

研究報告

臺灣木棧板碳足跡之研究

饒翊馨¹ 陳勇至^{1,2} 柳婉郁^{1*}

【摘要】本研究主要於探討臺灣木棧板產業之生命週期評估。針對木棧板的整個生命週期內的排放量進行分析。同時考慮進出口航運距離對碳排放的影響。研究結果指出，臺灣的木棧板進口主要來自臺灣自身出口再進口，其次來自拉脫維亞與中國大陸；每年總進口木棧板的排放量為 1,409,524.16 kg CO₂eq。然而木棧板的出口主要流向美國和中國大陸，每年總出口木棧板之排放量為 84,669.83 kg CO₂eq。綜合來看，臺灣的木棧板進出口產生 1,324,854 kg CO₂eq 的碳足跡逆差。在航運運輸方面，木模板排放量高達 1,055,234 kg CO₂eq，這說明臺灣的木棧板產業過度依賴進口，造成了大量碳足跡排放。本研究建議政府應該更加重視國內木材市場，增加國產木材的利用，不僅延長木棧板的生命週期效益，還能夠減少能源的消耗，產生有助於減輕木棧板產業對進口的過度依賴，從而降低碳足跡的排放。

【關鍵詞】碳足跡、棧板、生命週期評估、環境衝擊評估。

1 國立中興大學森林學系 Department of Forestry, National Chung Hsing University

2 國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處

The Experimental Forest, College of Bio-Resources and Agriculture, National Taiwan University

* 通訊作者，40227 臺中市南區興大路 145 號

Corresponding author. 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung City 40227, Taiwan

Email: wyliau@nchu.edu.tw

Research Paper

The study on carbon footprint of wooden pallets in Taiwan

Yi-Xin Rao¹ Yung-Chih Chen^{1,2} Wan-Yu Liu^{1*}

【Abstract】 This study focuses on exploring the life cycle assessment and environmental impact assessment of Taiwan's wooden pallet industry's imports and exports. A detailed investigation was conducted on the emissions throughout the entire life cycle of wooden pallets, including their reuse and carbon storage. Additionally, the influence of import and export shipping distances on carbon emissions was taken into account, and the contributions of shipping distances and total import/export quantities to overall emissions were calculated. The results show that the main source of imported wooden pallets in Taiwan is from its own exports and subsequent re-imports. The following sources are Latvia and mainland China. The total emissions from imported wooden pallets are 1,409,524 kg CO₂eq. On the other hand, the main destinations for wooden pallet exports are the United States and mainland China, with a total emission of 84,670 kg CO₂eq. Taken together, Taiwan's imports and exports of wooden pallets contribute to a carbon footprint deficit of 1,324,854 kg CO₂eq. In terms of shipping transportation, emissions reach as high as 1,055,234 kg of CO₂eq, underscoring the excessive import dependence of Taiwan's wooden pallet industry and the resulting substantial carbon footprint emissions. Based on the research findings, it is recommended that the government places greater emphasis on the domestic timber market and increases the utilization of domestically produced timber. This approach not only extends the lifecycle benefits of wooden pallets but also reduces energy consumption. This action would help alleviate the industry's overreliance on imports, thereby lowering carbon footprint emissions.

【Key words】 carbon footprint; transport pallets; life cycle assessment; environmental impact assessment.

一、前言

隨著全球氣候變遷日趨加劇，全球人民迫切需要採取行動來控制地球的平均溫度。減少碳排放已成為當前的重要策略之一，森林對於減少溫室氣體排放的效果逐漸受到重視，透過實行永續的森林經營，木材的收穫和木製產品的使用能有效地減緩氣候變遷 (Nabuurs et al. 2017)。近年來，各國十分關注木質產品的碳估算，因林木生長時能夠在其生物質中儲存碳，經採伐後的木材可用來替代高排放的燃料，木材的燃燒為替代效應 (Fortin et al. 2012; Lemprière et al. 2013; Pukkala 2014)，木質產品不僅在其使用壽命期間可作為碳匯，且生產過程中也較其他材料所消耗的能源少，因此比起其他非木材材料所造成的溫室氣體排放更少，使得木質產品在減緩氣候變遷上顯得更具有潛力 (Gustavsson & Sathre 2006; Dias et al. 2007; Lippke et al. 2010)。

但過去對於木質產品所探討的碳，常僅限於計算碳的含量或排放量，就木質產品而言應包括，木材收穫時期、產品製造時期、運送銷售時期、使用時期及丟棄後處置與回收時期等全程生命週期的碳總排放量，即是碳足跡 (carbon footprint) (Wiedmann & Minx 2008)。碳足跡的概念即是用來衡量人類為一項活動或產品整個生命週期中，直接與間接產生的溫室氣體排放量，以二氧化碳當量 (carbon dioxide equivalent, CO₂eq) 的形式表示，作為一項評估永續發展之指標 (Hoesly et al. 2012; Peters 2010; Wiedmann & Minx 2008)。

在全球產品貿易往來的過程中，在運輸上使用棧板的情況無處不在，棧板可作為組裝、

堆放、儲存、移動、運輸時的水平平台，作為搬運貨物和使用堆高機或起重機運貨的必備媒介，能更有效率且可靠地運輸貨物 (Buehlmann et al. 2009)，為全球貨物的運輸和存貨發揮著關鍵作用，為全球複雜供應鏈中之一環，在各個行業之中被廣泛使用 (Alanya-Rosenbaum et al. 2021)。全球使用的棧板數量不斷攀升，目前已超過 51 億個棧板需求 (Kočí 2019)，常見的棧板製作原料有塑料、金屬、瓦楞紙及木材等材質 (Trebilcock 2013; Li et al. 2018)，其中木棧板佔全球所有棧板產量的 92% (Freedonia Group 2020)。近年來商品貿易與物流行業的興盛，世界商品貿易佔全球經濟的一半以上，過去 30 年中增長十倍 (United Nations 2014)，且由於近年來電子商務激增，零售商與製造業者擴建倉儲或累積庫存，加上 COVID-19 疫情的爆發，使得經濟活動日趨線上化，致使物流業對棧板的需求暴增。綜合上述，本研究目標在探討臺灣木棧板產業進出口之生命週期評估及環境衝擊評估，並估算其碳足跡和貿易逆差。本研究的目的如下：

- (一) 探討木棧板的生命週期與環境衝擊評估
 - (二) 彙整木棧板碳足跡歷程及盤查其整體之碳排放
 - (三) 探討航運距離對木棧板進出口碳排放的影響
 - (四) 針對臺灣木棧板產業提出行動建議
- (一) 碳足跡之分析方法

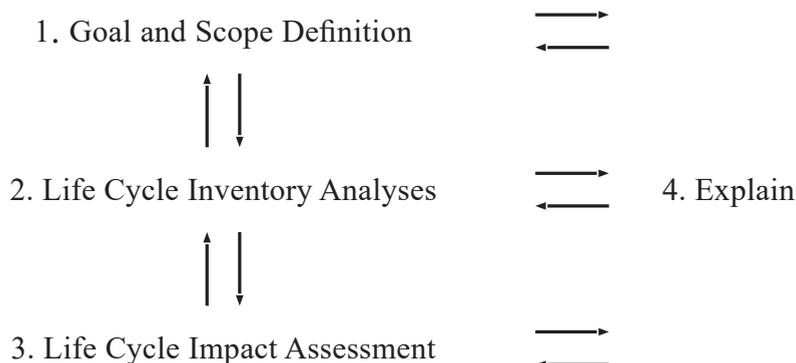
生命週期評估 (life cycle assessment, LCA) 即為碳足跡估算發展出來的工具之一，自二十世紀中葉發展至今，生命週期評估的內容逐漸完備，其指產品自原料生產、加工、包裝、運輸、販售、使用直至最後的廢棄物處理，亦

