

行政院農業委員會林務局委託研究計畫 100-00-5-11

期末報告

以生態系角度探討漂流木的功能 (2/2)

The ecosystem perspective for driftwood function (2/2)



主辦機關：行政院農業委員會林務局

執行機構：國立中興大學農業暨自然資源學院森林系

中華民國一百年十二月

目錄

目錄	1
圖目錄	3
表目錄	4
摘要	5
Abstract	6
一、前言	7
二、前人研究	8
(一) 碳循環與其回饋機制	8
1. 碳循環	9
2. 碳循環在氣候變遷下的回饋迴路	12
(二) 漂流木與其在生態上的功能	16
1. 漂流木與颱風之共伴關係	16
2. 漂流木的功能	17
三、材料與方法	20
(一) 漂流木樣本蒐集	20
1. 南臺灣	20
2. 東臺灣	20
3. 中臺灣	20
4. 北臺灣	20
(二) 漂流木之碳與養分含量測定	21
1. 漂流木P、K、Ca、Mg含量之測定	21
2. 漂流木C、N、S含量之測定	22
(三) 林管處漂流木總量估算資料蒐集	23
(四) 各林管處漂流木碳和營養源輸出估算	24

(五) 建立不同規模漂流木的養分回歸式	25
四、 結果與討論	26
(一) 莫拉克颱風期間漂流木各種養分元素輸出森林生態系之總量	26
(二) 不同漂流木總量規模的養分回規模式與應用	32
(三) 以生態系角度探討林地釋出漂流木功能	35
五、 結論與建議	39
(一) 結論	39
(二) 建議	40
六、 參考文獻	41
附件一 期中報告審查意見回覆.....	51
附件二 期末報告審查意見回覆.....	55

圖目錄

圖1 光合作用示意圖.....	9
圖2 全球生物和物理碳循環示意圖.....	10
圖3 大時間尺度的地質系統碳循環.....	11
圖4 全球碳循環的回饋機制.....	12
圖5 亞馬遜河上、中、下游河床沉積物之碳主要型態.....	19
圖6 經濟部水利署訂定之中央管河川示意圖.....	21
圖7 莫拉克颱風漂流木清理一般地區統計圖.....	23
圖8 莫拉克颱風期間森林地單位面積輸出碳量與單日累計最大降雨量相關曲 線.....	30
圖9 莫拉克颱風各種養分元素總量與漂流木常態重之回歸模式.....	33

表目錄

表1 近年全球各大洋4和5級颶風 (hurricanes) 生成的數目與總颶風生成數目之百分比.....	16
表2 各林管處轄區內各縣市林地輸出碳量.....	27
表3 各林管處轄區內縣市林地單位面積 N、P、K、Ca、Mg、S 養分輸出量.....	28
表4 各林管處轄區內各縣市林地 N、P、K、Ca、Mg、S 養分輸出總量.....	29
表5 各林管處轄區內樣本碳與養分比例.....	30
表6 凡那比颱風漂流木從森林輸出的各種養分元素總量.....	34
表7 漂流木對於其他生態系功能之SWOT分析.....	37

摘要

已於 2 年期第 1 年計畫成果得知 (一) 莫拉克颱風侵襲台灣期間，各林區管理處林地單位面積輸出碳量由高至低依序為屏東林管處 (1,358.94 kg ha⁻¹)、嘉義林管處 (269.22 kg ha⁻¹)、台東林管處 (253.53 kg ha⁻¹)、花蓮林管處 (22.38 kg ha⁻¹)、羅東林管處 (4.31 kg ha⁻¹)、南投林管處 (3.15 kg ha⁻¹)、東勢林管處 (1.76 kg ha⁻¹) 和新竹林管處 (1.65 kg ha⁻¹)。(二) 莫拉克颱風侵襲台灣期間，森林生態系共輸出 1,140,567 Mg 之漂流木生物量；碳 550,010 Mg；氮 1,308 Mg；磷 4,350 Mg；鉀 3,326 Mg；鈣 6,315 Mg；鎂 1,907 Mg；硫 120 Mg。而本期計畫更進一步的建立各養分元素的推估模式，並且揭示以生態系角度探討漂流木的主要功能有 (一) 為其它生態系統的生物社會提供棲地。(二) 供給森林生態系以外的其他生態系統緩效性養分。(三) 增加其它生態系統的生物多樣性。(四) 漂流木有短中期碳封存的效果-- 颱風侵襲陸域生態系統，使漂流木大量生成，著實為全球暖化欲將大氣中 CO₂ 減少的回饋機制之一。故建議政府單位未來面對大量的漂流木時，可先將會影響民眾生活的漂流木，把高經濟價值之木材載運至儲木場標售，剩餘之雜木，則清運至海洋某處圈放 (但不影響各港口之運輸活動之處)，使漂流木隨著洋流與垂直流，逐漸讓漂流木下沉至海底，達到短中期碳封存之效果；而其它不會影響民眾觀感之漂流木，則可放置原處，做為當地生態系統的緩效性養分。

Abstract

From the results of the first, we could know (I) The Forest District Office in descending order of driftwood biomass Pingtung Forest District Office (889,058 Mg) ; Taitung Forest District Office (153,864 Mg) ; Chiayi Forest District Office (74,271 Mg) ; Hualien Forest District Office (16,789 Mg) ; Luotung forest area management office (3,012 Mg) ; Nantou Forest District Office (2,192 Mg) ; Hsinchu Forest District Office (980 Mg) ; Dongshih Forest District Office (401 Mg) , forest produce in Taiwan Driftwood total biomass of 1,140,567 Mg. (II) And the Forest District Office, the output of carbon per unit area of forest land in descending order of Pingtung Forest District Office (1,358.94 kg ha⁻¹) , Chiayi Forest District Office (269.22 kg ha⁻¹) , Taitung Forest District Office (253.53 kg ha⁻¹) , Hualien Forest District Office (22.38 kg ha⁻¹) , Luotung forest bureau (4.31 kg ha⁻¹) , Nantou Forest District Office (3.15 kg ha⁻¹) , Hsinchu Forest District Office (1.65 kg ha⁻¹) and Dongshih Forest District Office (1.76 kg ha⁻¹). In this year, we established a mode of nutrient elements, and revealed the perspective ecosystem function of driftwood. There are (a) providing habitats for some species in other ecosystems, (b) supplying nutrients to other unforest ecosystems slowly, (c) increasing the biodiversity of other ecosystems, and (d) sinking carbon under the ocean in short-mid-term. It is suggested that government agencies face the future when a lot of driftwood. If driftwoods affect peoples' lives, the government should carry them to storage places. Then, driftwoods of high economic value would be sold by public tender, and the part of others could be placed in the ocean where does not affect the transport activity of each port at. While the other part of driftwoods would not affect the public perception, they could be placed on the same place, as nutrients for other ecosystems.

一、前言

台灣位於太平洋熱帶與亞熱帶交界處，是全球颱風發生頻率較高的地區之一，惟近年溫室效應連帶造成冰川融化、海洋暖化、海洋面積擴大、海平面上升，更進一步影響大氣環流與洋流，引起全球氣候變遷，預測將帶來更多極端氣候。2009年8月，台灣遭受莫拉克 (Morakot) 侵襲，造成南部地區近50年來最大水患，中央氣象局紀錄指示此颱風累計雨量達到2,900 mm，比當地平均年雨量高出些許多，由於此等暴雨過於大量，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進入溪流。當流量大增時，勢必對河岸基腳造成沖刷，而飽和的土壤坡面負荷增加，加上台灣脆弱陡峻之地質結構的雙層作用力之下，將造成嚴重的林地崩塌，致使漂流木氾濫、土石流等問題。也由於極端氣候發生之頻率增加，土石流與漂流木氾濫的頻度亦增大。惟目前量化漂流木養分的基礎資訊仍略顯不足，故本計畫目的在於，藉由各林區管理處漂流木的規模大小和養分分析，建立漂流木之碳、氮、磷、鉀、鈉、鈣和鎂等養分之總量回歸式，並以生態系觀點來重新檢視漂流木的在地功能，甚至是擴大檢視漂流木在全球的「節能減碳」所發揮的效益。

二、前人研究

對於地球碳循環 (carbon cycle) 因人為大量排放石化燃料之碳，導致全球氣候變遷 (global climate change) 所引發的回饋機制 (feedback mechanisms) 仍不完全了解。然而，跨政府氣候變遷小組 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 在不完全了解的情況下，制定了效率低落的議定書，執行成效不彰 (Prins and Rayner, 2011)。因此，在探討氣候變遷相關議題時，應先釐清碳循環與其相關的回饋迴路 (feedback loops)。

(一) 碳循環與其回饋機制

縱觀歷史與地質的時間尺度之下，全球氣候的暖化與大氣溫室氣體中的二氧化碳和甲烷有極大的相關性 (Doney and Shimel, 2007; Zachos *et al.*, 2008)。綜合的氣候交互作用 (Synthetic climate interactions)，會讓碳循環的回饋迴路打破穩定或者是穩定 (Field *et al.*, 2007; Sabine and Tanhua, 2007)。碳循環在人類經濟活動的作用之下，對於地球地質系統循環有直接的影響，例如土地利用型改變 (land use change) 與燃燒石化燃料 (Wigley *et al.*, 1996; IPCC, 2007; Schimel, 2007)。最近數十年間，二氧化碳與甲烷從陸域與海洋碳庫排放到大氣中，濃度已顯著上升，進而造成全球暖化 (Hansen *et al.*, 2005; IPCC, 2007)。

海洋 (Sabine and Tanhua, 2007) 與陸地 (Field *et al.*, 2007) 儲存人為排放的碳，不只藉由單純的物理與化學過程，同時也會使用地球生態系統的生物化學過程，去減少濃度升高的二氧化碳。今時今日，全球碳循環與地球的生態系統有密切的相關。碳是有機體之間交換的法定貨幣 (legal tender)。當我們改變了碳循環的平衡，我們卻無法清楚的知道生態系統會如何反應。而這些人為的干擾，可能會造成某些物種族群數量的擴張 (Exard *et al.*, 2011; Wardle *et al.*, 2011)，或者滅絕 (Myers *et al.*, 2000; Bush *et al.*, 2004; Estes *et al.*, 2011; Exard *et al.*, 2011; Wardle *et al.*, 2011)。有機體 (包括人類) 都在努力適應這些變動的環境。直到最

近，我們仍然不能完全了解全球碳循環，其中亦包括不同的碳庫 (carbon pools) 之間是如何流轉。人為改變了大氣中的 CO_2 濃度，會使不同碳庫的流轉之間產生不同的回饋迴路，但碳循環回饋機制的通量並無法明確的預測與計算。故藉由下列敘述整合現今氣候變遷對於碳循環的影響。

1. 碳循環

自然情況下，地球碳循環可分為短期的生物和物理尺度與長期的地質尺度：

(1) 生物和物理碳循環 (短期)

a. 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 (photosynthesis) (圖 1) 和呼吸作用 (respiration)，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 (dissolved organic carbon, DOC) 和已被分解成可溶性無機碳 (dissolved inorganic carbon, 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)。

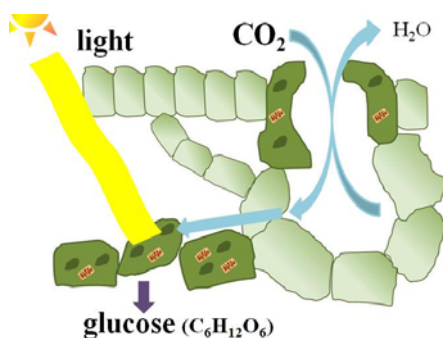


圖 1 光合作用示意圖 (Nelson and Cox, 2009)。植物，通常會吸取大氣中的 CO_2 ，並藉由葉綠體將光的能量轉換，遂合成葡萄糖 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) 再以不同之酵素，進行生化反應，轉化成其他醣類，供給植物做結構或是非結構性碳水化合物，加以運用或儲存。此過程形成基礎的生物碳循環。

b. 海洋生態系統

而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，進入大時間尺度的地質系統；或以 DIC 與 DOC 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 CO₂ 之形式釋放回大氣之中（圖 2）(Chavez *et al.*, 2010)。

