

研究報告

臺灣主要實木產品進口運輸之碳排放量估算

林俊成¹⁾ 陳溢宏¹⁾ 王培蓉¹⁾ 陳幸君¹⁾ 吳孟珊^{1,2)}

摘 要

研究木質產品的生命週期，可以瞭解木質產品從原物料取得到最終處置的過程中，投入與產出所產生的潛在環境衝擊。木材及林產品的碳足跡的計算，包過經營、伐採、運輸、生產、加工，甚至廢棄物處理等一系列的過程，臺灣木材需求量有99%來自進口，而國產材與進口材碳足跡的最大差異，在於原料取得過程經由「運輸」所產生的碳排放。因此本文以2005~2014年主要實木產品進口貿易資料，估算實木產品於航運之CO₂排放量，研究顯示臺灣進口的實木產品於航運過程的CO₂排放量平均每年為6.7萬公噸(散裝船)及30.9萬公噸(貨櫃船)。每立方公尺實木產品航運所排放的CO₂為3.18到47.69 kg m⁻³ (散裝船)、14.52到217.55 kg m⁻³ (貨櫃船)。每立方公尺實木產品航運的CO₂排放量佔CO₂固定量的比例為0.26~3.82% (散裝船)、1.19~17.43%。本文計算實木產品於航運過程產生的碳排放，研究成果可做為產品碳足跡之估算，以及未來國產材推動地產地銷減碳效益之估算依據。

關鍵詞：實木產品、CO₂排放量，運輸。

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。台灣林業科學32(3):191-201。

¹⁾ 林業試驗所經濟組，10066台北市南海路53號 Division of Forestry Economics, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

²⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail:wumengshan@tfri.gov.tw

2016年7月送審 2016年12月通過 Received July 2016, Accepted December 2016.

Research paper

An Estimation of Carbon Emissions by Taiwan's Major Imported Solid Wood Products

Jiunn-Cheng Lin,¹⁾ Yi-Hung Chen,¹⁾ Pei-Jung Wang,¹⁾
Sing-Jyun Chen,¹⁾ Meng-Shan Wu^{1,2)}

【 Summary 】

Studying the life-cycle of wood products can help understand the cradle-to-grave total energy and its potential environmental impact starting with extraction of materials from the earth to the end of life. Calculation of the carbon footprint of timber and wood products considers all activities associated with the use of the material or product maintenance, logging, transportation, fabrication, processing, and disposal. Taiwan relies heavily on wood imports of as much as 99%. Between domestic timber and imported timber, the most significant difference in the carbon footprint lies in the carbon emissions resulting from the transport when obtaining raw materials. Hence, based on data of major solid wood product imports of 2005~2014, this study estimated the CO₂ emissions from transport. Results indicate that the average CO₂ emitted annually from the transport of Taiwan's imported solid wood products was 67,000 metric tons (mt) from bulk carriers and 309,000 mt from container ships. The amounts of CO₂ emitted during the transport of every cubic meter of solid wood product were decided mainly by the shipping distance and type of carriers. Transporting every cubic meter of solid wood product resulted in 3.18 to 47.69 kg m⁻³ CO₂ emissions by bulk carriers and 14.52 to 217.55 kg m⁻³ emissions by container ships. As this paper estimates the carbon emissions produced during the transport of solid wood products, its results can contribute to estimations of a product's carbon footprint. This study also lays the groundwork on which the efficacy of minimizing CO₂ emission levels is calculated when encouraging the use of domestically produced timber in the future.

Key words: solid wood, carbon emissions, transportation.

Lin JC, Chen YH, Wang PJ, Chen SJ, Wu MS. 2017. An estimation of carbon emissions by Taiwan's major imported solid wood products. *Taiwan J For Sci* 32(3):191-201.

前言

臺灣總溫室氣體(greenhouse gas, GHG)排放量自1990至2013年增加108.93%，年平均成長率為2.94%，面對國際社會溫室氣體減量的趨勢，如何採行有效減量方法是相當大的挑戰。森林具有吸存二氧化碳的功能，有助於減緩溫室氣體排放量，2013年林業部門二氧化碳吸收量為21,069千公噸二氧化碳當量，1990至2013年

土地利用、土地利用變化及林業部門之二氧化碳吸收量增加約9.36%，年平均成長率為0.84% (EPA 2016)。

臺灣林產品原料來源多依賴進口，2005~2014年間臺灣實木產品每年平均進口 5.2×10^6 m³，而本地生產的木材年平均不及 5×10^4 m³；換言之，木材自給率不及1% (Lin et al. 2015)。