即從搖籃到墳墓 (cradle to grave)，每一個環節內的投入和產出及潛在環境衝擊之彙整與評估 (Finkbeiner et al. 2006)。國際標準組織 (International Organization for Standardization, ISO) 於 1996 年公布 ISO 14040 系列標準，為生命週期評估制定了應用在環境管理上的標準評估架構及步驟 (ISO 2006a, b; Niero et al. 2014)，用於量化與服務或產品相關的環境影響，將所有的排放指標換算為二氧化碳當量，協助瞭解及量化木棧板的環境影響，並評估供應鏈中潛在的改進領域。

生命週期評估可分為四個步驟如圖 1 所示：

1. 目標與範疇界定 (goal and scope definition)，先確定研究目標與界定範圍內所造成的汙染和所使用的資源，找出範圍中所有能量與物質的投入及產出，以及潛在的間接影響。

2. 生命週期盤查分析 (life cycle inventory analyses, LCI)，為蒐集研究範圍所涵蓋的所有投入資料，如主產物、副產物、不同污染源 (水、空氣) 及廢棄物等；以及間接影響資料，包括土地使用改變對生態及社會的影響等。
3. 生命週期衝擊評估 (life cycle impact assessment, LCIA)，則是依照 ISO14042 之標準來選擇合適的衝擊評估模式作為研究方法，量化不同類別的衝擊所帶來的影響。
4. 生命週期結果闡釋 (life cycle interpretation)，遵照 ISO14043 將綜合盤查與衝擊評估的結果進行分析，找出造成環境衝擊的主要原因，並給予生產鏈減少碳足跡排放之依據。



Source: Industrial Development Bureau, Ministry of Economic Affairs (2008).

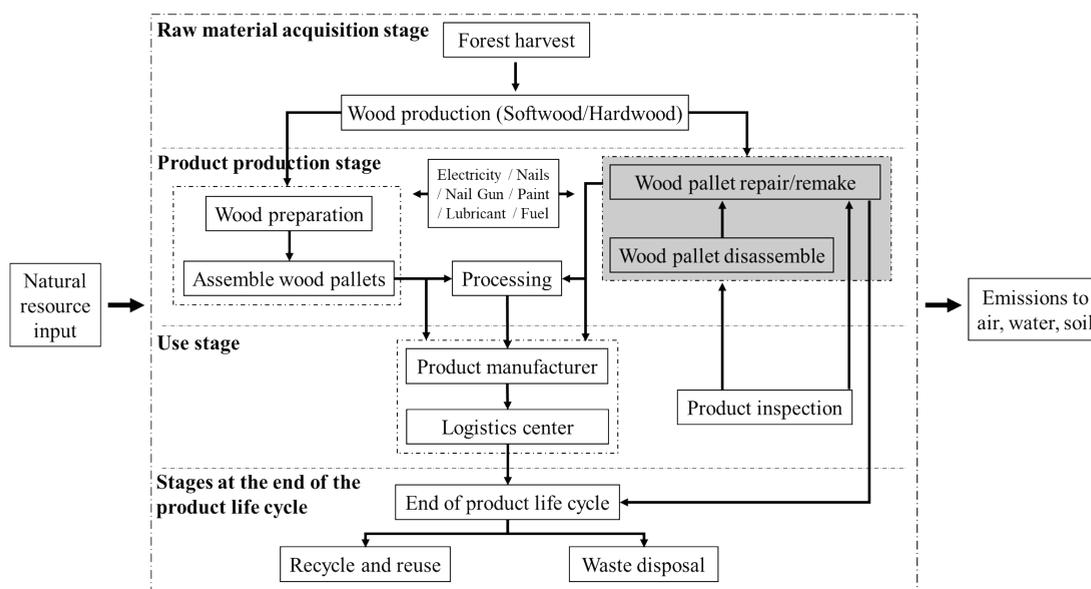
圖1. 生命週期評估架構圖。

Figure 1. Life cycle assessment architecture diagram.

(二) 木棧板的生命週期

木棧板的製程如圖 2 所示：從木材的伐採開始進行生產，透過處理加工，將新製成的棧板及重製後的棧板進行製造，過程中會消耗投入的資源，如：電力、各種固定用的釘具、油

漆、化學塗料以及燃料等，而後進入使用階段，將木棧板送入物流中心進行利用，直至產品的生命週期結束，將其回收再利用或是就此廢棄。



Source: Alanya-Rosenbaum et al. (2021) and this study.

圖2. 木棧板的生命週期。

Figure 2. Life cycle of wooden pallets.

生命週期衝擊評估包括了產品製造過程中對環境所造成的各種污染影響。在這方面，環境衝擊評估應該涵蓋所有相關因素。本研究選擇採用 TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts) 方法，該方法由 Bare 於 2011 年提出，包括了六項環境影響指標：全球暖化潛勢、酸化潛勢、優養化潛勢、臭氧層破壞潛勢、光化學煙霧潛勢和化石燃料消耗。透過使用這些指標，研究可以更全面地評估產品對環境的影響，從而有助於制定環境管理策略和可持續發展目標。

(三) 臺灣木棧板進出口歷史資料

依據財政部關務署 2021 年臺灣木棧板進口量資料顯示 (表 1 和表 2)，木棧板總進口金額為 250,456 千元，重量為 13,260 公噸，出口

金額為 87,650 千元，重量為 1,502 公噸；進口國家來自臺灣 (復進口)、拉脫維亞、中國、荷蘭、立陶宛、日本、丹麥、越南、德國等國家，其中主要進口國家為拉脫維亞 (43,368 千元)、中國 (38,799 千元) 以及臺灣 (38,302 千元)，占總進口的 48.1%。而臺灣的主要出口國家為美國 (14,597 千元)、中國 (10,169 千元)，日本 (5,946 千元)，共占 85.1%(表 3)。根據 Wu et al. (2018) 的研究指出，臺灣進口包裝用材中 65% 用於製作木棧板，35% 用於製作木箱，而在棧板的部分，其中的 25% 供國內使用，其餘做成木棧板隨貨物出口。

表1. 臺灣歷年木棧板進出口量。

Table 1. Taiwan's annual import and export volume of wooden pallets in recent years.

	Import		Export		Import/Export	
	Price (kNTD)	Weight (ton)	Price (kNTD)	Weight (ton)	Price (ratio)	Weight (ratio)
2021	250,456	13,260	56,209	1,502	4.46	8.83
2020	148,472	8,597	167,843	5,071	0.89	1.7
2019	163,427	9,609	190,800	3,998	0.86	2.4
2018	126,632	7,455	134,326	3,667	0.94	2.03
2017	103,757	6,090	87,650	2,586	1.18	2.36

資料來源：財政部關務署(2022)。

Source: Customs Administration, Ministry of Finance (2022).

表2. 2021年臺灣木棧板進口資料。

Table 2. Import data of wooden pallets in Taiwan in 2021.