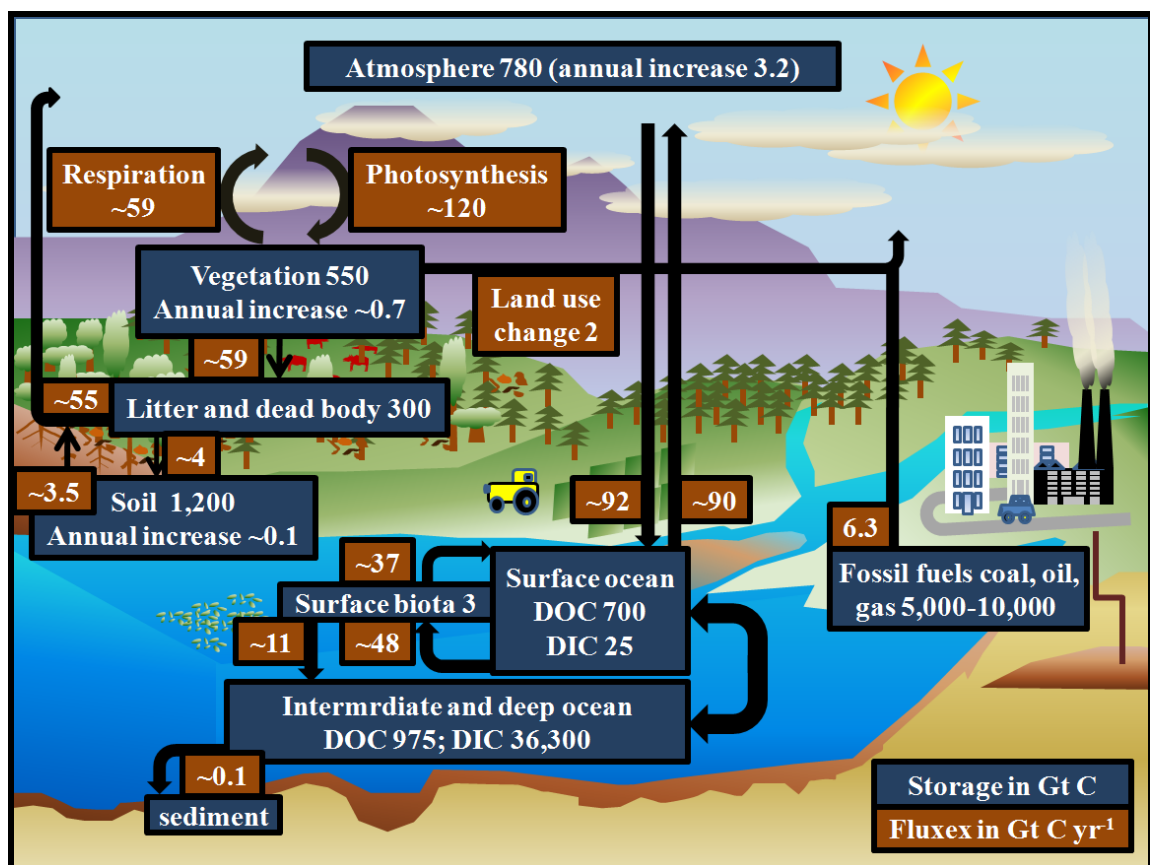


圖 2 全球生物和物理碳循環示意圖 (改自：Houghton, 2007)。圖中藍色方框為碳保存 (carbon conservation) 之量，單位為十億噸碳 (Gt C)；土磚紅方框則為碳通量 (carbon fluxes)，單位為每年十億噸碳 (Gt C yr⁻¹)。

(2) 大時間尺度的地質系統

待有機碳沉積於海洋地殼 (oceanic crust) 或陸域地殼 (continental crust) 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 (fossil fuels)；或在板塊隱沒處，隨著時間之推移，進入軟流圈 (asthenosphere)，而後可能從中洋脊 (oceanic spreading ridge) 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 (volcano) 噴發 CH_4 、 CO_2 等氣體回到大氣之中 (圖 3) (何春蓀，2006)。

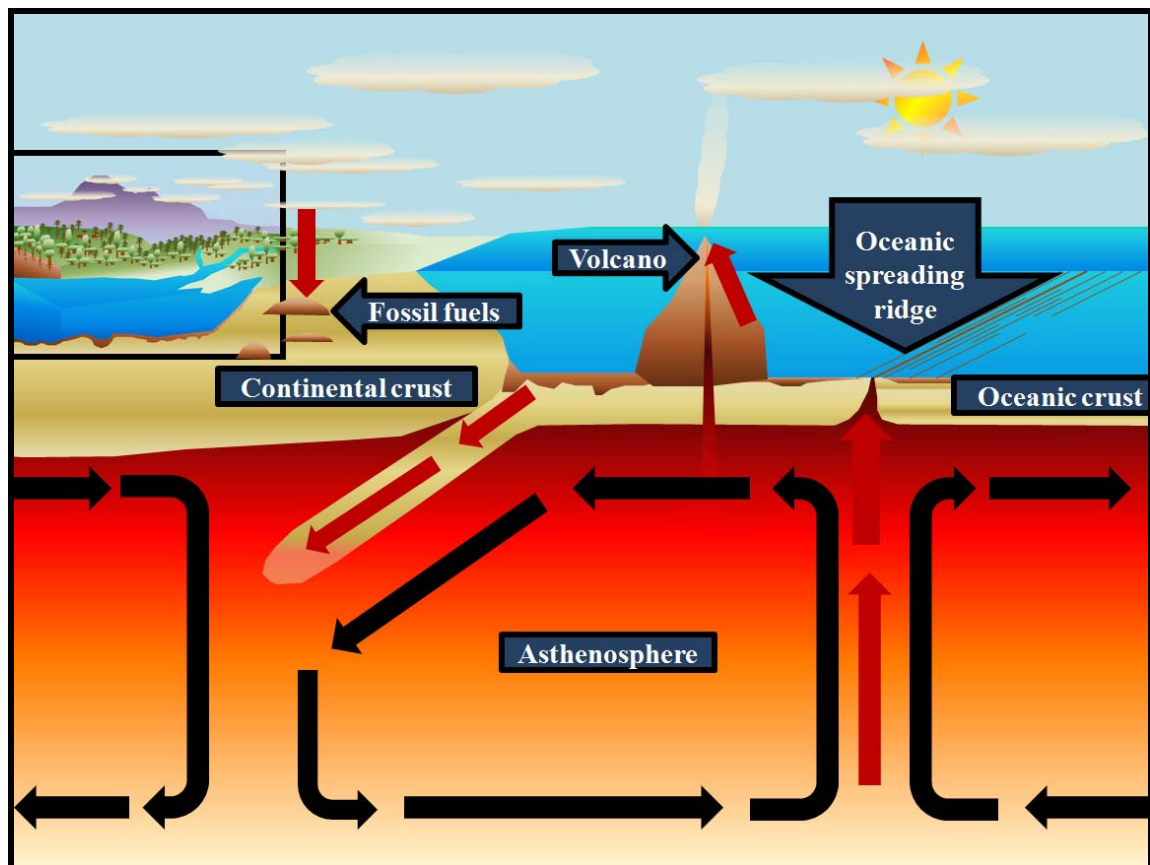


圖 3 大時間尺度的地質系統碳循環 (何春蓀，2006；Houghton，2007)。有機碳沉積於海洋地殼或陸域地殼，部分因高溫高壓生成液態可燃的有機液體與氣體，即為石化燃料；或在板塊隱沒處，隨著時間之推移，進入軟流圈，從中洋脊冷凝，重新回到海底，亦可能從火山噴發 CH_4 、 CO_2 等氣體回到大氣之中。

2. 碳循環在氣候變遷下的回饋迴路

很明顯地，在海洋、陸地與大氣之間，有許多生物與非生物機制在調控碳的循環途徑。而氣候變遷，近年也促使碳循環的途徑發生某些回饋迴路，但非常的複雜，將在下列的 a-t 做討論 (圖 4)：

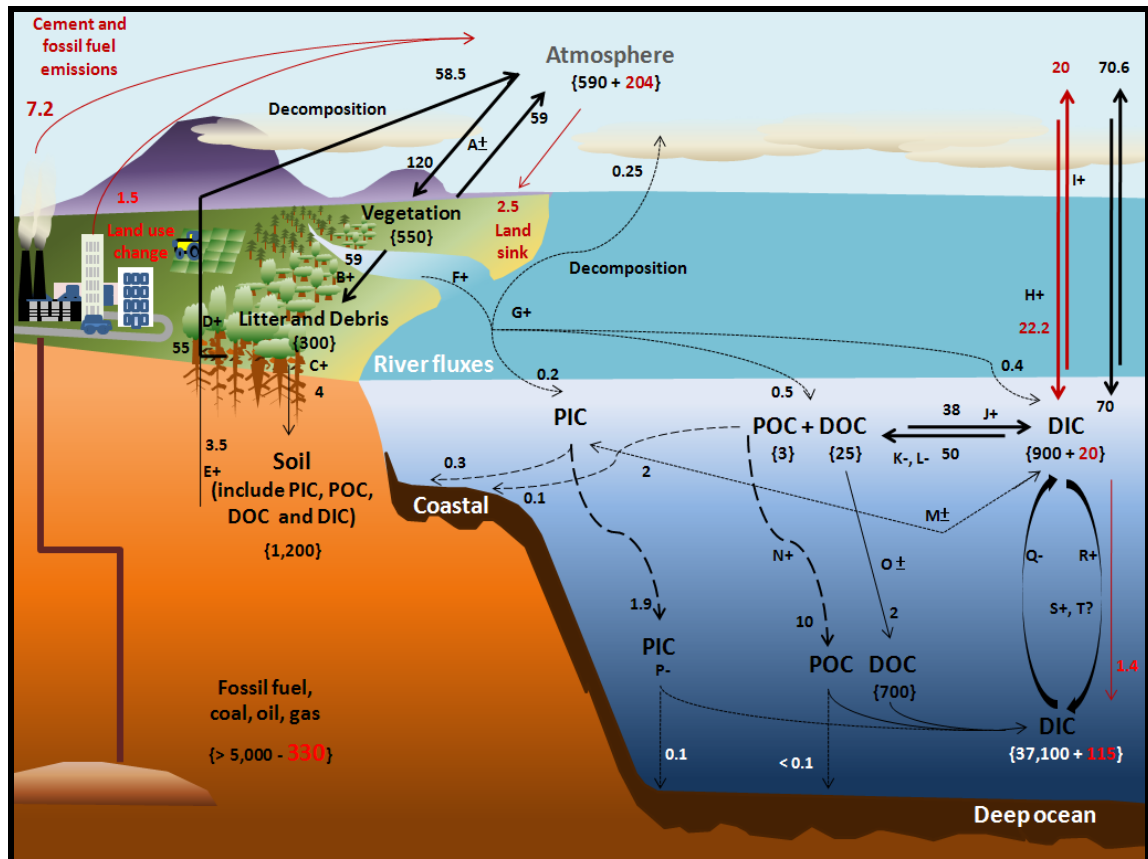


圖 4 全球碳循環的回饋機制。

- 近數十年間，熱帶 (Lewis *et al.*, 2009) 與溫帶 (Myneni *et al.*, 2001) 森林，因氣候變遷，已有顯著的增長。且未來淨初級生產量 (Lewis *et al.*, 2009; Malhi, 2010) 將會持續增加。然而，在某些地區也會有蟲害、森林火和乾旱的發生，可能也會使森林林木的死亡率升高，造成森林衰退 (Williams *et al.*, 2010)。
- 在增加二氧化碳濃度之下，因為森林的淨初級生產力上升，枯落物量也跟著上升 (Liu *et al.*, 2005)，導致有更多的有機質在地表層累積 (Schlesinger and Lichter, 2001)。

- c. 新鮮有機質的輸入量上升，使土壤有機質額外的分解量增加 (Bingeman *et al.*, 1953; Kuzyakov *et al.*, 2000)。
- d. c. 會導致土壤 CO₂ 排放更多量，甚至使原本儲存的碳量釋放回大氣之中 (Pendall *et al.*, 2004; Heimann *et al.*, 2008)。
- e. 最近的研究發現，在熱帶 (Sayer *et al.*, 2011) 與溫帶 (Fontaine *et al.*, 2007) 森林的土壤有機碳增加，會促發深層土壤的碳分解，生成 CO₂。
- f. 人為造成的氣候變遷會增加海洋表面溫度 (Webster *et al.*, 2006)，強降雨和洪水在許多地區也持續發生 (Pall *et al.*, 2011; Min *et al.*, 2011)，強烈颶風 (颱風) 侵襲陸域生態系統的頻率增加 (Emanuel, 2005; Webster *et al.*, 2006; Hoyos *et al.*, 2006)，導致陸域的碳將轉移至海洋的量更多 (Ittekkot, 1988; Schlünz and Schneider, 2000; Stallard, 1998; Hilton *et al.*, 2008; Kao *et al.*, 2010)。
- g. 河口是陸地與海洋分解有機物質主要的交互作用帶，會導致 CO₂ 大量的從河水中排至大氣層。因為最近大氣中的 CO₂ 濃度上升，高緯度與中緯度的大陸棚吸取 CO₂ 的能力上升，但是低緯度則相反，釋放更多 CO₂，導致更多碳排到海洋。
- h. 有許多因子，例如鹼度 (alkalinity) 與氣溫，會調控海水表面的可溶性無機碳 (dissolved inorganic carbon, DIC) 的二氧化碳容量 (capacity)。可以用 Revelle factor 來表示：

$$(\delta\rho\text{CO}_2 / \delta\text{DIC}) / (\rho\text{CO}_2 / \text{DIC})$$

近 250 年來，增加的 ρCO_2 會增加 Revelle factor，導致海洋表面吸收更多 CO₂ 的效率變低 (Sabine *et al.*, 2004a)。

- i. 即使 Revelle factor 因為溫度的增加而減少，海水表面 CO₂ 的溶解度也會減少。由於這是海洋主要的吸碳途徑，平均氣溫增加，將會使原本是吸收碳的海洋，轉變成碳排放的來源 (Goodwin and Lenton 2009)。
- j. 增加碳濃度會直接影響到生物因子，但是非常難量化。例如最近有研究證實，

