC森林碳匯計算方法與所需活動數據及轉換係數項目。
2. 蒐集重要樹種與林型之材積、單位面積蓄積等轉換模式。
3. 蒐集重要樹種與林型之碳匯轉換係數。
4. 建立木材於原料取得階段的數據蒐集項目。
5. 建立木材於原料取得階段的數據蒐集方法。
6. 盤點原料取得階段各項活動所需之碳足跡係數。

四、重要工作項目及實施方法：

1. 確認IPCC森林碳匯計算方法與所需活動數據及轉換係數項目
 - 根據IPCC國家溫室氣體清冊指南，確認應收集之森林碳匯計算之活動數據相關推估模式，以及不同計算層級之轉換係數項目。
2. 蒐集重要樹種與林型之材積、單位面積蓄積等轉換模式
 - 自相關研究報告、論文以及期刊等文獻，蒐集國內不同樹種與林型之單木材積、林分單位面積蓄積或生物量等推估模式，以及計算森林碳匯時將材積或生物量等活動數據轉換為碳量之轉換係數。
3. 蒐集重要樹種與林型之碳匯轉換係數
 - 根據推估模式及各種碳匯轉換係數類型區分資料表，自本研究蒐集之相關研究報告、論文以及期刊等文獻中抽取各樹種或林型之模式與係數資料，以建立森林碳匯轉換係數與專案活動數據資料庫。
4. 建立木材於原料取得階段的數據蒐集項目
 - 利用國內外文獻與產品類別規則，分析並確認木材於原料取得階段可能涵蓋的數據蒐集項目。
5. 建立木材於原料取得階段的數據蒐集方法
 - 利用文獻分析與現場訪談，確認木材於原料取得階段各項目的數據蒐集方法。
6. 盤點原料取得階段各項活動所需之碳足跡係數
 - 由國內外生命週期評估數據資料庫與期刊文獻，蒐集原料取得階段各項活動所需之碳足跡係數。

五、結果與討論：

1. 確認IPCC森林碳匯計算方法與所需活動數據及轉換係數項目。
 - 根據IPCC國家溫室氣體清冊指南，森林碳匯相關內容於「農業、林業和其他土地使用 (Agriculture, Forestry, Forestry and Other Land Use, AFOLU)」章節說明，其中森林匯的部分可分成生物量(Biomass)(包含地上部及地下部)、死有機質(Dead Organic Matter, DOM)(包含枯死木與枯落物)、土壤(Soils)(包含土壤有機質)三大類型，再細分為地上部、地下部、枯死木、枯落物、土壤有機質五種碳庫種類。
 - IPCC針對不同發展程度的國家提供不同層級的國家溫室氣體盤查方法，(1)第一層級方法(Tier 1)：當國家缺乏估算溫室氣體所需參數及因子的數據時，可使用簡單公式及預設值，加上簡易活動數據調查（如面積）即可估算，但是結果不確定性高；(2)第二層級方法(Tier 2)：已建立國家特殊環境及條件之參數及因子數據，則可使用此國家特定





數據導入第一層級方法的公式，進行更精準的估算；(3)第三層級方法(Tier 3)：國家有能力進行更全面性、更詳細、更準確及經常性的採樣量測，甚至可建立國家特定模式，所得結果有更高的確定性

- 林地碳量估算方式係參考上述提到IPCC指南所提供的5個碳庫，考量林業部門主要針對林木生物量的碳量估算，又IPCC指南於層級1方法為假設林地死有機質呈現平衡狀態，故假設死有機質碳庫的碳變化為0；土壤碳量部份，IPCC指南層級1方法係假設土壤碳量為平衡狀態，故死有機質碳增加量與減少量互相抵消，計算過程中的其他死有機質以及土壤部分可以忽略不計。因此森林碳量計算主要針對林木的地上部與地下部2大部分進行。
- 林木的地上部與地下部碳儲存計算方法部分，參考IPCC指南提供的兩種方法分別為增減法以及儲存量變化法，分別說明如下
- 第一種為增減法，透過計算在不同時期碳量的增加及減少：
 - $\Delta C_{TREE} = I \cdot BEF \cdot D \cdot (1+R) \cdot CF$ 公式 1
 - $\Delta C_{TREE} = I \cdot BCEF \cdot (1+R) \cdot CF$ 公式 2
 - 上述式中 ΔC_{TREE} 為單株或單位面積樹木之碳儲存變化量，I為樹木的年平均材積生長量，BEF為地上部擴展係數、D為基本木材密度、BCEF為生物量轉換及擴展係數、R為根莖比、CF為碳含量比例
- 第二種為儲存量變化法，藉由不同時期之碳儲存總量的變化，計算一期間內的碳增減量，而一時期之碳儲存量可藉由下列公式計算：
 - $C_{TREE} = V \cdot BEF \cdot D \cdot (1+R) \cdot CF$ 公式 3
 - $C_{TREE} = V \cdot BCEF \cdot (1+R) \cdot CF$ 公式 4
 - 上述式中 C_{TREE} 為單株或單位面積樹木之碳儲存量，V為樹木主幹之材積或蓄積，BEF為地上部擴展係數、D為基本木材密度、BCEF為生物量轉換及擴展係數、R為根莖比、CF為碳含量比例
- 因此，本研究針對上述計算森林碳匯計算方法，針對所需之項目進行蒐集，包括用於計算樹木材積或生物量等活動數據之各種推估模式，以及生物量擴展係數(BEF)、基礎密度(D)、生物量擴展及轉換係數(BCEF)、根莖比(R)、碳含量(CF)等6大項。

2. 蒐集重要樹種與林型之材積、單位面積蓄積等轉換模式

針對有關國內各樹種與林型之單木材積、林分蓄積以及生物量等各種計算森林碳匯活動數據可使用之轉換模式之研究文獻，透過關鍵字於文獻資料庫進行搜尋，並以滾雪球方式蒐集包含如期刊研究報告、學位論文以及計畫報告等文獻，完成蒐集具有模式資料之文獻共108篇(表 1)。並從中整理單木或林分層級之各類型推估模式共269筆，依據樹種林型以及分類層級分別統計如表 3及表 4，並將各推估模式之樹種、林型、學名、公式、地區、海拔、推估項目、分類層級等分別記錄，建立森林碳匯轉換係數與專案活動數據資料庫。