Country	NTD (thousands)	Weight (tons)	Percentage (%)
Taiwan ¹	38,302	2,247	16.95
Latvia	43,368	1,960	14.78
China	38,799	1,949	14.70
Netherlands	33,610	1,718	12.95
Lithuania	23,936	1,546	11.66
Japan	11,823	1,364	10.28
Denmark	31,618	774	5.84
Vietnam	7,413	447	3.37
Germany	7,205	435	3.28
Ukraine	6,762	405	3.06
Poland	3,810	190	1.43
South Korea	2,028	169	1.27
U.S.	513	22	0.16
Sweden	454	14	0.11
Philippines	116	14	0.11
Italy	683	3	0.02
Other countries	16	2	0.02
Total	250,456	13,260	100

資料來源：財政部關務署(2022)。

備註¹：臺灣的進口量是復進口量的數值，是指出口簡單加工或因故退回的國內產品的復進口。

Source: Customs Administration, Ministry of Finance (2022).

Note¹: The import volume of Taiwan is the value of the re-import volume, which refers to the re-import of domestic products exported for simple processing or returned for some reason.

表3. 2021年臺灣木棧板出口資料。

Table 3. Export data of wooden pallets in Taiwan in 2021.

Country	NTD (thousands)	Weight (tons)	Percentage (%)
U.S.	14,597	643	42.81
China	10,169	582	38.78
Japan	5,946	53	3.52
Guatemala	1,947	49	3.27
Singapore	1,191	27	1.81
Marshall Islands	753	21	1.37
Netherlands	15,494	17	1.13
Philippines	290	17	1.10
Macao	675	17	1.14
Denmark	317	11	0.70
Canada	281	11	0.70
Malaysia	434	11	0.70
South Korea	2,550	9	0.62
U.K.	335	8	0.55
Australia	350	7	0.45
Swatini	105	3	0.18
Poland	91	3	0.21
Vietnam	86	3	0.19
Germany	119	3	0.18
Other countries	156	3	0.22
Thailand	82	2	0.16
Honduras	51	1	0.06
Belgium	112	1	0.09
Sweden	78	0	0.01
Total	56,209	1,502	100

資料來源：財政部關務署(2022)。

Source: Customs Administration, Ministry of Finance (2022).

(四) 木棧板生命週期之資料蒐集

1. 原物料取得階段：原材料之取得包括最初的整地和種植幼苗、森林管理(施肥和間伐)、伐採、將鋸木運輸到木材製造設施以及木材生產都發生在這個階段，需將其總投入資源及木材之碳貯存量計算考量在內，而木質材料的碳足跡為整個生命週期之 CO₂ 排放量減去該木質材料內部所儲存之 CO₂ 量後所得 (Wang & Lo 2016)。
2. 產品生產階段：木棧板製造階段可分為三個主要過程：首先為木材準備並製板成型，將木材切割成所需的尺寸和切口，而後進行組裝及裝釘之過程和最後的處理加工，像是塗料、印模和特殊處理等，主要以生產過程中所消耗之電力及燃料等資源消耗列入計算之考量。

3. 使用階段：將木棧板送至產品製造商及物流中心進行利用。
4. 生命週期結束階段：木棧板的回收利用會將可繼續使用的棧板進行維修後回到使用階段，而無法進一步修復的木棧板會被拆除。其中約 37.3% 的棧板能夠繼續使用，其餘的 17.3% 會做為燃料使用，40.4% 則被磨碎並重新應用作為覆蓋物或動物用木屑，13% 的棧板移送至固體廢棄物處理設施，最終只有約 5% 的棧板被填埋 (Shiner 2018)。

本研究參考 Alanya-Rosenbaum et al. (2021)，將每塊木棧板換算為 0.035 m³ 之材積進行資料蒐集及彙整，木棧板各生命週期之資料蒐集結果如表 4 所示。

表4. 木棧板的碳足跡。

Table 4. Carbon footprint per wood pallet.

Unit: kg CO₂eq/ per wood pallet (0.035 m³)

	Raw material	Raw material transportation	Manufacturing	Repair	Abandoned	Total
Carbon Footprint	1.68	1.14	1.69	0.36	0.005	4.875

資料來源：Alanya-Rosenbaum et al. (2021) 和本研究整理。

Source: Alanya-Rosenbaum et al. (2021) and this study.

本研究欲計算全臺灣進口之木棧板碳足跡，將木棧板主要進出口國家以地區進行分類，考慮不同距離所造成之運輸排放量，以獲得碳足跡之精確數據，依 Wang & Lo (2016) 之數據為參考值，以散裝船方式運送，並考慮每公里、每公噸 CO₂ 排出量為 10 g，木材及木

質材料之密度以 500 kg/m³ 計算，則每公噸相當 2 m³，則每立方公尺之 CO₂ 排出量為 0.005 kg，即 0.005 kg/m³，本研究再計算 google earth 之航運距離，即可算出每 m³ 海運至臺灣 (高雄港) 所排出的 CO₂ 量，如表 5 所示。

表5. 進出口距離與碳排放量。

Table 5. Distance between import and export areas and carbon emissions.

Area	Distance from Kaohsiung Port, Taiwan (km)	CO ₂ emissions from transport (kg/m ³)
Latvia	21,634.65	108.17
Lithuania	21,333.86	106.67
Poland	21,291.35	106.46
Sweden	20,423.12	102.12
Denmark	20,121.11	100.61
Germany	20,053.42	100.27
Netherlands	19,627.83	98.14
Belgium	19,440.96	97.21
U.K.	19,327.44	96.64
Honduras	15,996.3	79.98
Guatemala	15,585.48	77.93
Ukraine	14,811.66	74.06
Italy	14,234.15	71.17
Swatini	12,914.68	64.57
U.S.	12,111.53	60.56
Canada	9,933.42	49.67
Australia	7,466.32	37.33
Marshall Islands	5,837	29.19
Thailand	3,191.43	15.96
Singapore	3,047.42	15.24
Malaysia	2,681.86	13.41
Japan	2,349.40	11.75
Vietnam	1,720.60	8.60
South Korea	1,668.18	8.34
Philippines	1,486.63	7.43
China (Shanghai)	1,137.13	5.69
Macao	693.44	3.47

三、結果

(一) 木棧板之碳足跡

本研究透過海關進出口統計數據，對木棧板的碳足跡進行估算。首先，以木棧板進口數量的重量為基準，進行碳足跡之估算，並採用林務局木材供銷進出口數據中的木製品材積轉換公式，將每公噸木棧板重量除以 0.9，以獲得相應的立方公尺材積數量。接著，以每立方公尺木棧板乘以 0.035 的比例，換算為單片木

棧板。最後，結合航運距離所引發的碳排放，得出精確的木棧板碳排放量數據。木棧板進口至臺灣的碳足跡研究結果 (表 6) 顯示，臺灣進口之木棧板在生命週期內所產生之排放量為 2,052,191.76 kg CO₂eq，加上臺灣從各國進口木棧板所造成之航運總排放量為 3,107,425.92 kg CO₂eq。計算之碳排放量包含木棧板生命週期內所製造之所有碳排放及由各國港口運輸至臺灣高雄港所造成之碳排放量，其中造成我國最大木棧板進口碳排放來源之國家為拉脫維

亞，為 538,960.13kg CO₂eq，最少排放量之國家為西班牙，為 14.73 kg CO₂eq 之排放量。

從臺灣出口的木棧板之碳足跡研究結果(表 7)，如計算考慮木棧板生命週期內所製造之所有碳排放，並未包含航運所造成之排放量，其中造成我國最大木棧板出口碳排放來源之國家為美國，為 99,520.57 kg CO₂eq，其次為中國大陸，排放量為 90,139.99 kg CO₂eq，雖然中國與臺灣之航運距離較短，因其進口量

十分龐大，故造成其總排放量僅次於美國，最少排放量之國家為瑞典，為 34.82 kg CO₂eq 之排放量。

由表 6 與表 7 資料顯示，臺灣木棧板進口碳足跡為 3,107,425.92 kg，臺灣木棧板出口的碳足跡為 232,331.20 kg，由此可知臺灣木棧板的碳足跡逆差為 2,875,094.72 kg，顯示在臺灣木棧板進口和出口之間的碳足跡存在一定的差距。

表6.木棧板進口到臺灣的生命週期評估

Table 6. Life cycle assessment of wooden pallets imported to Taiwan.

