

臺灣海草床碳匯
測量標準作業程序

2025年11月
海洋委員會

1. 前言

本方法為海草床碳匯納入臺灣國家溫室氣體排放清冊之測量方法，因此統一使用噸二氧化碳當量 ($t\text{CO}_2\text{e}$) 為單位。本書以碳儲量變化正值表示從大氣或其他碳庫移除溫室氣體 (即儲存溫室氣體在自身碳庫內)，溫室氣體排放量正值表示排出溫室氣體到大氣或其他碳庫。本方法主要參考：

1. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. 以下簡稱 2006 IPCC NIR 指南。
2. 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. 以下簡稱 2013 IPCC NIR 濕地補充指南
3. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 以下簡稱 2019 IPCC NIR 指南精進內容
4. Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses. 以下簡稱 IUCN 濱海藍碳
5. 內政部營建署城鄉發展分署「106-107 年度重要濕地碳匯調查計畫」案成果報告書-附錄：濕地碳匯功能調查標準作業程序。以下簡稱內政部營建署濕地碳匯標準作業

國家特定係數參考文獻：

1. Huang, Y.-H., Lee, C.-L., Chung, C.-Y., Hsiao, S.-C., & Lin, H.-J. (2015) Carbon budgets of multispecies seagrass beds at Dongsha Island in the South China Sea. *Marine Environmental Research*, 106, 92-102.
2. Zou, Y.-F., Chen, K.-Y., & Lin, H.-J. (2021) Significance of belowground production to the long-term carbon sequestration of intertidal seagrass beds. *Science of The Total Environment*, 800, 149579.
3. 林幸助(2022)。臺灣沿海重要碳匯生態系統調查與評估計畫成果報告。海洋委員會海洋保育署。
4. Lin, H.-J., Chen, K.-Y., Kao, Y.-C., Lin, W.-J., Lin, C.-W., Ho, C.-W. (2023) Assessing coastal blue carbon sinks in Taiwan. *Marine Research*, 3: 1-17.

2. 術語定義

2.1. 二氧化碳當量 (carbon dioxide equivalent, CO_2e)

各類溫室氣體相對於二氧化碳之輻射衝擊單位，係使用特定溫室氣體之重量乘以其溫暖化潛勢計算而得。需依照最新的中華民國國家溫室氣體排放清冊報告引用溫暖化潛勢。目前參考2022中華民國國家溫室氣體排放清冊報告，引用 IPCC (2007) Climate Change, the Fourth Assessment Report 各溫室氣體之溫暖化潛勢，二氧化碳為1、甲烷為25、氧化亞氮為298。其中，單位重量有機碳轉換成二氧化碳當量，需乘上轉換係數44/12；單位重量氧化亞氮的氮含量轉換成氧化亞氮含量，需乘上轉換係數44/28。

2.2. 碳庫 (carbon pool)

儲存在沉積物、植被、水體和大氣等儲碳載體中可以吸收和排放的碳，系統中所有碳庫加總成為碳儲量。

2.3. 碳儲量 (carbon stock)

指生態系統中儲存的總碳量。海草床沉積物則指每公頃特定深度的碳含量 (國際標準採用1公尺深，可視各國海草床沉積物深度做調整)。碳儲量可包含一個或多個碳庫的碳總量。本方法學統一以二氧化碳溫暖化潛勢作轉換，單位

為 t CO₂e/ha。

2.4. 活動數據 (activity data)

根據地理資料顯示某一地區的土地覆蓋和利用類型之變化。

2.5. 排放係數 (emission factors)

描述特定區域之有機碳含量變化。有機碳含量的變化由土地利用類型的內部變化(如海草床中水質營養污染)或土地利用方式改變(如從海草床變成鹽田)所導致。本書以碳儲量變化正值表示從大氣或其他碳庫移除溫室氣體(即儲存溫室氣體在自身碳庫內)，溫室氣體排放量正值表示排出溫室氣體到大氣或其他碳庫。

2.6. 海草床 (seagrass beds 或 seagrass meadow)

可以完全生活在海水(鹽水)中的沉水性被子植物總稱為海草，海草聚集長成一片成為海草床，多分布於潮間帶、亞潮帶，在魚塭及鹽田也能生長。臺灣有紀錄海草種類達13種：泰來草(*Thalassia hemprichii*)、圓葉水絲草(*Cymodocea rotundata*)、齒葉大洋草(*Oceana serrulata*)、卵葉鹽草(*Halophila ovalis*)、正鹽草(*Halophila major*)、毛葉鹽草(*Halophila decipiens*)、貝克氏鹽草(*Halophila beccarii*)、小赤崁鹽草(*Halophila siaoohkanensis*)、水韭菜(*Syringodium isoetifolium*)、鐮葉叢草(*Thalassiodendron ciliatum*)、線葉二藥草(*Halodule pinifolia*)、單脈二藥草(*Halodule uninervis*)及甘草(*Zostera japonica*)等，其中有98%的海草床面積分布於東沙亞潮帶。臺灣本島的潮間帶海草則是以分布於沙質底的泰來草及單脈二藥草為主，及分布於泥質底的貝克氏鹽草及甘草為代表。

2.7. 地上部生物量 (aboveground biomass)

沉積物表面以上所有活體植物組織(如葉片、果實等)的質量，本手冊指生物量乾重。

2.8. 地下部生物量 (belowground biomass)

沉積物表面以下所有活體植物組織(如水平莖、根等)的質量，本手冊指生物量乾重。

2.9. 海草覆蓋度及碳儲量經驗公式 (cover-biomass-soil organic carbon model)

透過建立參數間轉換的迴歸式，可藉由觀測海草床覆蓋度估算地上部生物量，再從地上部生物量估算地下部生物量，最後藉由地下部生物量估算沉積物碳儲存量。

2.10. 有機碳含量百分比 (carbon fraction)

單位質量中有機碳含量百分比。

2.11. 自源性碳 (autochthonous carbon)

在海草床中，由海草吸收固定海洋和大氣中的碳並轉移到植物組織中，之後在海草床周遭沉積物中堆積或分解。

2.12. 外源性碳 (allochthonous carbon)

源自於海草床以外的有機碳。

2.13. 沉積物碳埋藏 (carbon burial)

短期內不被分解的有機碳碎屑，可長期 (至少一年) 儲存於沉積物中。

2.14. 地表高程變化 (surface elevation change, SEC)

海草床沉積物從表面到底部岩層的深度變化量。

2.15. 碳庫差分法 (stock-difference method)

測定兩個不同時間點的有機碳儲量之變化量，得到層級3的估測值。

2.16. 增減法 (gain and loss method)

通過間接測量碳匯系統各階段的增加與減少 (如地下部分解後埋藏於沉積物之百分比)，估算生態系碳匯變化量。通常藉由彙整科學文獻或國家特定數據各項排放係數，加總計算後取得層級1至3的估計值。

2.17. 通量法 (flux method)

通過直接測量或建立模式，估算沉積物與植被、大氣與水體之間的溫室氣體排放或移除流通量，得到層級3和層級2估計值。

2.18. 分區 (habitat zoning)

採樣時將存在異質性的調查區劃分成性質均一的小區。

2.19. 測站 (monitoring station)

根據目標用於量測相關指標而設置的樣地。

3. 臺灣海草床碳匯估算流程

臺灣海草床碳匯估算流程依照海草床活動數據劃定面積，以各類活動數據海草床之相對應有機碳儲量或排放係數做計算。本方法主旨在測量並建立本土海草床在各類活動數據下的有機碳儲量或排放係數。

按照2006 IPCC NIR 指南、2013 IPCC NIR 濕地補充指南及內政部營建署濕地碳匯標準作業程序的預設假設，土地屬於一個給定土地利用20年後，將會從轉換類別變成保持類別。例如，一塊土地重新濕潤種植海草床後，土地利用類型就屬於「再濕潤、植被恢復和創建」。經過20年後，該土地仍維持海草床，土地利用類型才會轉換為「濕地維持濕地」。土地利用類型即為活動數據，海草床各項活動數據之具體管理活動如下：

1. 抽沙—(1)挖沙以建設港口、海港和碼頭，包含填充或疏浚以提高土地高程，(2)水產養殖
2. 再濕潤、植被恢復和創建—透過恢復水文和重建植被，從排水性沉積物轉換為飽和性沉積物

海草床碳匯估算之精度，參考2006 IPCC NIR 指南、2013 IPCC NIR 濕地補充指南及內政部營建署濕地碳匯作業的三種估算層級 (Achard et al. 2009)，估算精確度由低至高分別列如表1：