異營消費者與初級生產量之間的平衡會有所轉移。被增加的呼吸作用與循環導致 DIC 在海洋的量增加，且會減少有機碳的留存 (Wohlers *et al.*, 2009)。

- k. 同樣的，增加碳的濃度，會使浮游生物增多，減緩 DIC 的生成 (Riebesell *et al.*, 2007)。
- l. 然而，在脫氮作用盛行、硝酸鹽缺乏的海水中會導致透光層 (euphotic zone) 的固氮作用被激發 (Deutsch *et al.*, 2007)。
- m. 海水中的碳酸鈣化的時候會激發 CO₂ 的釋放，即 CO₂ 會被釋放，在鈣化作用減少的情況。高緯度冷水對於 pH 值下降比溫帶與熱帶的水域還要敏感，即 pH 值溫和的改變，也許會導致方解石 (calcite) 或文石 (aragonite) 在兩極海域附近未達到飽和 (Orr *et al.*, 2005)。海洋酸化會影響某些有機體的鈣化速率。減少 pH 值會導致鈣化減少，包括有孔蟲 (foraminifers)、珊瑚 (corals) 和翼足類動物 (pteropods)、鈣板金藻 (coccolithophorides) 等 (Doney *et al.* 2008; Riebesell *et al.* 2000)。然而，目前仍不清楚這些鈣化生物是否能在許多世代之後適應不同的碳酸環境 (Langer *et al.* 2006)，或者這些鈣化生物仍然會有相同的反應途徑 (Iglesias-Rodriguez *et al.* 2008, Riebesell *et al.* 2008)。
- n. 碳酸鈣 (CaCO₃) 可當作 POC 的壓艙石，當 POC 在海洋表面大量累積時，碳酸鈣可讓 POC 在分解前運送到更深的海裡 (Armstrong *et al.* 2002)。但這也可能因為鈣化速率的降低而減少 POC 往深海處流動。而這迴路已被證明可持續減少大氣中的 CO₂ (Kwon *et al.*, 2009)。
- o. 可溶性有機物質 (dissolved organic matter, DOM) 往往含有許多的碳，特別是一些難分解的碎屑，並且會有效率的向下運送至深海 (Hopkinson and Vallino, 2005)。
- p. 因為全球暖化，導致海洋溶解顆粒性無機碳 (particulate inorganic carbon, PIC) 的程度變高。使 PIC 沉澱至海洋底部的量減少。
- q. 減弱的經向翻轉環流 (meridional overturning circulation, MOC) 也會減少深海上湧的 DIC。

- r. 相似地，大多數氣候模式預測 MOC 在未來暖化的世界會減弱，這也會阻礙海洋表層水運送大氣中 CO₂ 到深海。而 q 與 r 的平衡，目前仍未定論 (Sarmiento and Le Quere 1996; Zickfeld *et al.*, 2008)。由於 MOC 也控制了大量營養物質的供給，使海水表面的生物群落更豐碩，導致淨下沉的碳量會比上升的量還多，是正回饋機制，但會因為地區的不同而有很大的差異 (Zickfeld *et al.*, 2008)。
- s. 氣候變化會間接影響浮游植物社會 (phytoplankton community) 吸取人為排放 CO₂ 的量。例如，鈣板金藻傾向在營養條件限制的狀態下生成方解石質地的貝殼，而矽藻 (diatoms) 則傾向在營養豐富的環境生長。在全球暖化的情況之下，透光層的養分供給會減少，使鈣板金藻的生長比矽藻更好，總體來說，會讓大氣中的碳鈣化成方解石，並且沉到深海裡 (Cermeno *et al.*, 2008)。
- t. 由於氣候變遷，導致洋流循環產生不可逆的變化，並且直接或間接影響到碳循環。例如，南半球的海洋是重要的碳匯，可吸取將近 40 % 海洋吸收的總碳量 (Sabine *et al.*, 2004)。Le Quere 等 (2007) 發現，南半球海洋吸取人為排放的碳已經在數十年間變少了。然而，這篇報告卻也忽視了大氣與海洋的交換 (Law *et al.*, 2008, Zickfeld *et al.*, 2008b)。進一步的觀察記錄表明，南半球海洋增加的風壓，對於南極環流的經向翻轉環流影響不大，因為埃克曼運輸 (Ekman transport) 的量會被增加的渦流通量 (eddy flux) 補償。因此，關於增加風壓的淨影響應該不大 (Böning *et al.*, 2008)。故不能準確的預測碳循環的回饋機制是正還是負。

從上述的碳循環與回饋機制看來，非常複雜，亦尚未完全被研究透徹。其中關於海洋與陸地之間，只有關於 DOC 輸出量的研究報告，以漂流木形式輸送碳的相關的研究更是稀少。

(二) 漂流木與其在生態上的功能

1. 漂流木與颱風之共伴關係

漂流木為可移動的巨型木質殘體 (coarse woody debris, CWD)，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)。惟近年肇因於變更土地利用型及大量開採石化燃料，導致二氧化碳排放量在工業革命後日與劇增 (圖 2)，溫室效應加劇，連帶造成冰川融化、海洋暖化、海洋面積擴大、海平面上升，更進一步影響大氣環流與洋流，引起全球氣候變遷，預測將帶來更多極端氣候 (IPCC, 2008)，且目前有越來越多研究認為，全球暖化使大部分海洋表面平均溫度 (surface sea temperature, SST) 上升，低緯度地區 4 和 5 級的強烈颶風 (颱風) 生成頻率大幅增加 (Emanuel, 2005; Webster *et al.*, 2006; Hoyos *et al.*, 2006) (表 1)，亦造成地球中低緯度區域的陸域生態系統擾動更為頻繁，而漂流木亦伴隨颶風 (颱風) 事件發生而產生 (張獻仁等，2010)。

表 1 近年全球各大洋 4 和 5 級颶風 (hurricanes) 生成的數目與總颶風生成數目之百分比 (Webster *et al.*, 2006)

Basin	Period			
	1975-1989		1990-2004	
	Number	Percentage	Number	Percentage
East Pacific Ocean	36	25	49	35
West Pacific Ocean	85	25	116	41
North Atlantic	16	20	25	25
Southwestern Pacific	10	12	22	28
North Indian	1	8	7	25
South Indian	23	18	50	34

註一：Number 表示時間間隔內，4 級以上強烈颶風生成之數目。

註二：Percentage 係指時間間隔內，4 級以上強烈颶風生成數目占總颶風生成數目之比例。

2. 漂流木的生態功能

Sedjo (1993) 認為，整個陸域生態系統中，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 (carbon pool)。而森林生態系的碳匯分為 (1) 地上部分，主要有幹 (stems)、枝 (branches)、葉 (leaves) 等；(2) 地下部分，主要有土壤中的顆粒性有機碳 (particulate organic carbon, POC)、可溶性有機碳 (dissolved organic carbon, DOC)、可溶性無機碳 (dissolved inorganic carbon, DIC)、顆粒性無機碳 (particulate inorganic carbon, PIC)、粗根 (coarse roots)、細根 (fine roots)、枯落物 (litterfall) 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 (coarse woody debris, CWD)，占枯落物輸入地面上總量的 3-24 % (Laiho and Prescott, 1999)，理應會有緩效性釋放養分的功能，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 CWD 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)，此則顯示，CWD 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。但另一方面，漂流木卻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，通常係由枯落物的分解與植物根部和土壤微生物吸收所形成。在穩定的狀態下，大部份由枯落物分解所釋出的養分，會再度被植群社會、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，可能會以可溶性有機物 (dissolved organic matter, DOM) 和已被分解成可溶性無機物 (dissolved inorganic matter, DIM) 的形式被雨水沖刷於河川溪流中，或隨土壤水之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，降雨量高之地區，顆粒性有機物 (particulate organic matter, POM)，包括直徑 $> 0.45\mu\text{m}$ 的土壤顆粒性有機物 (soil particulate organic matter, sPOM)、枯落物 (litterfall)、新鮮枝葉 (fresh leaves and branches)、新鮮巨型木質殘體 (fresh coarse woody debris, fCWD)、原本既有的巨型木質殘體 (old coarse woody debris, oCWD) [後二者樹幹的部分，如藉由洪水或土石流運輸後，可概括稱為漂流木 (driftwood)，而 oCWD 亦為枯落物的其中一種型式] 等，將隨土壤水和地表逕流流失，最後匯流於河川 (Hilton, 2008)；或者藉由洪水運輸的方式，直接從陸地沖刷至海洋。

河流運輸過程中，雖然部分有機物會被分解，碳素可能會釋放回大氣之中，但另一部分有機物的碳素，大部分將以穩定的石墨狀態，少部分則以其它有機或無機態碳，輸出至海洋 (圖 5) (Bouchez *et al.*, 2010)，再以異重流 (hyperpycnal flow) 之方式，沉積於大陸棚和海底 (Kao *et al.*, 2010)。故全球極端氣候頻率與強度加劇，也許是整個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 (positive feedback) 機制，可使大氣中的 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 (carbon conservation) 之效果，使碳素暫時進入長地質時間尺度。

因極端氣候事件生成的 CWD，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 CWD 分解速率常數 ($F_{\text{cwd}}/M_{\text{cwd}}$) 約在 0.09 yr^{-1} (此處 F_{cwd} 為每年分解 CWD 的質量， M_{cwd} 則為 CWD 的總質量，故分解速率常數的意義為，每年有多少比例的物質分解)，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，CWD 是其他低海拔生態系可持續增加數十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

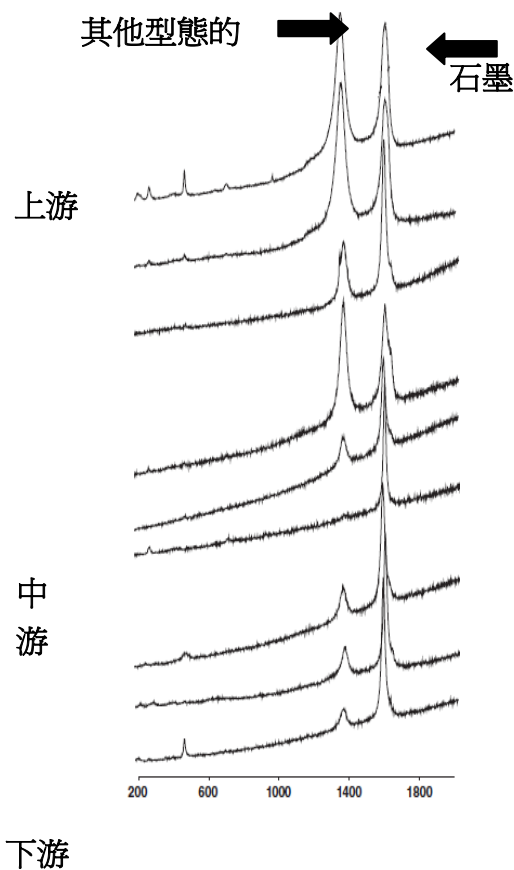


圖 5 亞馬遜河上、中、下游河床沉積物之碳主要型態 (修改自 Bouchez *et al.*, 2010)。隨著河流從上游運輸碳源至下游途中，石墨較為穩定，不易被生物分解與氧化。

Raman shift (cm^{-1})

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)。

惟目前量化漂流木養分的基礎資訊仍略顯不足，故本計畫目的在於，藉由林務局各林管處漂流木的規模大小和養分分析，建立漂流木之碳、氮、磷、鉀、鈉、鈣和鎂之總量回歸式，並以生態系觀點來重新檢視漂流木的在地功能，甚至是擴大檢視漂流木在全球的「節能減碳」所發揮的效益。

二、材料與方法

本計畫重要工作項目有漂流木樣本蒐集、漂流木之碳與養分含量測定、林管處漂流木總量估算資料之彙整、推估各林管處漂流木碳和營養源輸出量並建立不同規模漂流木的養分回歸式，其詳細實施辦法如下說明：

(一) 漂流木樣本蒐集

本計畫試驗對象為莫拉克颱風後的漂流木樣本蒐集，依序於南、東、中與北臺灣四地區各省道可及處之中央管河川 (圖 6) 與南、東部主要縣市管河川沿岸或集材廠，以手鋸或鏈鋸，隨機採取全台各林管處集水區流域之漂流木圓盤。取得途徑於下列所示：

1. 南臺灣

沿台 21 線 (高屏河流域)、台 27 線 (東港河流域)、台 17 線 (林邊河流域)、台 9 線 (楓港河流域)、台 6 線 (保力河流域)、屏東縣道 199 號 (四重溪流域)、屏東縣道 200 號 (港口溪流域)、台 1 線 (鹽水溪、二仁溪、率芒溪、枋山溪流域)、台 3 線 (曾文溪流域)、台 61 線西濱快速道路 (急水溪流域)、嘉義縣道 163 號 (八掌溪流域)、嘉義縣道 166 號 (朴子溪、北港溪流域) 等主要幹道搜集台灣南部地區各主要河川沿岸漂流木樣本。