Country	Unit: kg CO ₂ eq		
	Carbon Footprint (Shipping excluded)	Shipping Emissions	Carbon Footprint (Shipping included)
Latvia	303,361.19	235598.93	538,960.13
China	301,690.54	231043.93	532,734.46
Netherlands	265,852.48	187316.67	453,169.15
Lithuania	239,300.60	183263.78	422,564.38
Taiwan ¹	347,807.88	0.00	347,807.88
Japan	211,022.35	17797.08	228,819.43
Denmark	119,807.54	86536.53	206,344.07
Germany	67,309.82	48454.08	115,763.90
Ukraine	62,725.00	33350.92	96,075.92
Vietnam	69,241.71	4276.72	73,518.44
Poland	29,418.85	22484.97	51,903.81
South Korea	26,146.25	1565.73	27,711.98
U.S.	3,347.04	1455.20	4,802.24
Sweden	2,232.29	1636.57	3,868.86
Philippines	2,172.86	115.96	2,288.81
Italy	469.39	239.85	709.24
South Africa	108.33	54.89	163.22
Singapore	106.79	11.68	118.47
Luxembourg	30.64	21.68	52.33
Thailand	30.95	3.55	34.50
Spain	9.29	5.44	14.73
Average	97,723.42	50,249.25	147,972.66
Total	2,052,191.76	1055234.16	3,107,425.92

資料來源：本研究整理。

備註¹：復進口。

Source: This study.

Note¹: Re-imported.

表7. 從臺灣出口的木棧板生命週期評估。

Table 7. Life cycle assessment of wooden pallets exported from Taiwan

Unit: kg CO₂eq

Country	Carbon Footprint (Shipping excluded)	Shipping Emissions	Carbon Footprint (Shipping included)
U.S.	99,520.57	76,248.07	175,768.64
China	90,139.99	69,061.10	159,201.09
Japan	8,192.94	6,277.05	14,469.99
Guatemala	7,597.88	5,821.15	13,419.03
Singapore	4,214.94	3,229.29	7,444.23
Marshall Islands	3,175.25	2,432.73	5,607.98
Macao	2,655.71	2,034.69	4,690.40
Netherlands	2,631.73	2,016.31	4,648.03
Philippines	2,561.00	1,962.12	4,523.12
Canada	1,634.44	1,252.23	2,886.67
Malaysia	1,630.88	1,249.51	2,880.39
Denmark	1,627.01	1,246.54	2,873.55
South Korea	1,448.11	1,109.47	2,557.58
U.K.	1,277.56	978.81	2,256.37
Australia	1,050.21	804.63	1,854.84
Poland	478.52	366.62	845.15
Other countries ¹	464.29	0.00	464.29
Vietnam	439.52	336.74	776.27
Germany	421.11	322.63	743.74
Swatini	417.7	320.02	737.73
Thailand	363.23	278.29	641.51
Belgium	206.14	157.94	364.08
Honduras	147.64	113.12	260.76
Sweden	34.82	26.68	61.50
Average	9,680.47	7,401.91	17,082.37
Total	232,331.20	177,645.73	409,976.93

資料來源：本研究整理。

備註¹：其他國家為巴布亞新幾內亞、巴西、以色列、卡達、印尼、印度、奈及利亞、孟加拉、帛琉、法國、芬蘭、南非、智利、瑞士、義大利、葡萄牙和墨西哥的合計，因為出口重量小於1噸，因此本研究中忽略該運輸距離。

Source: This study.

Note¹: Other countries are Papua New Guinea, Brazil, Israel, Qatar, Indonesia, India, Nigeria, Bangladesh, Palau, France, Finland, South Africa, Chile, Switzerland, Italy, Portugal and Mexico combined, because of the weight of exports less than 1 ton, so the transport distance was ignored in this study.

(二) 木棧板之生命週期衝擊評估

生命週期衝擊評估包含產品製造過程中對環境所造成之汙染，皆應列入環境衝擊評估之內，本研究採用 TRACI 方法 (Bare 2011) 所涵蓋的六項環境影響指標來進行環境衝擊之盤查。每塊木棧板的生命週期衝擊評估如表 8，在全球暖化潛勢指標中共有 4.88 kg CO₂eq 的

影響，在酸化潛勢指標中共有 0.03 kg SO₂eq 的影響，在優養化潛勢指標中共有 0.01 kg Neq 的影響，在光化學煙霧潛勢指標中共有 0.686 kg NO_xeq 的影響，在臭氧層破壞潛勢指標中共有 1.25E-07 kg CFC₁₁eq 的影響和在化石燃料消耗指標中共有 6.761 MJ Surplus 的影響。

表8. 每塊木棧板生命週期衝擊評估。

Table 8. Life cycle impact assessment of each wood pallet.

Impact indicator	Raw material stage	Transportation	Manufacture	Use	Repair	Total	Unit
Global warming potential	1.68	1.14	1.69	0.36	0.005	4.88	kg CO ₂ eq
Acidification potential	0.015	0.007	0.007	0.002	4.69E-05	0.03	kg SO ₂ eq
Eutrophication potential	0.001	4.17E-04	0.008	0.001	5.96E-06	0.01	kg Neq
Photochemical smog potential	0.326	0.188	0.138	0.032	0.001	0.686	kg NO _x eq
Ozone depletion potential	5.26E-08	1.90E-09	5.87E-08	1.09E-08	6.95E-10	1.25E-07	kg CFC ₁₁ eq
Fossil fuel depletion	2.446	2.136	1.634	0.516	0.009	6.761	MJ Surplus

資料來源：Alanya-Rosenbaum et al. (2021) 和本研究整理。

Source: Alanya-Rosenbaum et al. (2021) and this study.

表 9 為木棧板進口之衝擊評估，共產生 12,451 kg SO₂eq 及 4,209.62 kg Neq 的排放、288,547 kgNO_xeq 排放、0.0532 kg CFC₁₁eq 排

放和造成 2,845,943 MJ Surplus 的化石燃料消耗，其中排放源之大宗國家為中國大陸，最少排放之國家為西班牙。

表9. 每塊木棧板進口之生命週期衝擊評估。

Table 9. Life-cycle impact assessment of wood pallets imported to Taiwan.