表1、碳庫估算之精確層級說明

層級	必備的資料	說明
1	使用 IPCC 預設的排放	準確度和可靠性最低，使用簡易的假設和

	係數	IPCC 所發布的活動數據和排放係數之預設值。誤差範圍可能很大，其誤差範圍地上部碳庫正負 50%，而沉積物碳庫則為正負 90%。
2	國家特定資料的關鍵係數	使用國家或特定地點的資料，因此具有更高的準確性和解析度。例如，一個國家應該有該國不同生態系類型的平均碳儲量資料。
3	主要碳庫的詳細調查、定期測量或模型計算	需要詳細調查的資料。收集各生態系統或土地利用區域中和碳儲量相關的完整資料，並隨時間重複測量關鍵碳儲量，以估算碳的變化或碳通量。碳通量的估算可以透過野外直接的現地測量或建置模型來推算之。

本土海草床的有機碳儲量或排放係數的測量方法，可混用上述三種準確度層級之估算。以 IUCN 濱海藍碳之標準採樣作業程序 (Howard et al. 2014)，海草床碳匯計算方法可分為3種：

1. 碳庫差分法：測定兩個不同時間點的有機碳儲量，碳庫變化量為溫室氣體排放等碳釋放後之結果，以取得該碳庫層級 3 的估計值。
2. 增減法：通過間接測量碳匯系統各階段的增加及減少（如地下部分解後埋藏於沉積物之百分比），估算生態系碳匯變化。通常藉由彙整科學文獻或國家特定數據各項排放係數，加總計算後取得層級 1 至 3 的估計值。
3. 通量法：透過直接測量或建立模型，估算沉積物與植被、大氣與水體之間的溫室氣體排放或移除量，以取得層級 2 和層級 3 估計值。

4. 海草床碳匯計算

海草床碳匯由海草床有機碳儲存年變化量決定，意即涉及植物體光合作用淨生產量，和植物體死有機質在沉積物中被微生物分解等作用的二氧化碳通量結果。為符合碳匯計算的保守性原則，在特殊情況需考量非二氧化碳溫室氣體排放所抵銷的海草床碳匯，如低鹽度環境下 (< 18 psu) 的甲烷排放及高營養鹽環境下 (中度優養化) 的氧化亞氮排放。海草床溫室氣體排放量計算如公式(1)，碳儲量變化量為正值表示從大氣或其他碳庫移除溫室氣體 (即儲存溫室氣體在自身碳庫內)，溫室氣體排放量正值表示排出溫室氣體到大氣或其他碳庫。

$$CS_{Seagrass} = \Delta C_{Seagrass} - CH_4-Seagrass - N_2O_{Seagrass} \quad \text{-----} \quad (1)$$

- $CS_{Seagrass}$ —海草床碳匯年變化量，單位為 t CO₂e/yr；
- $\Delta C_{Seagrass}$ —海草床碳儲存年變化量，單位為 t CO₂e/yr；
- $CH_4-Seagrass$ —海草床甲烷年排放量，單位為 t CO₂e/yr；
- $N_2O_{Seagrass}$ —海草床氧化亞氮年排放量，單位為 t CO₂e/yr。

4.1. 有機碳儲存年變化量

海草床有機碳儲存變化量利用碳庫差分法，較能涵蓋各碳庫晝夜、季節變化之綜合結果，例如植物體的光合作用及呼吸作用、死有機質及沉積物碳庫在不同氣溫下的分解等，如公式(2)。

$$\Delta C_{Seagrass} = \Delta C_B + \Delta C_{DOM} + \Delta C_{Soils} \quad \text{-----} \quad (2)$$

- $\Delta C_{Seagrass}$ —海草床有機碳儲存年變化量，單位為 t CO₂e/yr；

- ΔC_B —海草生物量碳儲存年變化量，單位為 t CO₂e/yr；
- ΔC_{DOM} —海草床死有機質碳儲存年變化量，單位為 t CO₂e/yr；
- ΔC_{Soils} —海草床沉積物碳儲存年變化量，單位為 t CO₂e/yr。

4.2. 生物量碳儲存年變化量

海草生物量碳儲存變化量計算如公式(3)、(4)、(5)，公式(4)屬於層級1，部分參數估計值如表2；公式(5)可用於層級2、3之估算，層級2估計值如表3、表4。層級3之完整量測方式，如5.2.及5.3.小節。

$$\Delta C_B = \sum_{ij} (A_{ij} \times \Delta B_{Total_{ij}}) \times 44/12 \quad \text{-----} \quad (3)$$

- ΔC_B —海草生物量碳儲存年變化量，單位為 t CO₂e/yr；
- A —海草床面積，單位為公頃(ha)；
- ΔB_{Total} —單位面積海草碳儲存年增加量，單位為 t C/ha·yr；
- $44/12$ —有機碳含量之二氧化碳當量轉換係數；
- i —海草種類；
- j —海草床活動數據，即土地利用類型面積。

層級1

$$\Delta B_{Total} = \Delta B_A \times (1 + R) \times CF \quad \text{-----} \quad (4)$$

- ΔB_{Total} —單位面積海草碳儲存年增加量，單位為 t C/ha·yr；
- ΔB_A —海草地上部平均年生長量(乾重)，單位為 t d.m./ha·yr；
- R —海草根莖比，即地下部與地上部比例；
- CF —海草地上部及地下部平均有機碳含量百分比(%)。

表2、海草地下部生物量與地上部生物量比值(R)層級1估計值

氣候區	R	95% CI	參考文獻
熱帶	1.7	1.5, 1.9	Aioi and Pollard 1993; Brouns 1985; Brouns 1987; Coles et al. 1993; Daby 2003; Devereux et al. 2011; Fourqurean et al. 2012; Halun et al. 2002; Holmer et al. 2001; Ismail 1993; Lee 1997; Lindeboom and Sandee 1989; McKenzie 1994; Mellors et al. 2002; Moriarty et al. 1990; Nienhuis et al. 1989; Ogden and Ogden 1982; Paynter et al. 2001; Poovachiranon and Chansang 1994; Povidisa et al. 2009; Rasheed 1999; Udy et al. 1999; van Lent et al. 1991; van Tussenbroek 1998; Vermaat et al. 1993; Vermaat et al. 1995; Williams 1987
亞熱帶	2.4	2.3, 2.6	Aioi 1980; Aioi et al. 1981; Asmus et al. 2000; Bandeira 2002; Boon 1986; Brun et al. 2009; Collier et al. 2009; de Boer 2000; Devereux et al. 2011; Dixon and Leverone 1995; Dos Santos et al. 2012; Dunton 1996; Fourqurean et al. 2012; Hackney 2003; Herbert and Fourqurean 2008; Herbert and Fourqurean 2009; Holmer and Kendrick 2012; Jensen and Bell 2001; Kim et al. 2012; Kirkman and Reid 1979; Kowalski et al. 2009; Larkum et al. 1984; Lee et al. 2005; Lee et al. 2005b; Lipkin 1979; Longstaff et al. 1999; Masini et al. 2001; McGlathery et al. 2012; McMahan

			1968; Meling-Lopez and Ibarra-Obando 1999; Mukai et al. 1979; Paling and McComb 2000; Park et al. 2011; Powell 1989; Preen 1995; Schwarz et al. 2006; Stevensen 1988; Townsend and Fonseca 1998; Udy and Dennison 1997; van Houte-Howes et al. 2004; van Lent et al. 1991; van Tussenbroek 1998; Walker 1985; West and Larkum 1979; Yarbro and Carlson 2008
溫帶	1.3	1.1, 1.5	Agostini et al. 2003; Cebrian et al. 2000; Fourqurean et al. 2012; Hebert et al. 2007; Holmer and Kendrick 2012; Larned 2003; Lebreton et al. 2009; Lillebo et al. 2006; Marba and Duarte 2001; McRoy 1974; Olesen and Sand-Jensen 1994; Rismondo et al. 1997; Sand-Jensen and Borum 1983; Terrados et al. 2006

層級2、3

$$\Delta B_{Total} = (\Delta B_A \times CF_A + \Delta B_B \times CF_B) \text{ -----} \quad (5)$$

- ΔB_{Total} —單位面積海草碳儲存年增加量，單位為 t C/ha yr；
- ΔB_A —海草地上部生物量平均年生長量(乾重)，單位為 t d.m./ha yr；
- CF_A —海草地上部有機碳含量百分比(%)；
- ΔB_B —海草地下部生物量平均年生長量(乾重)，單位為 t d.m./ha yr；
- CF_B —海草地下部有機碳含量百分比(%)。