木材自給率高低與森林是否永續經營有關 (Papadopoulos and Karagouni 2007)，臺灣大量使用進口木材及林產品，造成國內木材生產功能弱化長年自給率均低於1%的狀態，實屬不正常的資源使用。此外，臺灣大量進口木材及林產品，易引起其他國家的不滿及目前國際林產品市場上對於非法伐採 (illegal logging) 的重視，間接造成臺灣在國際林產品市場上扮演間接鼓勵非法伐採的不良印象，應是未來亟待加以改善的。

增加國內木材自給率，木材地產地銷的概念，與日本農村與農業振興的政策概念不謀而合。日本由於進口農產品增加及農業經營者高齡化，所以農地維持管理與農業繼承困難，使農業發展呈現停滯，因此日政府提出倡地產地銷的方法，不但可增加糧食自給率活用國產食材，也助於增加在地生產者所得，縮短運輸距離而減少環境負荷。這種「在地生產，在地銷售」的概念運用在其他產業也具有環境保護效果，縮短運輸距離，減少能源消耗及二氧化碳的排放，不論在農業及林業皆被重視。

從森林碳管理的角度分析，林木具有碳吸存與保存的功能，森林經由光合作用吸收大氣中的二氧化碳，並固定在木材中，將木材製成林產品後，林產品則有保存與替代的效果。林木在林地從生長後，砍伐送至工廠進行加工，再將成品銷售至使用者，最終產品壽命終止，從自然資源取得或產生的原物料到最終處置，其有關產品系統中連續與互相連結的過程，稱為生命週期 (life cycle)。國內對於林產品碳足跡的估算，著重在整個生命週期的探討，並未針對原料取得之差異來討論，Lin et al. (2001) 分析國內合板工業製成中所需排放的碳素量及儲藏的碳素量，依照IPCC基準換算的結果為12.6及235.5 kg m⁻³。Lian et al. (2002) 探討臺灣木質家具製程CO₂排放量及碳素儲存量。Yen (2014) 以木板凳為例探討林產品碳足跡，0.005334 m³的板凳其生命週期的碳排放為1.98 kg，而生命週期各階段的碳排放量大小依序為：製造階段>原料開採階段>配送銷售階段>廢棄處理階段>使用階段。Peng (2014) 指出

2009年臺灣木質家具使用原料1.2275×10⁶公噸，家具製造過程中排放CO₂為8.831×10⁵公噸，但木質家具原料儲藏之CO₂為2.0692×10⁶公噸，扣除製造過程排放之CO₂量，可削減大氣中CO₂約1.1861×10⁶公噸。

經由研究木質產品的生命週期，可以瞭解木質產品從原物料取得到最終處置的過程中，投入與產出所產生的潛在環境衝擊。木材及林產品的碳足跡，須計算經營、伐採、運輸、生產、加工，甚至廢棄物處理等一系列的過程，臺灣木材需求量有99%來自進口，而國產材與進口材的碳足跡的最大差異，在於原料取得過程經由「運輸」所產生的碳排放。因此本文以近10年主要實木產品進口貿易資料，估算主要進口實木產品於航運運輸之CO₂排放量，結果可做為實木產品碳足跡或生命週期估算之參考，以及未來國產材推動地產地銷減碳效益之估算依據。

材料與方法

本文以臺灣2005~2014年主要實木產品進口貿易資料，採用產品里程 (product miles) 的概念，估算主要進口實木產品於航運運輸之CO₂排放量，同時估算進口實木產品對於CO₂的固定量，以了解實木產品航運過程排放的CO₂與固定CO₂之情形，以下分別說明進口實木產品運輸之CO₂排放量與CO₂固定量之計算方式。

一、進口實木產品運輸之CO₂排放量估算方法

林產品的生產過程由原料取得、加工生產後再至消費市場，整個流向皆需運輸，而國產材與進口材的最大差異，在原料取得階段進口材需計算產品從國外到國內運輸所產生的CO₂排放量。實木產品進口多數以船運為主，船舶依照其用途可分為商船、漁船等，種類繁多，貨船是以承載貨物為主的船舶，數量約佔商船總數的95%以上，雖然速度比較慢而耗時，但運貨量大且運費較空運便宜，是水域的主要運輸工具，最常見為散裝船及貨櫃船。船舶溫室氣體排放以CO₂排放量所佔比例最高，CH₄及N₂O的排放量極少，運輸過程產生的

