

初探漂流木對減碳的效益與生態系服務功能

文／圖 ■ 王 仁 ■ 國立中興大學森林學系碩士

劉瓊霏 ■ 國立中興大學森林學系教授（通訊作者）

一、緒言

近年，臺灣遭受颱風侵襲頻繁，且常有強降雨發生，由於此等暴雨，土壤在降雨開始後不久即達到飽和，後續的降雨則多以地表與次地表逕流的方式迅速流入溪流。當河川流量大增時，勢必對河岸基腳造成沖刷，使得飽和的土壤坡面負荷增加，更加上臺灣脆弱陡峻之地質結構的雙層作用力下，造成林地崩塌，致使產生漂流木和土石流等問題。然而，漂流木對於環境生態並非全無助益。因此，本文以生態系觀點來檢視天然災害擾動下所產生漂流木的生態功能，並闡述漂流木在減碳上所能發揮的效益。

二、地球碳循環之機制

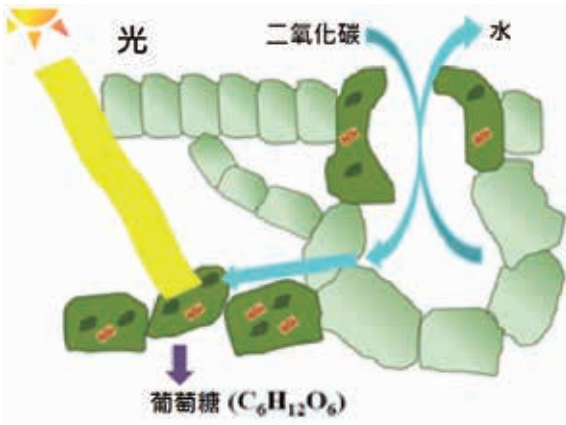
欲認知漂流木對減碳所能發揮的效益，首先應對地球碳循環機制和架構有所瞭解，在自然情況下，地球碳循環可分為大小時間尺度

的生物地質化學系統，以下分別說明之：

（一）小時間尺度生物地質化學系統

1. 陸域生態系統

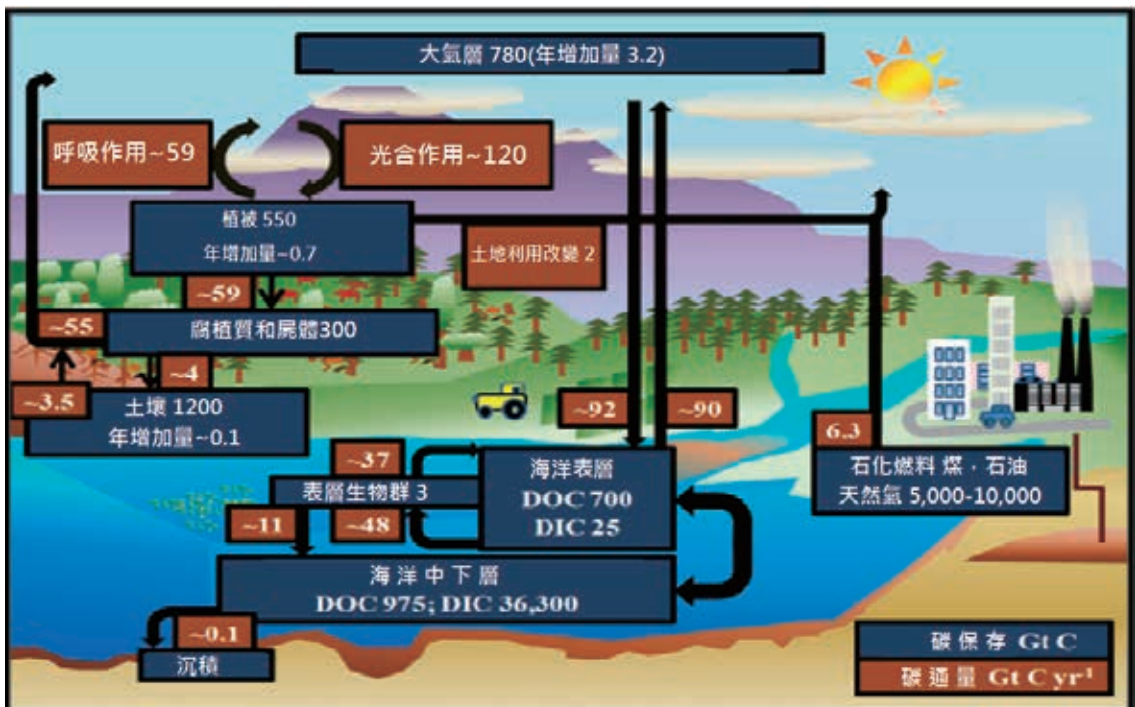
在陸域碳循環的流動中，初始取決於各種不同植物之光合作用（圖 1）和呼吸作用，幾乎所有的生命形式的能源皆來自於此二作用，將光能轉換成化學能，再加以運用消耗，以利於有機體的生長和繁殖，待植物體生成後，遂又餵養各生態系統的次級消費者與更高級的消費者之異營生物 (Lou, 2007)。這些陸域的有機體在死亡之後，部分可能會被微生物分解成顆粒有機物，其過程亦釋放碳於大氣之中。然而，殘餘在土壤或枯落物的碳，可能會以可溶性有機碳 (DOC) 和已被分解成可溶性無機碳 (DIC) 的形式被雨水沖刷於河川溪流中，進而排放於海洋生態系統內 (Cai, 2010)。