表3、臺灣海草碳儲存年增加量層級2估計值

植被類型		ΔB_{Total} (t C/ha·yr)	不確定性 U (%)	參考文獻
潮間帶 沙質底	泰來草 <i>Thalassia hemprichii</i>	2.84	67.6	林幸助 2022；Zou et al. 2021
	單脈二藥草 <i>Halodule uninervis</i>	5.06	68.3	林幸助 2022；Zou et al. 2021
潮間帶 泥質底	甘草 <i>Zostera japonica</i>	1.21	40.6	林幸助 2022；Zou et al. 2021
	貝克氏鹽草 <i>Halophila beccarii</i>	5.16	100.6	林幸助 2022
亞潮帶	東沙海草	13.43	60.7	Huang et al. 2015; Zou et al. 2021

使用戳針法及綁線法量化單位時間海草地上部及地下部生長量；東沙海草床為多海草種類混生，此表以多種優勢海草種類進行估計。

表4、臺灣海草地上部及地下部生物量碳含量百分比(%)層級2估計值

植被類型		CF_{AB} (%)	不確定性 U (%)	CF_{BB} (%)	不確定性 U (%)	參考文獻
潮間帶 沙質底	泰來草 <i>Thalassia hemprichii</i>	30.4	1.7	35.7	1.8	Huang et al. 2015

	單脈二藥草 <i>Halodule uninervis</i>	30.4	10.9	31.6	3.7	Huang et al. 2015
潮間帶 泥質底	甘草 <i>Zostera japonica</i>	38.8	5.7	33.4	5.9	林幸助 2022
	貝克氏鹽草 <i>Halophila beccarii</i>	28.0	10.1	24.7	52.9	林幸助 2022
亞潮帶	東沙海草	30.8	3.0	31.9	10.3	Huang et al. 2015

海草地上部碳含量百分比測量組織為葉片，地下部組織則包含垂直莖、水平莖及根。

4.3. 死有機質碳儲存年變化量

由於海草床死有機質碳庫佔整體碳庫的比例較小，而且海草床死有機質的變化量涉及自源性產生、潮汐等水文作用的輸出及輸入，和生地化作用產生的二氧化碳等溫室氣體排放，因此一般情況採用層級1資料，假設死有機質碳庫在生物量碳庫及沉積物碳庫間維持動態平衡，死有機質碳庫變化為0。部分潮汐交換較差或脫落葉片較容易累積的海草床，則需要使用層級2或3之計算方法，計算公式如(6)。層級3之完整量測方式，如5.4.小節。

$$\Delta C_{DOM} = A_{ij} \times \Delta DOM_{ij} \times 3.67 \quad \text{-----} \quad (6)$$

- ΔC_{DOM} —海草床死有機質碳儲存年變化量，單位為 t CO₂e/yr；
- A —海草床面積，單位為公頃(ha)；
- ΔDOM —海草床死有機質碳儲存年變化量，單位為 t C/ha·yr；
- 3.67—有機碳含量之二氧化碳當量轉換係數；
- i —海草種類；
- j —海草床活動數據，即土地利用類型面積。

4.4. 沉積物有機碳儲存年變化量

海草床沉積物有機碳儲存變化量計算如公式 (7)、(8)、(9)、(10)、(11)。層級1如公式 (7)，目前僅有重建植被、再濕潤土地有排放係數 (EF)預設值，可參照表5；層級2、3之估算方法 (1)屬於沉積物碳庫差分法，用於考慮外源性及自源性有機碳的綜合結果，參照公式(8)、(9)，預設值如表6；層級2、3之估算方法 (2)屬於增減法，能較準確量化海草床自源性有機碳埋藏貢獻，參照公式 (10)、(11)。依照2013 IPCC NIR 濕地補充指南，海草床底質皆屬於無機沉積物，須以沉積物碳庫差分法 (層級2、3之估算方法 (1))計算沉積物有機碳儲量。不過，臺灣海草床底質可分為沙質及泥質，泥質海草床多分布於粉泥黏土含量較多的河口、泥灘地或是廢棄鹽田。由於臺灣河口季節水流變動較大，導致泥質地海草床的底質擾動較多，因此建議使用增減法 (層級2、3之估算方法(2))計算泥質海草床的沉積物有機碳儲量，除了變異較低，在碳匯計算上也符合保守性原則。層級3之完整量測方式，如5.5.小節。

層級1：

$$\Delta C_{Soils} = A_{ij} \times -EF_{ij-Soils} \times 3.67 \quad \text{-----} \quad (7)$$

- ΔC_{Soils} —海草床有機沉積物碳儲存年變化量，單位為 t CO₂e/yr；
- $EF_{ij-Soils}$ —海草床沉積物碳排放係數，單位為 t C/ha·yr；
- A —海草床面積，單位為公頃(ha)；
- 3.67—有機碳含量之二氧化碳當量轉換係數；
- i —海草種類；
- j —海草床活動數據，即土地利用類型面積。

表5、開始重建植被再濕潤 (EF_{RE-Soils}) 有機及礦物聚合沉積物的年度排放係數層級1估計值

生態系	EF _{RE-Soils} (t C/ha·yr)	95% CI	參考文獻
海草床	-0.43	0.2, 0.7	Mateo and Romero 1997; Serrano et al. 2012

此處排放係數負值表示沉積物有機碳儲量年變化正值，即為沉積物有機碳儲量增加。

層級2、3之方法(1)：

$$\Delta C_{Soils} = A_{ij} \times CAR_{ij} \times 3.67 \quad \text{-----} \quad (8)$$

$$CAR_{ij} = SEC_{ij} \times SBD_{ij} \times CF_{ij-Soils} \quad \text{-----} \quad (9)$$

- ΔC_{Soils} —海草床沉積物有機碳儲存年變化量，單位為 t CO₂e/yr；
- A —海草床面積，單位為公頃(ha)；
- CAR —海草床沉積物有機碳埋藏速率，單位為 t C/ha·yr；
- 3.67—有機碳含量之二氧化碳當量轉換係數；
- SEC —海草床地表高程年變化量，單位為 cm/yr；
- SBD —海草床沉積物總體密度，單位為 g/cm³；
- CF_{-Soils} —海草床沉積物有機碳含量百分比(%)；
- i —海草種類；
- j —海草床活動數據，即土地利用類型面積。

表6、臺灣海草床沉積物有機碳儲存年變化量 (CAR) 層級2估計值

植被類型		CAR (t C/ha·yr)	不確定性 U (%)	參考文獻
潮間帶 沙質底	泰來草 <i>Thalassia hemprichii</i>	0.09	12.1	Zou et al. 2021
	單脈二藥草 <i>Halodule uninervis</i>	0.09	12.1	Zou et al. 2021
潮間帶	甘草	0.21	35.1	林幸助 2022

泥質底	<i>Zostera japonica</i>			
	貝克氏鹽草 <i>Halophila beccarii</i>	2.09	240.0	林幸助 2022
亞潮帶	東沙海草	1.30	94.8	Huang et al. 2015; Zou et al. 2021

目前泥質底海草床尚缺乏增減法所估算的沉積物有機碳儲存年變化，因此皆採用碳庫差分法之數據。泥質底海草床以增減法量化自源性海草床沉積物碳匯量。此處沉積物有機碳儲存年變化正值，即為沉積物有機碳儲量增加。

層級2、3之方法(2)：

$$\Delta C_{Soils} = A_{ij} \times \Delta C_{A-Soils} \times 3.67 \quad \text{-----} \quad (10)$$

$$\Delta C_{A-Soils} = (DA_{ij} \times W_{ij-DA} + DB_{ij} \times W_{ij-DB}) \quad \text{-----} \quad (11)$$

- ΔC_{Soils} —海草床沉積物有機碳儲存年變化量，單位為 t CO₂e/yr；
- A —海草床面積，單位為公頃(ha)；
- $\Delta C_{A-Soils}$ —海草床自源性沉積物有機碳儲存年增加量，單位為 t C/ha·yr；
- 3.67—有機碳含量之二氧化碳當量轉換係數；
- DA —海草地上部有機碎屑年增加量，單位為 t d.m./ha·yr；
- W_{DA} —海草地上部有機碎屑分解剩餘量百分比(%)；
- DB —海草地下部有機碎屑年增加量，單位為 t d.m./ha·yr；
- W_{DB} —海草地下部有機碎屑分解剩餘量百分比(%)；
- i —海草種類；
- j —海草床活動數據，即土地利用類型面積。

4.5. 甲烷年排放量

海草床甲烷排放計算如公式(12)，層級3之完整量測方式，如5.6.小節。依照2013 IPCC NIR 濕地補充指南，水體鹽度小於18 psu 才需考慮甲烷排放量。臺灣海草床生長在受海水影響明顯的亞潮帶或潮間帶，或閒置鹽田等鹽度較高之區域，鹽度皆大於18 psu，因此一般情況下可忽略不計。於受潮汐影響之區域，水體鹽度須於退潮時測量，以反應陸源營養輸入之影響。

$$CH_4-Seagrass = \sum_{ij} (A_{ij} \times EF_{ij-CH_4} \times GWP_{CH_4}) \quad \text{-----} \quad (12)$$