CO₂排放量，利用活動數據(activity data)和排放量轉換係數(emission conversion factor)之乘積進行計算。活動數據依木材及實木產品的數量或重量、運輸距離及運輸方式而有所差異，可以連續排放監測或藉由航行距離、燃料使用量等數據來推算，航運碳排放計算方式如式(1)，貨品重量、運輸距離以及轉換係數之計算方式說明如下：

運輸的CO₂排放量(E) = 貨品重量(M) × 運輸距離(D) × 排放量轉換係數(F)..... 式(1)

(一) 臺灣主要實木產品進口重量

本研究採用聯合國糧農組織分類標準及定義(FAO 1982)，依據國際熱帶林木組織(International Tropical Timber Organization; ITTO)、聯合國歐洲經濟委員會(United Nations Economic Commission for Europe; UNECE)及聯合國糧農組織收集各國木材、林產品貿

易資料所發展使用的問卷(Joint Forest Sector Questionnaire; JFSQ)為主軸，針對財政部關務署海關進出口貿易統計資料中之木材、林產品生產與貿易統計資料進行整理，以實木材積當量為單位，將實木產品分為原木(round wood)、木炭(wood charcoal)、木片及粒片(wood chips and particles)、木材殘餘物(其他木片、樹皮、鋸屑)(wood residues)、製材(sawnwood)、木質人造板(wood-based panels)等6大類。進出口資料中，林木及林產品的數量有些以材積(立方公尺m³)表示，有些則用重量(公噸mt)表示，因排放量估算係利用重量當作活動數據，故利用FAO於2008年發展的轉換係數，將體積單位轉換成重量單位(TFRI 2014)，如Table 1。

(二) 各國港口與臺灣港口之距離

臺灣國際商港以高雄港為主要港口，因深水貨櫃碼頭、在全球及區域航線上的樞紐位置等因素，是臺灣首要的海運樞紐、與貨運進

Table 1. Standard conversion factors used preparing tables of production and trade

Product	mt m ⁻³
Roundwood	
Wood fuel, including wood for charcoal	0.725
Coniferous	0.699
Non-coniferous	0.800
Wood charcoal	0.167
Wood chips and particles	0.625
Coniferous	0.625
Non-coniferous	0.750
Wood residues	0.667
Sawnwood	
Coniferous	0.549
Non-coniferous	0.699
Wood-based panels	
Veneer sheets	0.752
Plywood	0.649
Particle board, oriented strand board and others	0.649
Hardboard	0.950
Medium-density fiberboard	0.500
Other fiberboard	0.250

Source: Taiwan Forestry Research Institute (TFRI) (2014).

出口門戶，2013年在全球貨櫃港排名第13名(Wang 2015)。因此本研究以高雄港至各國港口之距離，計算實木產品航運的CO₂排放量。

木材進口國的港口，係利用2011~2015年林產品進口之海關統計資料，整理出各國與臺灣進行實木產品貿易的主要港口，從而利用EcoTransIT網站取得各國港口到臺灣高雄港之間的距離。

(三) CO₂排放量轉換係數

本研究選用英國環境部(Department for Environment, Food & Rural Affairs 2012)估算各船型溫室氣體排放數據做為轉換係數，船舶溫室氣體排放以CO₂為主，CH₄及N₂O的排放量極少，一般碳足跡的估算是計算活動過程中總溫室氣體排放量，將各種溫室氣體轉換為可比較的二氧化碳當量後進行加總，本研究為比較進口實木產品CO₂固定量與進口實木產品於航運過程中CO₂排放量，故不計CH₄及N₂O的排放，以每公噸公里的二氧化碳排放量之平均值做為轉換係數，散裝船(bulk carrier) CO₂排放量的轉換係數為3.49 g每公噸公里、貨櫃船(container)的CO₂排放量轉換係數為15.92 g每公噸公里。

二、進口實木產品CO₂儲存量之估算

林木生長時，藉由光合作用會將大氣中的碳固定，林木生物量最後再乘以林木之碳含量百分比，即為林木所固定之碳量，不論樹種構成為何，一般認為1公斤的木材約有50%的碳元素、43%的氧元素，如此估算CO₂的固定量為木材重量的1.83倍(Liao 2009, Oliver 2011)。