2. 東臺灣

沿台 9 線 (卑南溪、秀姑巒溪、和平溪流域)、台 11 丙 (花蓮溪流域) 等主要幹道搜集台灣東部地區各主要河川沿岸漂流木樣本。

3. 中臺灣

沿台 1 線 (濁水溪、烏溪、大安溪、中港溪流域)、台 8 線 (大甲溪流域)、台 6 線 (後龍溪流域) 等主要幹道搜集台灣中部地區各主要河川沿岸漂流木樣本。

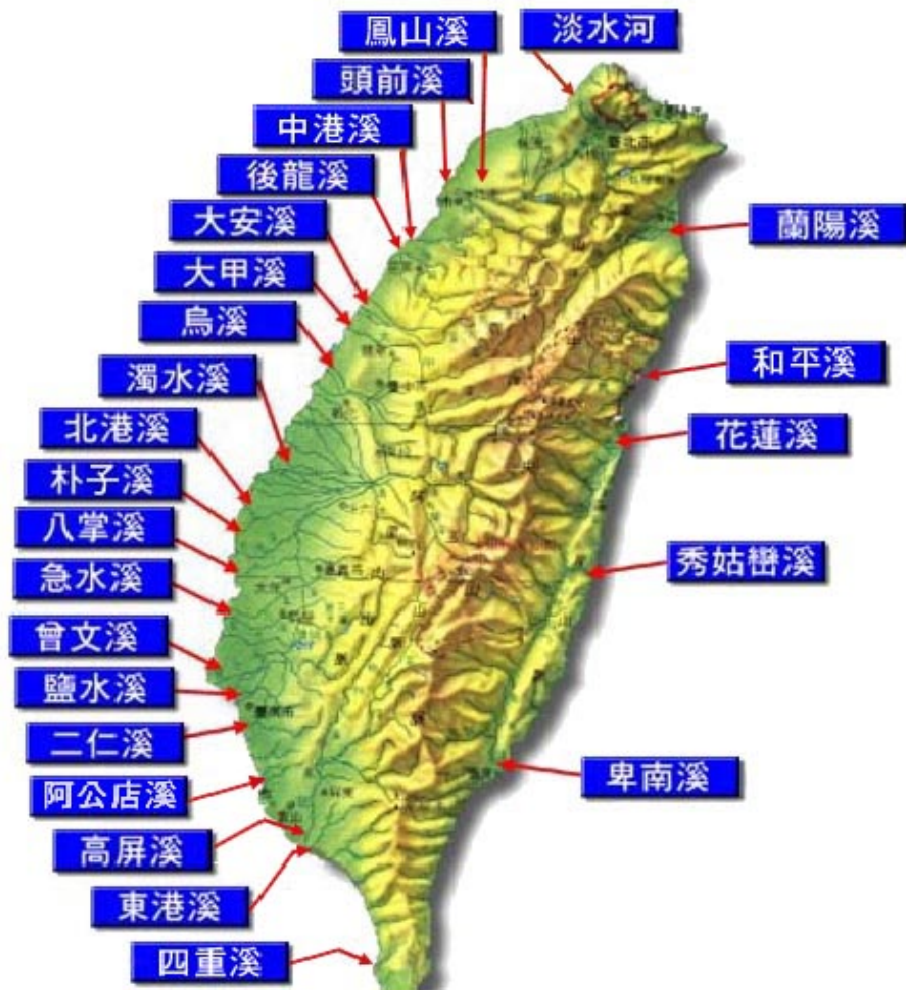


圖 6 經濟部水利署訂定之中央管河川示意圖 (經濟部水利署, 2008)。

4. 北台灣

沿台 68 東西向快速道路 (頭前溪流域)、新竹線道 118 號 (鳳山溪流域)、台 15 線和台 2 線 (淡水河流域)、台 7 線 (蘭陽溪流域) 等主要幹道到達台灣北部地區各主要河川沿岸漂流木樣本。

(二) 漂流木之碳與養份含量測定

1. 漂流木 P、K、Ca、Mg 含量之測定

參考 Allen 等人 (1986) 所提出的消化方法，並加以改良，將固態之漂流木粉之養分離子溶於高溫強酸之中，再以感應偶合電漿-原子發射光譜法

測定樣本中 P、K、Ca、Mg 的含量，其詳細步驟如下列所示：

- (1) 取得之樣本，利用研磨機磨成粉末，再以網目為 0.149 mm (mesh NO.100) 之標準篩過篩。
- (2) 而後秤取已過篩之粉末約 0.1 g 於 50 ml 消化管中，依序加入 10 ml 65 % HNO_3 (aq)、2 ml 96% H_2SO_4 (aq) 搖晃，使樣本初步降解後，再加入 2 ml 60% HClO_3 (aq) ，使之充分混合均勻。
- (3) 利用已先預熱 200°C 之電器加熱板，加熱 2 hr，再升溫至 375°C 1.5 hr，而後再次降溫至 200°C，煮至液體澄清。
- (4) 消化後所得澄清液，先以去離子水約略稀釋（防止濾紙因酸蝕破裂），並使用 Whatman 42 號濾紙過濾，濾液定量至 50 ml (照片 6)，以 100 ml 之塑膠罐盛裝，所得溶液，即可以感應偶合電漿質譜層析儀 (Inductively Coupled Plasma-atomic emission Spectrometry, ICP-AES, Leeman Labs. U.S.A.) 分析樣本。

2. 漂流木 C、N、S 含量之測定

參造上述樣本磨粉之步驟，將漂流木樣本破碎化後，使用微量天平精秤過篩之漂流木樣品粉末約 5-12 mg 於儀器專用小錫盒內 (照片 8)，摺疊包裝後送入元素分析儀 (CHNOS Elemental Analyzer, vario EL, Germany)，此儀器原理係利用 WO_3 作為催化劑，將分析樣本燃燒氧化成氣體，利用不同管住的吸附與脫附，使二氧化碳及氮氣分離，再利用熱導偵測器 (thermal conductivity detector, TCD) 進行偵測，即可得樣本 C、N、S 的濃度。

(三) 林管處漂流木總量估算資料蒐集

在莫拉克颱風造成漂流木大量輸出森林期間，依據林務局莫拉克颱風漂流木清理一般地區統計資料表，全台各林管處漂流木總量估算如圖 7 所示。

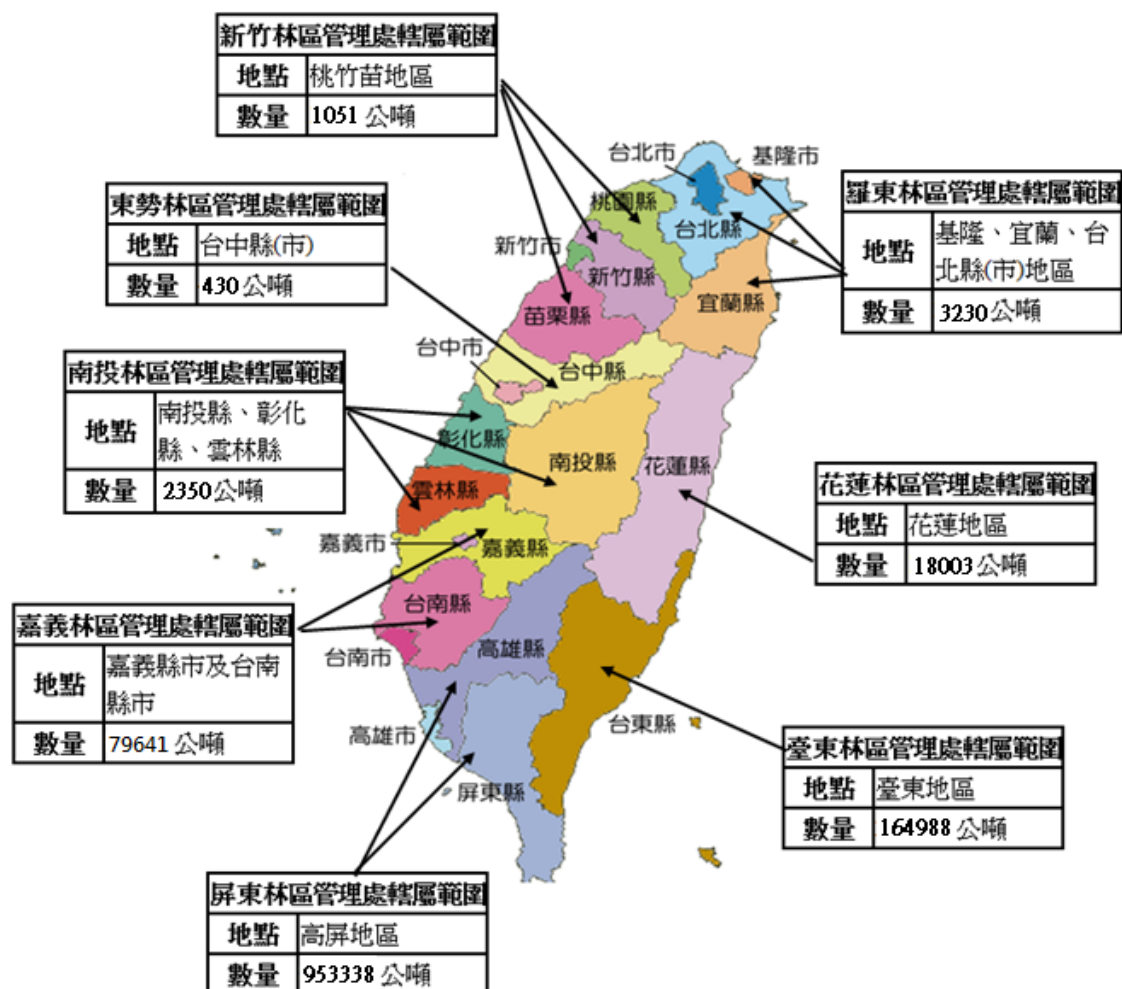


圖 7 莫拉克颱風漂流木清理一般地區統計圖。

屏東林區管理處轄屬範圍共有漂流木 953,338 公噸，台東林區管理處轄屬範圍有 164,988 公噸，嘉義林區管理處轄屬範圍 79,641 公噸，花蓮林區管理處轄屬範圍 18,003 公噸，南投林區管理處轄屬範圍 2,350 公噸，羅東林區管理處轄屬範圍 3,230 公噸，新竹林區管理處轄屬範圍 1,051 公噸，東勢林區管理處轄屬範圍 430 公噸，全台共計 1,223,031 公噸。

(四) 各林管處漂流木碳和營養源輸出估算

各林管處漂流木碳和營養源輸出量之估算，係以各林區管理處轄屬範圍統計資料之常態漂流木重量，經長時間之放置而趨近氣乾 (air dry) 重 (W_n)，乘以樣本漂流木粉 105°C 爐乾/漂流木樣本氣乾重 (C)，再乘上各養分元素含量 (E_r %)，如式 (1) 所示，即可求出各林管處漂流木碳和營養源從森林生態系輸出總量。而求得之總輸出量，再除以各林管處森林地面積，即可求得單位面積養分輸出量。

$$W_e = W_n \times C \times E_r \% \dots\dots\dots (1)$$

$$C = W_{ds} / W_{ns} \dots\dots\dots (2)$$

W_e ：碳或養分元素總重量 (Mg)

W_n ：漂流木氣乾重 (Mg)

C ：樣本 105°C 漂流木粉爐乾重/漂流木樣本氣乾重(g/g)

E_r ：碳或養分元素含量 (%)

W_{ds} ：漂流木樣本 105°C 爐乾重 (g)

W_{ns} ：漂流木樣本氣乾重 (g)

(五) 建立不同規模漂流木的養分回歸式

用莫拉克颱風生成之漂流木為基本數據資料，以各林區管理處轄屬範圍統計資料之常態漂流木重量，經長時間之放置而趨近氣乾 (air dry) 重 (W_n)，乘以樣本漂流木粉 105°C 爐乾/漂流木樣本氣乾重 (C)，再乘上各養分元素含量 ($Er\%$)，如式 (1) 所示，即可求出各林管處漂流木碳和營養源從森林生態系輸出總量。而各林區管理處輸出的總量，作為不同漂流木生成規模的常態重量資料點，再將個別推算出各林區管理處 C、N、P、K、Ca、Mg 養分元素的總重量，而後，與各林管區的漂流木常態重，建立回歸推估模式。且模式與參數務必越簡單越好，如此才能在往後颱風來時，估算各種養分元素總量的實際應用價值。

四、結果與討論

(一) 莫拉克颱風期間漂流木各種養分元素輸出森林生態系之總量

本計畫研究結果如表 2 所示，各林區管理處漂流木生物量由高至低依序為屏東林區管理處 (889,058 Mg)、台東林區管理處 (153,864 Mg)、嘉義林區管理處 (74,271 Mg)、花蓮林區管理處 (16,789 Mg)、羅東林區管理處 (3,012 Mg)、南投林區管理處 (2,192 Mg)、新竹林區管理處 (980 Mg)、東勢林區管理處 (401 Mg)，全臺灣林地產生漂流木生物量共 1,140,567 Mg；而各林區管理處林地單位面積輸出碳量由高至低依序為屏東林管處 ($1,358.94 \text{ kg ha}^{-1}$)、嘉義林管處 ($269.22 \text{ kg ha}^{-1}$)、台東林管處 ($253.53 \text{ kg ha}^{-1}$)、花蓮林管處 (22.38 kg ha^{-1})、羅東林管處 (4.31 kg ha^{-1})、南投林管處 (3.15 kg ha^{-1})、東勢林管處 (1.76 kg ha^{-1}) 和新竹林管處 (1.65 kg ha^{-1})，全臺灣林地平均單位面積輸出漂流木的碳量為 $261.61 \text{ kg ha}^{-1}$ ，相當於每公頃可抵消 25 個台灣人 1 年製造的碳量，其中以屏東林管處轄區的漂流木生物量與林地單位面積輸出碳量最高。