- CH_4 Mangrove—海草床甲烷年排放量，單位為 t CO₂e/yr；
- A —海草床面積，單位為公頃(ha)；
- EF_{CH_4} —單位面積海草床甲烷年排放量，單位為 t CH₄/ha·yr；
- GWP_{CH_4} —甲烷溫暖化潛勢；
- i —海草種類；
- j —海草床活動數據，即土地利用類型面積。

4.6. 氧化亞氮年排放量

海草床氧化亞氮排放估算層級2、3如公式(13)，在層級1僅有水產養殖有估計值，可用漁獲量資料代入計算，如表7；層級3之完整量測方式，如5.6.小節。依照2013 IPCC NIR 濕地補充指南，有關水產養殖活動才需考慮氧化亞氮排放量，如表7。於受潮汐影響之區域，水質須於退潮時測量，以反應陸源營養輸入之影響。若水體達中度優養化，該次測量則須計入底質氧化亞氮排放量。優養

化指數計算方式為 (E)=[化學需氧量]*[無機氮]*[活性磷酸鹽]/4500*10⁶。其中，E ≤ 3.0為輕度優養化；3.0 < E ≤ 9.0為中度優養化；E > 9.0為重度優養化。化學需氧量、無機氮及活性磷酸鹽單位為 mg/L。

$$N_2O_{Seagrass} = \sum_{ij} (A_{ij} \times EF_{ij-N_2O} \times GWP_{N_2O}) \tag{13}$$

- $N_2O_{Mangrove}$ —海草床氧化亞氮年排放量，單位為 t CO₂e/yr；
- A —海草床面積，單位為公頃(ha)；
- EF_{N_2O} —單位面積海草床氧化亞氮年排放量，單位為 t N₂O/ha·yr；
- GWP_{N_2O} —氧化亞氮溫暖化潛勢；
- i —海草種類；
- j —海草床活動數據，即土地利用類型面積。

表7、水產養殖紅樹林、潮間帶草澤及海草床的氧化亞氮排放係數 (EF_{F-N₂O}) 第1層級估計值

EF _{F-N₂O} (t N ₂ O-N/t-fish produced)	95% CI	參考文獻
1.69×10 ⁻³	0, 3.8×10 ⁻³	Hu et al. 2012

氧化亞氮之氮含量 (N₂O-N) 轉換為氧化亞氮含量 (N₂O) 需乘上轉換係數為 1.57，此處排放係數正值表示氧化亞氮排放。

5. 海草床有機碳儲存及排放係數量測技術

5.1. 量測分區及測站設置

量測分區及測站設置需權衡所需量測精度及成本(時間、人力、資金)。分區可依照活動數據(如土地利用轉變)、生物特徵(如海草種類)，或是依照環境條件分區(如水文地貌特徵、底質類型)。測站設計可依照量測目的採用(1)線性設計：用於測量分區變量對碳庫的影響，如垂直海岸線的穿越線，可了解不同潮位對海草床碳庫的影響；(2)隨機設計：在不清楚樣區碳儲量分布或可能是均勻分布時使用；(3)網格設計：於地圖上放置網格，每個網格內僅採樣單點，確保測站分布整個範圍(圖1)。每個測站面積至少5 m × 5 m (Howard et al. 2014)。以人工方式將長度30公分以上的營釘或其他標記物敲入底質，即可設立海草床長期標記點。如果樣點沉積速率較快，營釘上可綁上束帶或線材，方便每次量測時能較快找到長期標記點。



圖1、測站排列策略(a)線性設計(b)隨機設計(c)網格設計

5.2. 生物量及生長量

海草生長量可分為長時間尺度(詳見5.2.1-2小節)及短時間尺度(詳見5.2.3.1-2小節)之方法。概念皆為測量海草在不同時點的單位面積生物量，相減後即為單位面積單位時間海草生長量。長時間尺度的方法測量間隔為一年，選擇不同年分相同季節比較生物量變化量，在臺灣建議以春、夏季海草生物量最多的季節進行量測；短時間尺度的方法需進行四季量測，測量單位面積平均每日生長量($\Delta B_{AorB-season}$)，再換算成一整年的單位面積生長量，如公式(14)。

$$\Delta B_{AorB} = \sum \Delta B_{AorB-season} \times t_{season} \times 10^{-2} \quad \text{-----} \quad (14)$$

- ΔB_{AorB} —海草地上部或地下部生長量(乾重)，單位為 t d.m./ha·yr；
- $\Delta B_{AorB-season}$ —各季節海草地上部或地下部每日生長量(乾重)，單位為 g d.m./m²·day；
- t_{season} —各季節天數(days)；
- 10^{-2} —重量及面積單位轉換係數。

5.2.1. 破壞性收割法

在海草床中隨機選定地上部疏密程度具有代表性的區域，放置固定面積為10 cm × 10 cm 的鐵框，利用鏟子沿鐵框周圍將海草挖起，篩除底質後攜回實驗室，每個採集點至少3重複。採集後的生物量攜回實驗室區分地上部(葉子)及地下部(直立莖、水平莖及根)，以60°C烘乾並記錄乾重，即為單位面積生物量。



圖2、海草生物量破壞性收割法(採集後示意圖)

5.2.2. 覆蓋度轉換生物量之經驗公式

覆蓋度、地上部生物量及地下部生物量為海草床量測的重要參數，透過建立參數間轉換的迴歸式，可藉由觀測海草床覆蓋度估算地上部生物量，再從地上部生物量估算地下部生物量 (Stankovic et al. 2018)。目前臺灣尚待建立覆蓋度、地上部生物量及地下部生物量的關係式。建立方法須以覆蓋度級數作為海草地上部疏密程度級數，依照不同覆蓋度級數採集至少6重複數的海草生物量，即可畫出海草床覆蓋度估算地上部生物量的迴歸式 (Mumby et al. 1997; Short and Coles 2001; Stankovic et al. 2018)。由於族群穩定的海草床覆蓋度會呈現動態的季節消長 (Chen and Lin 2022)，因此若使用覆蓋度轉換生物量之經驗公式估算海草床生物量的年變化，需要以不同年份的相同季節進行比較，建議以海草覆蓋度最多的季節進行比較。

5.2.3. 海草生長量標記法

依照海草個體大小，用鐵絲及鋼釘設置10 cm × 10 cm 或20 cm × 20 cm 的方形樣框作為標記海草生長量之量測範圍。一般而言，海草地上部生長量使用10 cm × 10 cm 的方形樣框即可；海草地下部生長量則可能因為水平莖芽點數量較少，需使用20 cm × 20 cm 的方形樣框 (Zou et al. 2021)。每個鐵絲方框範圍為1重複，至少需要3重複。海草地上部生長量需依照不同葉片型態選擇相應的標記方式 (詳見5.2.3.1.小節)，海草地下部生長量則統一使用綁線法做標記 (詳見5.2.3.2.小節) (Short and Coles 2001)。

5.2.3.1. 地上部生長量

戳針標記法用於長帶形葉片海草地上部生長量，如公式(15)、(16)、圖3及**錯誤! 找不到參照來源。**。需要利用針頭從葉鞘一側刺穿海草葉片，大約7天後採收。將採收之樣本帶回實驗室清洗後，依照葉鞘與葉片之標記點，取下葉片新生長的部分烘乾秤重，即為新增的海草葉片生物量 ($d.m.NL$)。將新增的海草葉片生物量除以戳針標記後放置的時間 (t_L) 和標記之株數 (N_S)，平均後乘以單位面積之海草株數 (D_S)，即可得到該季節長帶形海草單位面積時間地上部生長量 (Short and Coles 2001)。

$$\Delta B_{A-season} = G_{LS} \times D_S \quad \text{-----} \quad (15)$$

$$G_{LS} = \frac{d.m.NL}{N_S \times t_L} \quad \text{-----} \quad (16)$$

- $\Delta B_{A-season}$ —各季節海草地上部每日生長量(乾重)，單位為 g d.m./m²·day；
- G_{LS} —每株海草地上部每日生長量(乾重)，單位 g d.m./shoot day；
- D_S —單位面積海草株數，單位為 shoots/m²；
- $d.m.NL$ —新增的海草葉片生物量(乾重)，單位為 g；
- N_S —樣框內標記株數 (shoots)；
- t_L —戳針標記後放置時間(days)。