3. 蒐集重要樹種與林型之碳匯轉換係數

針對國內重要樹種與林型之基礎密度、碳含量、地上部擴展係數以及根莖比等計算碳匯所需之轉換係數研究文獻，透過關鍵字於文獻資料庫進行搜尋，並以滾雪球方式蒐集包含如期刊研究報告、學位論文以及計畫報告等文獻共73篇(表 2)。並從中整理不同樹種之生物量擴展係數(BEF)62筆、生物量轉換與擴展係數(BCEF)29筆、基本密度(D)776筆、根莖比(R)47筆以及碳含量(CF)540筆，總計共1,454筆轉換係數資料，依據樹種類型以及分類層級分別統計如表 3及表 4，並將各項轉換係數之樹種、林型、學名、係數、地區、海拔與分類層級等分別記錄，建立森林碳匯轉換係數與專案活動數據資料庫。





4. 建立木材於原料取得階段的數據蒐集項目。

完成美國南方松、奧地利森林供應鏈溫室氣體排放量、北美軟木環境宣告以及瑞典森林作業等不同之LCA案例分析如附錄1，分析項目包括系統邊界、功能單位以及評估結果等資訊。根據分析結果，產品生命週期的基本要素包括系統邊界、功能單位與評估結果。功能單位通常為一立方米連皮木材，影響單位通常為二氧化碳當量，分配方式都為質量分配。最終的結果經常將碳儲存量與產品生產的碳排放量進行比較，以說明碳儲存量的大小。系統邊界方面，是否將和原木生產相關的非現場加工等次要過程列入，呈現較大差異；此外，原木製品從林道到工廠或消費者的運輸過程，因涉及後續的木材利用，通常為獨立的進程。表 5 木材原料生產從場地準備在林道或工廠結束，包括所有相關的初級和次級過程。由於森林管理制度不同，並非所有流程都適用。建議LCA的評估應該強制包括所有流程，如果不需要某些流程，則應註明，並解釋原因。所有過程的結果應該單獨的數據，以便比較不同的森林管理活動。

5. 建立木材於原料取得階段的數據蒐集方法。

- 從文獻回顧可知美國南方松的生命週期評估，其森林產量、輪伐期和管理系統等資料，基於文獻、森林模擬數據、收穫統計數據的評估以及對林地所有者的訪談。森林伐採作業的數據源自美國南部伐木設備、配置和生產力的研究數據。燃料、苗木、肥料、除草劑和機械設備是使用 SimaPro 生命周期軟體的資料，生成每項造林活動的排放概況。奧地利的生命週期評估，多數數據是通過書面和訪談交流從奧地利聯邦森林公司獲得。北美軟木生命週期評估主要數據為製造過程；森林管理活動的影響是根據對車輛和設備使用的區域調查的加權平均值估算。瑞典的數據來自管理單位的經營統計和承包商的紀錄。
- 此外，北美軟木對二手數據源的時間、地理、技術代表性和完整性進行數據質量評估。時間代表性從一般（10年以內的數據）到非常好（1年以內的數據），地理代表性非常老或良好（數據是特定於北美或代表全球過程），技術代表性非常好（數據代表北美技術）。
- 綜上所述，生命週期評估的數據蒐集方法，主要基於現場活動數據的蒐集，或基於文獻資料、代表性資料庫、訪談及各項商業與管理活動資料，數據源應有完整詳細的描述，不使用估計與假設。

6. 盤點原料取得階段各項活動所需之碳足跡係數

- 國內木材於原料取得階段的碳足跡研究並不多，顏婉婷(2014)以南庄疏伐木為例，估算木板凳於伐木和集材階段的碳足跡別為為2.04、10.01 kgCO₂e/m³。卓志隆、胡子涸(2018)以林業署六個疏伐地區為例，計算出伐木和集材階段的碳足跡為1.57和15.8 kgCO₂e/m³。原木集材與整堆作業所消耗的汽油及柴油用量中鏈鋸所使用油料為混合92 無鉛汽油及機油，其配合比為 20：1固。定式集材機、附絞盤與附抓鉤式怪手則使用柴油作為動力來源，引擎潤滑油為二行程機油。伐木及造材過程中，平均每生產 1 m³ 原木須消耗 0.63 公升的 92 無鉛汽油，機油為 0.03 公升；集材整堆過程中，每生產 1 m³ 原木須消耗 5.80 公升的柴油，機油為 0.22 公升。
- 活動過程中所需之碳足跡係數主要為油料與運輸兩大類，有關國內用於木材於原料取得階段已公告之碳足跡係數如表 6。有關苗木生產、場地準備及種植、除草、修枝等活動過程的碳足跡，除肥料外，國內尚無相關盤查數據。

六、結論：





1. 本研究根據IPCC國家溫室氣體清冊指南中有關森林碳匯之計算方法，進行碳匯計算之活動數據與轉換係數資料蒐集，包含計算推估樹木或森林之材積與生物量之相關推估式共269筆，以及生物量擴展係數(BEF)、基礎密度(D)、生物量擴展及轉換係數(BCEF)、根莖比(R)、碳含量(CF)等6種轉換係數共1454筆，並建立森林碳匯轉換係數與專案活動數據資料庫，可供未來計算不同樹種或林型之碳匯資料時，依目標樹種以及所在位置選擇是否有合適之模式與轉換係數使用。
2. 國內雖訂有木、竹製板材碳足跡產品類別規則，但對於原料取得過程並無詳細的規範。本計畫利用文獻蒐集分析與整理，建立木材原材料生產過程LCA評估數據蒐集項目、蒐集方法與碳足跡係數。木材原料生產從場地準備在林道或工廠結束，包括所有相關的初級和次級過程。國內目前僅有伐木與集材活動的調查數據，關於苗木生產、場地準備及種植、除草、修枝等活動過程的碳足跡並無實際的調查研究；此外，有關伐木與集材活動未紀錄人員通勤交通、機械運輸或道路維護等次要過程，可能會低估原料生產過程中的碳排放。

七、參考文獻：

1. 李冠賢 (2019) 木構造房屋生命週期碳足跡與林木經營碳匯效益評估。臺灣大學氣候變遷與永續發展國際學位學程碩士論文。
2. 林俊成、陳溢宏、王培蓉、陳幸君、吳孟珊 (2017) 臺灣主要實木產品進口運輸之碳排放量估算。臺灣林業科學。32(3):191-201。
3. 塗三賢 (2007) 台灣地區木構造住宅對碳貯存與二氧化碳減量之貢獻。臺灣大學森林環境暨資源學研究所博士論文。
4. 陳昆生 (2016) 以生命週期評估探討竹材利用之環境效益。臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
5. 顏婉婷 (2014) 林產品碳足跡之研究-以木製板凳為例。臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
6. Cosola, G., Grigolato, S., Ackerman, P., Monterotti, S., & Cavalli, R. (2016). Carbon footprint of forest operations under different management regimes. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 37(1), 201-217.
7. IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa K., Ngara, T., and Tanabe, K.(eds). Published: IGES, Japan.
8. Klein, D., Wolf, C., Schulz, C., & Weber-Blaschke, G. (2015). 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(4), 556-575.
9. Liski, J., Pussinen, A., Pingoud, K., Mäkipää, R., Karjalainen, T., 2001: Which rotation length is favourable to carbon sequestration? *Canadian Journal of Forest Research* 31(11): 2004-2013.
10. Picchio, R., Verani, S., Sperandio, G., Spina, R., Marchi, E., 2012: Stump grinding on a poplar plantation: Working time, productivity, and economic and energetic inputs. *Ecological Engineering* 40: 117-120.