結果

一、臺灣主要實木產品進口重量

Figure 1為2005至2014年間臺灣實木產品進口重量，2009年整體進口量降低，各實木產品除了木片及粒片，其餘產品的進口變化較小，實木產品以木片及粒片之進口量為大宗，佔每年進口量之四成，平均每年進口量為 1.288×10^6 公噸，進口趨勢浮動較大。其次為木質板，平均每年進口量為 9.462×10^5 公噸，整體進口量較穩定。製材進口量位居第三，平均每年進口量為 6.723×10^5 公噸，進口趨勢呈現略微上升。

Table 2為臺灣實木產品進口總量前十名的國家，進口總量從高至低依序為馬來西亞、澳大

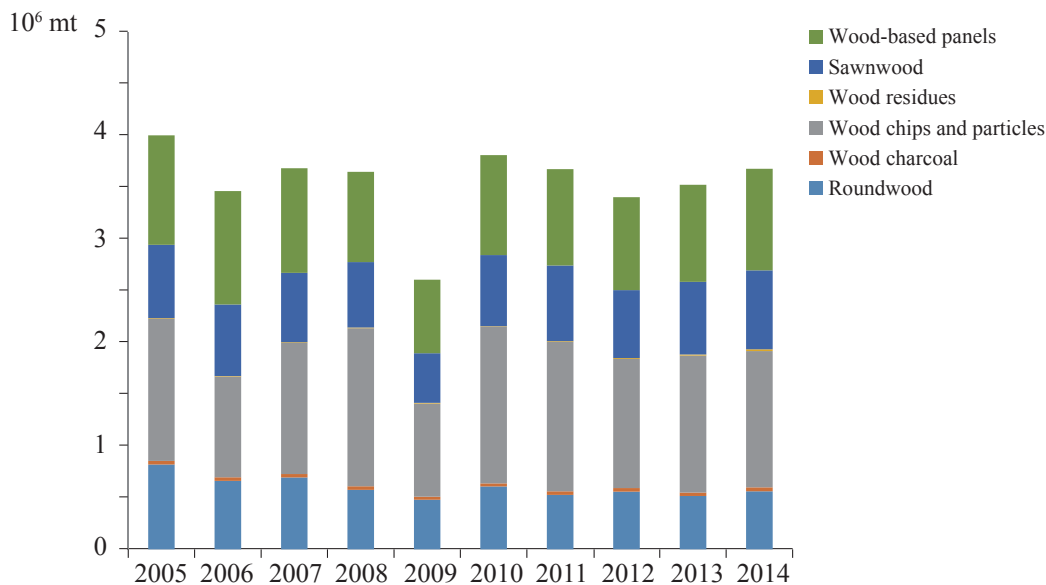


Fig. 1. Imported quantities of major solid wood forest products in Taiwan, 2005~2014.

利亞、泰國、中國大陸、印尼、越南、加拿大、紐西蘭、美國及巴布亞紐幾內亞，其他各洲國家進口量已扣除排行前十名國家之進口量。

從2005至2014年，臺灣進口實木產品總量為 3.548×10^7 公噸，亞洲¹⁾進口的量為 2.235×10^7 公噸，佔總量的63%，其中馬來西亞一直是臺灣進口木材的主要來源，2005年至2014年間從馬來西亞進口 8.86×10^6 公噸的實木產品，進口項目以原木為最大宗，共 3.923×10^6 公噸，佔44%；其次為木質板，佔38%，共 3.353×10^6 公噸。泰國為臺灣實木產品進口來源第三名、亞洲國家中第二名，進口量為 4.385×10^6 公噸，主要進口木片及粒片，佔67%，共 2.914×10^6 公噸；其次進口項目為木質板，佔32%，共 1.413×10^6 公噸。

大洋洲²⁾的進口量為 7.887×10^6 公噸，佔總量的22.23%，主要進口國為澳大利亞，位居臺灣實木產品進口來源第二名，十年間進口量為 6.234×10^6 公噸，進口項目主要是木片及粒片，佔全部的92%，共 5.734×10^6 公噸。紐西蘭為大洋洲國家進口國第二，進口量為 1.232×10^6 公噸，主要進口原木及製材。

二、航運距離

本研究從財政部關務署林產品進口統計資料，整理臺灣前十名實木產品進口國家與高雄港的距離以及各港口運輸實木產品之重量比，詳細資料如Table 3所示。馬來西亞以Tanjong Mani, Sarawak (42%)為主要出口港，依次為Bintulu, Sarawak (23%)及Kuala

Table 2. A list of countries by imported quantities of Taiwan's major solid wood products 2005~2014 Units: mt