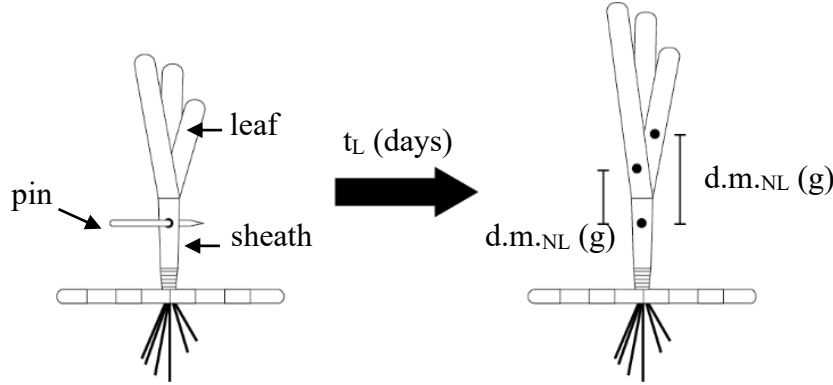


圖3、長帶形海草地上部生長量戳針標記法

pin：戳針；leaf：葉子；sheath：葉鞘； t_L ：戳針標記後放置的時間；d.m.NL：新增的海草葉片生物量(乾重)。

綁線法用於卵圓形葉片海草地上部生長量，如公式 (17)、(18)、(19)、圖4 及錯誤! 找不到參照來源。。依照海草水平莖芽點算起的第一株海草綁上棉線標記為基準點，此株海草及棉線基準點向芽點反方向的2-3株海草地上部為原先就存在的植株，雙片葉對生的卵圓形海草需要記錄葉片長寬、葉柄長度，多葉蓮座狀生長的海草葉片上以剪刀剪出缺口做記號。接著將水平莖及芽點埋回沉積物，大約7天後採收。將採收之樣本帶回實驗室清洗後，依照棉線基準點判斷，向芽點方向新長出的植株葉片皆為新生長的海草地上部生物量；原先就存在海草植株需要再次記錄葉片長寬、葉柄長度(雙片葉對生)，或是計算被標記的葉片後所新生的海草葉片(多葉蓮座狀)。利用卵圓形海草葉片的長寬，以橢圓形公式計算葉片面積，再藉由卵圓形海草葉面積及生物量迴歸公式，計算標記前後海草葉片的面積變化所增加的葉片生物量。同時以葉柄長度及海草生物量迴歸公式計算標記前後海草葉柄的長度變化所增加的葉柄生物量。蓮座狀生長的海草葉片則依照一開始標記時留下的葉片缺口為基準，區分固有葉片及新生葉片。由於蓮座生長的海草種類個體太小，不易量測葉片長寬及葉柄長，因此以新生葉片作為新生生物量即可。最後，加總隨芽點生長新生的地上部生物量(d.m.NL-forward)和原先海草植株所增加的地上部生物量(d.m.NL-backward)，除以綁線標記後放置的時間(t_R)，即可得到每個水平莖芽點單位時間的地上部生長量(G_{LR})。將每個水平莖芽點單位時間的地上部生長量(G_{LR}) 乘上單位面積水平莖芽點數量(D_R)，即可得到卵圓形海草單位面積時間地上部生長量(Short and Coles 2001)。

$$\Delta B_{A-season} = G_{LR} \times D_R \quad \text{-----} \quad (17)$$

$$G_{LR} = \frac{d.m.NL}{N_R \times t_R} \quad \text{-----} \quad (18)$$

$$d.m.NL = d.m.NL-forward + d.m.NL-backward \quad \text{-----} \quad (19)$$

- $\Delta B_{A-season}$ —各季海草地上部每日生長量(乾重)，單位為 g d.m./m²·day；
- G_{LR} —每段海草水平莖近芽點處地上部每日生長量(乾重)，單位為 g d.m./shoot·day；
- D_R —單位面積海草水平莖數量，單位為 shoots/m²；
- $d.m.NL$ —新增的海草葉片生物量(乾重)，單位為 g；
- N_R —樣框內標記水平莖芽點數(shoots)；
- t_R —綁線標記後放置時間(days)；
- $d.m.NL-forward$ —標記基準點向芽點方向新生之葉片生物量(乾重)，單位為 g；
- $d.m.NL-backward$ —標記基準點向芽點反方向新生之葉片生物量(乾重)，單位為 g。

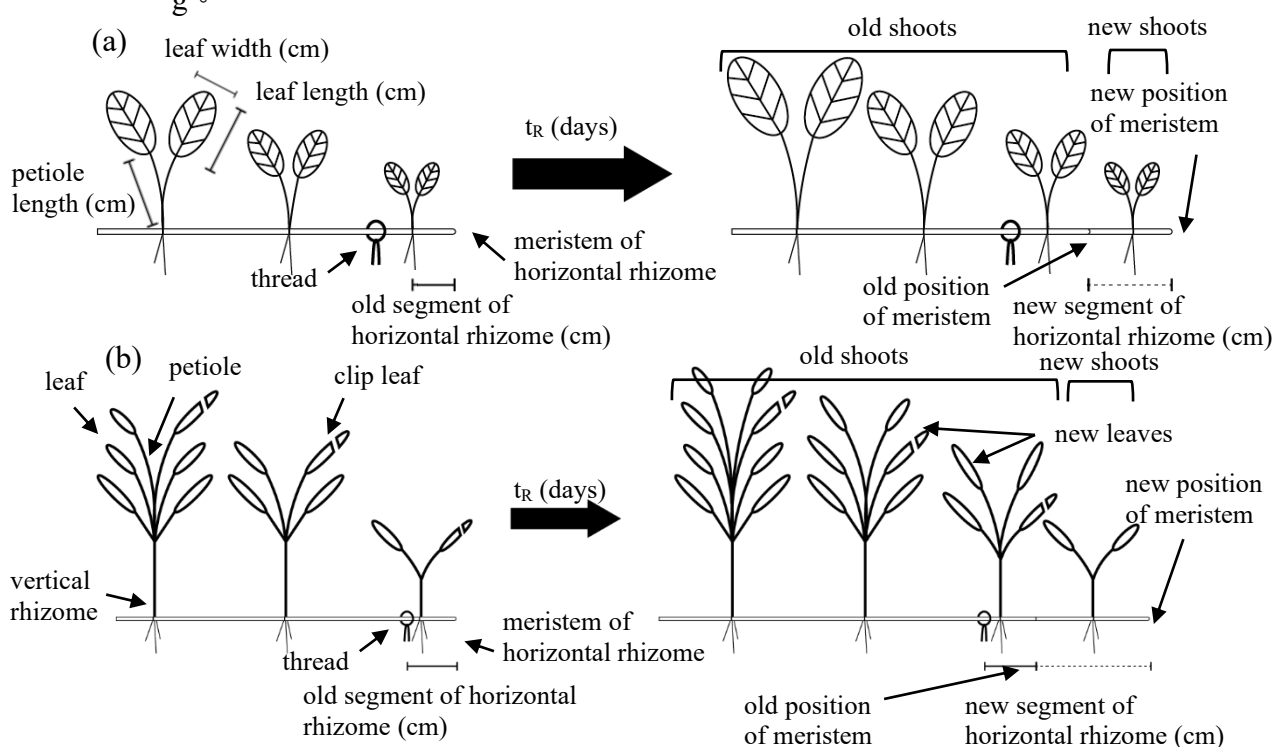


圖4、卵圓形海草地上部生長量綁線法(a)雙片葉對生，(b)多葉蓮座狀

leaf width：：葉寬；leaf length：葉長；leaf：葉子；thread：棉線；old segment of horizontal rhizome：原先的水平莖片段（第一株海草至水平莖芽點）； t_R ：綁線標記後放置的時間；meristem of horizontal rhizome：水平莖芽點；old shoots：原先的植株；new shoots：新生的植株；old position of meristem：水平莖芽點原先的位置；new segment of horizontal rhizome：新生的水平莖片段（水平莖芽點原先的位置至新的位置）；new position of meristem：水平莖芽點新的位置；leaf：葉子；petiole：葉柄；vertical rhizome：垂直莖；clip leaf：剪去葉片一角之標記；new leaves：葉片缺口標記後新生之葉片。

5.2.3.2.地下部生長量

地下部生長量使用綁線法測量，卵圓形葉片之海草僅需計算水平莖生長量

(G_R)，長帶形葉片之海草需再包含垂直莖生長量 (G_S)，如公式 (20)、(21)、(22)、(23)、圖4、圖5及**錯誤! 找不到參照來源。**。水平莖生長量與5.2.3.2.卵圓形葉片海草地上部生長量標記的綁線法相似 (圖4)。依照海草水平莖芽點算起的第一株海草綁上棉線標記為基準點，記錄棉線基準點與水平莖芽點之長度，再將水平莖及芽點埋回沉積物。大約7-40天後採收，依照海草個體大小差異選擇放置時間 (詳見**錯誤! 找不到參照來源。**)。將採收之樣本帶回實驗室清洗後，截下棉線標記點到水平莖芽點之間的水平莖，並且扣除一開始標記時棉線基準點與水平莖芽點之長度的片段，烘乾至恆重並秤重即為新增的水平莖生物量 ($d.m._R$)。將新增的水平莖生物量 ($d.m._R$) 除以單位面積水平莖芽點數量 (N_R)，再除以綁線標記後放置的時間 (t_R)，即為每個海草水平莖芽點單位時間水平莖生長量 (G_R) (Short and Coles, 2001)。