▲圖1、光合作用示意圖（修改自Nelson and Cox, 2009）。植物，通常會吸取大氣中的 CO_2 ，並藉由葉綠體將光的能量轉換，遂合成葡萄糖($C_6H_{12}O_6$)再以不同之酵素，進行生化反應，轉化成其他醣類，供給植物做結構或是非結構性碳水化合物，加以運用或儲存。此過程形成基礎的生物碳循環。

2. 海洋生態系統

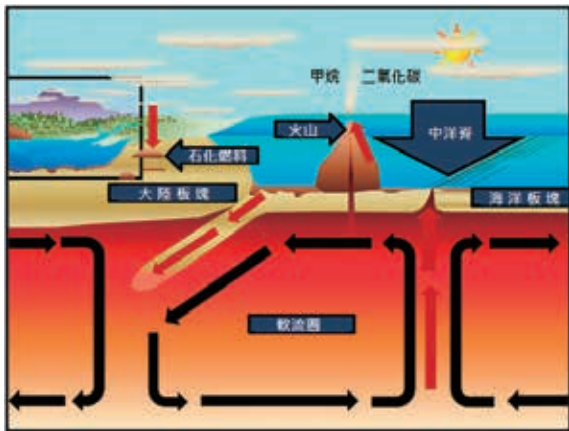
在海洋碳循環的流動中，初始則取決於各種不同海藻與海生植物之光合作用和呼吸作用，將光能轉換生成化學能，提供有機體的生長和繁殖，待海藻與海生植物生成後，遂又餵養海洋內各生態系統的次級消費者與更高級的消費者，而海洋的有機體死亡後，部分可能會被微生物分解成小碎塊，並釋放碳於淺海之中。然而，殘餘在碎塊中的碳（如海生動物貝殼之碳酸鈣），可能會沉於深海，甚至成為海底的沉積物，進入大時間尺度的生物地質化學系統；或以溶解性有機碳與溶解性無機碳的形式持續在海洋生態系統之中流轉，供給海洋各種不同的生物營養源，過程間，亦可能以 CO_2 之形式釋放回大氣之中（圖2）（Chavez et al., 2010）。



▲圖2、全球生物和物理碳循環示意圖（修改自Houghton, 2007）。圖中藍色方框為碳保存之量，單位為10億噸碳(Gt C)；土磚紅方框則為碳通量，單位為每年10億噸碳 (Gt C yr⁻¹)。

（二）大時間尺度的生物地質化學系統

有機碳沉積於海洋地殼或陸域地殼之中，部分可能於地殼中因高溫高壓生成液態可燃的有機液體與氣體，即為石油和天然氣，統稱石化燃料；或在板塊隱沒處，隨著時間之推移，進入軟流圈，而後可能從中洋脊冷凝，重新回到海底，或是陸域板塊張裂處，以火成岩的形式回到地殼之大裂谷，亦可能從火山噴發 CH_4 、 CO_2 等氣體回到大氣之中（圖 3）（何春蓀，2006）。



▲圖3、大時間尺度的生物地質化學系統碳循環（修改自何春蓀，2006；Houghton, 2007）。有機碳沉積於海洋地殼或陸域地殼，部分因高溫高壓生成液態可燃的有機液體與氣體，即為石化燃料；或在板塊隱沒處，隨著時間之推移，進入軟流圈，從中洋脊冷凝，重新回到海底，亦可能從火山噴發 CH_4 、 CO_2 等氣體回到大氣之中。