Country	Acidification potential	Eutrophication potential	Photochemical smog potential	Ozone depletion potential	Fossil fuel depletion
(Unit)	(kg SO ₂ eq)	(kg Neq)	(kg NO _x eq)	(kg CFC ₁₁ eq)	(MJ Surplus)
Taiwan	2,110.21	713.45	48,903.29	0.009	482,333.79
Latvia	1,840.54	622.28	42,653.89	0.008	420,695.91
China	1,830.41	618.85	42,418.99	0.008	418,379.07
Netherlands	1,612.97	545.34	37,380.00	0.007	368,679.49
Lithuania	1,451.88	490.87	33,646.69	0.006	331,857.81
Japan	1,280.31	432.87	29,670.65	0.005	292,642.04
Denmark	726.89	245.76	16,845.46	0.003	166,146.96
Vietnam	420.10	142.03	9,735.68	0.002	96,023.18
Germany	408.38	138.07	9,464.05	0.002	93,344.06
Ukraine	380.56	128.67	8,819.41	0.002	86,985.92
Poland	178.49	60.35	4,136.42	0.001	40,797.53
South Korea	158.63	53.63	3,676.28	0.001	36,259.15
U.S.	20.31	6.87	470.61	0.000	4,641.61
Sweden	13.54	4.58	313.87	0.000	3,095.69
Philippines	13.18	4.46	305.51	0.000	3,013.28
Italy	2.85	0.96	66.00	0.000	650.95
South Africa	0.66	0.22	15.23	0.000	150.23
Singapore	0.65	0.22	15.01	0.000	148.09
Thailand	0.19	0.06	4.35	0.000	42.92
Luxembourg	0.19	0.06	4.31	0.000	42.49
Spain	0.06	0.02	1.31	0.000	12.88
Total	12,451.00	4,209.62	288,547.01	0.053	2,845,943.07

資料來源：Alanya-Rosenbaum et al. (2021) 和本研究整理。

Source: Alanya-Rosenbaum et al. (2021) and this study.

表10為木棧板出口之生命週期衝擊評估，共產生 1,409.59 kg SO₂eq 及 476.58 kg Neq 的排放、32,666.77 kg NO_xeq 排放、0.01 kg

CFC₁₁eq 排放和造成 322,192.78 MJ Surplus 的化石燃料消耗，其中排放源之大宗國家為美國，最少排放之國家為瑞典。

表10. 每塊木棧板出口之生命週期衝擊評估。

Table 10. Life cycle impact assessment of wood pallets exported to Taiwan.

Country (Unit)	Acidification potential (kg SO ₂ eq)	Eutrophication potential (kg Neq)	Photochemical smog potential (kg NO _x eq)	Ozone depletion potential (kg CFC ₁₁ eq)	Fossil fuel depletion (MJ Surplus)
U.S.	603.81	204.14	13,993.02	0.0025	138,013.36
China	546.89	184.90	12,674.07	0.0023	125,004.53
Japan	49.71	16.81	1,151.96	0.0002	11,361.82
Guatemala	46.10	15.59	1,068.29	0.0002	10,536.61
Singapore	25.57	8.65	592.64	0.0001	5,845.20
Marshall Islands	19.26	6.51	446.45	0.0001	4,403.38
Netherlands	15.97	5.40	370.03	0.0001	3,649.63
Philippines	15.54	5.25	360.09	0.0001	3,551.55
Macao	16.11	5.45	373.40	0.0001	3,682.90
Denmark	9.87	3.34	228.76	0.0000	2,256.31
Canada	9.92	3.35	229.81	0.0000	2,266.61
Malaysia	9.89	3.35	229.31	0.0000	2,261.68
South Korea	8.79	2.97	203.61	0.0000	2,008.21
U.K.	7.75	2.62	179.63	0.0000	1,771.70
Australia	6.37	2.15	147.66	0.0000	1,456.42
Eswatini	2.53	0.86	58.73	0.0000	579.26
Poland	2.90	0.98	67.28	0.0000	663.61
Vietnam	2.67	0.90	61.80	0.0000	609.52
Germany	2.55	0.86	59.21	0.0000	583.98
Other countries	2.82	0.95	65.28	0.0000	643.86
Thailand	2.20	0.75	51.07	0.0000	503.72
Belgium	1.25	0.42	28.98	0.0000	285.88
Honduras	0.90	0.30	20.76	0.0000	204.75
Sweden	0.21	0.07	4.90	0.0000	48.29
Total	1,409.59	476.58	32,666.77	0.01	322,192.78

資料來源：Alanya-Rosenbaum et al. (2021) 和本研究整理。

Source: Alanya-Rosenbaum et al. (2021) and this study.

根據表 9 及表 10 對各進出口國家之環境衝擊評估，在酸化潛勢上有 11,041 kg SO₂eq 的逆差、優養化潛勢上有 3,733 kg Neq 的逆差、光化學潛勢 255,880 kg NO_xeq 的逆差、臭氧層破壞潛勢上只有 0.043 kg CFC₁₁eq 的逆差，化石燃料損耗上為 2,523,750 MJ Surplus 的逆差，可見臺灣過度仰賴進口木棧板主要會造成酸化和光化學汙染及大量使用石化燃料，主要來自工廠與運輸引擎排放之汙染物及揮發性有機汙染物，而在優養化及臭氧層破壞上之影響較不明顯。

(三) 木棧板之碳匯及碳替代能力

木製品在伐採收穫後，會將生物碳貯存

於產品內 (Gasol et al. 2008; Rives et al. 2013; Martínez-Alonso & Berdasco 2015)，本研究將木製品的碳貯存量與碳足跡指標分開計算，避免將兩者混淆。計算單位木棧板的碳貯存量，在原物料階段，伐採之林木具有較高之碳貯存，每塊木棧板之原物料為 37.26 kg CO₂eq，後續經過加工製造，將其製成木棧板的過程中會有部分生物量的碳排放，如：切割過程中的木廢料或木屑，其餘製成之木棧板的生物量會在使用年限內被貯存，直到修理階段有少量被釋放，最終廢棄作為其他木產品進行再利用或作為生質能源被燃燒，會再形成 29.1 kg CO₂eq 被排放出來 (表 11)。

表 11. 每單位木棧板的 LCA 碳貯存量 (0.035 m³)。
Table 11. LCA carbon storage per wood pallet (0.035 m³).

Unit: kg CO₂eq/1 wood pallet

	Raw material	Raw material transportation	Manufacturing	Repair	Abandoned ¹	Total
Biomass Carbon storage	37.26	-	0.53	-	-	37.79
Biomass Carbon emission	-	-	6.88	0.53	29.1	36.51
Net carbon storage	37.26	-	-6.35	-0.53	-29.1	1.28

資料來源：Alanya-Rosenbaum et al. (2021) 和本研究整理。

備註¹：在木棧板廢棄的部分，其中的37.3%會繼續使用，其餘的17.3%會做為燃料使用，40.4%則被磨碎並重新應用作為覆蓋物或動物用木屑，13%的棧板移送至固體廢棄物處理設施，最終約5%的棧板被填埋。

Source: Alanya-Rosenbaum et al. (2021) and this study.

Note ¹: Of the discarded portion of the wooden pallets, 37.3% of them will continue to be used, the remaining 17.3% will be used as fuel, 40.4% will be ground and re-applied as mulch or animal wood chips, and 13% of the pallets will be moved to solid waste treatment facilities, where approximately 5% of pallets end up in landfills.