長帶形葉片的海草種類，需另外計算直立莖生長量，需要參數包含葉間期 (PI_L)、垂直莖節數 (N_{SN}) 及垂直莖乾重 ($d.m._{SN}$)。由於長帶形海草葉片基部的生長點在長出新葉片時，在垂直莖上會產生新的節，因此計算垂直莖上的節數可以回推垂直莖生長時間。每一節的生長時間即為葉間期 (PI_L)，葉間期須利用地上部戳針法 (如5.2.3.1)，標記點需盡可能接近葉基部，待7-10天回收標記之海草樣本後，計算平均每株成功標記的海草植株裡有多少沒有戳針針孔的新生葉片數 (N_{NL})，將戳針標記後放置的時間 (t_L) 除以每株海草的新生葉片數 (N_{NL})，即可得到葉間期 (PI_L)。將每株海草垂直莖截下計算節數後烘乾至恆重。將垂直莖乾重 ($d.m._{SN}$) 除以垂直莖節數 (N_{SN}) 和葉間期 (PI_L)，即為每株海草單位時間垂直莖生長量 (G_S) (Short and Coles 2001)。

$$\Delta B_{B-season} = G_R \times D_R + G_S \times D_S \quad \text{-----} \quad (20)$$

$$G_R = \frac{d.m._R}{N_R \times t_R} \quad \text{-----} \quad (21)$$

$$G_S = \frac{d.m._{SN}}{N_{SN} \times PI_L} \quad \text{-----} \quad (22)$$

$$PI_L = \frac{t_L}{N_{NL}} \quad \text{-----} \quad (23)$$

- $\Delta B_{B-season}$ —各季海草地下部每日生長量 (乾重)，單位為 g d.m./m²·day；
- G_R —由海草水平莖芽點每日新生成之水平莖生長量 (乾重)，單位為 g d.m./shoot day；
- D_R —單位面積海草水平莖數量，單位為 shoots/m²；
- G_S —每株海草每日垂直莖生長量 (乾重)，單位為 g d.m./shoot day；
- D_S —單位面積海草株數，單位為 shoots/m²；
- $d.m._R$ —新增的海草水平莖生物量 (乾重)，單位為 g；
- N_R —樣框內標記水平莖芽點數 (shoots)；
- t_R —綁線標記後放置時間 (days)；
- $d.m._{SN}$ —海草垂直莖生物量 (乾重)，單位為 g；
- N_{SN} —垂直莖節數；
- PI_L —葉間期 (days)；
- t_L —戳針標記後放置時間 (days)；
- N_{NL} —新生葉片數。

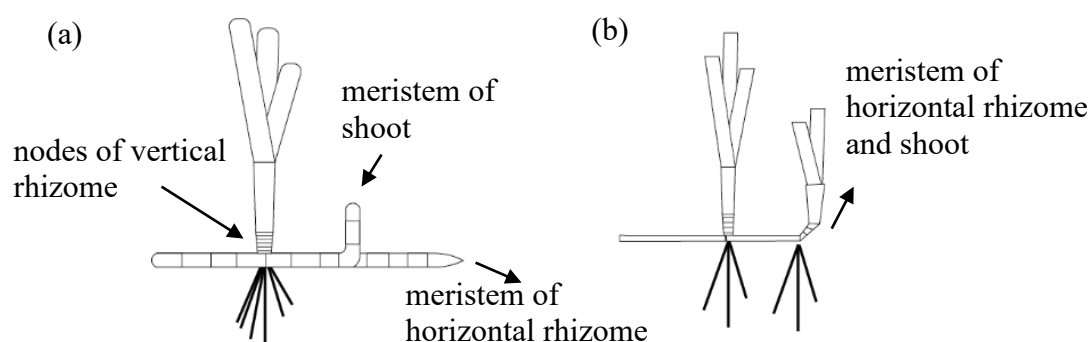


圖5、海草床地下部構造及型態(a)雙生長點(b)單一生長點

nodes of vertical rhizome：垂直莖節點；meristem of shoot：植株生長點；
meristem of horizontal rhizome：水平莖生長點；meristem of horizontal rhizome and
shoot：垂直莖及植株共同生長點。

表8、各類海草生長量測量之標記方法

海草 種類	部位	葉片形狀/ 生長型態	生活史	樣框 面積 cm ²	放置 天數	生長量 標記方法
泰來草	地上部	長帶形	個體大 / 周轉慢	100	6-8	戳針法
	地下部	具垂直莖/ 獨立水平 莖芽點		400	45- 50	綁線法計算水平莖， 並用葉間期計算垂直 莖
單脈 二藥草	地上部	長帶形	個體中 / 周轉快	100	6-8	戳針法
	地下部	具垂直莖/ 水平莖芽 點具海草 植株		400	15- 20	綁線法計算水平莖， 並用葉間期計算垂直 莖
甘草	地上部	長帶形	個體中 / 周轉快	100	6-8	戳針法
	地下部	具垂直莖/ 水平莖芽 點具海草 植株		400	15- 20	綁線法計算水平莖， 並用葉間期計算垂直 莖
貝克氏 鹽草	地上部	卵圓形、 具葉柄/蓮 座生長	個體小 / 周轉快	100	6-8	綁線法，並製造缺角 標記老葉，以及棉線 基準點後 2-3 株海草新 分支之植株
	地下部	獨立水平 莖芽點		100	6-8	綁線法，並計算棉線 基準點後 2-3 株海草新 分枝之水平莖
卵葉 鹽草	地上部	卵圓形、 具葉柄	個體小 / 周轉快	100	6-8	綁線法，並以葉面積 及葉柄長度之生物量 迴歸公式計算葉片生 物量變化
	地下部	獨立水平		100	6-8	綁線法

		莖芽點				
--	--	-----	--	--	--	--

5.3. 植物體有機碳含量百分比

將野外採集的海草植物體各組織，包含地上部葉子、葉柄及地下部垂直莖、水平莖和根，帶回實驗室清洗烘乾，加以磨碎並用0.5 mm 之篩網過篩，並進行碳元素分析。將屬於地上部及地下部植物組織碳含量百分比各別平均，即為海草床植物體地上部及地下部有機碳含量百分比數值 (Howard et al. 2014)。

5.4. 死有機質及碳含量百分比

海草床的死有機質由枯落葉片、死水平莖和果實等組成，且容易被水流帶離海草床，因此各類海草床中地表死有機碳庫僅占一小部分或可以忽略。測定方式為隨機樣框 (1000-2500 cm²) 採樣，將框內所有枯落葉片等死有機質帶回實驗室清洗及烘乾至恆重，即為單位面積死有機質乾重。將烘乾的死有機質樣本，使用5.3. 植物體有機碳分析方式，磨碎並用0.5 mm 之篩網過篩，並進行碳元素分析，即可得到死有機質碳含量百分比。將單位面積死有機質乾重乘上死有機質碳含量百分比，即可得到單位面積海草床死有機質碳儲量 (Howard et al. 2014)。

5.5. 沉積物碳儲量年變化量

海草床沉積物碳儲量變化量計算方式分為沉積物碳庫差分法及增減法。

沉積物碳庫差分法適用沙質底海草床，計算參數詳見5.5.1.-5.5.3.及5.5.6.小節。底土深度較淺可使用5.5.1.方法測量地表高程變化之海草床，沉積物碳儲量變化量計算如公式 (8)、(9)；底土深度太淺，無法量測地表高程變化之海草床，沉積物碳儲量變化之測量方式需將表層30 cm 沉積物分層，計算各層沉積物碳儲量 (g C/ cm²)，加總各層沉積物在不同年份的碳儲量變化量，即可得到海草床沉積物碳儲量變化量 (g C/cm²·yr)。沉積物分層至少為深度0-10 cm、10-20 cm 及20-30 cm，共三層。若人力等實驗資源允許，可增加分層數量 (如深度0-5 cm、5-10 cm、10-15 cm、15-20 cm、20-25 cm 及25-30 cm)，以提高估算精度。或利用5.5.6.小節的經驗公式方法，測量不同年份的沉積物碳儲量後相減，也能得到海草床沉積物碳儲量年變化量 (g C/cm²·yr)。