根據台灣中央氣象局 (central weather bureau, ROC) 建立的 TDB 防災颱風資料庫系統，配合表 2 結果顯示，各林區管理處林地單位面積輸出碳量與單日累計最大降雨量呈現顯著正相關 (圖 8)，又由於台灣地勢險峻陡峭且位處歐亞板塊與菲律賓海板塊交接處，本即屬地震頻繁之地區，地層極不穩定，倘遇颱風帶來豪大雨，雨量遠超過森林植群所能負載的範圍，地表逕流流量大增，即可能產生坡地崩塌與土石流洪水氾濫之現象 (張獻仁等，2009)，導致大量漂流木

表 2 各林管處轄區內各縣市林地輸出碳量

林管處	縣市別	森林地面積 (ha)	漂流木			林地單位面積 輸出碳量 (kg ha ⁻¹)
			常態重 (Mg)	爐乾生物量 ¹⁾ (Mg)	碳量 (Mg)	
屏東	高雄縣市	172,900	764,530	712,981	348,303	2,014.48
	屏東縣	146,700	188,808	176,077	86,014	586.33
	小計	319,600	953,338	889,058	434,317	1,358.94
台東	台東縣	279,900	164,988	153,864	70,962	253.53
	小計	279,900	164,988	153,864	70,962	253.53
嘉義	嘉義縣市	83,500	13,215	12,324	5,584	66.87
	台南縣市	41,500	66,426	61,947	28,068	676.34
	小計	125,000	79,641	74,271	33,652	269.22
花蓮	花蓮縣	359,500	18,003	16,789	8,046	22.38
	小計	359,500	18,003	16,789	8,046	22.38
南投	南投縣	298,000	2,350	2,192	1,007	3.38
	彰化縣	6,000	—	—	—	—
	雲林縣	15,800	—	—	—	—
	小計	319,800	2,350	2,192	1,007	3.15
羅東	宜蘭縣	163,700	2,085	1,944	899	5.49
	台北地區	159,500	1,145	1,068	493	3.09
	小計	323,200	3,230	3,012	1,393	4.31
新竹	桃園縣	42,200	1,049	978	436	10.33
	新竹縣市	100,700	1	0.9	0.4	0.00
	苗栗縣	122,000	0.6	0.6	0.3	0.00
	小計	264,900	1,051	980	436.7	1.65
東勢	台中縣市	110,500	430	401	195	1.76
	小計	110,500	430	401	195	1.76
總計		2,102,400	1,223,031	1,140,567	550,010	261.61

1) 常態重 (Wns) 乘以本試驗 C = 0.9326 即可得爐乾生物量。

表 3 各林管處轄區內各縣市林地單位面積 N、P、K、Ca、Mg、S 養分輸出量

林管處	縣市別	林地單位面積漂流木養分輸出量 ^{1,3)} (g ha ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
屏東	高雄縣市	4,360.08	15,565.70	12,452.60	22,751.33	6,968.81	284.53
	屏東縣	1,269.07	4,530.64	3,624.52	6,622.13	2,028.38	82.82
	小計	2,941.27	10,500.48	8,400.41	15,347.84	4,701.10	191.94
台東	台東縣	622.82	2,133.82	1,716.84	2,674.11	977.99	130.28
	小計	622.82	2,133.82	1,716.84	2,674.11	977.99	130.28
嘉義	嘉義縣市	331.64	607.54	190.88	1,069.19	166.09	38.37
	台南縣市	3,354.10	6,144.47	1,930.54	10,813.40	1,679.76	388.10
	小計	1,335.10	2,445.80	768.45	4,304.27	668.63	154.48
花蓮	花蓮縣	53.35	180.58	135.59	251.10	79.08	6.30
	小計	53.35	180.58	135.59	251.10	79.08	6.30
南投	南投縣	8.73	27.95	17.45	37.33	12.94	0.84
	彰化縣	— ²⁾	—	—	—	—	—
	雲林縣	—	—	—	—	—	—
	小計	8.14	26.04	16.26	34.79	12.06	0.78
羅東	宜蘭縣	12.87	46.32	33.93	67.59	20.83	1.17
	台北地區	7.25	26.11	19.12	38.09	11.74	0.66
	小計	10.10	36.35	26.62	53.03	16.34	0.92
新竹	桃園縣	53.03	95.73	22.44	73.95	21.31	1.85
	新竹縣市	0.02	0.04	0.01	0.03	0.09	0.00
	苗栗縣	0.01	0.02	—	0.01	0.04	0.00
	小計	8.46	15.28	3.58	11.80	34.01	0.29
東勢	台中縣市	3.78	14.03	11.14	20.13	6.27	0.29
	小計	3.78	14.03	11.14	20.13	6.27	0.29
總計		622.60	2,068.84	1,582.05	3,003.98	907.09	57.10

2) ¹⁾ 由表 2 各養分之總量配合表 1 之各林管處單位面積換算而得。

3) ²⁾ 量過稀少無法測得。

4) ³⁾ 上述皆為 96 小時內之輸出量。

表 4 各林管處轄區內各縣市林地 N、P、K、Ca、Mg、S 養分輸出總量

林管處	縣市別	漂流木養分總量 ¹⁾ (Mg)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
屏東	高雄縣市	753.86	2,691.31	2,153.05	3,933.70	1,204.91	49.20
	屏東縣	186.17	664.64	531.72	971.47	297.56	12.15
	小計	940.03	3,355.95	2,684.77	4,905.17	1,502.47	61.35
台東	台東縣	174.33	597.26	480.54	748.48	273.74	36.47
	小計	174.33	597.26	480.54	748.48	273.74	36.47
嘉義	嘉義縣市	27.69	50.73	15.94	89.28	13.87	3.20
	台南縣市	139.20	255.00	80.12	448.76	69.71	16.11
	小計	166.89	305.72	96.06	538.03	83.58	19.31
花蓮	花蓮縣	19.18	64.92	48.74	90.27	28.43	2.27
	小計	19.18	64.92	48.74	90.27	28.43	2.27
南投	南投縣	2.60	8.33	5.20	11.13	3.86	0.25
	彰化縣	—	—	—	—	—	—
	雲林縣	—	—	—	—	—	—
	小計	2.60	8.33	5.20	11.13	3.86	0.25
羅東	宜蘭縣	2.11	7.58	5.55	11.06	3.41	0.19
	台北地區	1.16	4.16	3.05	6.08	1.87	0.11
	小計	3.26	11.75	8.60	17.14	5.28	0.30
新竹	桃園縣	2.24	4.04	0.95	3.12	0.90	0.08
	新竹縣市	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
	苗栗縣	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
	小計	2.24	4.05	0.95	3.13	9.01	0.08
東勢	台中縣市	0.42	1.55	1.23	2.22	0.69	0.03
	小計	0.42	1.55	1.23	2.22	0.69	0.03
總計		1,308.95	4,349.52	3,326.10	6,315.57	1,907.06	120.04

¹⁾ 漂流木各項養分含量分別由表 4 而得

²⁾ 量過稀少無法測得。

表 5 各林管處轄區內樣本碳與養分比例 (%)

	N	C	Ca	Mg	K	P
屏東林管處	0.11 a ¹⁾	48.85 a	0.55 a	0.17 a	0.30 a	0.38 a
台東林管處	0.11 a	46.12 a	0.49 a	0.18 a	0.31 a	0.39 a
嘉義林管處	0.22 a	45.31 a	0.72 a	0.11 a	0.13 a	0.41 a
花蓮林管處	0.11 a	47.93 a	0.54 a	0.17 a	0.29 a	0.39 a
南投林管處	0.12 a	45.94 a	0.51 a	0.18 a	0.24 a	0.38 a
羅東林管處	0.11 a	46.25 a	0.57 a	0.18 a	0.29 a	0.39 a
新竹林管處	0.23 a	44.62 a	0.32 a	0.09 a	0.10 a	0.41 a
東勢林管處	0.10 a	48.55 a	0.56 a	0.17 a	0.31 a	0.39 a

¹⁾ 數字後英文字母相同者代表無顯著差異 (使用 HSD、LSD 和 Duncan's 多變域分析)

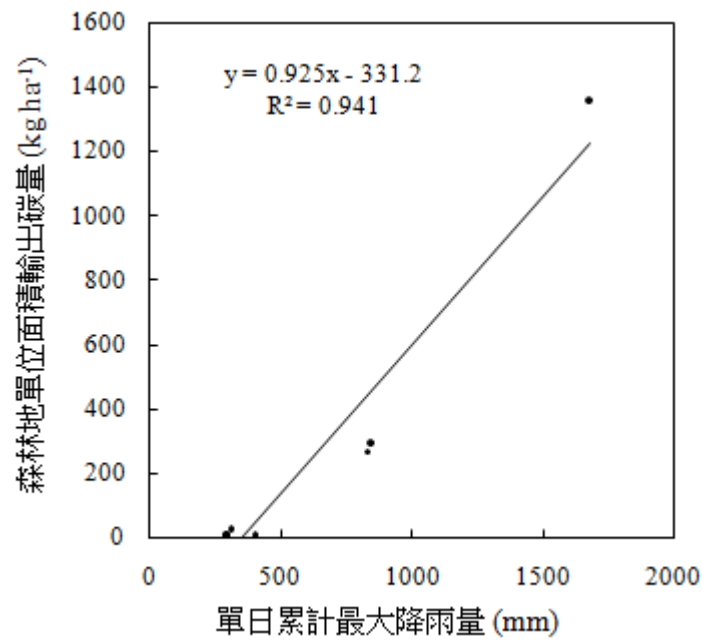


圖 8 莫拉克颱風期間森林地單位面積輸出碳量與單日累計最大降雨量
相關曲線。

產生，而漂流木中主成分大都為纖維素 (cellulose)、半纖維素 (hemicelluloses) 和木質素 (lignin)，綜合之碳濃度約占總漂流木絕乾重 50 %，此正意味著，降雨強度越大之地區，其林地平均單位面積輸出碳量亦高。

森林生態系統在莫拉克颱風侵擾期間，單位面積平均約輸出碳 261.61 Mg ha⁻¹；氮 622.60 g ha⁻¹；磷 2,068.84 g ha⁻¹；鉀 1,582.05 g ha⁻¹；鈣 3,003.98 g ha⁻¹；鎂 907.09 g ha⁻¹；硫 57.10 g ha⁻¹ (表 2、3)。

通常，森林生態系內之養分與有機物質 (organic matter, OM) 會藉由山區降水的淋洗作用 (leaching)，以滲流的土壤內形成的地下水和地表逕流匯流而成之溪流水形式，輸出森林生態系統 (Aber *et al.*, 1989)。但最近30年間的氣象資料指出，因為全球暖化增加海洋表面的平均溫度，導致熱帶氣旋的破壞力與出現頻率大幅上升 (Emanuel, 2005; Webster *et al.*, 2005; Hoyos *et al.*, 2006)，將對低緯度地區的陸域生態系統有更多衝擊與運輸。而全世界颶風密度最高的地區是東亞的菲律賓、台灣、中國、日本一帶，尤以台灣為最。颱風遇陸地或往北緯移動後，因水汽與海洋表面溫度不足而減弱，高山更會破壞颱風的結構，常使颱風消散。因此，台灣相較於中國和日本更易受颱風衝擊。

而颱風高強度的降水，將使地層因無法承受突來的壓力，瞬間與地表植被一同輸出山區林地，故有大量的土石流與漂流木，其中包含巨型有機物質 (coarse organic matter, COM)，蘊含大量的碳素與養分，並從森林生態系統流失。本試驗結果 (表 3、4) 與 Dise 和 Wright (1995) 的結果比較發現，一般正常的森林，約輸出 1 至 75 kg N ha⁻¹ yr⁻¹，然而，單一莫拉克颱風在南部高雄地區，96 小時即以漂流木的形式輸出了至少 4.3 kg N ha⁻¹ (表 3)，還未包括其它形式 (如以河流中的顆粒有機物或無機離子型態運輸)，即有如此輸出量，著實驚人。

(二) 不同漂流木總量規模的養分回規模式與應用

建立不同規模漂流木的養分回歸模式，可供未來迅速且精準的估算各種養分元素輸出森林生態系的總量，其結果如圖 9 所示，而各種養分元素總量與漂流木常態重之回歸模式則如式 (3) 至 式 (8) 所示：

$$(一) C: y=0.428850701955987x \dots \dots \dots (3)$$

$$(二) N: y=0.00125108432981582x \dots \dots \dots (4)$$

$$(三) P: y=0.00366080180687816x \dots \dots \dots (5)$$

$$(四) K: y= 0.0025911348546045x \dots \dots \dots (6)$$

$$(五) Ca: y=0.0049564946792393x \dots \dots \dots (7)$$

$$(六) Mg: y=0.00154454505965788x \dots \dots \dots (8)$$

y: 各種養分元素重 (Mg, or kg)

x: 漂流木常態重 (Mg)

