

2025年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

作品編號	180020
參展科別	地球與環境科學
作品名稱	氣候與地質條件驅動的臺灣紅樹林與鹽沼碳封存
得獎獎項	三等獎 加拿大科學展覽會 CWSF

就讀學校	臺北市立第一女子高級中學
指導教師	羅立 林郁梅
作者姓名	楊謹瑜 許和晏

關鍵詞	<u>碳匯、紅樹林、鹽沼</u>
-----	------------------

作者簡介



我們是北一女中高三的楊謹瑜（右）和許和晏（左），在臺大地質系學習藍碳系統的知識、實驗技術以及數據分析。感謝一路上指導我們的羅立教授，林郁梅老師，峻誌、郁豫助教，鋁政、易辰、翔宇學長與婉彤學姐，新豐鄉、國海院與中興大學林幸助老師提供的珍貴數據，以及所有支持我們的朋友及家人們，讓我們可以進入國際科展！

2025 年臺灣國際科學展覽會

研究報告

區別：

科別：地球與環境科學科

作品名稱：氣候與地質條件驅動的臺灣紅樹林與鹽沼碳封
存

關鍵詞：碳匯、紅樹林、鹽沼

編號：

摘要

本研究以臺灣新竹縣的新豐紅樹林與臺中市的高美溼地，分別作為臺灣紅樹林與鹽沼的代表。經過元素分析、粒徑分析及密度分析之後，比較臺灣紅樹林與鹽沼兩個藍碳系統的碳封存能力差異及和國外相關研究間的差異性。本研究發現，採樣地距海越近，有機碳佔底土比例越高；粒徑較小的沉積物顆粒，較可能儲存更多有機碳；並藉此得出了藍碳相關研究受地理環境影響很大的結論。各採樣地樣本的活性有機碳(LOC)比例多大於難降解有機碳(ROC)比例，可能是由於臺灣的藍碳系統缺乏河川穩定供應有機物，又受到年齡與氣候條件的影響，其中儲存的 ROC 在總有機碳(TOC)中所占的比例不高，因此不適合長期儲存有機碳，卻很可能在幾十年內快速形成一個新的碳匯系統。

英文摘要

This study compared the carbon sequestration capacity of mangrove forests and salt marshes in Xinfeng, Hsinchu County, and Gaomei Wetland, Taichung City, Taiwan. Through elemental analysis and particle size analysis, we investigated the differences in carbon sequestration between the two blue carbon systems, the variations with depth, and the discrepancies compared to relevant foreign studies. Our findings indicate that smaller sediment particles are more likely to store more organic carbon; the degree of tidal influence on a site affects the abundance of its organic matter sources. The proportion of labile organic carbon (LOC) in Taiwan's blue carbon systems is generally higher than that of refractory organic carbon (ROC), possibly due to the lack of stable organic matter supply from rivers in Taiwan's carbon sink system, as well as the influence of age and climatic conditions. The relatively low proportion of ROC in total organic carbon (TOC) suggests that these systems are not suitable for long-term organic carbon storage but may rapidly form a new carbon sink system within a few decades.

壹、研究動機

近年來溫室效應加劇，使人們開始研究如何減少空氣中的碳。而「碳匯」，也就是增加溫室氣體自大氣中吸收或儲存到樹木、海洋及土壤等自然場所的量，被視為一項有效且可行的做法 (Yung-Lin Chen, 2018)。大自然本身即具有捕獲與儲存碳的能力，被稱為碳捕獲及碳封存。其中，被儲存在沿岸或海洋生態系統的植物及土壤中的有機碳被稱作「藍碳」，因其高度的碳封存能力而在近年受到關注。藍碳系統儲碳能力傑出，主要是因為沿岸棲地土壤長期處於厭氧環境，根系與枯落物分解慢，儲存在土壤或植物體有機碳較不易分解，更具長久的固碳效果(Chmura et al., 2003)。紅樹林及鹽沼兩重要沿岸藍碳生態系統，具高碳封存能力而儲存大量有機碳於其土壤與植物，其地下碳儲量大於地上，兩者的碳封存速率也遠大於成熟熱帶森林。

本研究從實地採樣開始，以臺灣新竹市新豐鄉的新豐紅樹林與臺中市清水區的高美溼地作為研究對象。新豐紅樹林在臺灣的紅樹林中較古老，其碳封存的功能應會比年輕的紅樹林穩定；高美溼地是臺灣中部的重要溼地，此地的保護工作相當完整，較能避免人為破壞，可做為臺灣溼地的代表。本研究藉由計算紅樹林與鹽沼土壤的密度、粒徑及碳、氮元素比例，分析兩藍碳系統的碳封存能力，並研究距海遠近對於紅樹林碳封存能力的影響。而中華民國政府也於 111 年 3 月及 12 月公布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，期望本研究對於自然碳匯的分析結果能對相關政策有所貢獻。

貳、研究目的

- 一、比較紅樹林與鹽沼有機碳占比之差異
- 二、比較距海遠近以及沉積物粒徑與紅樹林有機碳之占比的關係
- 三、分析臺灣碳匯系統的潛力
- 四、比較臺灣的碳匯系統與國外研究的差異與其產生原因

參、研究設備及器材

一、電子秤(圖一，圖二)

本研究主要使用了兩種電子秤，其中一種電子秤的最小感重為 0.01 g，用於測量切割過的樣本重量；另一種電子秤較為精密，最小感重為 0.0001 g，主要用在元素分析時取 50 mg 樣本的過程中。

二、烘箱(圖三)

烘箱主要是用於烘乾測量密度用的小方塊。

三、冷凍乾燥機(圖四)

由於沉積物中可能含有微生物，若將樣本以烘乾的方式乾燥，可能會加速微生物反應而破壞樣本。故本研究使用冷凍乾燥的方式去除樣本的水分。將樣本置於冷凍乾燥機之後，冷凍乾燥機內的溫度會急速下降，使樣本中的水分快速凝固。同時，機器內的壓力也會逐步下降至接近真空的狀態，使冰昇華為水蒸氣，以去除樣本中的水分。

四、離心機(圖五)

用於粒徑分析的前處理過程中。將樣本放入離心機後，離心機轉子的高速旋轉會產生很大的離心力，使離心管內的沉積物顆粒快速沉降，不同質量與密度的樣本即能分離出來。本研究使用離心機分離沉積物顆粒與和沉積物反應的鹽酸、雙氧水等溶液。

五、元素分析儀(圖六、圖七)

元素分析儀，全名高溫燃燒法總有機碳總氮分析儀，是利用高溫燃燒法來測量樣本中的元素比例。此儀器配置了非分散性紅外線探測器(NDIR)，測量燃燒後所產生氣體中的二氧化碳濃度，並將其轉換成訊號以測量碳元素佔總質量的比例為例。燃燒時，儀器中的紅外線會偵測到一段波長，儀器積分此段波長後會得出一個面積值，稱為 TC Area，而此值和樣本的 TC(mg)成函數關係。此儀器可以透過分段升溫的方式將樣本灰化，分離出 LOC、ROC、TIC 和 TN。

要求出 TC Area 和 TC(mg)之函數關係，需要用 TC(%)已知且固定的標準品以計算出未知的 TC(%)。測出不同重量的標準品上機所得出之面積值，再用 $TC(\%)(已知量) = TC(mg)(所求量)/weight(mg)(操縱變因)$ ，即可求得 TC(mg)及面積值與待測樣本質量的檢量線。將儀器算的面積值代入檢量線運算，便可得出樣本的 TC(mg)。

六、雷射粒徑分析儀(圖八)

此儀器使用紅光與藍光雷射光源穿透一組傅立葉鏡頭，並用多角度偵測器量出粒徑分布範圍，最後用 Mie 公式理論推算粒徑分布。使用時以水為載體，將待測物用滴管滴入進樣系統，直到待測物濃度達可測量濃度為止。每樣本的量測約 6-8 分鐘。之後便可得到樣本之粒徑分布曲線，以及樣本顆粒在各個粒徑大小的分布表格。若測得粒徑分布趨勢圖有一峰值，可以推測此樣本粗顆粒大致分布的粒徑大小；若圖中呈現出兩個明顯的峰值，則表示此樣本粗顆粒與細顆粒混雜。本研究的樣本粒徑值，為粒徑分布曲線之峰值，也就是粒徑值的眾數。

(圖一到七本圖由作者拍攝；圖八引自海洋大學儀器設備列表)



圖一、最小刻度 0.1 g 的電子秤。



圖二、最小刻度 1 mg 的電子秤



圖三、烘箱



圖四、冷凍乾燥機



圖五、離心機



圖六、元素分析儀

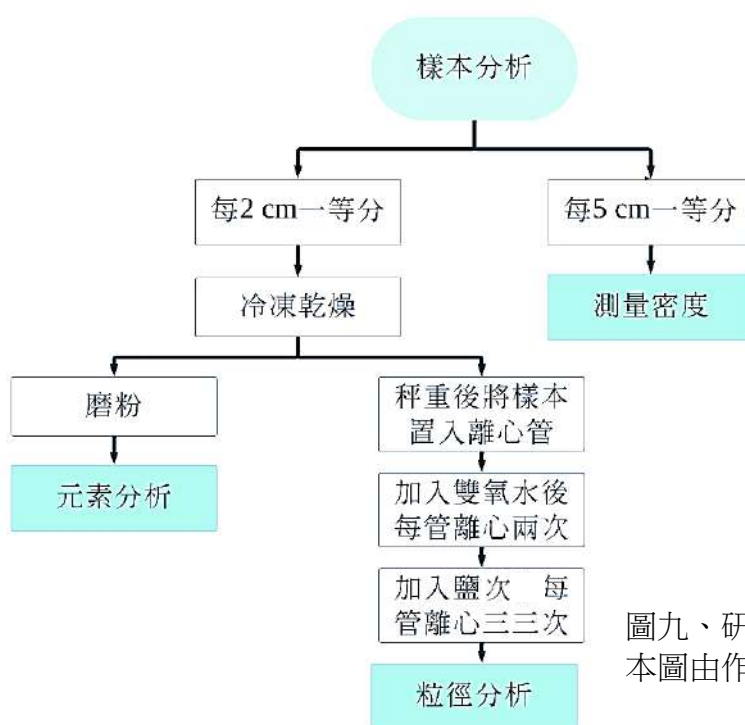


圖七、元素分析儀連接之氣瓶(灰瓶：氮氣，黑瓶：氧氣)