表 1 本計畫已蒐集有關樹木或林分生長模式相關文獻

作者	年度	篇名
劉慎孝等	1955	台灣柳杉林收穫表。
楊寶霖、石子材	1963	空中照片判釋用林分材積(二)。
林子玉	1963	林分生長量表簡易編制法及預測方法比較之研究。
劉慎孝等	1964	臺灣杉木林收穫表。
劉慎孝、林子玉	1968	台灣中南部相思樹林分收穫表及材積表。
劉慎孝	1969	杉木林分適中立木度之查定研究。
劉慎孝、林子玉	1970	台灣北部琉球松收穫表及材積表。
黃崑崗	1970	台灣二葉松林分收穫表及材積表之編製。
林野庁計畫課	1970	立木幹材積表。
陳松藩	1972	台灣產樟科主要樹種材積表之編製研究。
陳松藩	1972	台灣產殼斗科樹種材積表及形數表之編製研究。
楊榮啟	1972	臺大實驗林柳杉樹幹形狀及立木材積表編製之研究。
黃崑崗	1972	桂竹材積與重量關係及其材積表編製之研究。
林務局	1973	臺灣各主要樹種主木材積表。
陳松藩	1973	臺灣泡桐材積表及形數表之編製。
劉宣誠等	1974	蓮華池巒大杉造林木生長之研究。
劉宣誠	1974	臺灣泡桐生長與生育地狀況關係之研究。
楊榮啟	1975	臺灣大學實驗林產柳杉之生長與收穫的研究。
林子玉	1975	臺灣區天然生櫟櫟類樹種材積表之編製。
劉慎孝	1975	臺灣柳杉林分理想立木度之查定研究。
黃崑崗	1977	紅檜人工林生長之調查研究。
林子玉等	1978	臺灣產相思樹材積表。
林子玉等	1978	台灣產木油桐材積表。
陳松藩	1979	台灣杉材積表及形數表之編制。
洪良斌、羅卓振南	1980	蓮華池林區肖楠造林木生長之研究。
楊榮啟	1980	森林測計學。
林國銓	1980	山黃麻生物量與養分含量之研究。
洪良斌等	1980	楠梓仙溪林區臺灣雲杉天然林生長之研究。
高強	1980	台灣柳杉最佳疏伐與輪伐期之經濟分析。
劉宣誠等	1981	台灣大葉桃花心木造林木之生長及木材材質之研究。
劉宣誠	1982	本省杉木造林木之生長與木材性質之研究。
劉宣誠、吳萬益	1984	光蠟樹造林木生長與生育地狀況關係之研究。
Liu et al. 劉宣誠等	1984	六龜地區臺灣杉造林木之生長與材質之研究。
楊榮啟	1984	談森林生長模式。
Chang, S. J.	1984	A simple production function model for variable density growth and yield modeling.





陳朝圳	1985	大雪山地區紅檜人工幼齡林生長模式之研究。
羅紹麟、馮豐隆	1985	林相變更之柳杉造林地的林分構造與收穫。
張峻德	1986	臺灣中北部柳杉林分之生物量生產力。
羅紹麟、馮豐隆	1986	台灣第一次林相變更造林木生長情形及生長量調查計劃報告。
馮豐隆、羅紹麟	1986	台灣二葉松人工林生長與收穫之研究。
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。
劉業經等	1986	惠蓀林場闊葉樹次生林林相改良報告 (I) - 伐採三十年後之植生組成及初步處理。
羅紹麟、馮豐隆	1987	生物量調查及分析方法在樟樹資源調查之應用。
姚鶴年	1987	台灣主要樹種立木材積求積式之解析。
張森等	1987	林務局普通施業地人工林生長與收穫之分析。
劉業經	1988	臺灣二葉松在臺灣之育林。
陳財輝、呂錦明	1988	苗栗海岸砂丘木麻黃人工林之生長及林分生物量。
陳朝圳、范貴珠	1989	恆春地區巨葉銀合歡生長與收穫之研究。
廖大牛	1990	森林資源經營學。
林照松、洪富文	1991	六龜地區臺灣杉人工林之生長。
姚榮鼎等	1992	台灣光臘樹在竹山地區 23 年之生長。
陳麗琴、黃進睦	1992	Weibull 機率密度函數於蓮華池杉木人工林原木經濟價值之研究。
劉浚明、鍾旭和 Liu CM, Chung HH	1993	台灣杉非線性收穫模式之建立。
劉浚明、鍾旭和	1993	臺灣杉非線性收穫模式之建立。
李久先、顏添明	1994	紅檜人工林單木生長之研究(一)-未疏伐林分及疏伐林分單木生長模式模擬效果分析。
林務局	1995	第三次臺灣森林資源及土地利用調查。
林務局	1997	台灣林產處分調查用立木材積表。
陳麗琴等	1997	六龜試驗林台灣杉人工林蓄積量及生長估測之研究。
陳財輝等	1998	四湖海岸木麻黃林分生物量及養分量聚集。
林俊成、李國忠、 林裕仁	1999	柳杉人工林碳貯存效果與適應成本研究。
林國銓等	2001	福山闊葉林林木地上部生物量估算之異率迴歸式。
王雅諄	2002	南仁山亞熱帶雨林木本植物生物量之估算。
林俊成等	2002	全民造林運動二氧化碳吸存潛力之經濟效益評估。
Fukuda et al.	2003	Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan.
黃凱洛	2003	杉木人工林生長量與碳吸存之研究。
顏添明等	2004	杉木人工林成熟林分林木生長及生物量之探討。
白石則彥等	2004	東京大学千葉演習林における炭素蓄積量の推定—1995 年と 1909 年の比較—。
李欣蓉	2004	七星山優勢樹種生物量估算養分濃度與土壤性質之探討。