Country/Products	Round wood	Wood charcoal	Wood chips and particles	Wood residues	Sawnwood	Wood-based panels	Total
Malaysia	3,923,077	82,940	54	4078	1,496,294	3,353,370	8,859,814
Australia	11,073	0	5,734,488	3841	414,134	70,145	6,233,681
Thailand	1064	25,608	2,914,029	2564	29,274	1,412,568	4,385,107
China	8618	9366	872,332	8648	263,947	2,246,801	3,409,712
Indonesia	7179	129,878	1,494,248	37,790	68,865	795,330	2,533,289
Vietnam	79,765	84,834	1,827,139	4024	242,326	79,031	2,317,118
Canada	115,047	0	0	990	1,749,344	110,213	1,975,594
New Zealand	530,117	0	0	652	547,567	154,093	1,232,430
USA	188,724	42	30,630	7001	847,798	57,445	1,131,640
Papua New Guinea (PNG)	251,679	0	0	0	70,170	75,167	397,016
Others in Asia	540,201	6154	612	2479	237,044	62,583	849,072
Others in Oceania	21,207	0	12	117	1,192	1414	23,942
Others in North & Central America	10,651	15	0	0	3084	1184	14,934
Others in Europe	15,403	219	1250	9188	285,407	963,762	1,275,230
Others in South America	78,603	19	9396	16	435,311	70,496	593,840
Others in Africa	209,274	105	6	233	31,194	8363	249,174
Others	282	28	0	0	349	10	669
Total	5,991,965	339,206	12,884,196	81,621	6,723,299	9,461,973	35,482,261

¹⁾ 亞洲進口量包括泰國、中國大陸、印尼、越南以及其他亞洲國家。

²⁾ 大洋洲進口量包括澳大利亞、紐西蘭、巴布亞紐幾內亞以及其他大洋洲國家。

Baram (14%)，其他港口占21%；澳大利亞以 Melbourne、Sydney、Brisbane 為與臺灣貿易前三名之港口；泰國以 Songkhla、Bangkok 及 Laem Chabang 為前三名之貿易港；中國以 Lianyungang、Ningbo 及 Shanghai 為前三名

主要貿易港；印尼、越南、加拿大、紐西蘭及美國，分別以 Surabaya (53%)、Haiphong (82%)、Vancouver (98%)、Tauranga (58%) 及 Tacoma (42%) 為主要港口；巴布亞紐幾內亞以許多零散港口為主(85%)。

Table 3. Distances between the entry ports and Kaohsiung (KHS)

Country/Region	Port	Proportion	Distance (km)
Malaysia	Tanjung Manis, Sarawak	0.42	2525.11
	Bintulu, Sarawak	0.23	2301.93
	Kuala Baram	0.14	2111.25
	Other	0.21	2441.80
Australia	Melbourne	0.35	8848.45
	Sydney	0.32	7823.39
	Brisbane	0.29	7001.55
	Other	0.04	7891.13
Thailand	Songkhla	0.33	2795.09
	Bangkok	0.33	3109.22
	Laem Chabang	0.31	3082.40
	Other	0.03	2995.57
China	Lianyungang	0.34	1654.48
	Ningbo	0.20	1055.72
	Shanghai	0.18	1239.02
	Other	0.28	1316.41
Indonesia	Surabaya	0.53	3668.59
	Jakarta, Java	0.22	3581.28
	Semarang, Java	0.12	3646.98
	Other	0.12	3632.28
Vietnam	Haiphong	0.82	1458.55
	Da Nang	0.06	1465.00
	Ho Chi Minh City	0.06	2069.66
	Other	0.06	1765.72
Canada	Vancouver	0.98	10,334.40
	Prince Rupert	0.01	9462.55
	Montreal	0.01	21,742.05
	Other	0.00	13,846.33
New Zealand	Tauranga	0.58	9061.73
	Napier	0.19	9480.49
	Wellington	0.09	9291.67
	Other	0.14	9332.34
USA	Tacoma, WA	0.42	10,307.70
	Savannah, GA	0.18	22,679.85
	Seattle, WA	0.06	10,261.47
	Other	0.34	16,681.10

con't

Papua New Guinea	Vanimo	0.08	4303.79
	Port Moresby	0.07	5176.94
	Others	0.85	4740.37
Other	Asia		2358.15
	Oceania		7234.66
	North, Central America		18,192.56
	Europe		18,472.65
	South America		20,035.27
	Africa		17,185.91