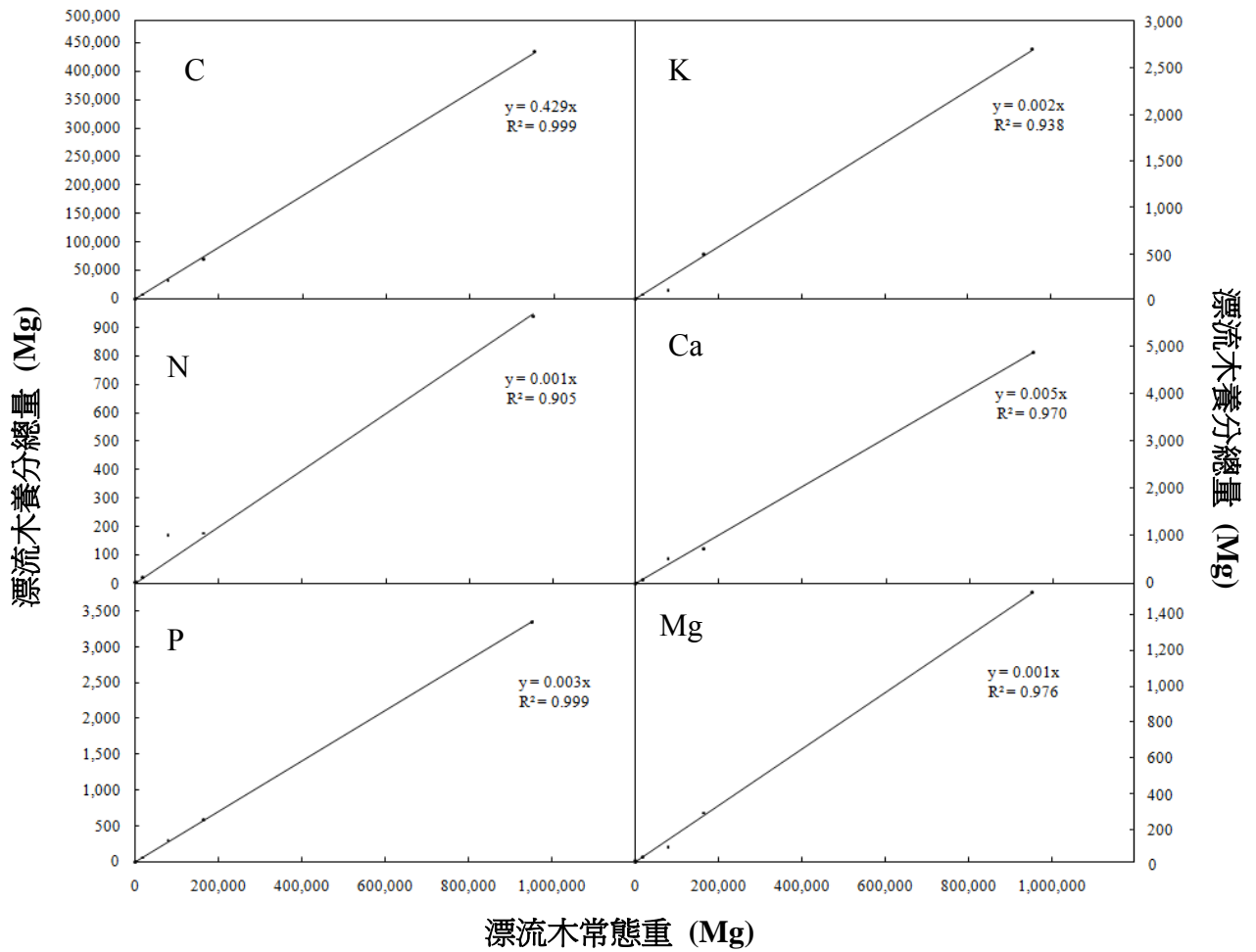


圖 9 莫拉克颱風各種養分元素總量與漂流木常態重之回歸模式。n=8。

將此回歸式應用於凡那比颱風，估算此颱風從森林輸出各種養分元素總量如表 6 所示。藉由已建立的回歸模式，將來颱風再次侵擾時，如已調查漂流木常態重後，帶入公式，可不用再進一步進行成本昂貴的化學試驗分析，即可迅速得知各種養分元素從森林生態系輸出的量。

表 6 凡那比颱風漂流木從森林輸出的各種養分元素總量

林管處	漂流木常態重	碳 (C)	氮 (N)	磷 (P)	鉀 (K)	鈣 (Ca)	鎂 (Mg)
				(Mg)			
羅東	8.80	3.77	0.01	0.03	0.02	0.04	0.01
嘉義	5.00	2.14	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
屏東	24098.80	10334.79	30.15	88.22	62.44	119.45	37.22
台東	11964.00	5130.77	14.97	43.80	31.00	59.30	18.48

漂流木在生成前，會滯留於森林生態系，其滯留時間 (retention time) 為影響漂流木生成量非常重要的因素。惟目前只有凡那比和莫拉克颱風 2 筆基礎資料，並無法完整做出漂流木與巨型木質殘體的滯留時間 (即每次颱風造成漂流木大量生成的時間間格) 和漂流木輸出量的關係。尚須更進一步的長期收集多次颱風生成的漂流木常態重量，方可使推估模式更完整。

(三) 以生態系角度探討林地釋出漂流木功能

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 (carbon pool)。而森林生態系的碳匯分為：

1. 地上部分，主要有幹 (stems)、枝 (branches)、葉 (leaves) 等；
2. 地下部分，主要有土壤中的顆粒性有機碳 (particulate organic carbon, POC)，例如粗根 (coarse roots)、細根 (fine roots)、枯落物 (litterfall) 等，尚有可溶性有機碳 (dissolved organic carbon, DOC)、可溶性無機碳 (dissolved inorganic carbon, DIC)、顆粒性無機碳 (particulate inorganic carbon, PIC) 等。

而漂流木主要為 1. 之幹與枝，和 2. 部分 POC 裏，枯落物中的巨型木質殘體 (coarse woody debris, CWD)，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 (coarse woody debris, CWD)，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 CWD 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)，此則顯示，CWD 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。但另一方面，漂流木卻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，通常係由枯落物的分解與植物根部和土壤微生物吸收所形成。在穩定的狀態下，大部份由枯落物分解所釋出的養分，會再度被植群社會、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，

可能會以可溶性有機物 (dissolved organic matter, DOM) 和已被分解成可溶性無機物 (dissolved inorganic matter, DIM) 的形式被雨水沖刷於河川溪流中，或隨土壤水之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，降雨量高之地區，顆粒性有機物 (particulate organic matter, POM)，包括直徑 $> 0.45\mu\text{m}$ 的土壤顆粒性有機物 (soil particulate organic matter, sPOM)、枯落物 (litterfall)、新鮮枝葉 (fresh leaves and branches)、新鮮巨型木質殘體 (fresh coarse woody debris, fCWD)、原本既有的巨型木質殘體 (old coarse woody debris, oCWD) [後二者樹幹的部分，如藉由洪水或土石流運輸後，可概括稱為漂流木 (driftwood)，而 oCWD 亦為枯落物的其中一種型式] 等，將隨土壤水和地表逕流流失，最後匯流於河川 (Hilton, 2008)；或者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 (hyperpycnal flow) 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，也許是整個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 (positive feedback) 機制，可使大氣中的 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 (carbon conservation) 之效果，使碳素暫時進入長地質時間尺度。

因極端氣候事件生成的 CWD，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 CWD 分解速率常數 ($F_{\text{cwd}}/M_{\text{cwd}}$) 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十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) (表 7)。

表 7 漂流木對於其他生態系功能之 SWOT 分析

	漂流木對生態系功能的內部優勢 (strength)	漂流木對生態系功能的內部劣勢 (weakness)
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 (opportunity)	漂流木的外在威脅 (threaten)
林木在林地生長	<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。

可藉由 SWOT 分析去探討以生態系角度探討林地釋出漂流木功能，從表 7 我們可以清楚的知道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。

當漂流木尚未形成，可能以林木或者是巨型木質殘體的形式留存於森林生態系時，則可能會對漂流木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。

五、結論與建議

(一) 結論

1. 建立不同規模漂流木的養分回歸模式，可供未來迅速且精準的估算各種養分元素輸出森林生態系的總量，各種養分元素總量與漂流木常態重之回歸模式則如下所示：

$$\text{碳 } y = 0.428850701955987x$$

$$\text{氮 } y = 0.00125108432981582x$$

$$\text{磷 } y = 0.00366080180687816x$$

$$\text{鉀 } y = 0.0025911348546045x$$

$$\text{鈣 } y = 0.0049564946792393x$$

$$\text{鎂 } y = 0.00154454505965788x$$

y: 各種養分元素重 (Mg, or kg)

x: 漂流木常態重 (Mg)

2. 以生態系角度探討漂流木的主要功能如下列所示：
 - (1) 為其它生態系統的生物社會提供棲地。
 - (2) 供給森林生態系以外的其他生態系統緩效性養分。
 - (3) 增加其它生態系統的生物多樣性。
 - (4) 漂流木有短中期碳封存的效果-- 颱風侵襲陸域生態系統，使漂流木大量生成，著實為全球暖化欲將大氣中 CO₂ 減少的回饋機制之一。

(二) 建議

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，故建議政府單位於未來面對大量的漂流木時，可先將會影響民眾生活的漂流木，把高經濟價值之木材載運至儲木場標售，剩餘之雜木，則清運至海洋某處圈放（但不影響各港口之運輸活動之處），使漂流木隨著洋流與垂直流，順應自然因大氣中二氧化碳濃度過高所導致的回饋機制，逐漸讓漂流木下沉至海底，達到短中期碳封存之效果，可節省處理漂流木移運與放置之經費，但圈放方法和所需經費要另行評估是否可行；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。

五、參考文獻

- 林國銓 (1997) 福山闊葉林枯落物及枝葉層之動態變化。台灣林業科學 12(2): 135-144。
- 林國銓 (2006) 颱風干擾對福山闊葉林枯落物的影響。林業研究專訊 13(5): 29-31。
- 林裕仁、劉瓊霏、林俊成 (2002) 台灣地區主要用材比重與碳含量測定。臺灣林業科學 17(3): 291-9。
- 林登秋 (2006) 颱風與福山森林生態系結構及功能之變動。林業研究專訊 13(5): 6-9。
- 吳慶現、翁偉明 (2007) 石門水庫漂流木及異重流運移試驗分析。經濟部水利署研究報告。337 頁。
- 陳靜修、盧崑宗、黃莉雯、劉正字、顏江河 (2006) 漂流木製造木炭及木醋液之研發與農林作物之栽培利用 (I) 針葉樹漂流木製造木炭與木醋液。林業研究季刊 28 (4): 87-98。
- 陸象豫、黃良鑫、謝漢欽 (2010) 何以莫拉克颱風重創扇平園區。林業研究專訊 17(1): 45-48。
- 郭耀綸、尤國霖、楊月玲、王相華 (2007) 颱風擾動對台灣南部墾丁森林林下光量及六種樹苗生長之影響。台灣林業科學 22(4): 367-80。
- 康若蘭、林登秋、詹進發、黃正良 (2005) 2000 年碧利斯颱風干擾前後福山試驗林 NDVI 變動之研究。台灣林業科學 20(1): 73-87。
- 斯煒 (1947) 颱風與台灣植物分佈之關係。台灣省林業試驗所研究報告 No.6 p1-14。
- 張獻仁、范家翔、林素惠、向韻如 (2010) 莫拉克風災漂流木形成原因之探討。台灣林業 35(5): 7-10。
- 盧惠生 (2006) 颱風干擾對天然闊葉林穿落雨空間分佈之影響。林業研究專訊

13(5): 32-35 .

- Aber, J. D., K. J. Nadelhoffer, P. Streudler and J. Melillo (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *Bioscience* 39: 378-386.
- Allen, S. E., H. M. Grimshaw and A. P. Rowland (1986) Chemical analysis. *In*: P. D. Moore and S. B. Chapman (eds), *Methods in Plant Ecology*. 2nd Edition. Blackwell Scientific Publications, Oxford. pp. 285-344.
- Armstrong, R. A., C. Lee, J. I. Hedges, S. Honjo and S. G. Wakeham (2002) A new, mechanistic model for organic carbon fluxes in the ocean based on the quantitative association of POC with ballast minerals. *Deep Sea Research Part II* 49: 219–236.
- Bingeman, C. W., J. E. Varner and W. P. Martin (1953) The effect of the addition of organic materials on the decomposition of an organic soil. *Soil Science Society of America Journal* 17: 34-38.
- Bond-Lamberty, B., C. Wang and S. T. Gower (2003) Annual carbon flux from woody debris for a boreal black spruce fire chronosequence. *Journal of Geophysical Research* 108: 8220.
- Bouchez, J., O. Beyssac, V. Galy, J. Gaillardet, C. France-Lanord, L. Maurice and P. Moreira-Turcq (2010) Oxidation of petrogenic organic carbon in the Amazon floodplain as a source of atmospheric CO₂. *Geological Society of American* 38(3): 255-258.
- Böning, C. W., A. Dispert, M. Visbeck, S. R. Rintoul and F. U. Schwarzkopf (2008) The response of the Antarctic Circumpolar Current to recent climate change. *Nature Geoscience* 1: 864–869.
- Bush, M. B., M. R. Silman and D. H. Urrego (2004) 48,000 years of climate and forest change in a biodiversity hot spot. *Science* 303: 827-829.
- Cai, W. (2011) Estuarine and Coastal Ocean Carbon Paradox: CO₂ Sinks or Sites of Terrestrial Carbon Incineration? *Annual Review of Marine Science* 3: 123-145.