圖八、雷射粒徑分析儀

肆、研究方法或過程



圖九、研究方法之流程圖，本圖由作者親自製作

一、野外採樣

(一) 研究區域之背景特徵

1. 紅樹林(mangrove)

紅樹林是一種由特殊的鹽生樹種組成的森林，存在於亞熱帶和熱帶之海岸沿線的潮間帶、河口和島嶼上。藉由排鹽系統、氣根和胎生苗等方式，紅樹林生態系統的樹木有適應高鹽、缺氧和潮汐浸淹環境的能力(FAO and ITPS., 2021)。

其主要通過光合作用和從鄰近的陸地、海洋和空氣導入二氧化碳並且捕獲碳；其次是來自定植在地上根部的大型藻類和森林地面的微藻；第三大來源是來自上游和鄰近沿海地區的運輸和沉積 (Alongi, 2014)。紅樹林多數的碳是由紅樹林植物經光合作用後，產生凋落物並儲存在地下，最終以泥炭的形式存在。由此可知，紅樹林土壤主要以有機碳的形式進行碳封存(Alongi, 2012)。紅樹林相對高的初級生產力，以及從其周圍環境外的沉積物捕獲而來的碳，使紅樹林成為世界上最重要的藍碳生態系統之一，高達 8-15%的海洋有機碳埋藏其中。相較於其他森林種類，紅樹林能夠在土壤中儲存 3-4 倍的碳。紅樹林生態系統中大部分的碳，被保存在有機土壤頂部數公尺處 (FAO and ITPS., 2021)。全球與紅樹林有關的碳其量可觀，大量儲存於其土壤和植物的生物量中。所以紅樹林的復育，可以成為增加碳儲量的重要途徑(FAO and ITPS., 2021)。本研究主要由測每管岩芯中總有機碳占比，來估算紅樹林碳封存能力。

土壤碳的年埋藏率是通過碳損失(出口、消費和礦化)和年積累率之間的差額來估計的。但所封存的碳也不會全部都埋藏在土壤中，會隨土壤間隙中的地下水流失。因此，表層之下的總碳含量應該會有隨深度遞減的趨勢。(FAO and ITPS., 2021)

2. 鹽沼(salt marsh)

鹽沼指的是潮汐規律性淹沒的含鹽濱海區域或沼澤型溼地，主要是由深層的泥土及泥炭所構成，其泥炭來源是植物的枯落物。由於週期性的潮汐影響，土壤表層累積的鹽份能夠被海水帶走，其鹽度相對於內陸型的沼澤地穩定。鹽沼生態系有穩定海岸線、防止洪水氾濫、淨化污水、涵養水源及碳吸存等重要功能。前人研究顯示，鹽沼每年碳儲量約占有所有碳匯系統的 20%，而全球鹽沼所占面積也大於紅樹林。

表一、紅樹林與鹽沼之碳封存能力對全球的貢獻之比較(改自 Alongi, 2012 之研究)			
種類	面積(10^{12} m^2)與佔全球總面積比例	封存速率($\text{gC/m}^2 \text{ 年}$)	全球碳封存量(Tg/年)與佔全球總碳封存量之比例
紅樹林	0.14 (0.5%)	174	24 (14%)
鹽沼	0.22 (0.8%)	150	33 (20%)

(二) 採樣點介紹

為了取得深層的樣本，並使採集含砂量高的樣本時更容易，本研究將採集樣本用的壓克力管置入不鏽鋼管內，以汽油取代人工作為動力來源，使其內的重槌可以持續敲打岩層、獲取深層樣本。

1. 紅樹林：新豐紅樹林

本研究以新豐溼地的紅樹林作為紅樹林的代表(圖十)。新豐位於臺灣新竹縣新豐鄉，月均溫在 15-29°C 間，年雨量在 1000-1500 mm 間(中央氣象署，2022)。其紅樹林面積曾在 2001 年達最高峰 14.4 公頃，但在 2001 及 2004 年，出海口砂嘴陸續經歷納莉、艾利颱風的破壞，導致砂嘴缺口加大(王相華等，2016)，無法屏障砂嘴後方紅樹林密集分布的區域，海浪直接拍打到紅樹林的前緣，不利於紅樹林的生長，於 2015 年面積縮小為 8.5 公頃，至今面積仍在這個數值上下小有起伏(傅淑瑋等，2016)。新豐紅樹林的樹種為水筆仔及海茄苳混生(傅淑瑋等，2016)，被視為北臺灣和南臺灣紅樹林的交界。新豐紅樹林可謂全臺最古老的天然紅樹林，於 1932 年就有被記載(Kudo, 1932)，這點可從該地植生相較於其他紅樹林較為高大的樹木看出。

本研究於 2023 年七月五日，在新豐紅樹林取三個地點 XF-1、XF-2、XF-3 鑽孔(圖十一)。XF-1 及 XF-2(24°54'29"N, 120°58'15"E)靠近內陸、已陸化而受潮汐影響較小，定義為內陸地區，兩個鑽孔點之間相距不遠；XF-3(24°54'35"N, 120°58'12"E)位於港口旁邊，受潮汐影響較大，定義為沿海地區。本研究在在 XF-1 與 XF-2 兩點各取一管岩芯、在 XF-3 取三管岩芯，分別是 XF-3-1、XF-3-3 與 XF-3-4。XF-1、XF-2 的樣本多為砂；XF-3 的樣本多為泥。由於在 XF-1、2 鑽孔時剛退潮，表層的土壤被水淹過。



圖十、新豐紅樹林在新竹縣新豐鄉的位置示意圖(紅框內區域)，本圖引自 Google Map



圖十一、紅樹林鑽孔點(XF-1、XF-2、XF-3)在 Google 地圖上之位置，本圖引自 Google Map

2. 鹽沼：高美溼地

本研究以位於大甲溪出海口的高美溼地作為鹽沼的代表(圖十二)。高美溼地位於臺灣臺中市清水區，月均溫在 15-30°C 間，2022 年九月至 2023 年八月年雨量為 1051.5 mm，總面積為 701.3 公頃，是以挺水性的雲林莞草為主的鹹水草澤生態系，主要植被有雲林莞草、互花米草、蘆葦、鹽地鼠尾粟等(陳泳霖，2018)。高美溼地是鹹水草澤生態系，其環境受潮汐影響大，潮差約為 4.102 m，比新豐的潮差(3.551 m)大(交通部中央氣象署，2022)。

高美溼地的前身是高美海水浴場，在臺中港的啟用之後，高美海水浴場的泥沙淤積情形日益嚴重，遂在民國 65 年結束營業。此後，民間團體與當地民眾一同參與高美溼地的保育行動，直到民國 93 年，「高美野生動物保護區」才取得了法律地位。此區域作為溼地用途的期間其實並不長久。

本研究在高美溼地取兩個地點 BH1(24°18'59.5"N, 120°33'01.6"E)、BH2(24°18'48.0"N, 120°33'01.6"E)鑽孔(圖十三)。其中 BH1 的主要植被為蘆葦、互花米草和鹽地鼠尾粟；BH2 的主要植被則為雲林莞草。



圖十二、高美溼地在臺中市清水區的位置示意圖(紅框內區域)，本圖引自 Google Map



圖十三、BH1、BH2 在 Google 地圖上之位置，本圖引自 Google Map

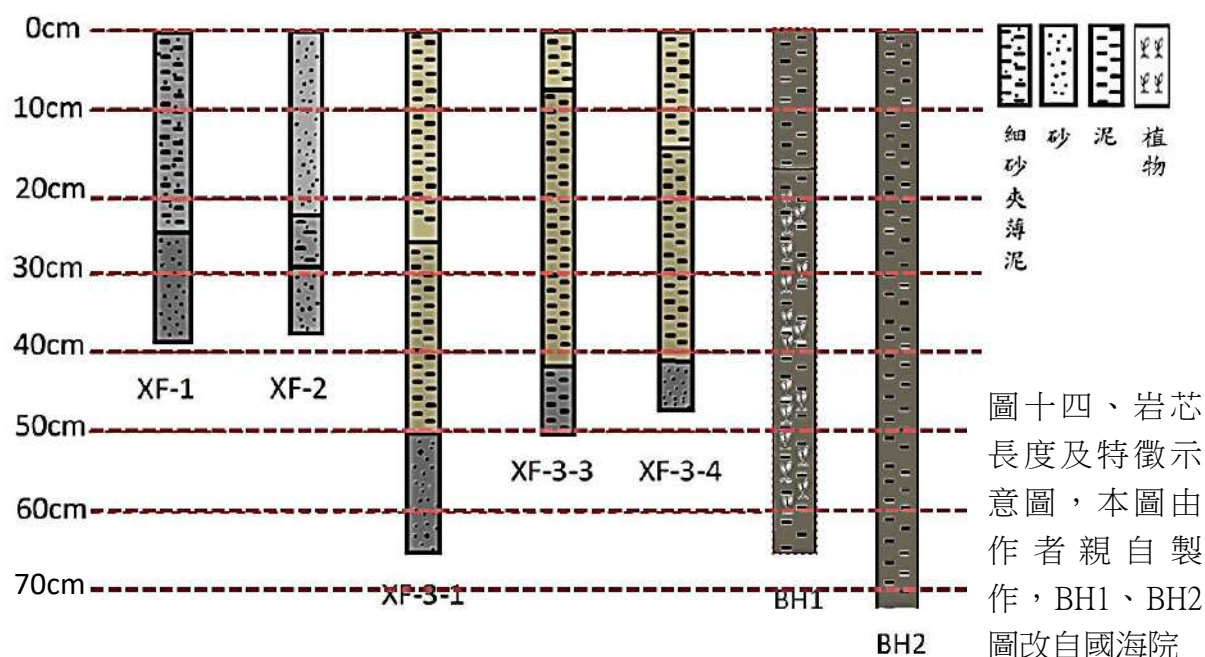
二、樣本的初步描述

回實驗室後便將樣本存放於冷凍櫃中。從冷凍櫃取出岩芯後，將其以自製桿子推出(圖十五)。先針對各岩芯的外型進行描述(表二)，再畫出其岩芯特徵示意圖(圖十四)。

表二、未經處理的岩芯之外觀特徵描述

鑽孔點	全長	特徵
XF-1	37 cm	0-24 cm：岩芯呈現灰咖啡色，細砂夾薄泥 24-37 cm：以細砂為主
XF-2	36 cm	0-22 cm：灰咖啡色，砂居多 22-28 cm：較深的灰咖啡色，細砂夾薄泥 28-36 cm：以細砂為主