而重複利用木棧板可減少製造新木棧板所造成之碳排放量及其他環境衝擊，所以具有其減碳效益，根據表 12 之換算，每塊木棧板可減少 5.39 kg CO₂eq 的排放，和其他五種環境

衝擊：4.04E-03 kg SO₂eq、1.86E-04 kg Neq、0.073 kg NO_xeq、1.11E-08 kg CFC₁₁eq 和 12.5 MJ Surplus 的化石燃料消耗。

表12. 重複利用木棧板對環境衝擊的減碳效益 (0.035 m³)。

Table 12. Environmental impact reduced by reuse of each wood pallet (0.035 m³).

	Global warming potential (kg CO ₂ eq)	Acidification potential (kg SO ₂ eq)	Eutrophication potential (kg Neq)	Photochemical smog potential (kg NO _x eq)	Ozone depletion potential (kg (CFC ₁₁ eq))	Fossil fuel depletion (MJ Surplus)
Reuse	5.39	4.04E-03	1.86E-04	0.073	1.11E-08	12.5

資料來源：Alanya-Rosenbaum et al. (2021) 和本研究整理。

Source: Alanya-Rosenbaum et al. (2021) and this study.

考慮再利用後的木棧板環境衝擊評估結果(表 13)顯示，其進口之總排放量為1,409,524.16 kg CO₂eq；環境衝擊的部分造成7,806.78 kg 的二氧化硫排放，2,639.43 kg的氮排放，180,918.98 kg的氧化氮物排放，0.03 kg的氟氯碳化物排放，1,784,406.30 MJ Surplus的化石燃料消耗。出口部分總排放量為84,669.83kg CO₂eq；環境衝擊的部分造成883.81 kg的二氧化硫排放，298.82 kg的氮排放，20,482.06kg 的氧化氮物排放，0.01 kg的氟氯碳化物排放，202,014.87MJ Surplus的化石燃料消耗。將進口量與出口量進行比較可得，臺灣進出口木棧板共造成1,324,854 kg CO₂eq的碳足跡逆差，在航運運輸上，造成1,055,234 kg CO₂eq之排放量，表示我國的木棧板產業過度依賴進口，並造成大量之碳足跡排放。

表 13 為考慮再利用及表 11 碳貯存後的木棧板環境衝擊評估，在經過使用階段，會有 37.3% 的木棧板被降級回收或被燃燒或作為他用，而木棧板在廢棄後仍會有 1.28 kg CO₂ 的碳貯存量，故為了對木棧板生命週期之評估做完整考量，回收重新進入使用階段的木棧板及直至廢棄階段之碳貯存量所減少之排放量皆應考慮在內，進口總量可減少 1,159,070 kg CO₂eq、出口總量則可減少 86,659 kg CO₂eq 的排放量。

表13. 考慮再利用後的木棧板環境衝擊評估。

Table 13. Environmental impact of import and export of wooden pallets considering carbon substitution and reuse.

	Global warming potential (kg CO ₂ eq)	Acidification potential (kg SO ₂ eq)	Eutrophication potential (kg Neq)	Photochemical smog potential (kg NO _x eq)	Ozone depletion potential (kg (CFC ₁₁)eq)	Fossil fuel depletion (MJ Surplus)
Original import emissions	3,107,425.92	12,451.00	4,209.62	288,547.01	0.05	2,845,943.07
Import emissions considering carbon substitution	1,409,524.16	7,806.78	2,639.43	180,918.98	0.03	1,784,406.30
Raw export emissions	232,331.20	1,409.59	476.58	32,666.77	0.01	322,192.78
Consider export emissions from carbon replacement	84,669.83	883.81	298.82	20,482.06	0.01	202,014.87

資料來源：Alanya-Rosenbaum et al. (2021) 和本研究整理。

Source: Alanya-Rosenbaum et al. (2021) and this study.

四、討論

本研究計算我國每塊木棧板之生命週期造成的二氧化碳當量為 4.875 kg CO₂eq，相較於過去文獻，高於 Ng et al. (2014) 計算新加坡木棧板產業為 3.176-4.009 kg CO₂eq，其原因為此文獻為將木棧板的使用壽命做了詳細的分類，透過增加木棧板的使用壽命可以減少重製與回收所造成之排放量，而本研究之木棧板並未將使用壽命做估計，故推測此為臺灣木棧板碳足跡高於此文獻之緣故。

臺灣屬於海島國家，木材的跨國運輸皆須仰賴船運，木材進口的航程長短對於臺灣木棧板之碳足跡影響甚大，恐導致我國木棧板碳足跡高於其他國家，雖然如何創造低碳的航運路

徑及替代航行燃料早已是海運業者的共同目標 (Fan et al. 2022)，但長途跨國的船隻運輸所產生的碳足跡仍遠高於國內的陸運的碳足跡，為降低臺灣木棧板之碳足跡應選擇國內所生產的木材。

另外 Kočí (2019) 比較木棧板與塑膠棧板對環境的影響，包括碳排放、化石燃料消耗、環境汙染和陸地生態毒性等變數，以同樣 1 m³ 之塑膠棧板與木棧板進行比較，在氣候變遷之影響上，木棧板對環境的影響為 2.16 kg CO₂eq，比塑膠棧板的環境影響 (3.36 kg CO₂eq) 小。木棧板之回收方式有再利用、燃燒及掩埋，分別造成 -0.84 kg CO₂eq、0.16 kg CO₂eq 與 2.99 kg CO₂eq 之排放，而塑膠棧板之回收排放量為 0.416-0.687 kg CO₂eq 之間，

故在木棧板回收上選擇再利用及燃燒處理才能有效減少碳排放量。Weththasinghe et al. (2022) 也對棧板最常見的兩種材料進行評估，結果顯示，完成 100 次航程後，塑膠棧板的碳足跡 ($216 \text{ kg CO}_2\text{eq} / 0.0408 \text{ m}^3$) 比木棧板高 1.5 倍 ($144 \text{ kg CO}_2\text{eq} / 0.0408 \text{ m}^3$)。以上兩篇文獻結果皆顯示木棧板之碳排放量小於塑膠棧板之排放量，因此若以碳減排為目標，選擇木棧板為較佳的選擇。

García-Durañona et al. (2016) 以西班牙加泰羅尼亞的針葉木，對木棧板供應鏈的生命週期評估，以 22.35 kg 的木棧板作為單位，其生命週期所造成的碳排放為 $2.12 \text{ kg CO}_2\text{eq}$ ，其每公斤之碳排放量為 $0.095 \text{ CO}_2\text{eq}$ ；將本研究的 0.035 m^3 單位木棧板換算為重量，為 31.35 kg ，每公斤之碳排放量為 $0.156 \text{ CO}_2\text{eq}$ ，高於西班牙木棧板之碳排放量，原因為西班牙的伐木作業區到鋸木廠的木材運輸距離原產地很近，故在運輸階段減少化石燃料的消耗是減少總體碳足跡之關鍵。各種木質材料的碳排放量比較，根據表 14 對木質材料生命週期之 CO_2

排放量及碳足跡評估，推算不同木質材料的排放量與其碳貯存量與本研究之木棧板做比較，在排放量上擁有較高碳排放量之木質材料為粒片板 (826.86 kg/m^3) 與纖維板 ($1,413.86 \text{ kg/m}^3$)，粒片板為利用木材碎片、鉋花等廢料，搗碎成纖維狀，加入膠合劑後以熱壓、壓製而成；而纖維板造成較高碳排的原因也為其生產過程中須經高溫加壓及烘乾等程序，會造成較高的碳排放。相較於本研究的木棧板，製程階段歷經木材切割、組裝及裝釘和塗料、印模等特殊處理等過程，排放量皆低於粒片板、纖維板與合板 (165.79 kg/m^3)。在碳貯存量的比較上，由表 14 可得，闊葉樹具有較高的碳貯存量，三種人造板的比較上，纖維板具有最高之碳貯存量 ($1,375 \text{ kg/m}^3$)，其次為粒片板 ($1,191.67 \text{ kg/m}^3$)，最低為合板 ($1,008.33 \text{ kg/m}^3$)，而本研究之碳貯存量為考慮整個木棧板生命週期直至廢棄後的碳貯存量，且包含裁切或再利用過程中的碳貯存排放，故總碳貯存量較低，為 36.57 kg/m^3 。

表14. 各木質材料碳貯存量與排放量之比較。

Table 14. Comparison of carbon emissions and storage of various wood materials.