- Cermeno, P., S. Dutkiewicz, R. P. Harris, M. Follows, O. Schofield and P. G. Falkowski (2008) The role of nutricline depth in regulating the ocean carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Science* 105: 20344–20349.
- Chambers, J. Q., J. P. Schimel and A. D. Nobre (2001) Respiration from coarse wood litter in central Amazon forests. *Biogeochemistry* 52: 115-131.
- Deutsch, C., J. L. Sarmiento, D. M. Sigman, N. Gruber and J. P. Dunne (2007) Spatial coupling of nitrogen inputs and losses in the ocean. *Nature* 445: 163–167.
- Dise, N. B. and R. F. Wright (1995) Nitrogen leaching from European forests in relation to nitrogen deposition. *Forest Ecology and Management* 71(1-2): 153-161.
- Doney, S. C. and D. S. Schimel (2007) Carbon and Climate System Coupling on Timescales from the Precambrian to the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources* 32: 31-66.
- Emanuel, K. (2005) Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature* 436: 686-688.
- Erickson, H. E. and G. Ayala (2004) Hurricane-induced nitrous oxide fluxes from a wet tropical forest. *Global Change Biology* 10, 1155-62.
- Estes, J. A., J. Terborgh, J. S. Brashares, M. E. Power, J. Berger, W. J. Bond, S. R. Carpenter, T. E. Essington, R. D. Holt, J. B. C. Jackson, R. J. Marquis, L. Oksanen, T. Oksanen, R. T. Paine, E. K. Pikitch, W. J. Ripple, S. A. Sandin, M. Scheffer, T. W. Schoener, J. B. Shurin, A. R. E. Sinclair, M. E. Soulé, R. Virtanen and D. A. Wardle (2011) Trophic Downgrading of Planet Earth. *Science* 333: 301-306.
- Ezard, T. H. G., T. Aze, P. N. Pearson and A. Purvis (2011) Interplay Between Changing Climate and Species' Ecology Drives Macroevolutionary Dynamics. *Science* 332: 349-351.
- Field, C. B., D. B. Lobell, H. A. Peters and N. R. Chiariello (2007) Feedbacks of

- terrestrial ecosystems to climate change. *Annual Review of Environment and Resources* 32: 1-29.
- Fontaine, S., S. Barot, P. Barré, N. Bdioui, B. Mary and C. Rumpel (2007) Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature* 450: 277-280.
- Galloway, J. N., A. R. Townsend, J. W. Erisman, M. Bekunda, Z. Cai, J. R. Freney, L. A. Martinelli, S. P. Seitzinger and M. A. Sutton (2008) Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science* 320: 889–892.
- Goodwin, P and T. M. Lenton (2009) Quantifying the feedback between ocean heating and CO₂ solubility as an equivalent carbon emission. *Geophysical Research Letters* 36: L15609.
- Gough, C. M., C. S. Vogel, C. Kazanski, L. Nagel, C. E. Flower and P. S. Curtis (2007) Coarse woody debris and the carbon balance of a north temperate forest. *Forest Ecology and Management* 244: 60-67.
- Hansen, J., L. Nazarenko, R. Ruedy, M. Sato, J. Willis, A. D. Genio, D. Koch, A. Lacis, K. Lo, S. Menon, T. Novakov, J. Perlwitz, G. Russell, G. A. Schmidt and N. Tausnev (2005) Earth's energy imbalance: confirmation and implications. *Science* 308: 1431–1435.
- Harden, J. W., S. E. Trumbore, B. J. Stocks, A. Hirsch, S. T. Gower, K. P. O'Neill and E. S. Kasischke (2000) The role of fire in the boreal carbon budget. *Global Change Biology* 6: 174-184.
- Heimann, M. and M. Reichstein (2008) Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* 451: 289-292.
- Hilton, R. G., A. Galy, N. Hovius, M. Chen, M. Horng and H. Chen (2008) Tropical-cyclone-driven erosion of the terrestrial biosphere from mountains.

- Nature Geoscience 1: 759-762.
- Hopkinson, C. S. and J. J. Vallino (2005) Efficient export of carbon to the deep ocean through dissolved organic matter. *Nature* 433: 142–145.
- Houghton, R. A. (2007) Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 35: 313-347.
- Hoyos, C. D., P. A. Agudelo, P. J. Webster and J. A. Curry (2006) Deconvolution of the factors contributing to the increase in global hurricane intensity. *Science* 312: 94-97.
- Iglesias-Rodriguez, M. D., P. R. Halloran, R. E. M. Rickaby, I. R. Hall, E. Colmenero-Hidalgo, J. R. Gittins, D. R. H. Green, T. Tyrrell, S. J. Gibbs, P. von Dassow, E. Rehm, E. V. Armbrust and K. P. Boessenkool (2008) Phytoplankton calcification in a high-CO₂ world. *Science* 320: 336–340.
- Intergovernmental Panel Climate Change (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK/New York: Cambridge Univ. Press.
- Ittekkot, V. (1988) Global trends in the nature of organic matter in river suspensions. *Nature* 332: 436–438.
- Kao, S. J., M. Dai, K. Selvaraj, W. Zhai, P. Cai, S. N. Chen, J. Y. T. Yang, J. T. Liu, C. C. Liu and J. P. M. Syvitski (2010) Cyclone-driven deep sea injection of freshwater and heat by hyperpycnal flow in the subtropics. *Geophysical Research Letters* 37: L21702.
- Krajick, K. (2001) Defending Deadwood. *Science* 293: 1579-1581.
- Krankina, O. N. and M. E. Harmon (1995) Dynamics of the dead wood carbon pool in northwestern Russian boreal forests. *Water, Air, & Soil Pollution* 82: 227-238.
- Kuzyakov, Y., J. K. Friedel and K. Stahr (2000) Review of mechanisms and

- quantification of priming effects. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 1485-1498.
- Kwon, E. Y., F. Primeau and J. L. Sarmiento (2009) The impact of remineralization depth on the air-sea carbon balance. *Nature Geoscience* 2: 630–635.
- Laiho, R. and C. E. Prescott (1999) The contribution of coarse woody debris to carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in three Rocky Mountain coniferous forests. *Canadian Journal of Forest Research* 29 (10): 1592-1603.
- Laiho, R. and C. E. Prescott (2004) Decay and nutrient dynamics of coarse woody debris in northern coniferous forests: a synthesis. *Canadian Journal of Forest Research* 34 (4): 763-777.
- Langer, G., M. Geisen, K. H. Baumann, J. Klas, U. Riebesell, S. Thoms and J. R. Young (2006) Species-specific responses of calcifying algae to changing seawater carbonate chemistry. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 7: Q09006.
- Law, R. M., R. J. Matear and R. J. Francey (2008) Comment on "Saturation of the Southern Ocean CO₂ sink due to recent climate change." *Science* 319: 570.
- Lenton, T. (2011) 2 °C or not 2 °C? That is the climate question. *Nature* 473, 7.
- Lewis, S. L. et al. Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature* 457: 1003-1006 (2009).
- Le Quere, C., C. Rödenbeck, E. T. Buitenhuis, T. J. Conway, R. Langenfelds, A. Gomez, C. Labuschagne, M. Ramonet, T. Nakazawa, N. Metzl, N. Gillett and M. Heimann (2007) Saturation of the Southern Ocean CO₂ sink due to recent climate change. *Science* 316: 1735–1738.
- Liu, L., J. S. King and C. P. Giardina (2005) Effects of elevated concentrations of atmospheric CO₂ and tropospheric O₃ on leaf litter production and chemistry in trembling aspen and paper birch communities. *Tree Physiology* 25: 1511-1522.
- Malhi, Y. (2010) The carbon balance of tropical forest regions, 1990-2005. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2: 237-244.

- Marra, J. L. and R. L. Edmonds (1994) Coarse woody debris and forest floor respiration in an old-growth coniferous forest on the Olympic Peninsula, Washington, USA. *Canadian Journal of Forest Research* 24: 1811-1817.
- Maser, C. and J. R. Sedell (1994) From the forest to the sea: the ecology of wood in streams, rivers, estuaries, and oceans. St. Lucie Press, Delray Beach, Florida, USA.
- Min, S., X. Zhang, F. W. Zwiers and G. C. Hegerl (2011) Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature* 470: 378–381.
- Montzka, S. A., E. J. Dlugokenchy and J. H. Butler (2011) Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature* 476: 43-50.
- Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B. da Fonseca and J. Kent (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853-858.
- Myneni, R. B., J. Dong, C. J. Tucker, R. K. Kaufmann, P. E. Kauppi, J. Liski, L. Zhou, V. Alexeyev and M. K. Hughes (2001) A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. *Proceedings of the National Academy of Science* 98: 14784-14789.
- Orr, J. C., V. J. Fabry, O. Aumont, L. Bopp, S. C. Doney, R. A. Feely, A. Gnanadesikan, N. Gruber, A. Ishida, F. Joos, R. M. Key, K. Lindsay, E. Maier-Reimer, R. Matear, P. Monfray, A. Mouchet, R. G. Najjar, G. Plattner, K. B. Rodgers, C. L. Sabine, J. L. Sarmiento, R. Schlitzer, R. D. Slater, I. J. Totterdell, M. Weirig, Y. Yamanaka and A. Yool (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437: 681–686.
- Pall, P., T. Aina, D. A. Stone, P. A. Stott, T. Nazawa, A. G. J. Hilberts, D. Lonmann and M. R. Allen (2011) Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature* 470: 382-385.
- Pendall, E., S. Bridgham, P. J. Hanson, B. Hungate, D. W. Kicklighter, D. W. Johnson,

- B. E. Law, Y. Luo, J. P. Megonigal, M. Olsrud, M. G. Ryan and S. Wan (2004) Below-ground process responses to elevated CO₂ and temperature: A discussion of observations, measurement methods, and models. *New Phytologist* 162: 311-322.
- Prins, G. and S. Rayner (2007) Time to ditch Kyoto. *Nature* 449: 973-975.
- Riebesell, U., I. Zondervan, B. Rost, P. D. Tortell, R. E. Zeebe, F. M. Morel (2000) Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂. *Nature* 407: 364–367.
- Riebesell, U., K. G. Schulz, R. G. J. Bellerby, M. Botros, P. Fritsche, M. Meyerhöfer, C. Neill, G. Nondal, A. Oschlies, J. Wohlers and E. Zöllner (2007) Enhanced biological carbon consumption in a high CO₂ ocean. *Nature* 450: 545–549.
- Riebesell, U., R. G. J. Bellerby, A. Engel, V. J. Fabry, D. A. Hutchins, T. B. H. Reusch, K. G. Schulz and F. M. M. Morel (2008) Comment on “Phytoplankton Calcification in a High-CO₂ World.” *Science* 322: 1466b.
- Sabine, C. L., R. A. Feely, N. Gruber, R. M. Key, K. Lee, J. L. Bullister, R. Wanninkhof, C. S. Wong, D. W. R. Wallace, B. Tilbrook, F. J. Millero, T. Peng, A. Kozyr, T. Ono and A. F. Rios (2004) The Oceanic sink for Anthropogenic CO₂. *Science* 305: 367–371.
- Sabine, C. L. and T. Tanhua (2010) Estimation of anthropogenic CO₂ inventories in the ocean. *Annual Review of Marine Science* 2: 175-198.
- Sarmiento, J. L. and C. LeQuere (1996) Oceanic carbon dioxide uptake in a model of century-scale global warming. *Science* 274: 1346–1350.
- Sayer, E. J., M. S. Heard, H. K. Grant, T. R. Marthews and E. V. J. Tanner (2011) Soil carbon release enhanced by increased tropical forest litterfall. *Nature Climate Change* 1: 304–307.
- Schimel, D. (2007) Carbon cycle conundrums. *Proceedings of the National Academy of Science* 104: 18353-18354.