三、漂流木對於節能減碳發揮的效益與生態系的服務功能

漂流木為可移動的巨型木質殘體，係森林生態系統輸出至其它生態系統的緩效性養分型態之一（Krajick, 2001）。陸域生態系統中，

森林生態系儲存了 86% 的地上部碳與 73% 的土壤碳，故森林生態系為陸域生態系之主要碳匯。其中森林生態系的碳匯分為：

- （一）地上部分，主要有幹、枝、葉等。
- （二）地下部分，主要有土壤中的顆粒性有機碳，例如粗根、細根、枯落物等，尚有可溶性有機碳、可溶性無機碳、顆粒性無機碳等。

而漂流木主要為 1. 幹與枝，2. 部分顆粒性有機碳，枯落物中的巨型木質殘體，可被因豪大雨造成洪水與土石流，挾帶大量的泥沙石，從森林生態系輸出至其它生態系，如海洋生態系、河流生態系、海岸生態系、農地生態系等。

林國銓（2006）研究福山闊葉林之結果顯示，成熟的森林生態系可產生穩定的枯落物量，使枯枝落葉層和土壤養分供給保持穩定，但森林生態系易受颱風擾動，使森林枯落物量產生變異，以致存在於生物體大量有機碳的輸出亦隨之改變。而就傳統的認知上，枯落物中的巨型木質殘體，占枯落物輸入地面上總量的 3 ~ 24% (Laiho and Prescott, 1999)，理應會有緩效性施放養分的功能，但後來的研究發現，不只占 3 ~ 24%，更高達 3 ~ 73% 的枯落物乾重是由巨型木質殘體組成，但是卻只占全部枯落物所提供的氮 < 5%，磷 < 10%，和 < 25% 的鉀、鈣、鎂 (Laiho and Prescott, 2004)，此研究結果顯示，巨型木質殘體在北半球森林養分循環的影響力不會太大，釋放養分的效應不明顯，且分解速率相對於葉部與枝條緩慢許多。但反過來說，漂流木

也因為分解緩慢，故可在碳循環上扮演著暫時封存碳的角色。

森林生態系內部的碳循環，通常由枯落物的分解和植物根部和土壤微生物吸收形成。在穩定的狀態下，大部份由枯落物分解所釋出的養分，再度被植群社會、微生物及土壤所吸收，進而達成一穩定的平衡狀態；僅有少量的養分，會以可溶性有機物和已被分解成可溶性無機物的形式被雨水沖刷於河川溪流中，或隨土壤水滲流，被帶離森林生態系，進而排放於海洋生態系統內 (Cai, 2010)。惟近年極端氣候頻繁，導致狂風暴雨經常發生，而遭颱風擊落的新鮮枝葉較隨季節更迭回歸林地的枯黃老葉，有更高的養分含量 (林國銓, 1997)。因此，在分解過程中所釋放的大量養分，可能超出整個森林生態系所能承載的量，特別在強颱風侵襲期間，總磷、鉀、硝酸根、鉍根等離子 (Lin et al., 2011)、顆粒性有機物、枯落物、新鮮枝葉、新鮮巨型木質殘體、原本既有的巨型木質殘體後 2 者樹幹的部分，如藉由洪水或土石流運輸後，可概括稱為漂流木，將隨土壤水和地表逕流流失，最後匯流於河川 (Hilton, 2008)，直至海洋。漂流木藉由洪水運輸的方式，堆積於河床、泥沼地、農地等生態系統，或者直接再以異重流之方式，沉積於大陸棚和海底 (Kao et al., 2010)。也可能飄浮於海洋表面，經過數月後，因鹽水浸潤整個漂流木內部，使漂流木順著垂直海流輸送於海底部，達到短中期碳封存的效果。故全球極端氣候頻率與強度加劇，為地球生態系統對於近年人為大量開採石化燃料，導致過量的碳排放於大氣之

中的正向回饋機制，可使大氣中 CO_2 被陸域生態系的植物行光合作用後，固定於有機體中，被颱風帶來之強降雨及強風沖刷於河流中，遂埋藏於海底，有碳封存之效果，使碳素暫時進入大時間尺度的生物地質化學系統。