增減法適用泥質底海草床，計算參數詳見5.5.4.小節，沉積物碳儲量變化量計算如公式 (10)、(11)。惟增減法所量化的沉積物碳儲量變化量，僅包含海草床自源性的沉積物碳埋藏貢獻。

5.5.1. 海草床地表高程年變化量

量測海草床地表高程變化 (SEC)，可使用30-60 cm 之營釘由沉積物表層垂直向下戳至底岩，藉由營釘總長度減掉露出土表之長度，即為底土深度。不同時間的底土深度相減，即可得到海草床地表高程變化率 (cm/yr)。

5.5.2. 沉積物總體密度

野外採集依照土柱二次取樣法 (Howard et al. 2014)，使用不鏽鋼底土採集管 (圖6a) 採集30 cm 深的沉積物樣本，再用小型採集器 (圖6b) 取樣0-10、10-20和10-30 cm 各層之沉積物。將樣本冷藏於4°C，帶回實驗室烘乾至恆重。將每個小採集器的沉積物樣本乾重除以採集體積即為沉積物總體密度。可測量沉積物地表高程變化的海草床，僅需計算表層0-5 cm 深的沉積物總體密度，可用小型採集器直接從沉積物表層採集。

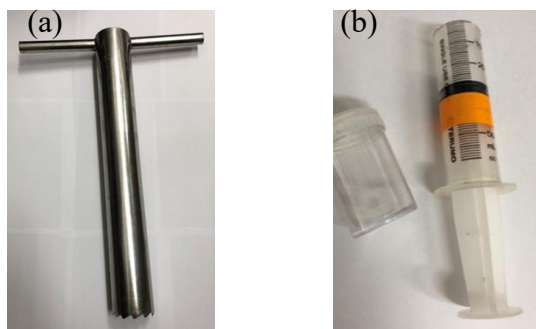


圖6、表層沉積物採集器

(a)不鏽鋼底土採集管(b)小型採集器

5.5.3. 沉積物有機碳含量百分比及沉積物碳儲量

同5.5.2.採集方法，實驗室分析階段，將採集所得之沉積物樣本冷凍乾燥、均質後以0.5 mm 篩網過篩。用酸洗去除無機碳，再以二次水清洗避免後續元素分析因酸液殘留而產生誤差。最後將去除酸液的沉積物樣本冷凍乾燥，進行碳元素分析，即可得到各層沉積物有機碳含量百分比 (Howard et al. 2014)。

5.5.4. 分解剩餘量及自源性沉積物碳埋藏貢獻

海草床分解實驗參考 Mateo and Romero (1996)，用5.2.1方法收集海草地上部及地下部組織，將清洗後的地上部及地下部擦乾，各別取5-20 g 放入網目0.1 mm 的分解袋 (15 cm × 10 cm)，最後將分解袋放回海草床待不同時間點回收並測量其分解剩餘量。若人力資源允許，放入分解袋中的新鮮樣本應盡量達20 g，以確保能測得海草組織分解剩餘的重量。地上部分解袋放置於海草床地表，地下部分解袋需埋至5-10 cm。分解袋在300天內需回收5-7次，如放置14、30、60、120、240天之後收回，每次回收後須清洗樣本並烘乾至恆重。最後依照 Olson (1963) 的指數迴歸模型計算，即可得到分解剩餘百分比 (Zou et al. 2021)。一般海草碎屑於240到365天之間，剩餘量已分解趨緩而變動不大，因此可作為碎屑分解後貢獻的沉積物碳埋藏量。

海草床自源性的沉積物碳埋藏貢獻計算如公式 (10)、(11)，其中的參數海草地上部碎屑 (DA) 由海草地上部生長量乾重 (ΔB_A) 減掉海草床碎屑輸出量 (DA_{out} ，單位為 t d.m./ha·yr，詳見5.5.5.小節)，再乘以地上部有機碳含量百分比 (CF_{AB})；海草地下部有機碎屑 (DB)，可直接以海草地下部生長量乾重 (ΔB_B) 數值乘以地下部有機碳含量百分比 (CF_{BB}) 估算，單位為 t C/ha·yr。由於僅有海草地上部容易隨水流輸出，因此需要考慮側向運輸後剩餘的有機碎屑，才會留在海草床中的分解。地下部從新生、枯死到分解都在沉積物裡，且不易區分剛死亡的地下部，所以可以直接用地下部每年新增的生物量作為地下部碎屑的年增加量。

5.5.5. 海草床碎屑年輸出量

隨機選定採樣區後，清除卡在底土和海草植被上的有機碎屑及落葉，罩上30 cm × 30 cm × 45 cm 之網袋 (圖7)，以收取新凋落而被海浪或海流帶離的海草地上部落葉碎屑，但不撿拾留在沉積物表面的有機碎屑。每次碎屑收集網放置時間為兩天，取回網內碎屑以60°C烘乾至恆重除以放置時間，即可得到每日海草床碎屑輸出量 g d.m./m²·d (Huang et al. 2015)。四季量測每日海草床碎屑輸出量平均後轉換時間及面積單位，即可得到海草床有機碎屑單位面積年輸出量 (DA_{out})，單位為 t d.m./ha·yr。



圖7、海草床碎屑攔截網

5.5.6. 海草地下部生物量及沉積物碳儲量經驗公式

海草床地下部生物量為重要的沉積物有機碳來源，透過建立參數間轉換的迴歸式，可藉由5.2.1.實際採集的地下部生物量或由5.2.2.所估計的地下部生物量，估算海草床沉積物碳儲量 (Stankovic et al. 2021; Stankovic et al. 2018)。目前臺灣尚待建立地下部生物量與沉積物碳儲量的關係式，建立方法須在同一樣框內採集地下部生物量 (詳見5.2.1.) 及沉積物碳儲量 (詳見5.5.3.) 樣本，採集足夠重複數後即可畫出地下部生物量與沉積物碳儲量的迴歸式 (Stankovic et al. 2021; Stankovic et al. 2018)。

5.6. 非二氧化碳溫室氣體年排放量

使用密閉罩蓋法，將密閉罩蓋在棲地沉積物、水體或植物體上，再連接至溫室氣體分析儀，計算罩蓋內溫室氣體濃度隨時間的變化量 (Lin et al. 2020)。隨後考量罩蓋體積、測量溫度和罩蓋覆蓋在棲地沉積物、水體或植物體上的面積，以各溫室氣體溫暖化潛勢的二氧化碳當量進行換算，即可得到單位面積單位時間棲地沉積物、水體或植物體的溫室氣體排放量 ($t\ CO_2e/ha\ yr$)。常用罩蓋 (圖8) 及儀器之相關參數，詳見附件8.1-8.3。海草床沉積物溫室氣體測量需考慮棲地積水，如封閉水域之海草床在積水情況可用浮體罩蓋測量溫室氣體。

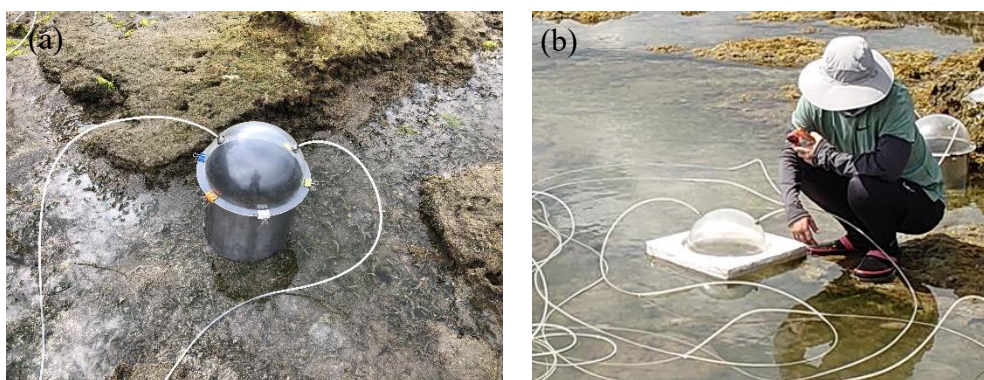


圖8、海草床溫室氣體量測常用之各類型罩蓋
(a)沉積物圓形罩蓋(b)水體浮體罩蓋

6. 品質保證與管控

6.1. 完整性

完整的海草床溫室氣體清單包括前述海草床的排放估計值。應注意不要列入已經算入其它農業、林業和其他土地利用領域 (AFOLU) 各章或重複計算各碳庫的溫室氣體排放量。

特別是部分濕地可能接收含有高營養含量的非點排放源的污水和沉澱物，這些濕地釋放的有機或無機氮以及有機碳，可能已包括在林地或農田，或廢棄物部門的估算方法中。如果能證實這些濕地碳或氮的非點源排放，較佳作法是在合適的清單部門和類別中報告相關的溫室氣體排放。