其他各洲國家到高雄港距離，以進口總量前100名國家到高雄港距離進行平均，所得結果如Table 3所示，亞洲其他國家與高雄港平均距離為 2.358×10^3 公里；歐洲其他國家與高雄港平均距離為 1.847×10^4 公里；非洲其他國家與高雄港平均距離為 1.719×10^4 公里；北中美洲其他國家與高雄港平均距離為 1.819×10^4 公里；南美洲其他國家與高雄港平均距離為 2.004×10^4 公里及大洋洲其他國家與高雄港平均距離為 7.235×10^3 公里。

三、主要實木產品航運過程的CO₂排放量

本研究依據式(1)之公式，分別利用散裝船與貨櫃船之排放係數，估算臺灣進口實木產品在航運上所排放的CO₂，Table 4為2005~2014年之間主要國家CO₂排放量，2005至2014年間，平均每年CO₂排放量為 6.7×10^4 公噸(散裝船)及 3.08×10^5 公噸(貨櫃船)。各實木產品進口國的CO₂排放量，除進口量的因素外，航運距離亦為主要影響因素。CO₂排放量第1名為澳大利亞，澳大利亞雖然是排名第2的實木產品進口國，但其運輸距離較其他鄰近亞洲國家高出2倍以上，故其碳排放超越實木產品進口排名第1的馬來西亞，若以貨櫃船為運輸工具，澳大利亞實木產品航運過程中的CO₂排放量為 7.892×10^5 公噸。馬來西亞雖然是排名第1的實木產品進口國，但其距離臺灣較近，排放的CO₂總量於各進口國家中位居第二，若以貨櫃船為運輸工具，馬來西亞實木產品航運過程中的CO₂排放量為 3.384×10^5 公噸，其CO₂排放量與澳大利亞差距超過1倍。加拿大與美國分別為CO₂排放量第3名

與第4名的國家，雖然這兩個國家的實木產品進口量分別排名第7與第9，但是其運輸距離超過1萬公里，遠大於泰國、中國大陸、印尼、越南等距離臺灣較近的國家，因此CO₂排放量的排名位居前列。

四、每進口1 m³實木產品之航運二氧化碳儲存量

本研究將實木產品體積藉由Table 1轉換係數換算為重量，以木材重量的1.83倍估算每立方公尺實木產品CO₂的固定量，除了木炭、木材殘餘物之外，每個進口項目類別又細分為針葉樹材、闊葉樹材或不同組合板等，因為各實木產品的密度不同，單位之間的轉換係數也有所差異，使每立方公尺的固碳量有變化。本研究利用2005~2014年間臺灣實木產品進口量的資料進行計算，估算出每立方公尺原木固定的CO₂平均為1410公斤，每立方公尺木炭固定的CO₂平均為306公斤，每立方公尺木片及粒片固定的CO₂平均為1360公斤，每立方公尺的木材殘餘物固定的CO₂平均為1220公斤，每立方公尺的製材固定的CO₂平均為1160公斤，每立方公尺的木質板固定的CO₂平均為1200公斤。

討論

Simon (2010)計算新西蘭單板層積材每立方公尺能固定910公斤CO₂。Bushi et al. (2011)計算軟木、軟木膠合板、西部紅雪松木及壁板的CO₂固定量，1 m³實木產品換算成產品重量大約

Table 4. List of countries by CO₂ emissions in shipping to the port of Kaohsiung Units: mt

Country/Region	Bulk carrier	Container
Australia	173,013.42	789,218.80
Malaysia	74,185.41	338,404.53
Canada	71,849.51	327,749.06
USA	58,156.07	265,284.99
Thailand	45,804.28	208,941.00
New Zealand	39,567.39	180,490.79
Indonesia	32,199.93	146,883.33
China	16,261.67	74,179.29
Vietnam	12,238.47	55,827.07
Papua New Guinea	6558.38	29,916.72
Others in Europe	82,213.52	375,025.55
Others in South America	41,523.16	189,412.26
Others in Africa	14,945.18	68,174.01
Others in Asia	6987.81	31,875.64
Others in North & Central America	948.18	4325.23
Others in Oceania	604.50	2757.51
Total	677,056.88	3,088,465.76

0.45~0.3公噸，其所固定的CO₂分別為760、820、630及630公斤。本研究結果顯示除木炭的實木產品，其CO₂固定量比其他研究高，推估是因為研究採用FAO轉換係數，其1 m³實木產品換算成重量約為0.55~0.8公噸，使實木產品從體積轉換成重量後數值較高，CO₂固定量相對來說也偏高。