因極端氣候事件生成的巨型木質殘體，其分解速率的研究不多，無論在熱帶森林 (Chambers et al., 2001)、溫帶森林 (Marra and Edmonds, 1994)、或寒帶森林 (Krankina and Harmon, 1995; Harden et al., 2000; Wang et al., 2002; Bond-Lamberty et al., 2003) 地區的巨型木質殘體分解速率常數約在 0.09 yr^{-1} ，皆比其他較小型的顆粒性有機碳來得緩和 (Gough et al., 2007)，故對於森林生態系統外，是其他低海拔生態系可以持續增加數 10 年的緩效性回歸養分，其養分的濃度又比一般的枯枝落葉低 (Laiho and Prescott, 2004)，但是對低海拔地區、河床、河岸、海岸、濕地的生態系統仍有些許施肥的效用 (Maser and Sedell, 1994)，甚至可做為其它野生動物的棲地等功能 (Krajick, 2001)。

藉由漂流木優劣勢分析，以生態系角度探討林地釋出漂流木功能 (如表 1)。漂流木對於其它生態系的內部優勢有：

1. 臥躺河床孕育菌菇和昆蟲。
2. 為魚蝦提供優良棲息場所。
3. 沖入海洋生態系統成為營養鹽來源。
4. 附著藤壺等動植物並聚集小魚群，常成為遷徙鳥類的休息站。
5. 堆陳於海邊，亦有螃蟹挖地洞、昆蟲棲息、植物發芽，增加海岸生物多樣性。

6. 供給森林生態系以外的其他生態系統緩效性養分。

7. 有短中期碳封存的效果。

但相對的，內部劣勢則會對民眾與政府有氣候風險成本增加的可能，例如：

1. 阻礙交通。
2. 造成水庫與港口等重大基礎建設阻塞。
3. 推積農地無法耕作。
4. 對民眾而言是大型垃圾。
5. 阻塞水力發電廠機具。

表 1. 漂流木對於其他生態系功能之優劣勢分析

	漂流木對生態系功能的內部優勢	漂流木對生態系功能的內部劣勢
林木輸出森林生態系成為漂流木	<ol style="list-style-type: none"> 1. 臥躺河床孕育菌菇和昆蟲。 2. 為魚蝦提供優良棲息場所。 3. 沖入海洋生態系統成為營養鹽來源。 4. 附著藤壺等動植物並聚集小魚群，常成為遷徙鳥類的休息站。 5. 堆陳於海邊，亦有螃蟹挖地洞、昆蟲棲息、植物發芽，增加海岸生物多樣性。 6. 供給森林生態系以外的其他生態系統緩效性養分。 7. 有短中期碳封存的效果。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 阻礙交通。 2. 造成水庫與港口等重大基礎建設阻塞。 3. 推積農地無法耕作。 4. 對民眾而言是大型垃圾。 5. 阻塞水力發電廠機具。
	漂流木的外在機會	漂流木的外在威脅
林木滯留林地	<ol style="list-style-type: none"> 1. 過熟使森林生產力衰退。 2. 如久未經適當之經營，例如疏伐作業，則可能使土壤坡面負荷增加，土石流生成風險上升。 3. 森林如未開墾，使地主原本可經商或農墾之機會成本犧牲。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 淨化空氣。 2. 蓄水保土。 3. 防風固砂。 4. 動物棲地保護。 5. 資源供人利用。 6. 環境美化。

當漂流木尚未形成，而以林木或者是巨型木質殘體的形式留存於森林生態系時，則對於生態環境議題上有相對上的優勢與劣勢，例如在森林裡的林木有淨化空氣、蓄水保土、防風固砂、動物棲地保護、資源供人利用、環境美化等功能，如林木被沖刷成漂流木，就會顯得可惜；但是當過熟使森林生產力衰退並久未經適當之經營（例如疏伐老木作業），則可能使土壤坡面負荷增加，土石流生成風險上升，或者森林如未開墾，使地主原本可經商或農墾

之機會成本犧牲，成為漂流木對生態功能有益的外部機會。

漂流木從森林生態系統輸出過多時，會造成民眾與政府的財物大量的損失，即時的清運亦耗費大量的人力物力，故政府單位於未來面對大量的漂流木時，可先將影響民眾生活的漂流木移運，將高經濟價值之木材載運至儲木場標售，剩餘之雜木，則可清運至海洋圈放，逐漸讓漂流木下沉至海底，達到短中期碳封存之效果，亦節省處理漂流木移運與放置之經

費。而其它不會影響民眾觀感之漂流木，則可放置原處，不做處理，亦可做為當地生態系統的緩效性養分。♻️



▲漂流木臥躺河床可孕育菌菇和昆蟲



▲無經濟價值之漂流木可清運至海洋圈放，達到短中期破封存之效果。



▲漂流木為非森林的陸域生態系統之重要緩效性營養源之一，可孕育生物多樣性。

參考文獻（請逕洽作者）



（圖片／高遠文化）