林國銓等	2004	六龜台灣杉人工林碳和氮的累積和分布。
葉青峯	2004	台灣扁柏森林的生物量及雲霧沈降量估算。
劉兆昌	2004	杉木人工林樹冠結構與生物量之研究。
陳凱欣	2005	鴛鴦湖台灣扁柏森林生物量與冠層結構。
邱志明等	2006	紅檜生材含水率與密度在單株間與單株內之變異。
哀力頤	2006	紅檜與柳杉人工林地上部碳貯存量之推估。
林國銓等	2006	六龜試驗林亞熱帶天然闊葉林地上部碳貯存量之估算。
柯淑惠	2006	台灣檫木人工林生物量及碳儲存量之研究。
林國銓等	2007	苗栗地區相思樹和木油桐人工林碳和氮累積量及生產量之估算。
張瑞文	2007	應用光達資料於溪頭柳杉人工林分調查之研究。
王瑞閔	2007	台灣國有林地森林碳吸存估算方法之探討。
國立嘉義大學森林暨自然資源學系	2008	疏伐強度對平地造林林分蓄積及地上部生物量影響之研究。
林國銓等	2008	檫木人工林造林木碳貯存量和吸存量之估算。
顏添明等	2008	台灣中部地區紅檜及柳杉人工林疏伐示範區生長收穫模式建立之研究。
林世宗等	2008	台灣二葉松地上部生物量及碳吸存量之估算。
陳莉坪	2008	台糖平地造林植林碳匯計畫設計文件之研究。
行政院農業委員會林務局	2008	人工林永續經營監測系統建立 -以桃花心木之疏伐作業為例。
林國銓等	2009	台東地區相思樹與楓香兩人工林碳累積量。
國立臺灣大學農業經濟學系	2009	不同疏伐作業下之經濟效益分析及其對留存木之影響。
陳羽康	2010	臺灣杉林分結構與生物量之研究。
邱志明等	2010	台灣杉人工林生物量與不同疏伐策略碳吸存效應。
林國銓等	2010	光蠟樹人工林碳貯存量和吸存量之估算。
中興大學森林學系	2010	林木生長模式應用於常見平地造林樹種之碳吸存量推估。
張愷玲	2010	新化林場大葉桃花心木人工林蓄積量與碳吸存量之推估。
鄭景鵬	2010	臺灣二葉松人工林生育地環境對林分結構、蓄積量與生物量影響之研究。
孫正華等	2011	不同相對關係式推估針葉樹及竹類地上部生物量之比較。
邱志明等	2011	紅檜人工林生物量和不同疏伐策略對二氧化碳吸存之效應。
王兆桓	2011	建置森林生長量與蓄積量分析系統暨改善碳吸存估計之研究(3/4)。
林金樹等	2012	九鬮農場大葉桃花心木、印度紫檀及小葉南洋杉人工林的林分初期生長特性。
黃菊美等	2012	棲蘭山地區檜木林其林木生物量及生長量之估算。
郭耀綸	2013	更新造林對森林碳吸存之效應：林分碳與土壤碳--台灣南部更新造林對林分碳吸存之效應(I)。





鄭智馨等	2014	溪頭台灣杉人工林之林分特性與發展。
陳財輝等	2014	蓮華池巨竹林之林分結構與地上部生物量。
李宗宜等	2016	阿里山石棹地區石竹林分結構及生物量。
邱志明等	2017	紅檜人工林不同林分密度生長與自我疏伐之研究。
羅弘霖	2017	臺灣杉人工林之林木生長與林分密度之探討。
鄭智馨等	2018	溪頭自然教育園區人工造林地之林分特性。
邱志明等	2018	紅檜與台灣扁柏林分自我疏伐之初探。
中興大學	2019	雪山黑森林臺灣冷杉更新與物候調查。
李隆恩等	2021	六龜地區臺灣杉人工林生長模式之建立。





表 2 本計畫已蒐集有關森林碳匯轉換係數相關文獻

作者	年度	篇名
馬子斌	1951	臺灣產主要木材之理學性試驗(一)。
馬子斌	1952	臺灣產主要木材之理學性試驗(二)。
馬子斌	1953	臺灣產主要木材之理學性試驗(三)。
馬子斌	1954	臺灣產主要木材之理學性試驗(四)。
馬子斌	1955	臺灣產主要木材之理學性試驗(五)。
馬子斌	1956	臺灣產主要木材之理學性試驗(六)。
馬子斌	1959	臺灣產主要木材之理學性試驗(七)。
馬子斌	1964	臺灣產主要竹材之物理性質及力學性質。
馬子斌	1966	臺灣重要木材之物理性質與力學性質試驗。
蔣福慶	1973	臺灣主要竹材之物理性質試驗。
王子定	1978	不同齡級柳杉之生長與樹木生物量生產之研究。
李訓煌	1978	不同齡級柳杉林之生長及樹木生物量生產之研究。
馬子斌、黃清吟	1980	重要商用竹材之一般性質(一)。
游漢明	1981	不同齡級柳杉林分地上部之生物量與淨生產量。
馬子斌等	1981	臺灣重要竹材之物理與加工性質。
王松永	1983	商用木材。
谷雲川等	1987	速生樹種木材纖維性質與製漿試驗(一)山黃麻_麻六甲合歡及杉木。
吳順昭、謝榮生	1988	台灣主要經濟樹材組織構造變異性之研究(I)－針葉樹材之樹幹之直徑、比重、細胞壁率與邊心材率。
堯明才	1990	台灣主要經濟樹材組織構造變異性之研究--三種闊葉樹材之組織構造變異性。
呂錦明、陳財輝	1992	桂竹之林分構造及生物量-桶頭一桂竹林分之例。
馬子斌等	1992	重要商用木材之一般性質。
劉正字等	1992	竹木材積層膠合製作高級製品及結構建材(I)竹材基本物理機械性質及膠合性之探討。
林國銓等	1994	福山試驗林闊葉林生態系生物量與葉面積指數的累積與分布。
王義仲、陳周宏	1995	臺灣產竹種工藝利用價值之評估 (I)。
陳載永、葉政翰	1996	樹種對三種非破壞性測定儀檢測木材彈性係數之影響。
林裕仁等	2002	臺灣地區主要用材比重與碳含量測定。
林國銓等	2003	六龜試驗林兩台灣杉人工林生物量和碳儲存量之估算。
黃金城等	2003	台灣雲葉、青剛櫟及相思樹作為防火樹種之可行性探討。
林國銓等	2004	六龜臺灣杉人工林碳和氮的累積和分布。
林世宗、鍾智昕	2005	臺灣二葉松林木地上部碳吸存之估算。
林國銓、何淑玲	2005	由生物量推估臺灣不同林分之碳儲存量。
郭幸榮等	2005	柳杉人工林生物量及碳儲存量之估算－以觀霧地區為例。
薛銘童等	2005	關刀溪次生林不同樹種地上部碳的累積和分配。