- Schlesinger, W. H. and J. Lichter (2001) Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature* 411: 466-469.
- Schlünz, B. and R. R. Schneider (2000) Transport of terrestrial organic carbon to the oceans by rivers: Re-estimating flux and burial rates. *International Journal of Earth Sciences* 88: 599–606.
- Sedjo, R. (1993) The carbon cycle and global forest ecosystem. *Water, Air, and Soil Pollution* 70: 295-307.
- Stallard, R. F. (1998) Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global Biogeochemical Cycles* 12: 231–257.
- Townsend, A. R. and R. W. Howarth (2010) Fixing the global nitrogen problem. *Scientific American* 302: 64–71.
- van Vuuren, D. P., J. Weyant and F. de la Chesnaye (2006) Multi-gas scenarios to stabilize radiative forcing. *Energy Economics* 28: 102–120.
- Velders, G. J., D. W. Faheyb, J. S. Danielb, M. McFarlandc and S. O. Andersend (2010) The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing. *Proceedings of the National Academy of Science* 106: 10949–10954.
- Vitousek, P. M., R. Naylor, T. Crews, M. B. David, L. E. Drinkwater, E. Holland, P. J. Johnes, J. Katzenberger, L. A. Martinelli, P. A. Matson, G. Nziguheba, D. Ojima, C. A. Palm, G. P. Robertson, P. A. Sanchez, A. R. Townsend and F. S. Zhang (2009) Nutrient imbalances in agricultural development. *Science* 324: 1519–1520.
- Wang, C., B. Bond-Lamberty and S. Gower (2002) Environmental controls on CO₂ flux from black spruce coarse woody debris. *Oecologia* 132: 374-381.
- Wardle, D. A., R. D. Bardgett, R. M. Callaway and W. H. Van der Putten (2011) Terrestrial ecosystem responses to species gains and losses. *Science* 332: 1273-1277.

- Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry and H. R. Chang (2005) Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science* 309: 1844-1846.
- Wohlers, J. A., Engelb, E. Zöllner, P. Breithaupt, K. Jürgens, H. Hoppe, U. Sommer and U. Riebesell (2009) Changes in biogenic carbon flow in response to sea surface warming. *Proceedings of the National Academy of Science* 106: 7067–7072.
- Wigley, T. M. L., R. Richels and J. A. Edmonds (1996) Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations. *Nature* 379: 240–243.
- Williams, A. P., C. D. Allen, C. I. Millar, T. W. Swetnam, J. Michaelsen, C. J. Stilla and S. W. Leavitt (2010) Forest responses to increasing aridity and warmth in the southwestern United States. *Proceedings of the National Academy of Science* 107: 21289-21294.
- Wu, C. C. and Y. H. Kuo (1999) Typhoon affecting Taiwan: Current understanding and future challenges. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 80, 67-80.
- Zachos, J. C., G. R. Dickens and R. Zeebe (2008) An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature* 451: 279-283.
- Zickfeld, K., M. Eby and A. J. Weaver (2008a) Carbon-cycle feedbacks of changes in the Atlantic meridional overturning circulation under future atmospheric CO₂. *Global Biogeochemical Cycles* 22: GB3024.
- Zickfeld, K., J. C. Fyfe, M. Eby and A. J. Weaver (2008b) Comment on "Saturation of the Southern Ocean CO₂ sink due to recent climate change." *Science* 319: 570.
- 中央氣象局 (2009) <http://www.cwb.gov.tw/> °
- 林務局 (2005) <http://www.forest.gov.tw/mp.asp?mp=1> °
- 經濟部水利署 (2008) <http://www.wra.gov.tw/default.asp> °

期中報告審查意見回覆

審查意見	意見回覆
一、符合期中審查標準。	一、感謝委員意見。
二、就森林生態系而言，當考慮漂流木各種養分元素輸出時，是否應考量樹木樹冠比例也一併流失（輸出），請加以說明。	二、就森林生態系而言，確實應該考慮樹木樹冠比例的流失（輸出），惟葉部與枝條被狂風豪雨沖刷下來時，並非漂流木。而漂流木可能是原本在森林生態系統中的巨型木質殘體，並無葉部與枝條；或者是新鮮的漂流木，具有葉部與枝條，並不能完全的以樹冠比例去定量。應另行擬定計畫，並需再開發新方法，去解決與計算。
三、表 2，各林管處統計之常態重數值，與圖 3 漂流木清理數值，部分相同，部分不同，各數值之計算方式如何，請加以說明。	三、表 2 與圖 3 部分數值相同，部分不同之主因為，林務局對於此 2 者之結算時間不同所致，已於後來統一。各數值是參照林務局提供之資料。
四、圖 3 莫拉克颱風漂流木重量應為生材飽水狀態下測定，常態漂流木是氣乾 (Wn) 狀態下測定，但表 2 之數值有部分比圖 3 為高，其計算方法請加以說明。	四、表 2 部分數值比圖 3 (此版本之圖 7) 高係因為時間點不同所致，圖 3 之數值為較早先的結算總量，某些數值較表 2 的常態漂流木重少，因此易造成混淆，故已統一將圖 3 的結算時間點修改為表 2 之常態重數

	值。
<p>五、計算養分時所用公式(2)之 C 值為 0.9326，亦即相當於木材含水率僅在 7~8 % 之間，是否偏低？取樣方式請加以說明，大徑原木之含水率應非常高，同時若各表之計算基礎為 96 小時內之重量，漂流木應為生材而非氣乾材。</p>	<p>五、據吳慶現、翁偉明 (2007) 與陳靖修等人 (2006) 之研究結果可知，漂流木含水率在 7~8 % 之間為合理範圍。取樣方式如材料與方法所示，大徑原木之含水率其實並無非常高，同時各表之基礎亦不是 96 小時內之重量，96 小時為颱風滯留台灣造成降水之時間，當時因計畫審查之時程等因素，各表計算基礎為莫拉克風災發生後 3-6 個月，且當時漂流木數量過於龐大，本預估應清除時程可能為數年之久，但在全林務局積極努力的清除下，亦花費數月之久。故統計資料應非 96 小時內之重量，故當作置放數月之久的氣乾材計算。</p>
<p>六、取圓木盤時，各流域均依直徑區分 12 徑階，故計算 C 值在各流域是否有所不同，請列表說明。</p>	<p>六、本計畫開始執行時，漂流木大致上已經推集妥善，各林管處已進行招標，大徑木圓盤取得不易，故大徑木系以磨取些許木粉做 EA (基礎元素分析) 與 ICP (感應耦合電漿質譜層析儀) 之分析，而各流域之 C 值可從表 4 得知，無論 HSD、LSD 與 Duncan's 多變域分析得</p>

	<p>知，各域並無顯著差異。</p>
<p>七、圖 4，是以單日最大雨量與 96 小時之輸出碳量之關係，如以整個降雨量比較是否可行？請加以說明。</p>	<p>七、當降雨過於大量，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進入溪流。當流量大增時，勢必對河岸基腳造成沖刷，而飽和的土壤坡面負荷增加，加上台灣脆弱陡峻之地質結構的雙層作用力之下，會造成嚴重的林地崩塌，土石流夾帶著漂流木一起氾濫。故漂流木量之多寡，與暴雨的程度較有相關。圖 4 (為此版本之圖 8) 如以整體降雨量反而會稀釋暴雨的程度，因此，為了要反映暴雨的強度，把單位時間點縮為 1 天較為妥當。</p>
<p>八、有關於生物量計算，應再以精確含水率換算，單位建議以公噸表示，以方便參考。</p>	<p>八、關於生物量計算，已使用精確含水率換算，至於單位則是參照國際單位制 (符號:SI, 來自法語: <i>Système international d'unités</i>)，又稱公制或米制，是現時世界上最普遍採用的標準度量衡單位系統，採用十進制進位系統。其中的 Mg (百萬克) 剛好同等於 ton (公噸)，故使用 Mg 可同時與國際接軌，又不至於換算</p>

	不易。
九、本計畫以生態系角度探討林地釋出漂流木功能等，請考量是否再與保留於林地林木功能做比較；結果與摘要，應具體敘明漂流木之生態功能，提供政府相關單位參考應用。	九、感謝評審委員的建議，已做 SWOT analysis 於內文，比較漂流木與林地林木功能做比較。並具體說明了漂流木之生態功能，供政府相關單位參考應用。
十、本計畫為 2 年期第 2 年計畫，請於期末報告增列第 1 年成果摘要及未來可供應用情形。	十、已於期末報告之摘要融合第 1 年成果摘要及未來可應用之情形。

附件二

期末報告審查意見回覆

<p>一、符合期末審查標準，達到預期效益。</p>	<p>一、感謝評審委員肯定。</p>
<p>二、p. 13 Revelle factor 是甚麼意思?</p>	<p>二、以公式: $(\delta pCO_2 / \delta DIC) / (pCO_2 / DIC)$ 表示之，簡單來說，係人為排放的二氧化碳與自然中原本存在於大氣與海洋中的二氧化碳之比值。越大代表大氣與海洋中人為排放的碳越多。</p>
<p>三、p. 31 算出全臺灣林地平均單位面積輸出碳量為 $261.61 \text{ kg ha}^{-1}$，相當於每公頃可抵消 25 個台灣人 1 年製造的碳量，著實驚人，但此數據如何算出?</p>	<p>三、此數據係以莫拉克風災造成的漂流木，經換算後得到總輸出的碳重，再除以全臺灣的森林面積而求得。</p>
<p>四、p. 38 倒數第 4 行有錯字。</p>	<p>四、已修正。</p>
<p>五、p. 39 中提到 retention time 會影響漂流木生成的量，請敘述 retention time 是如何影響?</p>	<p>五、因每次颱風來襲間期、來襲時的林分狀態與累積的 CWD 不相同，故積留林分的潛在漂流木量亦不相同，retention time 越長，可能會使漂流木輸出量更大；越短則輸出量可能較少。</p>
<p>六、p. 40 中提到「枯落物中的巨型木質殘體 (coarse woody debris, CWD)，占枯落物輸入地面上總量的</p>	<p>六、漂流木因分解時間較長，且如沉入海底，則可能更不容易被分解（因微生物社會較少），碳就會以漂流</p>

<p>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 CWD 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)，此則顯示，CWD 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。但另一方面，漂流木卻可在碳循環上扮演著暫時封存碳的角色。」漂流木是如何扮演碳封存的角色？</p>	<p>木形式封存於各自然生態系統中，而較不會成為二氧化碳釋放於大氣之中，達到碳封存的效果。</p>
<p>七、圖 8 顯示莫拉克颱風期間森林地單位面積輸出碳量與單日累計最大降雨量成明顯相關，是否其它養分也有此相關性？</p>	<p>七、其它養分確實也有此相關性，更精確的說，因漂流木的輸出量與各養分量呈顯著的正相關，故當累計最大降雨量與碳輸出量成明顯正相關時，其它養分應也有此相關性存在。</p>
<p>八、颱風是自然界最具破壞力的天氣系統，也是臺灣最重要的災變天氣。由於臺灣位於颱風路徑之要衝，平均每年因為氣象上的「天災」所造</p>	<p>八、感謝評審委員的建議。</p>

<p>成高達百億元以上的損失中，就有百分之七十左右的災害是颱風所造成，但對森林生態系卻是主要水的來源，也促進森林更新的機會。實有必更進一步的長期收集多次颱風生成的漂流木所能提供的生態系功能的資料，強化森林對環境永續貢獻。</p>	
<p>九、Keyword → Keywords</p>	<p>九、已修正。</p>
<p>十、建議宜將所使用的儀器設備(如：感應偶合電漿、原子發散光譜等)之廠牌、型號等資料補上。</p>	<p>十、已附上廠牌與型號。</p>
<p>十一、p. 31 倒數第三行「全臺灣林地平均單位面積輸出碳量為 261. 61 kg ha⁻¹」，是否指漂流木？</p>	<p>十一、確實是指漂流木。</p>
<p>十二、p. 31 圖 8 宜移至 p. 35 適當處。</p>	<p>十二、已修改。</p>
<p>十三、p. 35 先提及表 4，而於 p. 36 才提及表 3，表之安排宜調整順序。</p>	<p>十三、已修正。</p>
<p>十四、表 5 似乎於文章中未提及。</p>	<p>十四、表 5 為證明各林管區漂流木養分濃度並無顯著差一，此為第 1 年期中審查意見之審查意見與建議。</p>
<p>十五、p. 35 倒數第 5 行提及「硫 57. 10 gha⁻¹ (表 2、4)」，但表 2 與表 4 未見硫之數據。</p>	<p>十五、此為當時製表時之疏忽，感謝評審委員指正，已附上硫之數據。</p>

<p>十六、漂流木對於生態性功能雖然有既存內部優勢或機會，但其外威脅及內部劣勢應如何去克服解決？</p>	<p>十六、這些是原本就存在的環境問題，只能建議森林要經營管理，使風險降低。</p>
<p>十七、本年度計畫所建立漂流木養分元素回饋機制，如何應用？</p>	<p>十七、藉由已建立的回歸模式，將來颱風再次侵擾時，如已調查漂流木常態重後，帶入公式，可不用再進一步進行成本昂貴的化學試驗分析，即可迅速得知各種養分元素從森林生態系輸出的量。</p>
<p>十八、所建議漂流木有短中期炭封存效果，期使漂流木沉入海底可行性如何？</p>	<p>十八、需要時日就能沉入海底</p>
<p>十九、建議將文中的「不同規模漂流木的養分回歸模式」加入到結論與建議。</p>	<p>十九、已加入</p>
<p>二十、漂流木對於其他生態系功能之SWOT分析表中「林木滯留林地」用詞，建議修改。</p>	<p>二十、已修改為「林木在林地生長」。</p>
<p>二十一、結論與建議所提漂流木清運至海洋圈放，使漂流木隨著洋流與垂直流，逐漸下沉至海底，達到短中期碳封存效果，請補充敘明國外相關案例，如施作方式、數量、需多久時間、多少經費等資料，以提供應用參考。</p>	<p>二十一、此牽涉到很多複雜材料和技術層面問題，並無相關報導，故無法評估。</p>