Table 5為主要進口國每立方公尺實木產品航運過程CO₂排放量，以及所佔CO₂固定量之比例。在前10名進口國中，每立方公尺實木產品CO₂排放量以美國為最大，每立方公尺實木產品的CO₂排放量為31.3 kg，其次為加拿大、澳大利亞及紐西蘭等國，分別為20.44、20.23、19.68 kg m⁻³；中國大陸、越南以及馬來西亞等國每立方公尺實木產品CO₂排放量最少，分別為3.18、3.48、5.9 kg m⁻³，從前10名進口國每立方公尺實木產品CO₂排放量的排序，更顯突出運輸距離對於排放量的影響，運輸距離越長者單位木材的CO₂排放量越高。本研究同時以散裝船與貨櫃船為例，計算各國家到高雄港的CO₂排放量佔CO₂固定量的比例，散裝船的變化在0.26~3.82%之間；用貨櫃船航行的差異性比例較明顯，變化範圍在1.19~17.43%之間，各國

家到高雄港的CO₂排放量佔CO₂固定量的比例同樣以美國為最大，比例為12.81%，其次為加拿大與紐西蘭，澳大利亞(20.33 kg m⁻³，6.92%)雖然每立方公尺實木產品的CO₂排放量與加拿大(20.44 kg m⁻³，9.07%)、紐西蘭(19.68 kg m⁻³，8%)略同，但是在CO₂排放量佔CO₂固定量的比例較低的原因是澳大利亞主要為木片及粒片之進口國，而加拿大與紐西蘭主要以製材為主，由於木片及粒片之CO₂固定量為1360公斤高於製材CO₂固定量的1160公斤，故產生澳大利亞於CO₂排放比例呈現較低的情形。

Simon (2010)計算新西蘭單板層積材的碳足跡，航運過程每立方公尺層積材排放CO₂ 22~114公斤，以每立方公尺0.91公噸計算CO₂固定量，其碳排放量佔CO₂固定量的比例為2.4~12.5%。Oliver (2011)計算闊葉樹窯乾材的碳足跡，以每公斤木材可固定1.835公斤的CO₂量進行估算，航運期間排放的CO₂為0.068公斤，航運期間每公斤木材CO₂固定量佔CO₂排放量的比例為3.7%。由前述文獻可知本文估算主要進口國每立方公尺實木產品航運過程CO₂排放量佔CO₂儲存量之比例尚落在合理的區間內。

Table 5. CO₂ emissions from shipping per cubic meter of solid wood products

Import country	CO ₂ emissions (kg m ⁻³)		CO ₂ emissions/CO ₂ storage (%)	
	Bulk carrier	Container	Bulk carrier	Container
Malaysia	5.90	26.91	0.46	2.09
Australia	20.23	92.28	1.52	6.92
Thailand	7.06	32.20	0.57	2.60
China	3.18	14.52	0.26	1.19
Indonesia	7.69	35.09	0.69	3.17
Vietnam	3.48	15.89	0.29	1.32
Canada	20.44	93.23	1.99	9.07
New Zealand	19.68	89.75	1.75	8.00
USA	31.30	142.78	2.81	12.81
Papua Nea Guinea	12.71	57.98	0.90	4.12
Others in Asia	5.76	26.27	0.45	2.05
Others in Oceania	19.93	90.93	1.38	6.29
Others in North & Central America	47.69	217.55	3.47	15.83
Others in Europe	40.67	185.53	3.52	16.07
Others in South America	41.59	189.71	3.82	17.43
Others in Africa	46.52	212.22	3.28	14.95

結論

估算實木產品生命週期，有助於瞭解木質產品從原料物取得到最終處置的過程中，投入與產出所產生的潛在環境衝擊，進而調整相關策略。Miner (2010)計算全球森林產業對溫室氣體的影響，實木產品在生命週期中各階段CO₂排放量為原木產出佔2%、化學及化石燃料佔10%、產品製造佔55%、運輸佔6%、產品使用佔0%、產品處置佔27%。Green Resources公司在東非植樹及生產木製品，該公司利用森林工業碳評估工具(FICAT)計算碳排放量，實木產品在生命週期中各階段CO₂排放量為森林管理佔25%、化學及化石燃料佔15%、製造佔41%、運輸佔18%、產品使用佔0.3%、產品壽命終止佔0% (Parigiani et al. 2011)。Simon (2010)計算新西蘭單板層積材的碳足跡，航運最近及最遠距離所排放的CO₂佔整個碳足跡過程的比例為3.4~15.4%。Oliver (2011)計算闊葉樹窯乾材航運的CO₂排放量在整個碳足跡過程中佔的比例為14.8%。由國外研究得知運輸或航運的CO₂排放量佔產品生命週期的3.4~18%，未來若能提升