XF-3-1	62 cm	0-25 cm：較淺的暗土黃色，多為泥 25-50 cm：暗黑色的泥與暗土黃色的泥交雜 50-62 cm：較深的暗土黃色
XF-3-3	50 cm	0-7 cm：較淺的暗土黃色，以泥為主 7-40 cm：暗黑色的泥與土黃色的泥交雜 40-50 cm：暗黑色的泥為主
XF-3-4	47 cm	0-14 cm：較淺的土黃色，以泥為主 14-39 cm：暗黑色的泥與深土黃色的泥交雜 39-47 cm：暗黑色的泥與深土黃色的泥交雜，且開始出現砂
BH1	65 cm	0-20 cm：呈灰咖啡色，主要為泥質沉積物 20-65 cm：為大量的植物根莖與泥質沉積物
BH2	72 cm	0-72 cm：呈灰咖啡色，皆為細粒之泥質沉積物



圖十四、岩芯
長度及特徵示
意圖，本圖由
作者親自製
作，BH1、BH2
圖改自國海院

三、切割樣本

為了使所得數據不受樣本頂部形狀之影響，在保留樣本頂部 1 cm 後，每 5 cm 插入內部邊長為 1 cm 的方塊，再將方塊放入烘箱去除水分測量其密度。最後紅樹林以 2 cm、鹽沼以 5cm 為一等分用鐵片分割樣本(圖十六)，將切割完的樣本裝入袋中，再於袋上記錄樣本編號。隨後放入 -40℃ 的冰箱，隔週再將其置入冷乾機中去除水分。

四、粒徑分析

取出冷乾後的樣本秤約 1 g 裝入 50 mL 離心管內。在離心管中加入 10 mL 15% 雙氧水，去除沉積物內有機質以避免顆粒膠結。再將離心管放入裝有 60℃ 溫水的震盪機 30 分鐘以加速反應。之後以離心機分離離心管上層廢液，再加入 20 mL 過濾自來水離心第二次。在此次後加入鹽酸並進行三次離心以去除沉積物的碳酸鈣。最後將樣本浸入 20 mL 的過濾水並加入 1 mL 的六偏磷酸鈉使沉積物分離以免影響分析結果。

五、元素分析

(一) 目的

測量出土壤中的碳、氮元素各佔總質量之比例。總有機碳質量佔總質量比例較高者，土壤碳封存能力佳，或此地有機質多；進入土壤之有機殘體中氮之成分及含量越高，有機碳積蓄的可能性越高，且 TOC/TN 的比值可用於推測有機物的來源。沉積物 TOC/TN 值在 7 以下者多來自海洋，在 8 以上者則來自陸地(Zeyang Lu et al., 2023)。

(二) 流程

冷乾後的樣本稱約 1 g，用秤量紙包起來後磨粉。用高精準度電子秤取將近但大於 50 mg 的粉狀樣本裝在小坩堝，再以元素分析儀分析其中各元素占樣本總重量比例。

六、密度分析

以 5 cm 為一單位，在樣本上插上邊長為 1 cm 的中空小方塊(圖十七)，將小方塊填充完樣本後再將蓋子蓋上(圖十八)，並以秤重後的結果扣除方塊重量作為樣本密度。由於實驗時的人為疏失，本研究在將樣本填充進小方塊中的階段未完整將小方塊塞滿。(圖十五到圖十八由作者拍攝)



圖十五、用自製桿子推出岩芯



圖十六、切割樣本過程圖



圖十七、密度分析取樣過程



圖十八、填充完成的小方塊

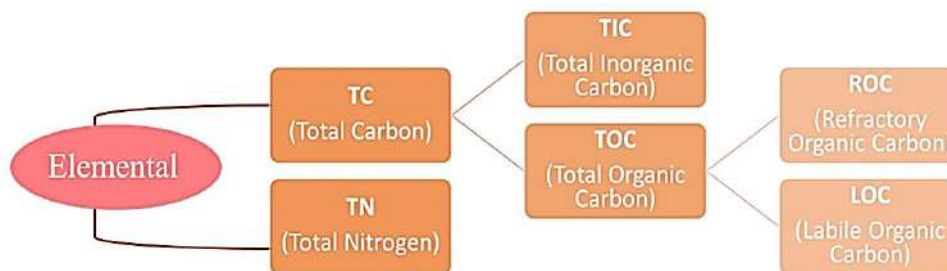
伍、研究結果

本研究用到許多英文縮寫，以下先整理後續討論使用到的英文縮寫之釋義。

表三、本研究所使用到的英文縮寫之全名及釋義		
英文縮寫	英文全名	中文釋義
Weight	Sediment Dry Weight	沉積物乾重量
TC	Total Carbon	總碳，為總無機碳及總有機碳的和。
TOC	Total Organic Carbon	總有機碳，為活性有機碳及難降解有機碳之和。
LOC	Labile Organic Carbon	活性有機碳，為一種較易汽化的短碳鏈有機碳。
ROC	Refractory Organic Carbon	難降解有機碳，為一種較難汽化的長碳鏈有機碳。
TIC	Total Inorganic Carbon	總無機碳
TN	Total Nitrogen	總氮

本研究在研究結果，會分別分析紅樹林、鹽沼這兩個區域之元素分析與粒徑分析之結果，在討論中再進一步比較二者間的差異與關係。

為了方便比較，在紅樹林中，本研究將 XF-1、XF-2 的 TC(%) 取平均成另一筆數據「內陸」；將 XF-3-1、XF-3-3、XF-3-4 的 TC(%) 取平均成另一筆數據「沿海」。然而，XF-3-1 為 62 cm，XF-3-3 為 50 cm，XF-3-4 為 47 cm，這三根岩芯高度不一，所以在「沿海」這筆數據中，0-47 cm 間取的數據範圍為 XF-3-1、XF-3-3、XF-3-4 三者的平均；47-50 cm 為 XF-3-1、XF-3-3 兩者的平均；50-62 cm 則為 XF-3-1 的原始數據。



圖十九、元素分析各參數關係圖，本圖由作者親自製作

一、元素分析

(一) 總有機碳佔樣本總質量比例〔TOC(%)〕隨深度的變化

用來計算樣本中總碳佔總質量比例 TC(%) 的公式如下：

$$TC(\%) = [\text{活性有機碳質量 } LOC(\text{mg}) + \text{難降解有機碳質量 } ROC(\text{mg}) + \text{總無機碳佔總質量比例 } TIC(\text{mg})] * 100\% / \text{樣本總乾重 } Weight(\text{mg})$$

用來計算總有機碳佔樣本總質量比例 TOC(%) 的公式如下：

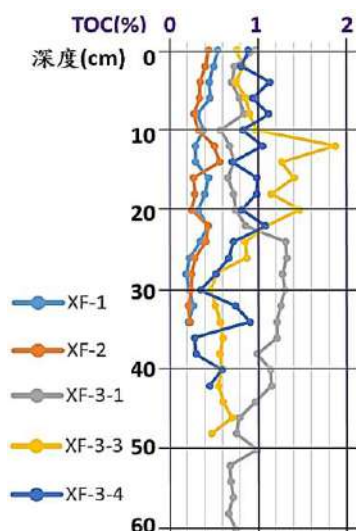
$$TOC\% = [LOC(\text{mg}) + ROC(\text{mg})] * 100\% / \text{樣本總乾重 } Weight(\text{mg})$$

表四、各地點之 TOC(mg)/TC(mg) 之值					
區域	鑽孔處	TOC/TC	區域	鑽孔處	TOC/TC
紅樹林	XF-1	0.95	鹽沼	BH1	0.96
	XF-2	0.96		BH2	0.89
	XF-3-1	0.95			
	XF-3-3	0.93			
	XF-3-4	0.92			

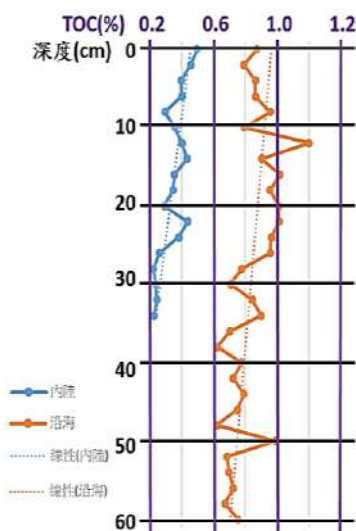
由表四可見，各點 TOC 在 TC 中的占比皆約等於 0.9，可見各採樣點所存的碳皆以有機碳為主，故 TC(%) 與 TOC(%) 隨深度變化趨勢很接近。在以下研究數據中，將會跳過對總碳的分析，而以分析有機碳隨深度變化趨勢作為代表。

紅樹林的 TOC(%)，由圖二十可知，除了 XF-3-1 外，其餘隨深度變化趨勢大致為隨深度遞減，而 XF-1、2 的 TOC(%) 明顯少於 XF-3 的各點。將 XF-3 各點數據合併後，

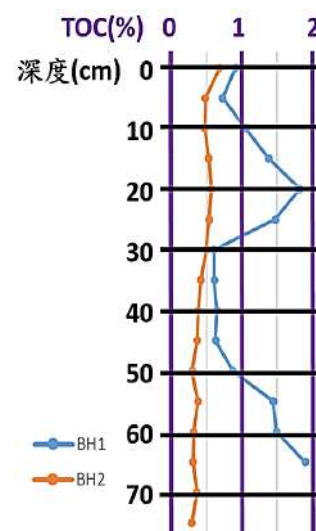
由圖二十一可見，紅樹林沿海地區 TOC(%) 比內陸地區高許多，而二者大致上皆隨深度遞減。鹽沼地區的部分，由圖二十二可見，BH1 的 TOC(%)皆大於 BH2。BH1 在 0-20 cm 處有上升的趨勢，在 20-30 cm 處約下降 1%左右，並在 30-65 cm 處逐漸上升。BH2 的趨勢線一直都很平穩的下降，從 0.73%降至 0.34%，下降幅度小。故 BH1 隨深度略有上升的趨勢，而 BH2 之 TOC(%)隨深度變化無明顯趨勢。