林國銓等	2006	亞熱帶闊葉林林木粗根生物量和養分含量之估算。
顏添明、黃凱洛	2006	杉木地上部碳儲存量之推估。
許原瑞等	2006	海岸林分生物量調查規劃。
王義仲	2006	竹林生物量調查回顧與展望。
行政院農業委員會林務局	2006	森林蓄積量與生物量轉換模式之建立(1/3)。
羅盛峰、王松永	2007	炭化條件對孟宗竹與麻竹炭化物基本性質之影響(一)收炭率、收縮率、真密度及元素分析。
行政院農業委員會林務局	2007	森林蓄積量與生物量轉換模式之建立(2/3)。
行政院農業委員會林務局	2008	森林蓄積量與生物量轉換模式之建立(3/3)。
李宣德、馮豐隆	2008	森林碳吸存資源調查推估模式系統一以臺灣樟樹為例。
紀怡嘉	2008	臺灣中部地區桂竹林生物量與碳貯存量之研究。
許原瑞	2008	桉樹類的生物量與碳蓄積量。
李佳如等	2008	樟樹及臺灣檫的年輪特徵值對動彈性模數及抗壓強度之影響。
林振榮等	2008	柳杉紅色及黑色心材造林木物理性材質之評估。
盧惠生	2009	綠色造林試驗監測計畫—平地造林對水文環境之影響98年成果報告。
顏添明等	2009	臺灣主要三種針葉樹種地上部之碳含量及碳貯存量。
劉彥群、杜明宏	2009	木材化學組成對其活性碳性質之影響。
行政院農業委員會林務局	2010	建置森林生長量與蓄積量分析系統暨改善碳吸存估計之研究(2/4)。
邱志明、林振榮	2010	六龜地區不同疏伐處理紅檜造林木的木材碳含量及基本密度。
李宣德、馮豐隆	2010	臺灣地區樟樹生物量擴展係數之建立。
劉素玲等	2010	製備條件對兩種國產竹活性碳基本性質之影響。
彭嘉文等	2010	銀合歡木灰作為製備活性碳天然活化劑之探討。
杜清澤等	2011	人倫地區柳杉人工林地上部與地下部生物量之估算。
林裕仁等	2011	四種臺灣竹材碳轉換係數之分析。
陳財輝等	2011	南投縣鳳凰山孟宗竹產筍林分之生長與生物量。
陳財輝等	2011	包籜矢竹之生長、生物量及竹筍生產。
沈竣研、林亞立	2011	以熱處理桉樹單板製作合板之性質評估。
廖宜緯等	2011	台糖公司屏東縣平地造林碳貯存量調查。
林業試驗所	2012	「綠色造林試驗監測計畫」計畫之期末報告。
行政院農業委員會林務局	2012	建置森林生長量與蓄積量分析系統暨改善碳吸存估計之研究(4/4)。
陳財輝等	2012	臺南左鎮地區荊竹林之生長與生物量。
孫百寬等	2013	臺灣中部地區孟宗竹林不同經營強度林分性態值、地上部生物量及碳貯存量之比較





陳財輝等	2013	花蓮地區 3 種海拔包籜矢竹林分之特性。
廖天賜	2013	桂竹林經營作業法對林分動態變化之研究(1_3)。
高裕閔、王兆桓	2014	和平事業區森林永久樣區調查與分析 CO ₂ 吸存效應。
葛兆年	2015	植樹造林試驗監測計畫－平地造林對水文環境之影響。
國立宜蘭大學森林暨自然資源學系	2017	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)。
邱志明等	2017	疏伐處理對台灣杉人工林木材年輪特徵與碳含量之影響。
成允聖、陳財輝	2018	荊竹生物炭對育苗介質與苗木生長之影響。
行政院農業委員會水土保持局	2019	水土保持樹種固碳能力與儲碳潛力計算資料庫之建置。
行政院環境保護署	2023	中華民國國家溫室氣體清冊報告。





表 3 本研究蒐集之推估式以及各項轉換係數筆數以物種數統計

	針葉		闊葉		竹	
	物種數	總筆數	物種數	總筆數	物種數	總筆數
推估式	17	169	29	79	6	21
BEF	8	20	10	30	4	12
BCEF	9	10	12	19	-	-
R	3	6	10	32	3	9
D	29	127	467	604	15	45
CF	20	72	401	441	4	27





表 4 本研究蒐集推估式及各項轉換係數筆數以不同分類層級分類統計

		推估式	BEF	BCEF	R	D	CF
針	平均	1	-	1	-	-	-
	科	-	-	-	-	-	2
	屬種	1	4	1	-	13	7
闊葉	平均	167	16	8	6	114	63
	科	4	4	3	2	-	3
	屬	4	-	-	-	42	149
	種	3	-	-	-	159	159
竹類	平均	68	26	16	30	403	130
	科	-	-	-	-	-	-
	屬	-	-	-	-	-	-
	種	21	12	-	9	45	27





表 5 木材原材料生產過程 LCA 評估數據蒐集項目

進程	意義	項目
場地準備 Site preparation (SP)	包含種植前或種植期間的措施以準備場地的過程	清理、防火帶建設和維護、打樁和燃燒以及土壤鬆土
場地管理 Site tending (ST)	在種植期間或種植後幾年內包含措施以改善或保護種植場地的過程	圍欄、施肥、殺蟲劑和除草劑
造林作業 Silvicultural operations (SO)	與樹木生長、林分結構或木材提取直接相關的過程	種植、除草、修剪、間伐、最終砍伐、運輸、砍伐後過程、和裝上卡車
次要過程 Secondary processes (SEP):	與原木生產和供應直接相關的非現場加工	林業經營規劃、機器製造和維護、道路建設和維護、通勤交通和機械運輸、住房和住宿，種子/幼苗生產和運輸
運輸 Transport (T)	原木製品從林道到門口或消費者的運輸過程	
削片 Chipping (C)	在某些情況下，如果它是在林道上進行的，則考慮到 Chipping，因此，它被包含在一個單獨的過程組中	