國產材的使用率，將有益於減少運輸過程產生的碳足跡。

研究結果表示臺灣進口的實木產品於航運過程的CO₂排放量每年平均為6.7萬公噸(散裝船)及30.9萬公噸(貨櫃船)。每立方公尺實木產品航運所排放的CO₂為3.18~47.69 kg m⁻³ (散裝船)、14.52~212.22 kg m⁻³ (貨櫃船)。單位實木產品於航運過程中產生的CO₂排放量主要受航海距離遠近及船型所影響，CO₂固定量則因品項而異。臺灣實木產品主要依賴國外進口，若能增加國內木材自給率，將能減少實木產品於運輸程中產生的排放，本研究估算出實木產品因航運產生的CO₂排放量，未來希望藉此探討國內運輸與進口航運佔產品生命週期之情況。

參考文獻

Bushi L, Salazar J, Meil J. 2011. A PAS 2050:2008 carbon footprint of four Canadian wood products delivered to the UK. The American Center for Life Cycle Assessment (ACLCA) LCA XI Conference.

Department for Environment, Food & Rural Affairs. 2012. 2012 Greenhouse gas conversion factors for company reporting. Available at <https://www.gov.uk/government/publications/2012-greenhouse-gas-conversion-factors-for-company-reporting>. Accessed 10 January 2016.

EcoTransIT. Available at <http://www.ecotransit.org/>. Accessed 5 January 2016.

Environmental Protection Administration (EPA). 2016. 2015 Taiwan Greenhouse Gas Inventory. Available at http://unfccc.saveoursky.org.tw/2015nir/uploads/00_nir_full.pdf. Accessed 20 January 2016.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1982. Classification and definition of forest products. Rome, Italy: FAO. 54 p.

Lian SP, Wan SY, Lin FC. 2002. Evaluation on energy consumption, carbon dioxide emission, and carbon storage quantity in manufacturing wooden furniture in Taiwan. For Prod Ind 21(4):243-52.

Liao TN. 2009. Estimating regular functions of Taiwan's forest carbon sink. Taiwan For 35(2):26-38.

Lin JC, Chen SJ, Wu MS. 2015. An analysis of timber harvest volume and production in Taiwan between 1991 and 2013. Taiwan J For Sci 30(2):121-30.

Lin TL, Wan SY, Lin FC. 2001. Evaluation on carbon dioxide emission and carbon storage quantity in manufacturing plywood in Taiwan. J Exp For Natl Taiwan Univ. 15(1):9-13.

Miner R. 2010. Impact of the global forest industry on atmospheric greenhouse gases. FAO Forestry Paper 159. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization (FAO).

Oliver R. 2011. A preliminary assessment of the carbon footprint of American hardwood kiln dried lumber supplied to distributors in the European Union (2nd Ed). Available at http://www.americanhardwood.org/fileadmin/docs/LCA_background/Kiln.pdf. Accessed 20 December 2015.

Papadopoulos I, Karagouni G. 2007. European timber trade analysis: an economical overview and regional market potential. In: Ntalos G & Mantanis G, editor. Practical Solutions for Furniture and Structural Bonding. International Workshop in Larnaka, Cyprus; 2007 March 22-23. p 143-51.

Parigiani J, Desai A, Mariki R, Miner R. 2011. The carbon footprint of an East African forestry enterprise. J Sustain Develop 4(3):152-62.

Peng WC. 2014. The sequestration of carbon dioxide from the wooden furniture industry in Taiwan, [MS thesis]. Pingtung, Taiwan: National Pingtung Univ. of Science and Technology.

Simon L. 2010. Carbon footprint of New Zealand laminated veneer lumber. Available at <http://www.nelsonpine.co.nz/>. Accessed 14 December 2015.

Taiwan Forestry Research Institute (TFRI). 2014. 2003-2013 Trade statistics of major forest products in Taiwan. Taipei, Taiwan, TFRI.

Wang YT. 2015. Operational performance of container terminals at the port of Kaohsiung. Mar Q 24(1):45-59.

Yen WT. 2014. Carbon footprint of wood product - a case study of wooden stool. [MS thesis]. Taipei, Taiwan: School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University.