圖二十、紅樹林不同鑽孔點的 TOC%隨深度之變化。本圖由作者親自製作



圖二十一、圖二十數據合併，加趨勢線。本圖由作者親自製作



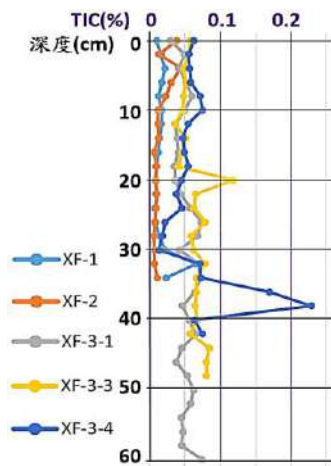
圖二十二、鹽沼不同鑽孔點的 TOC%隨深度之變化。本圖由作者親自製作

(二) 總無機碳佔樣本總質量比例〔TIC(%)〕隨深度的變化

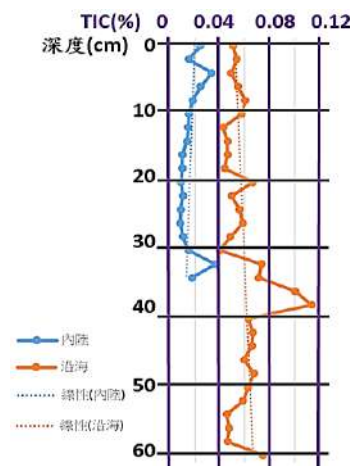
用來計算佔樣本總質量比例 TIC(%)的公式如下：

$$\text{TIC\%} = \text{總無機碳質量 TIC(mg)} / \text{樣本總乾重 Weight(mg)}$$

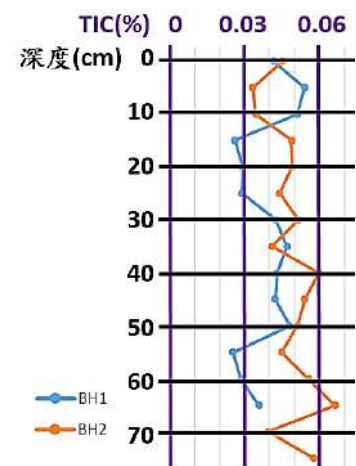
紅樹林的 TIC(%)由圖二十三可見，各鑽孔點的隨深度之變化皆不太明顯。XF-1、XF-2 的 TIC(%)少於 XF-3 的各點；XF-3-4 有一明顯的峰值，無機碳比例大幅度升高。由圖二十四，整體而言，紅樹林沿海地區的 TIC(%)仍比內陸地區高，但差異程度沒有像 TOC(%)那樣明顯。鹽沼地區的 TIC(%)由圖二十五中可見，BH1 和 BH2 大致是介於 0.03%-0.06 %之間，隨深度變化趨勢不明顯，且 BH1 和 BH2 並沒有很大的差異。(圖二十三到二十五由作者親自製作)



圖二十三、紅樹林不同鑽孔點的 TIC% 隨深度之變化



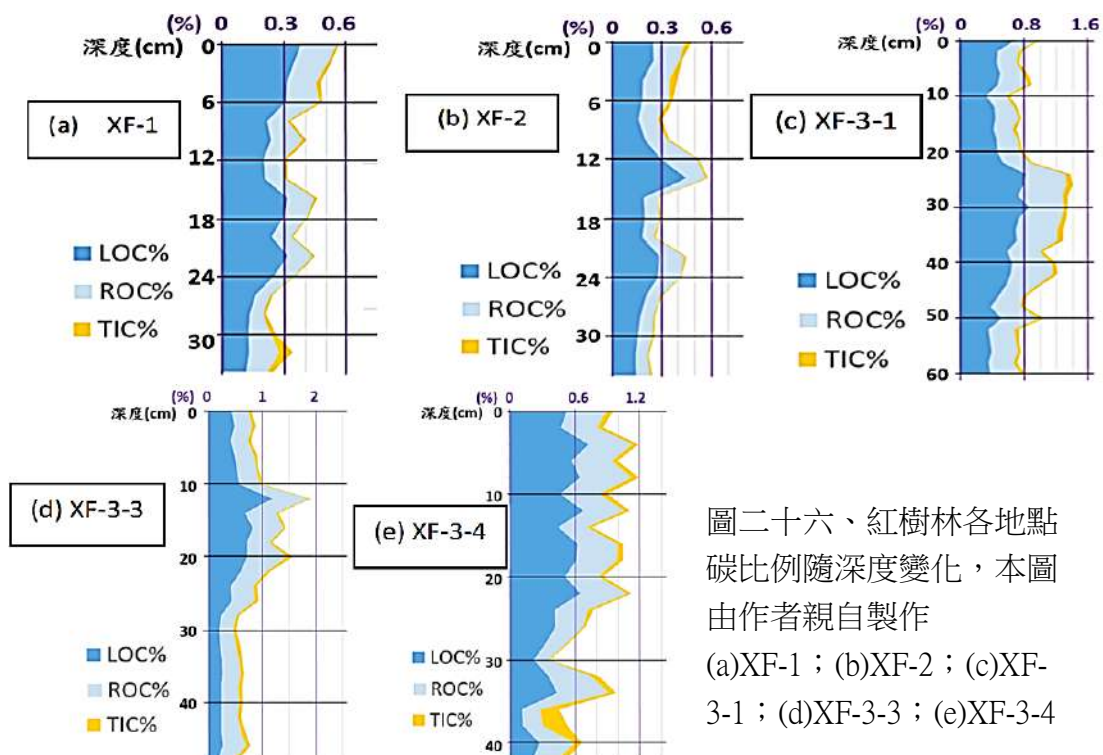
圖二十四、圖二十三數據合併，加趨勢線



圖二十五、鹽沼不同鑽孔點的 TIC% 隨深度之變化

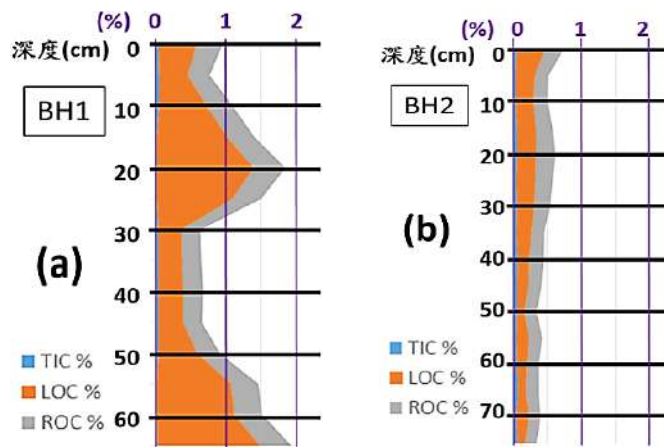
(三) 各地點之含碳成分之占比比較

紅樹林的部分，在圖二十六中，可發現各鑽孔點的 LOC(%) 都比 ROC(%) 大，且兩者皆明顯大於 TIC(%)。每個鑽孔點的 TC(%) 隨深度變化的趨勢與 LOC(%) 的趨勢相近，ROC(%) 隨深度變化的幅度則較小。XF-1、XF-2 的 TC(%) 皆較 XF-3-1、XF-3-3 與 XF-3-4 少，其中 XF-3-1、XF-3-3 的量有明顯的突增，但 XF-3-3 的 TC(%) 突增的深度較 3-1 的淺；XF-3-3、XF-3-4 有往下遞減的趨勢，但 XF-3-1 不太明顯。鹽沼地區的部分，由圖二十七可見，BH1 的 TC(%) 隨深度的變化較大，BH2 的 TC(%) 隨深度的變化則較小。在 TC(%) 中，不論是 BH1 或是 BH2 皆呈現 $LOC(\%) > ROC(\%) > TIC(\%)$ 的情形，且整體的 TC(%) 趨勢大致上是隨著 LOC(%) 變化的。



圖二十六、紅樹林各地點碳比例隨深度變化，本圖由作者親自製作

(a)XF-1；(b)XF-2；(c)XF-3-1；(d)XF-3-3；(e)XF-3-4



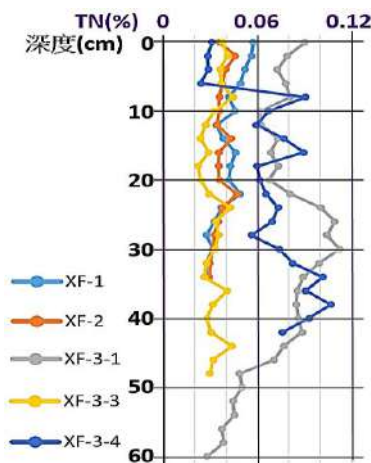
圖二十七、鹽沼各地點
碳比例隨深度變化，本
圖由作者親自製作
(a)BH1；(b)BH2。

(四) 總氮佔樣本總質量比例〔TN(%)〕隨深度的變化

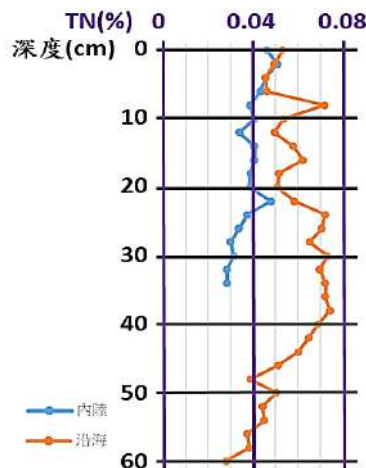
用來計算 TN(%)的公式如下：

$$TN(\%) = \text{總氮質量 } TN(\text{mg}) / \text{樣本總乾重 } Weight(\text{mg})$$

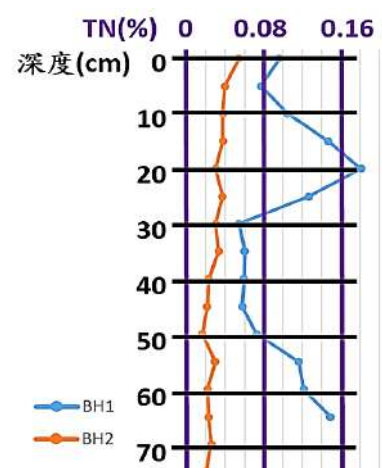
紅樹林地區的 TN(%) (圖二十八)，各鑽孔點的值大致都在 0.1% 以下，少於各點的 TC(%)。XF-3-1、XF-3-4 的 TN(%) 皆明顯高於其他三者。XF-1、XF-2、XF-3-1 的 TN(%) 隨深度的變化趨勢由多到少；XF-3-3 變化不明顯；XF-3-4 的 TN(%) 3-4 cm 處有一明顯峰值。由圖二十九可看出，紅樹林沿海地區淺於 8 cm 的範圍內，TN(%) 和內陸地區差不多；然而在深於 8 cm，沿海地區的 TN(%) 比內陸地區高許多。鹽沼地區的 TN(%) (圖三十)，BH1 的在 0-20 cm 處大約是從 0.08% 上升至 0.16%，在 20-30 cm 處由 0.16% 下降至 0.06% 左右，並在 30-65 cm 緩緩上升。至於 BH2，其趨勢大致是平穩的下降，由 0.05% 下降至 0.02%，隨深度的變化不大。