表 6 國內用於木材於原料取得階段已公告之碳足跡係數

項目	係數名稱	碳足跡數值	宣告單位	單位	公告年份
油料	車用汽油(於移動源使用，2020)	3.01	公升(L)	行政院環境保護署	2022
	車用汽油(於固定源使用，2020)	2.93	公升(L)	行政院環境保護署	2022
	車用汽油(未燃燒，2020)	0.657	公升(L)	行政院環境保護署	2022
	柴油(於捕撈移動源使用，2020)	3.35	公升(L)	行政院環境保護署	2022
	柴油(於水路運輸移動源使用，2020)	3.36	公升(L)	行政院環境保護署	2022
	柴油(於鐵路運輸與非道路運輸移動源使用，2020)	3.61	公升(L)	行政院環境保護署	2022
	柴油(於公路運輸移動源使用，2020)	3.38	公升(L)	行政院環境保護署	2022
	柴油(於固定源使用，2020)	3.34	公升(L)	行政院環境保護署	2022
	柴油(未燃燒，2020)	0.73	公升(L)	行政院環境保護署	2022
	燃料油未燃燒(蒸餘油/重油未燃燒，2020)	0.829	公升(L)	行政院環境保護署	2022
燃料油使用(蒸餘油/重油使用，2020)	3.95	公升(L)	行政院環境保護署	2022	
肥料	硝酸銨鈣(肥料)	1.8	公斤(kg)	經濟部工業局	2016
	氯化鉀(肥料用)	0.61	公斤(kg)	經濟部工業局	2015
運輸	營業小貨車(汽油)	0.683	延噸公里(tkm)	行政院環境保護署	2022
	營業小貨車(柴油)	0.587	延噸公里(tkm)	行政院環境保護署	2022
	營業大貨車(柴油)	0.131	延噸公里(tkm)	行政院環境保護署	2022

資料來源:產品碳足跡資訊網





附錄 1、LCA 案例分析

1. 美國南方松(Oneil & CORRIM 2021)

系統邊界

圖1為美國南方LCA評估的系統邊界。主要分為造林作業與伐採作業兩大部分。造林作業，例如預先規定的焚燒（對於長葉松）、機械和/或化學場地準備、種植（或自然再生），以及林分管理活動，例如化學刷除、施肥和疏伐。採伐作業包括砍伐（砍伐樹木）、堆放（將樹木移至平台或路邊）、加工（將樹木切割成適合運輸的長度）以及裝載到卡車上準備運。此分析中未報告運輸，因為木材加工設施有特定的距離和設備。投入包括幼苗、燃料和用於育苗的電力，用於場地準備、管理和收穫的燃料，除草劑、助燃劑和化肥的生產和應用，以及所有操作的人員和材料運輸。輸出包括生產 1 立方米原木、副產品、包括森林殘留物在內的廢物相關的排放。

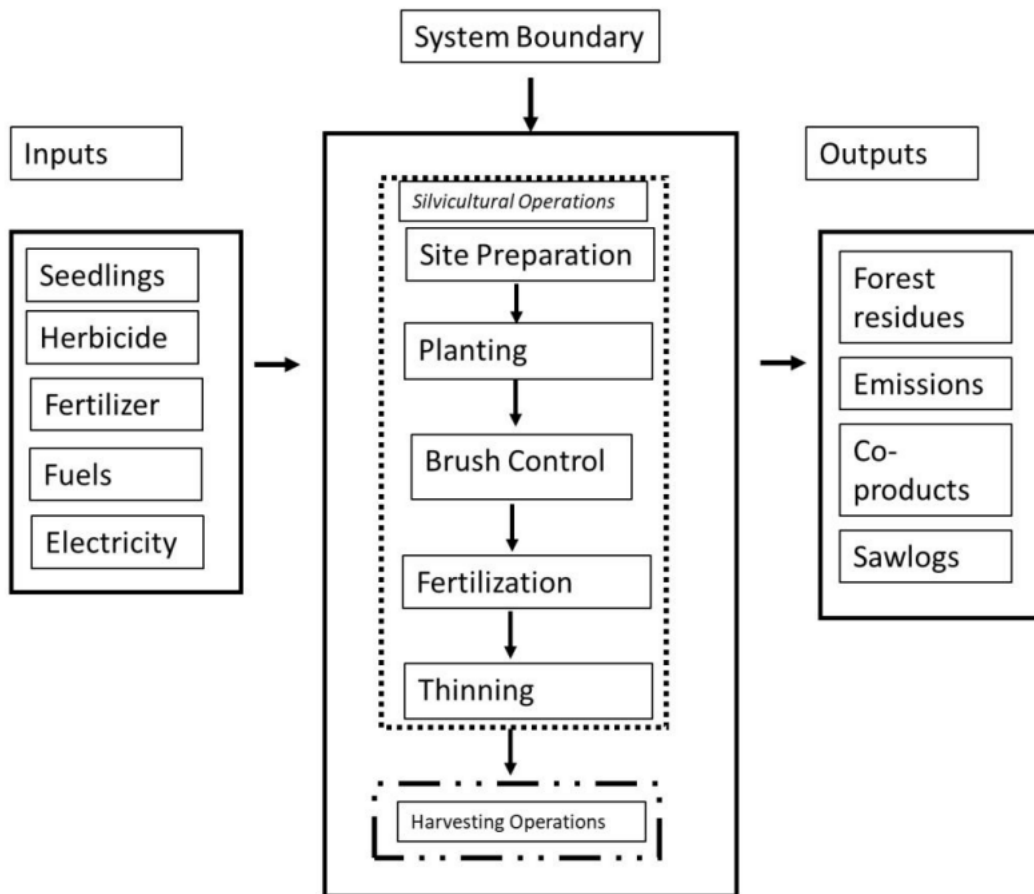


圖1、美國東南部地區森林資源LCA的系統邊界

功能單位

功能單位為裝載在卡車上的1立方米原木。所有輸入和輸出數據都根據產品和聯產品的質量分配給產品的功能單元。分配基於原木的烘乾重量。

伐採後，森林殘餘物如果被作為紙漿纖維來源或生物能源從現場移除，它就會成為副產品（經濟價值），並且可以分配給上游林業負擔隨後的相關影響。如果讓材料原地腐爛，它就會作為森林殘餘物離開系統邊界。如果燃燒材料是為了滿足減





少火災隱患的規定，或者是為了提高再生的成功率，則這些影響將包含在生命週期中進行分配。

結果

南方松林原木的全球變暖潛能值 (GWP) 影響為 $10.1 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ ，造林業務 GWP $2.5 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$ ，佔原木生產的 25%。造林作業的總 GWP/ m^3 範圍為 6.6 至 $0.001 \text{ kg CO}_2\text{e}$ 。

一立方米絕乾原木含 235 千克碳或 863 千克二氧化碳當量 (Milota 2015)。經換算南方松林原木的全球變暖潛能值 (GWP)，約 1.2% 的二氧化碳當量封存在每立方所生產的原木中。

2. 奧地利森林供應鏈溫室氣體排放量 (Kühmaier et al., 2022)

系統邊界

圖2為奧地利木材供應鏈，從苗木生產到工廠大門的所有相關生產流程。供應鏈由多個過程組組成，例如場地準備和撫育、採伐、運輸和二次加工。採伐過程包括提取樹木(砍伐)、樹幹(砍伐和去枝)、原木(砍伐、去枝和橫切)和採伐殘餘物(樹枝和直徑小於 7 cm 的採伐木材)。所有的過程都包含它們各自的次要過程。次要過程包括所有不在森林中發生但也與提供原木相關的過程，例如機械製造、將機器從工廠運輸到當地企業或提供燃料。