Types of wood materials	Category	Density (kg/m ³)	Life Cycle CO ₂ Emissions (kg/m ³)	Carbon storage in wood materials (kg/m ³)
Log	Softwood	400	93.86	733.33
	Hardwood	800	93.86	1,466.67
Lumber	Softwood artificial drying	450	159.95	825
	Hardwood artificial drying	800	352.23	1,466.67
Plywood、LVL		550	165.79	1,008.33
Heat treated material	Softwood artificial drying	450	261.38	825
	Hardwood artificial drying	800	453.83	1,466.67
Particle board		650	826.86	1,191.67
Fiberboard		750	1,413.86	1,375
Wooden pallet		895.71	139.29	36.57

資料來源：王松永&羅盛峰 (2021) 和本研究整理。

Source: Wang & Lo (2016) and this study.

Carrano et al. (2014) 預測木棧板使用壽命的累積影響，其中包括運輸，文中顯示每片新木棧板產生的排放量為 3.16 kg CO₂eq，此結果與本本研究相近。木棧板的損壞可透過回收進行維修或重製，研究顯示將木棧板重製及修理的碳排放並不會超過製造新木棧板的碳排放，故木棧板的回收再利用能有效減少碳排放量 (Carrano et al. 2014; Park et al. 2018)。

Tornese et al. (2016) 研究木棧板再製造的碳足跡，預測使用壽命內產生的碳排放。其研究結果顯示，單個木棧板在良好的處理和輕負載下的 CO₂ 排放量為每片 2.58 kg CO₂eq，而在粗暴處理和重負載下之 CO₂ 排放量達每片

4.28 kg CO₂eq。本研究計算之木棧板生命週期造成的二氧化碳當量為每片 4.875 kg CO₂eq，大於 Tornese et al. (2016) 之結果，推測原因為本研究之木棧板並未將使用壽命做估計，故碳排放較高。Tornese et al. (2016) 之研究也指出，木棧板的碳排放量與重製率呈高度相關，因為木棧板製造食所造成之碳排放有 97-99% 來自所使用的材料，因此隨著木棧板使用環境的惡化，重置率下降，其碳排放量增加 66-89%，故永續的木棧板管理對碳當量排放有重要影響。

評估木棧板生命週期對環境影響的一個重要因素為重量，以松木作為棧板材料以替代雲

杉材料時，松木棧板對環境的影響較小。木棧板的重量會增加運輸貨物的整體重量，間接地反映在運輸的整體環境影響上 (Koči 2019)。

在使用木棧板的過程中，我們不得不面對一些挑戰和缺點。首先，木棧板的損壞率和後續處理成本相對較高。此外，受到臺灣潮濕的氣候影響，木棧板容易受到白蟻和蛀蟲等問題的困擾。若不仔細留意，我們很容易忽略木材上不易察覺的微小裂痕，並且在貨物重壓下，容易導致木棧板斷裂。然而，在使用階段若我們能選擇適當的木材和儲存方式，有助於減少木棧板的消耗，同時也能增加棧板的再利用數量。此外，木棧板因涉及動植物檢疫，使得出口程序變得相對複雜，需要經過高溫殺菌處理，容易受到海關的檢查和限制。在運送的過程中，突出的鐵釘可能會傷害到人員或損壞貨物包裹，這些都是進出口棧板可能面臨的問題。為了減少大量從國外進口木棧板的問題，也為了降低相關的能源消耗和影響，本研究參考了美國木棧板產業的盤查數據，以評估臺灣進出口木棧板的碳足跡。儘管美國木棧板產業十分成熟，且年供給與需求量龐大，代表了木棧板產業的一個典型案例，但兩地的運輸和設備設施存在差異，因此碳足跡的估算仍有進一步精進的空間。未來的研究將試圖更準確地反映臺灣木棧板產業的生產模式和運輸數據，以評估其完整的生命週期。此外，在探討木棧板的生命週期時，目前我們對於使用壽命的計算還較為簡單。如果能對使用壽命進行更詳細的分類，將有助於更準確地估算碳足跡，同時也能計算出延長使用年限所帶來的效益，這將增加木棧板產業在減緩氣候變遷方面的價值。在統計臺灣木棧板數據方面，本研究採用了財政

部關務署的進出口數據。然而，獲取國內生產木棧板的數據相對困難，因為不同業者所生產的棧板尺寸和種類各異，生產廠商根據客戶需求進行生產，無法進行批量處理。因此，無法僅依靠木棧板數量來換算原材料的使用量。如果想要獲得更確切的國內生產數據，可能需要與臺灣木棧板業者進行更詳細的溝通和諮詢。

五、結論

本研究探討了臺灣木棧板產業進出口之生命週期評估，並盤點了木棧板生命週期內的各種排放量，以深入了解木棧板產業所帶來的環境影響。我們考量了木棧板的再利用、使用木質材料的碳貯存，以及進出口航運距離等因素，綜合計算了整個生命週期中的總排放量。

透過木棧板的生命週期中多次重複使用，其耐用性成為減少環境影響的關鍵因素。根據我們的估算有 37.3% 的木棧板能夠被重複利用，這有助於進口時減少 1,159,070kg CO₂eq 的排放以及出口時的 86,659 kg CO₂eq 排放，從而對減少整體環境污染具有影響性，故加強木棧板使用階段的維護及修理，可以增加木棧板的使用壽命。

基於本研究結果，我們建議政府更加重視國內木材市場，並增加國產材之利用。由於國產木材在適應臺灣濕熱氣候上較進口材更為耐用，具有延長生命週期之效益，也更能減少耗能。然而，進口國外之木材在伐採上難以確保其是否有經過森林管理委員會 (Forest Stewardship Council, FSC) 或其他森林認證，包括森林管理 (Forest Management, FM) 認證及監管鏈 (Chain of custody, COC) 等認證，未經過認證之木材具有來源不明或是砍伐國外的

天然林或熱帶雨林之疑慮，對當地林農收益及其森林經營管理之方式也可能成為生產木棧板之負的外部性。

關於木棧板的材種選擇，由於棧板材對木材用料的要求不如原木或家具材來的高，大部分木棧板使用的是次等木料，而這些木料來源主要都是 10-20 年樹齡的樹木。臺灣目前的人工林普遍缺乏適當的疏伐撫育措施，因此我們建議可透過疏伐中小徑木，將其賣給木棧板生產商，可以解決森林健康問題，同時提高國內木材自給率，促進國產材的銷售。雖然臺灣生產的木材在質量上可能無法與國外大規模林業所生產之產品相媲美，但透過生產木棧板等消耗性產品，可以有效地減少進口所造成之碳排放。