圖二十八、紅樹林不同鑽
孔點的 TN% 隨深度之變
化。本圖由作者親自製作



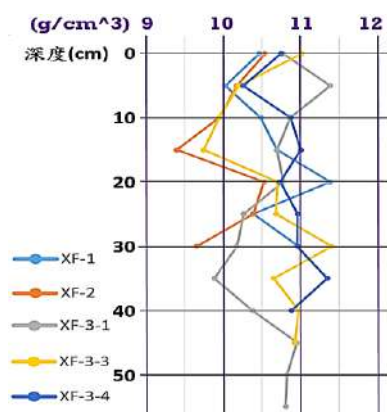
圖二十九、圖二十八數據
合併，加趨勢線。本圖由
作者親自製作



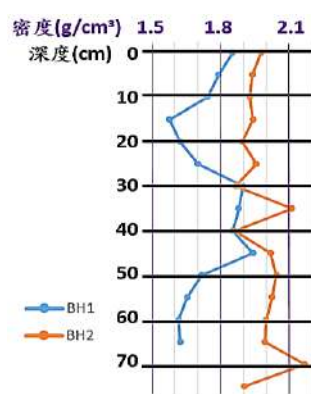
圖三十、鹽沼不同鑽孔點
的 TN% 隨深度之變化。本
圖由作者親自製作

二、密度

本研究可測得樣本含水密度，但無法測得乾重密度。因為裝入沉積物的小方塊放入烘箱後，水分蒸發，待測物的體積會改變。紅樹林地地區各鑽孔點的樣本含水密度 (圖三十一) 隨深度的變化很小，可能是因沉積環境未受嚴重擾動。本研究使用的密度測量方法是將尚未經過冷凍乾燥處理的樣本取出後，將邊長為 1 cm 的中空小方塊以 5 cm 為間隔插入樣本中，在固定體積為 1 cm^3 的情況下，只要測得樣本的重量即可得出樣本的密度。但是許多小方塊未被塞滿就已被測量，因此造成測量的結果未必準確。況且，本研究所算出來的紅樹林土壤密度值大多在 $9\text{--}12\text{ g/cm}^3$ 之間，這樣的值異常的大，所以實驗過程中一定有某些環節出錯，因此在下列討論中將不參考密度分析的數據。鹽沼地區(圖三十二) 的密度，BH1 和 BH2 隨深度無法看出明顯的變化趨勢。BH2 的密度平均為 1.97 g/cm^3 ，略大於 BH1 的 1.75 g/cm^3 ，但是兩者相差不大。



圖三十一、紅樹林不同鑽孔點的土壤溼重密度隨深度之變化。本圖由作者親自製作



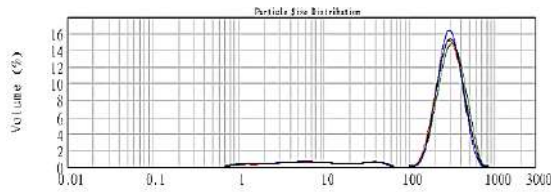
圖三十二、鹽沼不同鑽孔點的土壤溼重密度隨深度之變化。本圖由作者親自製作

三、粒徑分析

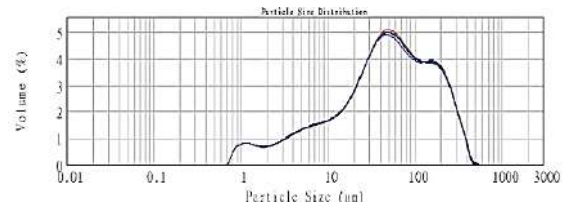
本研究所使用的粒徑數據是將每個深度的樣本經雷射粒徑分析儀分析之後，取該深度之樣本粒徑數據的眾數繪製而成的。在粒徑分析的數據中，XF-1、XF-2 兩點較 XF-3 的粒徑大許多。這可能是因為 XF-1、2 皆為內陸區域，而 XF-3 為沿海區域。至於鹽沼的部分，本研究目前僅完成樣本的粒徑分析前處理。

(一) 粒徑分布曲線

XF-1、2 粒徑曲線的高峰值落在 $100\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$ 之間，有一明顯峰值；且其峰值所佔比例約為 7-15%。以 XF-1 的 2-4 cm 處之粒徑分布曲線為例，如圖三十三。XF-3 的三個點中，粒徑曲線之峰值佔整體比例幾乎都不到 6%，且分布的較為平均，呈現一個緩慢上升的坡，如圖三十四。



圖三十三、XF-1 2-4 cm 處粒徑分布曲線。本圖引自雷射粒徑分析儀之分析資料結果



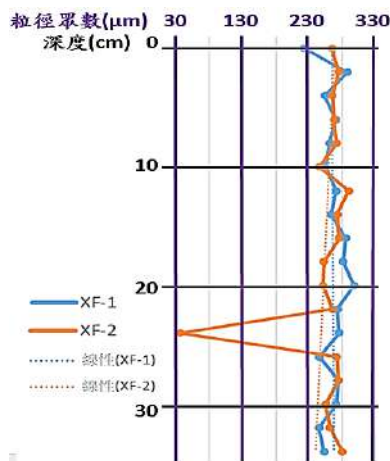
圖三十四、XF-3-1 6-8 cm 處粒徑分布曲線。本圖引自雷射粒徑分析儀之分析資料結果

(二) 粒徑眾數隨深度之變化

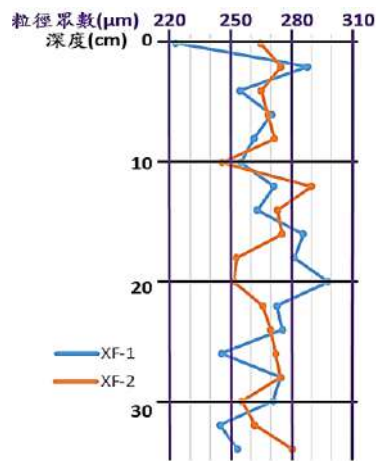
內陸地區的部分，從圖三十五中可看出，在 XF-2 的 26 cm 處，有一明顯異常的低谷值，且從圖中難以看出粒徑隨深度變化之趨勢。

為了方便看出粒徑隨深度變化之趨勢，本研究將 26 cm 處的異常值 34.924 μm 改為 270 μm ，使其較為貼近 XF-1、XF-2 其他數據之值以方便作圖(圖三十六)。然而，將異常值修正後，仍無法從圖中看出明顯的粒徑隨深度變化趨勢。

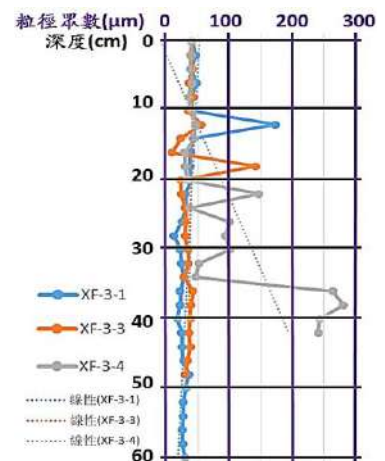
沿海地區的部分(圖三十七)，可見許多明顯異常之峰值，其中 XF-3-4 36-42 cm 處有一明顯上升區域，且其附近數值都在 250 μm 左右。



圖三十五、內陸地區粒徑隨深度變化。本圖由作者親自製作



圖三十六、上圖 XF-2 26 cm 處異常值修正後結果。本圖由作者親自製作



圖三十七、沿海地區粒徑隨深度變化。本圖由作者親自製作

陸、討論

由伍、研究結果可見，紅樹林地區，沿海(XF-3)的 TOC(%)在地層各深度的數值均大於內陸(XF-1、2)的 TOC(%)數值，且皆有表層碳比例比底部少，但表層之下隨深度遞減之情形(圖二十一)；鹽沼地區的部分，BH1 和 BH2 的 TOC(%)皆小於 2%，和紅樹林地區的結果差不多。BH1 隨深度略有上升的趨勢，而 BH2 之 TOC(%)隨深度變化無明顯趨勢(圖二十二)。以下討論，將分析造成以上現象之可能原因，並藉此估計臺灣的碳匯潛力。

一、有機碳儲量與來源

(一) 有機碳(TOC)背景介紹

紅樹林的有機碳主要來自陸地、海洋或是紅樹林植物本身行光合作用產生的。陸源的有機碳主要是由陸生的高等植物產生，再由河流運輸至紅樹林溼地中；來自海洋的有機碳是由潮汐帶來的，來源包括海洋藻類、浮游植物及海草床 (Alongi, 2014)。

(二) 紅樹林與鹽沼之有機碳比例比較

根據 Zeyang Lu 等人(2023)的研究，TOC(%)應該呈現紅樹林地區大於鹽沼地區的關係。但在本研究中，所測出的內陸紅樹林區 TOC(%)大致上為 0.2%-0.6%，沿海的則是 0.6%-1.2%(圖二十一)，而鹽沼的 TOC(%)在 BH1 在 1%-2%間，BH2 約為 0.5%(圖二十二)，稍大於紅樹林區的數值。本研究推測造成紅樹林與鹽沼的 TOC(%)不同，是由於受潮汐與不同植被的影響。高美溼地的潮差(4.1 m)大於新豐地區的(3.6 m)，受潮汐影響的範圍也比較大，或許能為此地帶來更多的沉積物；且在表二中可以得知，BH1 大約在 20-65 cm 有鑽到大量根莖與泥質沉積物，與所測到較高的 TOC(%)可能有關連。