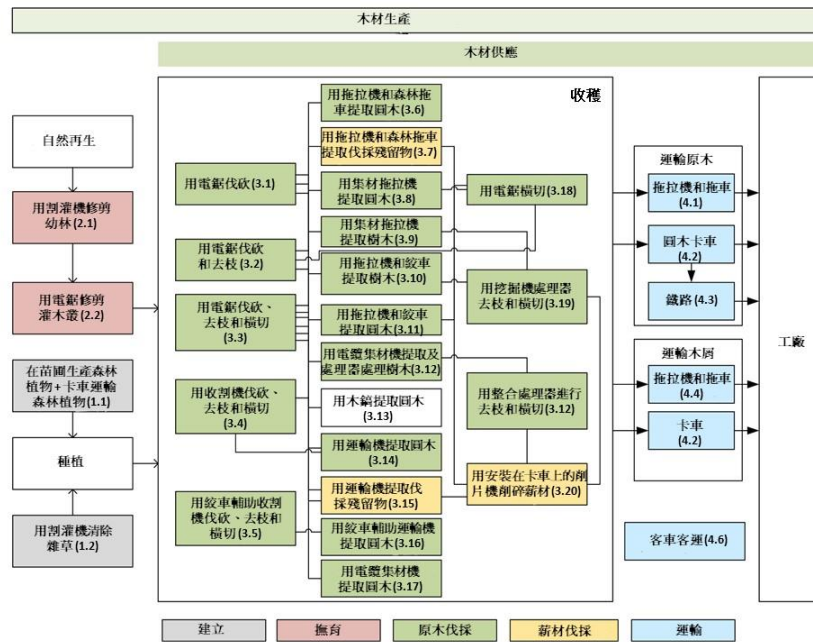


圖2、為奧地利木材供應鏈的生產流程

功能單位

功能單位是一立方米包括樹皮的木材。使用這個功能單元是因為它常用於其他 LCA 研究，因此結果將與其他研究具有可比較性。





結果

2018 年奧地利因採伐和運輸 19.2 hm³ 木材共排放了 492,096 噸二氧化碳當量。相當於 25.63 Kg二氧化碳當量/每立方米。交通運輸在供應鏈中的排放量最大，佔77%，其中卡車運輸佔 65%，鐵路運輸以及拖拉機和拖車各佔 6%。集材佔排放量的 14%，其中集運機 (5%)、集材機 (3%)、電纜堆垛機 (2.5%) 以及拖拉機和絞車 (2%) 是主要驅動因素。砍伐、去枝和橫切等過程佔溫室氣體排放量的 5%，切削佔4%。幼苗生產、運輸到森林、種植以及用割灌機清除雜草對整個供應鏈的溫室氣體排放沒有顯。

3.北美軟木環境宣告

北美製造的木製品，目前已針對不同產品製定和發布環境聲明(Environmental Product Declaration, EPD)，涵蓋木材、膠合板、定向刨花板、層壓單板木材、工字托樑、膠合層壓木材和紅木木材等多種木製品。EPD提供一種透明和直接的方式來了解木製品的潛在和整體環境影響。本研究選擇木材，了解企業估算產品LCA的方法。

系統邊界

LCA 調查軟木木材從搖籃到大門的過程。產品系統只包括生產階段(圖3)，分成三類信息模塊分別為：“A1提取和上游生產”、“A2運輸到工廠”和“A3製造”。

A1開採和上游生產包括北美管理森林慣常的所有林業活動：間伐、施肥、伐木、幼苗生長和重新種植。A2運輸至設施包括通過卡車、水路或鐵路運輸將原木和輔助生產材料運輸至工廠。A3製造包括鋸切、窯乾和刨削。

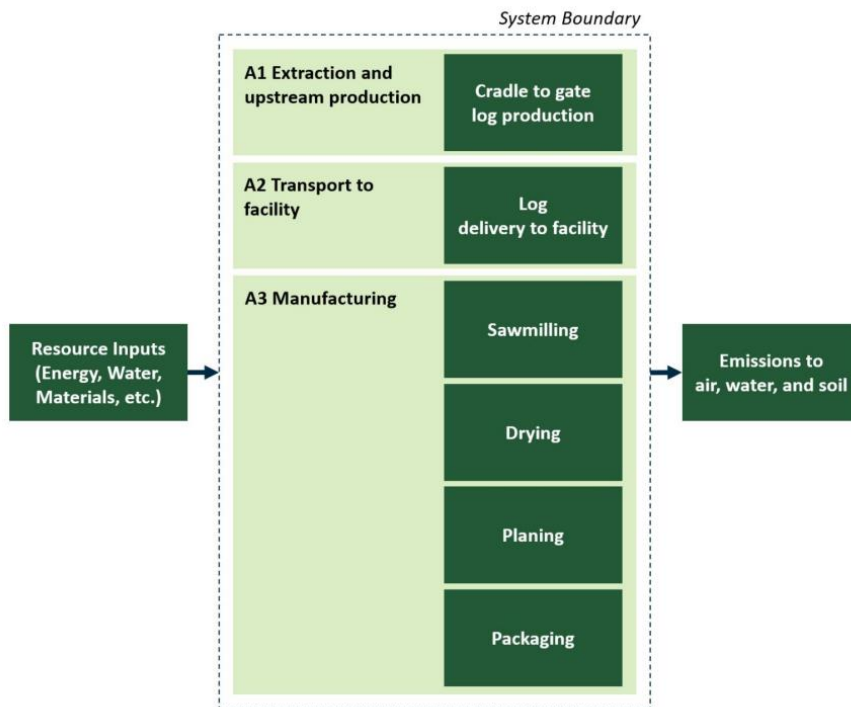


圖3、北美軟木LCA系統邊界





功能單位

LCA 研究的功能單位是“北美(美國和加拿大)生產的一立方米軟木木材的產量”。並標註單位厚度、密度、含水量等特性。

結果

A1、A2、A3階段的GWP影響分別為 10.55、10.01、42.56 kgCO₂e/m³。

4.瑞典森林作業的LCA評估(Berg and Lindholm 2005)

系統邊界

研究包括瑞典原木生產技術系統，從苗木生產到木材運輸到工廠大門。系統包括種子生產、森林幼苗的培育、砍伐清理、整地、自然或人工再生、除草、伐木作業、二次運輸。將勞動力、機械和供應品運輸到森林工作地點，這些操作被分解為單元過程(苗木生產、造林、伐木和二次運輸)，如圖4所示。