最後，我們強調延長木棧板的使用壽命可以延長其生命週期，減少製造新棧板所需的資源。此外，被降級回收、作為他用以及被燃燒之木棧板在減緩氣候變遷上也具有重要的潛力，例如，木質顆粒已在歐美國家得到廣泛應用，其原料主要是在木產品生產過程中產生之碎屑，將此作為能源使用時並不會產生額外的碳排放。建議政府可推廣木質棧板之再利用及將廢棄後之棧板製成木質顆粒或其他再利用，不僅是增加森林的價值，活絡臺灣林業市場，同時也是減少碳排放的有效途徑之一。

六、引用文獻

- Alanya-Rosenbaum S, Bergman RD, Gething B (2021) Assessing the life-cycle environmental impacts of the wood pallet sector in the United States. *Journal of Cleaner Production* 320: 1-9.
- Bare J (2011) TRACI 2.0: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. *Clean Technologies and Environmental Policy* 13(5): 687-696.
- Buehlmann U, Schuler A (2009) The US household furniture industry: Status and opportunities. *Forest Products Journal* 59(9): 20-28.
- Carrano AL, Thorn BK, Woltag H (2014) Characterizing the carbon footprint of wood pallet logistics. *Forest Products Journal* 64: 232-241.
- Dias JM, Alvim-Ferraz MC, Almeida MF, Rivera-Utrilla J, Sánchez-Polo M (2007) Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review. *Journal of Environmental Management* 85(4): 833-846.
- Fan A, Xiong Y, Yang L, Zhang H, He Y (2023) Carbon footprint model and low-carbon pathway of inland shipping based on micro-macro analysis. *Energy* 263: 126150.
- Finkbeiner M, Inaba A, Tan R, Christiansen K, Klüppel HJ (2006) The new international

- standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 11(2): 80-85.
- Fortin M, Ningre F, Robert N, Mothe F (2012) Quantifying the impact of forest management on the carbon balance of the forest-wood product chain: A case study applied to even-aged oak stands in France. *Forest Ecology and Management* 279: 176-188.
- Freedonia Group (2020) Global wood pallet demand to reach 5.8 billion units in 2024. <https://www.freedoniagroup.com/Content/News/2020/05/27/Global-Wood-Pallet-Demand-to-Reach-5.8-billion-units-in-2024>.
- García-Durañona L, Farreny R, Navarro P, Boschmonart-Rives J (2016) Life cycle assessment of a coniferous wood supply chain for pallet production in Catalonia, Spain. *Journal of Cleaner Production* 137: 178-188.
- Gasol CM, Farreny R, Gabarrell X, Rieradevall J (2008) Life cycle assessment comparison among different reuse intensities for industrial wooden containers. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13(5): 421-431.
- Freedonia L, Sathre R (2006) Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. *Building and Environment* 41(7): 940-951.
- Hoesly R, Blackhurst M, Matthews, HS, Miller JF, Maples A, Pettit M, Fischbeck P (2012) Historical carbon footprinting and implications for sustainability planning: A case study of the pittsburgh region. *Environmental Science & Technology* 46(8): 4283-4290.
- ISO (2006a) Environmental management. Life cycle assessment. Principle and framework. ISO 14040:2006. International Organization for Standardisation, Geneva, Switzerland.
- ISO (2006b) Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. ISO 14044:2006. International Organization for Standardisation (ISO), Geneva, Switzerland.
- Kočí V (2019) Comparisons of environmental impacts between wood and plastic transport pallets. *Science of The Total Environment* 686: 514-528.
- Lemprière T, Kurz W, Hogg E, Schmoll C, Rampley G, Yemshanov D, Blain D (2013) Canadian boreal forests and climate change mitigation. *Environmental Reviews* 21(4): 293-321.
- Li J, Wang BJ, Zhou J (2018) The reliability-based design and optimization procedures for a heavy-duty pallet system. *Advances in Mechanical Engineering* 10(1): 1-11.
- Lippke B, Wilson J, Meil J, Taylor A (2010) Characterizing the importance of carbon stored in wood products. *Wood and Fiber Science* 42: 5-14.
- Martínez-Alonso C, Berdasco L (2015) Carbon

- footprint of sawn timber products of *Castanea sativa* Mill. in the north of Spain. *Journal of Cleaner Production* 102: 127-135.
- Nabuurs GJ, Delacote P, Ellison D, Hanewinkel M, Hetemäki L, Lindner M (2017) By 2050 the mitigation effects of EU forests could nearly double through climate smart forestry. *Forests* 8(12): 484.
- Niero M, Di Felice F, Ren J, Manzardo A, Scipioni A (2014) How can a life cycle inventory parametric model streamline life cycle assessment in the wooden pallet sector? *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19(4): 901-918.
- Ng R, Shi CWP, Tan HX, Song B (2014) Avoided impact quantification from recycling of wood waste in Singapore: An assessment of pallet made from technical wood versus virgin softwood. *Journal of Cleaner Production* 65: 447-457.
- Park J, Horvath L, Bush RJ (2018) Life cycle inventory analysis of the wood pallet repair process in the United States. *Journal of Industrial Ecology* 22(5): 1117-1126.
- Peters GP (2010) Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2(4): 245-250.
- Pukkala T (2018) Carbon forestry is surprising. *Forest Ecosystems* 5(1): 1-11.
- Rives F, Peltier R, Montagne P (2013) Fifteen years of forest community management in Niger: From a technician's dream to social reality. *Small-scale Forestry* 12(1): 87-105.
- Shiner ZP (2018) Investigation of Disposal and Recovery of Wood and Wood Packaging in the United States. Virginia Polytechnic Institute and State University [dissertation], US.
- Tornese F, Carrano AL, Thorn BK, Pazour JA, Roy D (2016) Carbon footprint analysis of pallet remanufacturing. *Journal of Cleaner Production* 126(10): 630-642.
- Trebilcock, B (2013) Reader Survey: Talking Pallets with Modern's Readers. From Wood to Plastic to Pallet Pools, Our Readers Tell Us What's Important in Pallets. *Modern Materials Handling Magazine*. Peerless Media, Framingham, MA.
- United Nations (2014) World economic situation prospects, Chapter I global economic outlook. *Prospects for the world economy in 2014-2015*: 1-8.
- Weththasinghe KK, Akash A, Harding T, Subhani M, Wijayasundaraa M (2022) Carbon footprint of wood and plastic as packaging materials – An Australian case of pallets. *Journal of Cleaner Production* 363(20): 132446.
- Wiedmann T, Minx J (2008) A definition of 'carbon footprint'. *Ecological Economics Research Trends*. Nova Science Publishers, New York.
- 王松永、羅盛峰 (2016) 木質材料生命週期之二氧化碳排出量及碳足跡評估。林產工業 35(2) : 67-79。

吳俊賢、陳溢宏、林俊成、陳豐熙 (2018) 國內木質包裝材料之木箱及木棧板使用量分析。林業研究專訊 25(6)：40-44。

財政部關務署 (2022) 海關進出口統計。綜合查詢系統。2022 年 3 月 25 日，取自：
<https://portal.sw.nat.gov.tw/APGA/GA30>

經濟部工業局 (2008) 產品節能減碳資訊網。2022 年 3 月 20 日，取自：<https://ghg.tgpf.org.tw/CVHome/>