(三) 紅樹林沿海與內陸地區碳匯性質之差異

1. 有機碳比例

造成沿海地區與內陸地區的 TOC(%)量產生差別的原因，可能和兩個採樣點陸化程度，或是受潮汐影響程度的不同有關。XF-1、XF-2 陸化程度較大，受潮汐的影響較小，因此由潮汐所帶來的有機物顆粒不容易在此沉積，所以由海洋輸入的有機碳就會比受潮汐影響的 XF-3 各點少，XF-1、XF-2 的 TOC(%)也就較低。除了受潮汐影響程度差異外，還有一個可能因素就是粒徑。XF-1、XF-2 為砂質的土壤(表二、圖十四)，是粗顆粒的沉積物，較不易吸附有機質。這點將在三、距海遠近與粒徑對碳占比的影響更加詳細的說明。

然而，Lina Cui 等人(2021)提到，影響土壤 TOC 含量的主要因素是林齡、土壤深度及樹種等因素，而水文條件如和河口之距離對土壤碳儲量是沒有影響的，這與本研究顯然不符。造成這樣矛盾的現象，推測是因為 Lina Cui 等人的研究所分析的紅樹林採樣區位於中國福建的泉州灣，而此地有洛陽江與晉江等流量穩定的河川作為穩定的沉積物供給來源；本研究所分析的岩芯之鑽孔點，位於臺灣新豐鄉的新豐紅樹林，主要流經的河川為新豐溪。臺灣多數河川屬於荒溪型河川，流量會隨季節而有大幅度波動。所以討論臺灣的紅樹林之碳儲量時，需考慮水文條件的影響。

2. 有機碳來源

TOC/TN 的比例能夠解釋環境中的沉積物來源。一般而言，海洋有機質的 TOC/TN 比值為 7，土壤有機質為 8-20，大於 20 的為陸源有機質(Nasir et al., 2016)。

為了方便比較，將各鑽孔點每深度 TOC(mg)、TN(mg)個別相加再相除，得出每鑽孔點 TOC/TN 值(表五)。紅樹林的 TOC/TN，XF-3-3 超過 20，推測其沉積物多來自陸地，其餘可能多來自紅樹林本身沉積。鹽沼的 TOC/TN，BH1 為 10.94，BH2 為 14.19，由此可推知鹽沼沉積物的來源多來自本身植被枯落物的沉積。

表五、各鑽孔點之 TOC/TN 值平均					
鑽孔點		TOC/TN	鑽孔點		TOC/TN
紅樹林	XF-1	8.68	鹽沼	BH1	10.94
	XF-2	9.44		BH2	14.19
	XF-3-1	12.37			
	XF-3-3	26.17			
	XF-3-4	11.27			

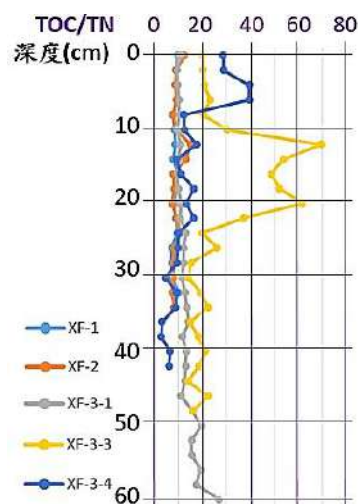
然而，若照上述前人理論來看，紅樹林的五個鑽孔點中，理論上位於內陸、有機物多為陸源的 XF-1、XF-2 之 TOC/TN 要很接近，且顯著大於位於沿海、有機物多來自海洋的 XF-3。

為了解釋此現象，本研究參考 Meng-fan Chu 等人(2021)的研究，其表明 TOC/TN 值雖為研究沉積有機碳來源的傳統指標，常被應用到紅樹林有機碳來源的研究中，但這些指標的單獨應用存在一定的局限性。由於紅樹林植物的 TOC/TN 與陸生植物大致相同，僅利用此指標無法準確地區分有機質來源。這也很好的解釋了為何區分陸源與海洋有機質的 TOC/TN 沒有一個明確的值，而是每篇研究皆有些許差異，且多陸源有機質的地點，並無法確定此地點一定在內陸地區。

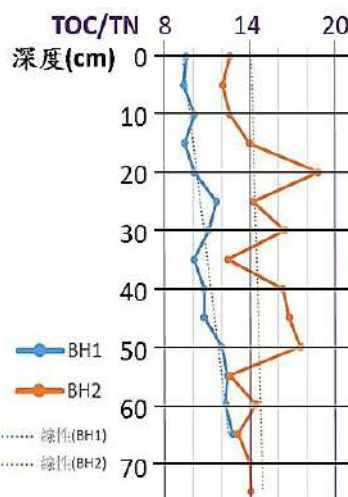
比較了 XF-3-3 和 XF-3-1、XF-3-4 的數據之後，本研究發現其 TOC(%)大致相同，但 XF-3-3 的 TN(%)平均為 0.03%，小於 XF-3-1、XF-3-4 的數值(約為 0.07%)，才導致 XF-3-3 的 TOC/TN 顯著大於其他 XF-3 的點。參考 Lee 等人 2019 年的研究之後，發現若 TOC/TN 介於 12-28 之間，其沉積物來源可能是來自陸地，也可能來自淡水或鹹水，因此雖然 XF-3-3 和 XF-3-1、XF-3-4 差異較大，但尚在合理範圍之內。

紅樹林的 TOC/TN (圖三十八)，XF-1、XF-2 的有機質來源隨深度的變化不明顯；XF-3-1 與 XF-3-3 都在 10 以上，可能來自紅樹林本身的沉積或是由淡水帶來的；XF-3-4 的 TOC/TN 則有隨深度遞減至 10 以下的趨勢，顯示 XF-3-4 早期海洋有機質較多，但後來淡水有機質逐漸增加，代表紅樹林的有機質會同時受到多種來源的影響。

鹽沼的 TOC/TN (圖三十九)，BH1 自岩芯頂部到約 65 cm 處逐漸上升，顯示此地早期受到比較多淡水有機質影響，而後數值逐漸下降，顯示海洋來源的有機碳逐漸增加。BH2 基本上都落在 12-20 之間，顯示其主要以淡水來源的有機碳為主，但是中間有一些小變化。



圖三十八、紅樹林各鑽孔點的 TOC/TN 隨深度之變化。本圖由作者親自製作



圖三十九、鹽沼各鑽孔點的 TOC/TN 隨深度之變化。本圖由作者親自製作

二、碳匯能力

一個地區的碳匯能力，可以用有機碳的兩個種類：活性有機碳(LOC)與難降解有機碳(ROC)的比值來分析，以下會更加詳細說明。

(一) 紅樹林的 LOC 與 ROC 的來源

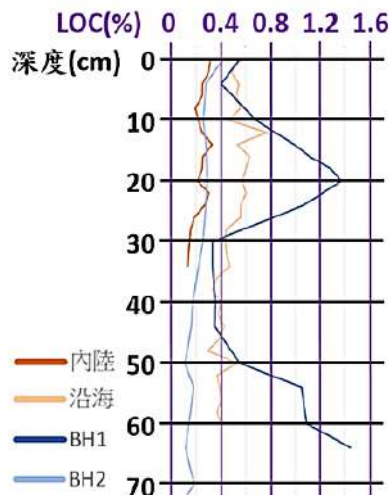
LOC(Labile Organic Carbon, 活性有機碳)是土壤有機碳中較容易被土壤生物分解的部分，且為有機碳中周轉速度最快的一部份(X.m. zou et al., 2005)。而 ROC(Refractory Organic Carbon, 難降解有機碳)的形成原因則如下：陽光照射表層海洋的時候，約有 20% 的有機碳以溶解、懸浮和下沉的顆粒形式輸送到海洋內部，然後被礦化並以溶解無機碳(DIC)、沉積顆粒有機碳(POC)或「難溶」形式封存溶解有機碳(rDOC, refractory dissolved organic carbon)，這也就是本研究中的 ROC(Baltar et al., 2021)。因此，在討論土壤的碳匯能力時，是期望土壤能以 ROC 這種經過礦化、穩定不易流動的形式來封存碳，而不是像 LOC 這種容易被分解為二氧化碳的碳。

(二) LOC(%)、ROC(%)隨深度之變化

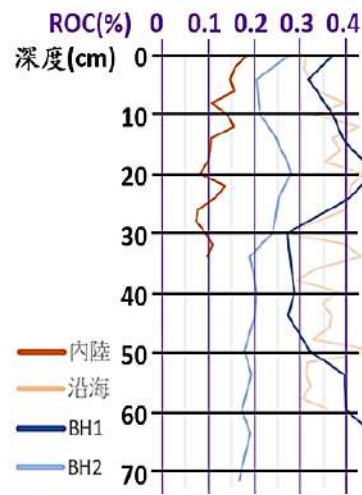
由圖四十、四十一可見，LOC(%)的部分，XF 的內陸及沿海地區還有 BH2 皆有些微隨深度遞減的趨勢，而 BH1 的趨勢則為隨深度遞增；ROC(%)的部分，除了 XF 的內

陸地區與 BH2 有隨深度遞減的趨勢外，其餘皆沒有明顯隨深度變化之趨勢。

Zeyang Lu 等人在 2023 年的研究中顯示，表層沉積物含有較多的 LOC，其比例隨著深度的增加而減少。這與本研究的數據所呈現之趨勢相符。然而，Zeyang Lu 等人在 2023 年的研究也提到，ROC 的比例與深度有關，其在上部 40 cm 隨著深度的增加而明顯增加，而這與本研究的數據顯然不符。造成此現象的原因，以下將會比較本研究之 LOC 與 ROC 占 TOC 比例與前人研究之差異後，再進一步做推論。