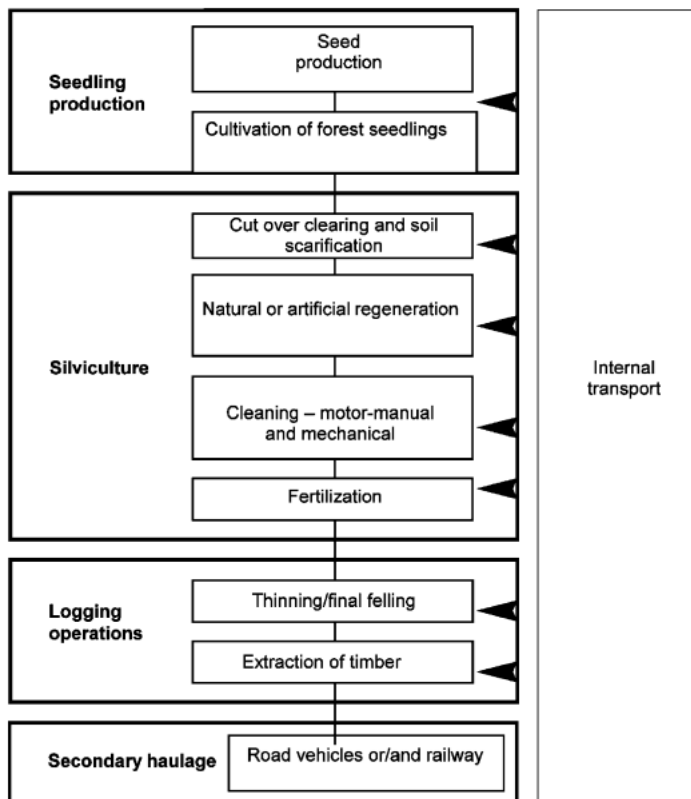


圖4、瑞典森林作業的LCA系統邊界

功能單位

與所有收集的數據相關的功能單位是 1 m³ s.u.b. (solid under bark s.u.b.)。圓木的基本密度為 399 kg/m³，密度值根據瑞典 1993-1998 年歐洲赤松、挪威雲杉和白樺樹種的平均年砍伐量加權。

結果





生產 1 立方米木材所需的能源使用量在瑞典北部為 200 MJ，在中部地區為 187 MJ，在瑞典南部為 147 MJ。在使用的能源總量中，二次運輸占能源需求最大，北部使用的占總能源的56%(113 MJ)，中部使用占53%(99 MJ)，南部地區為53% (77 MJ)。一立方米木材含有約7700 MJ，將木材運到工廠的過程所用能量最高 200 MJ，生產過程產生的能源釋放占木材可用固有能量的3%。

5. 小結

Klein等人(2015)以22項不同的同行評審研究、四份原始報告和兩個數據庫為基礎，分析林業部門LCA評估的系統邊界、功能單元、影響類別和涉及的過程。有關原料取得階段的活動進程(圖5)，可總結為場地準備、場地管理、造林作業、次要過程、運輸、削片等過程。茲將原料取得階段各項活動數據蒐集項目整理如表1。

功能單位通常以一立方米包括樹皮的木材為基礎(1m³ ob)。從整地到林道(SP+ST+SO+SEP)的平均GWP為14.3kgCO₂e。加上運輸過程(從搖籃到工廠大門)，GWP增加到6.3-67.114.3kgCO₂e(平均值=19.7)。假設平均碳儲存量為734kgCO₂e/m³ob(含碳量0.5，密度400/m³ob)，碳排放占儲存在木材中的碳的比值約為0.008-0.09。

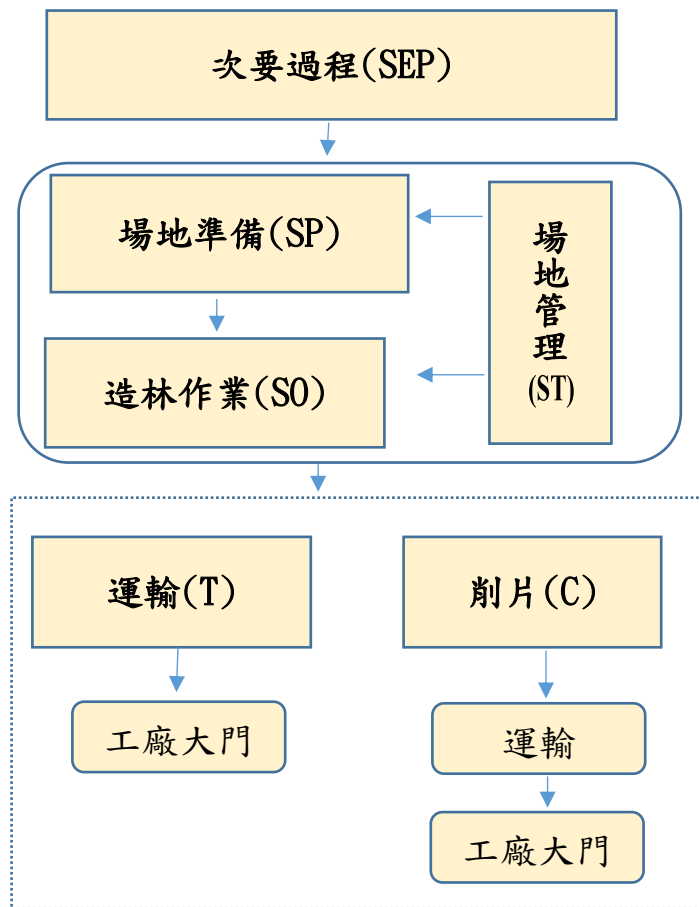


圖5、森林原材料生產的產品生命週期過程(Klein et al., 2015)





表1、木材原材料生產過程LCA評估數據蒐集項目

進程	意義	項目
場地準備 Site preparation (SP)	包含種植前或種植期間的措施以準備場地的過程	清理、防火帶建設和維護、打樁和燃燒以及土壤鬆土
場地管理 Site tending (ST)	在種植期間或種植後幾年內包含措施以改善或保護種植場地的過程	圍欄、施肥、殺蟲劑和除草劑
造林作業 Silvicultural operations (SO)	與樹木生長、林分結構或木材提取直接相關的過程	種植、除草、修剪、間伐、最終砍伐、運輸、砍伐後過程、和裝上卡車
次要過程 Secondary processes (SEP):	與原木生產和供應直接相關的非現場加工	林業經營規劃、機器製造和維護、道路建設和維護、通勤交通和機械運輸、住房和住宿，種子/幼苗生產和運輸
運輸 Transport (T)	原木製品從林道到門口或消費者的運輸過程	
削片 Chipping (C)	在某些情況下，如果它是在林道上進行的，則考慮到 Chipping，因此，它被包含在一個單獨的過程組中	