圖四十、各地點的 LOC(%)隨深度之變化。本圖由作者親自製作

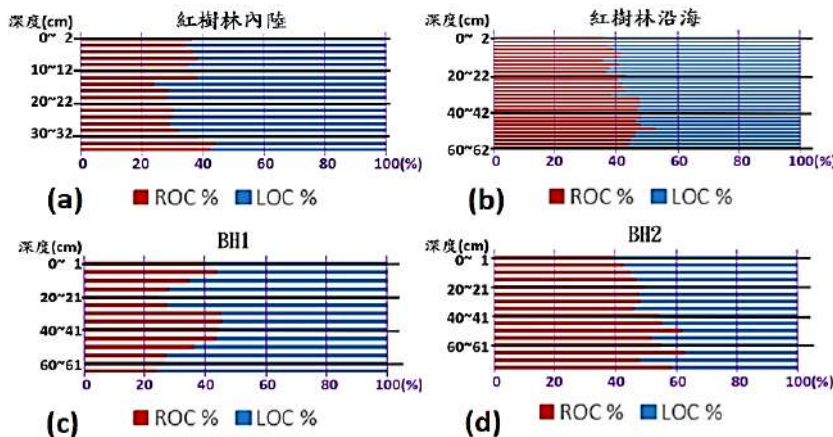


圖四十一、各地點的 ROC(%)隨深度之變化。本圖由作者親自製作

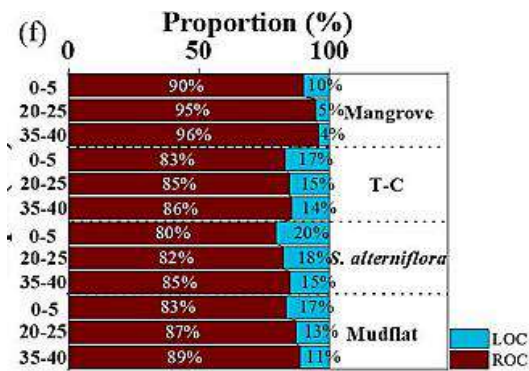
(三) 以 ROC:LOC 分析土壤存碳能力

由圖四十、四十一可見，XF 各點及 BH1 之 ROC(%)皆小於 LOC(%)，唯 BH2 之 ROC(%)和 LOC(%)皆約等於 0.2%。為了較好呈現土壤中的 LOC 含量顯著大於 ROC 含量之情形，本研究畫出 ROC:LOC 隨深度變化的柱狀圖(圖四十二)。

然而，在 Zeyang Lu 等人在 2023 年的研究數據(圖四十三)中，紅樹林土壤 ROC 的含量近乎是 LOC 的九倍，這與本研究的數據結果有極大的差異。



圖四十二、本研究之 ROC:LOC 隨深度變化的柱狀圖。本圖由作者親自製作
(a)紅樹林內陸；(b)紅樹林沿海；(c)BH1；
(d)BH2。



圖四十三、中國湛江紅樹林的 ROC:LOC 隨深度之變化(Zeyang Lu et al., 2023)。本圖引自 Zeyang Lu 等人 2023 年的研究

觀察到此現象後，本研究參考了更多文獻的說法。其中 Lina Cui 等人 2021 年的研究表明，紅樹林 ROC 隨時間積累，而 LOC 含量隨著時間逐漸下降，也就是 ROC:LOC 之值會隨著時間遞增。本研究的 ROC:LOC 之值極小，所以照 Lina Cui 等人的結論，本研究所選擇的紅樹林採樣點很年輕。然而，新豐紅樹林是臺灣較古老的紅樹林。

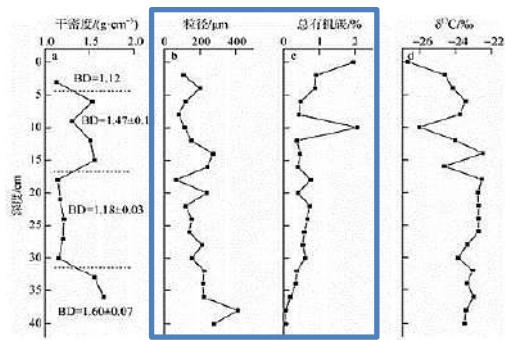
(四) 綜合比較

由 Zeyang Lu 等人於 2023 的研究可知，ROC 含量越高的區域越有能力長久且穩定的儲存有機碳。本研究每個採樣點的 ROC(%)都相當低，代表本研究中的碳匯系統多以不穩定且容易被分解回到大氣的 LOC 為主。這些碳剛被生產沒多久，此地之碳匯能力尚未成熟，所以臺灣紅樹林及鹽沼表層 1 m 處左右的土壤碳封存能力不佳。造成此點的原因，推測是採樣環境的不同所致。臺灣地區碳匯系統的形成主要是受到氣候的影響，沒有穩定的河川系統供給沉積物，河川所帶來砂源的河川水量會依季節而有明顯的差異，夏天多而冬天少，極度不穩定。再加上相較前面所提的前人研究，臺灣的碳匯系統可能都非常年輕。在肆、研究過程或方法及進行步驟的(三) 採樣點介紹中有提及高美溼地是在民國 65 年之後才形成的，至今大約只有五十年的時間而已，其碳封存的能力未必穩定，相較於因發展長久而逐漸擁有自動捕獲碳機制的紅樹林生態系而言，臺灣只能被動的由河川或暴雨、颱風等形式輸入碳，但這也可能代表臺灣有能力在短期內生成一碳匯系統。

三、距海遠近與粒徑對碳占比的影響

(一) 紅樹林陸化區域粒徑隨深度之變化

在 XF-2 的 26 cm 處粒徑之異常的低谷值(圖三十五 XF-2 的 26 cm 處)，由於在岩芯切割過程中，在 24-28 cm 處並沒有觀察到任何有異於其他處的物質(如：泥、葉)的出現，岩芯的色澤和其他部分也沒變化，加上僅有一樣本點，所以推測這個低谷值是實驗誤差或人為操錯疏失所致。最有可能的情況是，在進行 24-26 cm 的粒徑分析時，滴管只吸取到了樣本液的上半部分，所以吸取到的粒徑只有細顆粒。



圖四十四、本圖引自《海南儋州灣紅樹林區沉積有機質來源及碳儲量》(2021)。由藍色方框中的兩張圖可看出兩點：一，土壤粒徑隨著深度的加深有增大的趨勢；二，總有機碳的比例大致上隨深度遞減

由圖三十五看出，粒徑沒有明顯隨深度的變化。然而，Chu 等人(2021)在海南儋州灣紅樹林區的研究顯示，土壤粒徑變化有隨深度遞增的趨勢；總有機碳(%)則有隨深度遞減的現象(圖四十四，藍框處)。也就是說，本研究(圖三十五)和前人研究(圖四十四)粒徑值隨深度的加深有上升的趨勢之說法相斥。可能是因為臺灣的顆粒沉降機制和此研究之採樣點有所差異，才會觀察到這樣的現象。

(二) 紅樹林沿海區域粒徑隨深度之變化

XF-3-4 的 36-42 cm 處明顯上升之區域(圖三十七 XF-3-4 36-42 cm 處)，這些相較前幾筆數據顯得異常的數據的出現，並不是只有一兩筆，而是 36 cm 以上的粒徑值皆較 36 cm 以下的粒徑值大許多，不能僅用實驗誤差來解釋這個現象。

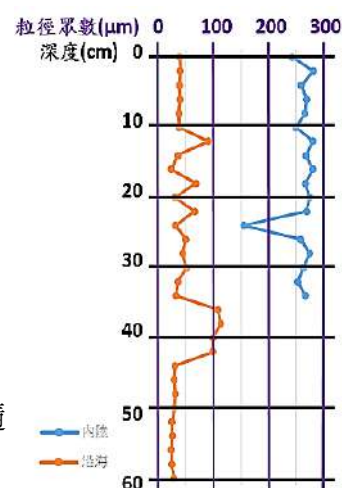
回頭看表二及圖十四，可見 XF-3-1、XF-3-3、XF-3-4 的岩芯成分皆以泥為主，但 XF-3-4 的 39 cm 處開始有砂的出現，這可能是 XF-3-4 的粒徑值之 36-42 cm 處的明顯上升之區域的出現有關。這與本研究實驗結果，在成分以泥為主的岩芯中開始出現砂的地方，粒徑值會大幅上升的情形吻合。

在 XF-3-1、XF-3-3、XF-3-4 之粒徑隨深度的變化圖表加上趨勢線後(圖三十七)，除了後半段有砂出現的 XF-3-4 外，其餘兩者仍是觀察到粒徑值隨著深度的加深遞減這樣與前人研究(圖四十四)矛盾的現象。

(三) 內陸及沿海區域之比較

由圖四十五可見，紅樹林內陸地區的粒徑比紅樹林沿海地區大了五倍左右，這可能跟其沉積顆粒的性質有關。內陸地區的顆粒以砂為主，而沿海地區則以泥為主。內陸的砂多可能是因為強風吹拂帶來粗砂粒，會做出如此推論是因為內陸的 XF-1、XF-2 無河流流經，所以較可能是強風帶來；而沿海的 XF-3 位於漁港旁，有人為設施擋住水流，所以有較多細顆粒如泥等留下。砂粒的顆粒半徑本身就比较泥大許多，所以粒徑眾值才會相差五倍之多。《氣候治理下的溼地碳匯：以臺灣為例》有提到，粒徑較小的泥質沉積物的有機碳含量會較沙質高，因為細顆粒較粗顆粒容易吸附有機碳。這點

和本研究的研究結果完全相符。粒徑較小、岩芯成分主要為泥的 XF-3 之 TOC 含量，確實比粒徑較大、岩芯成分主要為砂的 XF-1、XF-2 之 TOC 含量大許多(表二、圖十四、圖二十、圖二十一、圖三十五、圖三十七、圖四十五)。



圖四十五、紅樹林內陸與沿海地區的粒徑隨深度變化之比較。本圖由作者親自製作

四、碳占比隨深度的變化及其意義

(一) TC 與 TOC

深度越深，TC(%)、TOC(%)越少的原因可能和碳從紅樹林輸出有關係。紅樹林土壤中封存的有機碳，可能因微生物的代謝作用而以氣態如二氧化碳的形式排出，這些氣體也可能溶解在地下水中，再經由地下水排出。越下層的沉積物受生物代謝作用與地下水的影響越久，流失的碳也越多，導致 TOC(%)不論在內陸或沿海都有隨深度遞減的趨勢。

而鹽沼的部分，綜合高美溼地兩口岩芯的結果來看，顯示高美溼地的出現多落在河口礫石質的沖積扇上，在特定的大型事件(數米甚至更深的礫石層)上，開始有較穩定的沉積環境累積多細顆粒的沉積物，但是植物的分配、離河口(淡水)注入的遠近，亦會影響有機碳的組成與含量變化，未來可能需要離岸更遠的鑽探位置，才有機會比較好掌握整體較細顆粒的沉積物分佈範圍以及不同有機碳來源分佈的時空分佈變化。

(二) TIC

由圖二十四、圖二十五可見，整體而言，紅樹林與鹽沼地區的 TIC(%)隨深度變化趨勢和比例都沒有明顯的差異，隨深度的變化也沒有固定的趨勢。

在紅樹林地區中，XF-3-4 在深度為 34-38 cm 之間有一明顯的峰值(圖二十三 XF-3-4 36-38 cm 處)，推測是因為燒到生物的殼體所致，才會使無機碳比例大幅度升高。

五、臺灣藍碳系統的碳收支模型

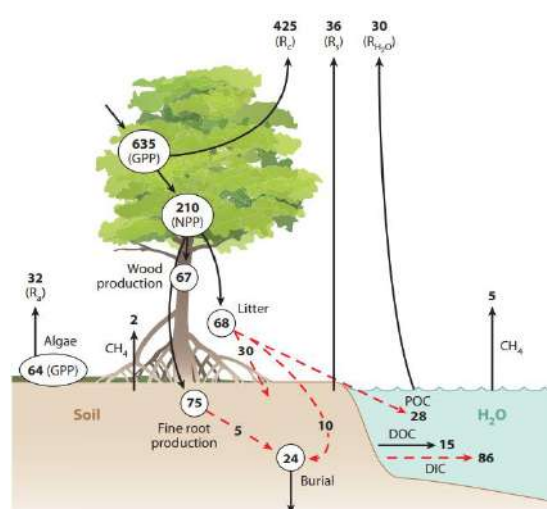
(一) 前人研究匯整

在 Alongi(2014)的研究中提及，紅樹林的 TOC 來自陸地、海洋或光合作用所產生的。另外，在 Zeyang Lu 等人(2023)的研究中也提到，土壤表層的 LOC 較多，ROC 較少，且 ROC(%)會時間逐漸累積，LOC(%)則會隨時間逐漸下降。本研究繪製了紅樹林

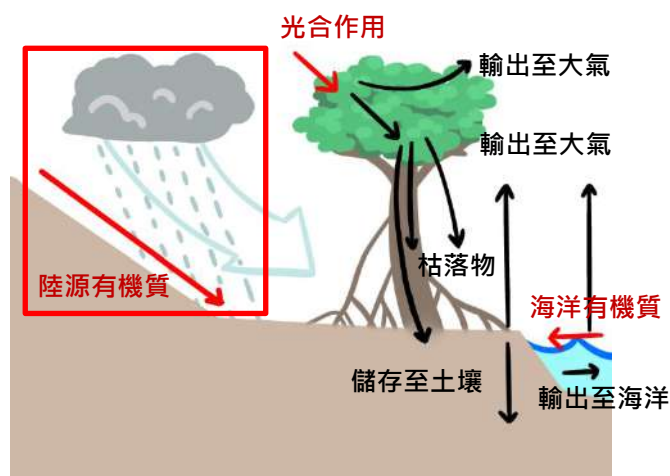
碳收支的示意圖以輔助說明（圖四十六）。

(二) 臺灣藍碳系統碳收支模型

本研究在圖四十六中加入了水文條件與氣候兩種因素(圖四十七紅框處)，以圖四十七呈現。本研究推測臺灣的藍碳系統受到氣候及水文條件的影響很大，一場短期的氣候事件可能會增加陸源有機質的輸入，或使枯落物增加，進而使 TOC/TN 值上升並改變其碳儲量。



圖四十六、氣候穩定時，紅樹林的碳收支情況（單位：TgC/y）。本圖截自 Alongi, 2014



圖四十七、氣候不穩時，紅樹林的碳收支情況（箭頭粗細不代表通量多寡）。本圖由作者親自製作

柒、結論與應用

臺灣紅樹林的碳封存能力主要受到氣候、水文條件等外在環境因素影響，並可藉由粒徑大小或距海遠近推論 TOC(%)的大小。粒徑較大者，較不易吸附有機質，TOC(%)會低於粒徑較小者；近海地區受潮汐影響較大，也許可為當地帶來更多有機值而使 TOC(%)上升。粒徑跟距海遠近沒有絕對的關係，而是受當地環境因素如風的吹拂與人為設施的存在影響。

由於河川流量不穩定與紅樹林發展尚未成熟，再加上氣候的影響，本研究推估臺灣的碳匯系統並無法長久且穩定的儲存有機碳，因此國外的研究結論較難套用在臺灣的藍碳系統中。但也由於環境複雜的關係，本研究推論臺灣的環境有利於在短期之內形成一碳匯系統。

期望未來可以針對紅樹林與鹽沼等藍碳系統做 TOC 與 LOC 來源的分析，並測定沉積物的年齡，以求這些藍碳系統的碳封存速率。同時也期望未來能取得深度更深的岩芯樣本，以獲得關於藍碳系統更詳細的數據。若未來能將本研究中估算土壤有機碳比例的方式應用在政府的減碳機制上，並估算底土有機碳除量及底土有機碳儲存速率，應能對 2050 年的淨零排

放國家目標有所貢獻。

捌、參考文獻

- 王相華、黃俐雯、傅淑瑋、鄧國禎、葉堃生、李鎮宇(2016)。海岸侵蝕危及新豐國家級濕地之紅樹林。林業研究專訊，23(5)，39 - 42。
- 傅淑瑋、李鎮宇、鄧國禎、葉堃生、黃俐雯、王相華(2016)。新豐紅樹林在 1948 至 2015 年間的變遷。國家公園學報，26(1)，31 - 45。
<https://tpl.ncl.edu.tw/NclService/JournalContentDetail?SysId=A16037952>
- 多樣性生態顧問有限公司(2018)。106-107 年度高美(國家級)重要濕地基礎調查計畫。臺中市政府農業局。
- 陳永霖(2018)。海岸鹽沼型濕地沉積物之碳庫與碳會能力之分析研究-以高美濕地為例。國立中山大學海洋環境及工程學系研究所。
- 交通部中央氣測站(2022)。縣市測站列表 - 新竹縣。
https://www.cwa.gov.tw/V8/C/W/OBS_County.html?ID=10004
- 魏國彥、羅立(2023)。氣候治理下的溼地碳匯：以臺灣為例。逢甲大學創能學院、臺灣大學地質科學系。
- Andriani Nasir, Muhammad Lukman, Ambo Tuwo, Muhammad Hatta, Rahmadi Tambaru and Nurfadilah.(2016). The Use of C/N Ratio in Assessing the Influence of Land-Based Material in Coastal Water of South Sulawesi and Spermonde Archipelago, Indonesia. *Frontiers in Marine Science, Volume 3, Article 266*, 1-2.
- Chmura, G. L., Anisfeld, S. C., Cahoon, D. R., and Lynch, J. C.(2003) Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4).
- Daniel M Alongi.(2012). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3(3), 313-322.
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.4155/cmt.12.20>
- Daniel M Alongi.(2014). Carbon Cycling and Storage in Mangrove Forests. *Annual Review of Marine Science*, 6, 195 - 219.
<https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- FAO and ITPS.(2021). Recarbonizing global soils: A technical manual of recommended management practices. Volume 2: Hot spots and bright spots of soil organic carbon. Rome, FAO.
<https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb6378en>
- Federico Baltar, Xosé A. Alvarez-Salgado, Javier Arístegui, Ronald Benner, Dennis A. Hansell, Gerhard J. Herndl, and Christian Lønborg.(2021). What Is Refractory Organic Matter in the Ocean? *Frontiers in Marine Science, Volume 8*, 1-7.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.642637/full>
- Kudo Y.(1932). The mangrove of Formosa. *The Botanical Magazine* 46 (544):147-156.
- Lee, S., Kim, T., & Kim, G. (2019). Tracing Terrestrial versus Marine Sources of Dissolved Organic Carbon in a Coastal Bay Using Stable Carbon Isotopes. *Biogeosciences*, 17(1), 135 - 144.
<https://bg.copernicus.org/articles/17/135/2020/>
- Lina Cui, Huimin Sun, Xuhua Du, Wenting Feng, Yugang Wang, Jinchu Zhang, Jiang Jiang. (2021). Dynamics of Labile Soil Organic Carbon during the Development of Mangrove and Salt Marsh Ecosystems. *Ecological Indicators, Volume 129*, 1-9.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X21005409?via%3Dihub>
- Meng-fan Chu, Xiao-tong Xiao, Yang Ding, Mei-xun Zhao.(2021). Sediment organic matter sources and carbon stock associated with a mangrove reserve in Danzhou Bay, Hainan, China. *Marine Sciences*, 45(2), 22-31.
<http://qdhys.ijournal.cn/html/hyxx/2021/2/20210203.html>

National Oceanic and Atmospheric Administration. What is a salt marsh.

<https://oceanservice.noaa.gov/facts/saltmarsh.html>

X.m. zou, H.h. ruan, Y.fu, X.d. yang, & l.q. sha.(2005). Estimating Soil Labile Organic Carbon and Potential Turnover Rates Using a Sequential Fumigation – Incubation Procedure. *Soil Biology & Biochemistry* 37, 1923 – 1928.

<https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/30071>

Yung-Lin Chen.(2018). Analysis of Carbon Stock and Carbon Sink Effects for Salt Marsh Wetland-A Case Study in Kaomei wetland.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2016.00266/full>

Zeyang Lu , Kai Xiao , Fenfang Wang , Yao Wang , Qibiao Yu , Nengwang Chen.(2023). Salt marsh invasion reduces recalcitrant organic carbon pool while increases lateral export of dissolved inorganic carbon in a subtropical mangrove wetland.*Geoderma*, Volume 437,1-13.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706123002501?via%3Dihub>

【評語】 180020

本研究彙整國際碳匯文獻，進行野外實地調查與分析，實際驗證本土碳封存環境，並進行比較分析，動機架構清楚，實驗方法設計妥適。河口藍碳相關之文獻回顧豐富，仔細與前人研究進行比較，並繪製出屬於本地的碳收支系統示意圖。粒徑數據中出現異常偏低的數值，建議應說明為何調整為 $270\ \mu\text{m}$ 。化學分析數據存在一定的測量誤差，建議進入正式的數據分析前應先討論測量誤差，方知數據品質與多少的數據差異，才可列入研究的分析討論。本研究著重於有機碳的碳匯效益，可是無機碳(如生物殼體之碳酸鈣)也是重要的潛在碳匯，建議於分析階段中，可適當評估無機碳的潛在貢獻(計算鹽酸反應前後的重量損失)。