6.2. 不確定性

層級1之估計值不確定性可參考2006 IPCC NIR 指南和內政部營建署濕地碳匯標準作業(林幸助與陳渭中 2019)；層級2、3之估計值不確性可參考2006 IPCC NIR 指南和2022中華民國國家溫室氣體排放清冊報告第六章其中的林業部門計算方式。海草床面積變化因結合航照圖，無法用統計方法估算不確定性，且屬於國家統計資料，因此依照2006 IPCC NIR 指南將不確定性設定為5%。國家特定海草床碳儲存增加量之不確定性採用誤差傳播法，藉由各係數文獻數值、標準差與標準誤計算不確定性，如公式(24)、公式(26)、公式(26)、公式(27)；不同係數採用加法計算時，不確定性總和需使用加法規則，如公式(28)；不同係數採用乘法計算時，不確定性總和需使用乘法規則，如公式(29)。

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{-----} \quad (24)$$

- SD —標準差；
- x_i —第 i 筆係數數值；
- $\bar{x}$ —文獻收集之係數平均值；
- n —數據筆數。

$$SE = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad \text{-----} \quad (25)$$

- SE —標準誤；
- SD —標準差；
- n —數據筆數。

$$U = \frac{SD \times 1.96}{\bar{X}} \times 100\% \quad \text{-----} \quad (26)$$

- U —文獻數量或計算數據小於 30 筆之不確定性；
- SD —標準差；
- $\bar{x}$ —文獻收集之係數平均值。

$$U = \frac{SE \times 1.96}{\bar{X}} \times 100\% \quad \text{-----} \quad (27)$$

- U —文獻數量或計算數據為 30 筆以上之不確定性；
- SE —標準誤；
- $\bar{x}$ —文獻收集之係數平均值。

$$U_{total} = \sqrt{\frac{(U_1 \times E_1)^2 + (U_2 \times E_2)^2 + \cdots + (U_n \times E_n)^2}{E_1 + E_2 + \cdots + E_n}} \quad \text{-----} \quad (28)$$

- U_{total} —不確定性之總和(加法規則)；
- U_1, U_2, U_n —不同變量的不確定性；
- E_1, E_2, E_n —不同變量。

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \text{ -----} \quad (29)$$

- U_{total} —不確定性之總和(乘法規則)；
- U_1, U_2, U_n —不同變量的不確定性。

6.3. 時間序列一致性

明確定義海草床之活動數據，並持續使用是一種較佳的作法。時間序列的一致性中要求在整個時間序列中需使用相同的方法。每當使用新的方法時，時間序列中的所有數值應該使用新方法重新計算，並報告為何新的方法被認為更準確或更不精確。重新計算以前數據時的一個潛在問題是某些過去的數據可能無法使用。克服這一限制之相關詳細方法，請參考2006 IPCC NIR 指南第一卷第五章及濕地，在兩次海草床資源調查期間，可使用內差法推得各年度海草種類分布面積之數據。

6.4. 品質保證/品質控制

品質保證/品質控制 (QA/QC) 是對於國家溫室氣體排放的定期審查，以促進國家溫室氣體清冊的透明度、一致性、可比較性、完整性及準確性。關於品質保證/品質控制 (QA/QC) 規定的制定和實施在2013 IPCC NIR 濕地補充指南，國內特定排放係數須建立固定海草床樣區定期量測，以確保其準確性。

7. 本方法學碳匯項目及建議量測方法

本方法學針對估算層級2-3的海草床排放係數，整理各項目量測及計算方法，如表9。

表9、臺灣海草床排放係數估算層級2-3計算方法彙整表

海草床 排放係數項目		是否需要計算	估算層級2-3計算方法
植物體 碳庫	地上部	澳洲國家溫室氣體 清冊沒列入計算	碳庫差分法- 1.帶狀型葉片：戳針法 2.非帶狀型葉片：綁線法
	地下部	重要碳匯項目	碳庫差分法- 1.水平莖：綁線法 2.垂直莖：葉間期計算
死有機質碳庫		一般不計算，僅在 沉積物表面死有機 質層明顯時計算	碳庫差分法
沉積物 碳庫	沙質 沉積物	重要碳匯項目	碳庫差分法- 1.用營釘量測地表高程變化 2.無法計算高程變化時，需計算 表層各層沉積物碳庫變化
	泥質 沉積物	重要碳匯項目	增減法-

			計算植物體分解後，對沉積物碳庫的貢獻
非二氧化碳 溫室氣體排放	甲烷	一般不計算，僅在低潮水體鹽度<18psu 時計算	通量法- 密閉罩蓋法
	氧化亞氮	一般不計算，僅在低潮水質中度優養化時計算	

7. 參考文獻

- 行政院環保署(2022)。2022中華民國國家溫室氣體排放清冊報告，頁6-1 – 6-15。
- 林幸助、陳渭中(2019)。106-107年度重要濕地碳匯調查計畫案成果報告書-附錄：濕地碳匯功能調查標準作業程序。內政部營建署城鄉發展分署。
- 林幸助、邵廣昭 (2020)。我國海洋生態調查監測網與監測規範建立之整體規劃，國家海洋研究院。
- 林幸助(2022)。臺灣沿海重要碳匯生態系統調查與評估計畫成果報告。海洋委員會海洋保育署。
- Agostini, S., Pergent, G. & Marchand, B. (2003) Growth and primary production of *Cymodocea nodosa* in a coastal lagoon. *Aquatic Botany* 76(3): 185-193.
- Aioi, K. (1980) Seasonal change in the standing crop of eelgrass *Zostera marina* in Odawa Bay, Central Japan. *Aquatic Botany* 8(4): 343-354.
- Aioi, K., Mukai, H., Koike, I., Ohtsu, M. & Hattori, A. (1981) Growth and organic production of eelgrass *Zostera-marina* in temperate waters of the Pacific coast of Japan. 2. Growth Analysis in Winter. *Aquatic Botany* 10(2): 175-182.
- Aioi, K. & Pollard, P. C. (1993) Biomass, Leaf growth and loss rate of the seagrass *Syringodium isotifolium* on Dravuni Island, Fiji. *Aquatic Botany* 46(3-4): 283-292.
- Asmus, R. M., Sprung, M. & Asmus, H. (2000) Nutrient fluxes in intertidal communities of a South European lagoon (Ria Formosa) - similarities and differences with a northern Wadden Sea bay (Sylt-Romo Bay). *Hydrobiologia* 436(1-3): 217-235.
- Bandeira, S. O. (2002) Leaf production rates of *Thalassodendron ciliatum* from rocky and sandy habitats. *Aquatic Botany* 72(1): 13-24.
- Boon, P. I. (1986) Nitrogen pools in seagrass beds of *Cymodocea serrulata* and *Zostera capricorni* of Moreton Bay, Australia. *Aquatic Botany* 25(1): 1-19.
- Brouns, J. (1985) A comparison of the annual production and biomass in three monospecific stands of the seagrass *Thalassia hemprichii* (Ehrenb) Aschers. *Aquatic Botany* 23(2): 149-175.
- Brouns, J. (1987) Aspects of production and biomass of four seagrass species *Cymodoceoideae* from Papua New Guinea. *Aquatic Botany* 27(4): 333-362.
- Brun, F. G., van Zetten, E., Cacabelos, E. & Bouma, T. J. (2009) Role of two contrasting ecosystem engineers *Zostera noltii* and *Cymodocea nodosa* on the food intake rate of *Cerastoderma edule*. *Helgoland Marine Research* 63(1): 19-25.
- Cebrian, J., Pedersen, M. F., Kroeger, K. D. & Valiela, I. (2000) Fate of production of the seagrass *Cymodocea nodosa* in different stages of meadow formation. *Marine Ecology Progress Series* 204: 119-130.
- Change, C. (2007). IPCC fourth assessment report. The physical science basis, 2, 580-595.
- Chen, K. Y., & Lin, H. J. (2022). High-Resolution Mapping of Seagrass Biomass Dynamics Suggests Differential Response of Seagrasses to Fluctuating Environments. *Diversity*, 14(11), 999
- Coles, R. G., Long, W. J. L., Watson, R. A. & Derbyshire, K. J. (1993) Distribution of Seagrasses, and Their Fish and Penaeid Prawn Communities, in Cairns Harbour, a Tropical Estuary, Northern Queensland, Australia. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 44(1): 193-210.
- Collier, C. J., Lavery, P. S., Ralph, P. J. & Masini, R. J. (2009) Shade-induced response and recovery of the seagrass *Posidonia sinuosa*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 370(1-2): 89-103.
- de Boer, W. F. (2000) Biomass dynamics of seagrasses and the role of mangrove and seagrass vegetation as different nutrient sources for an intertidal ecosystem.

- Aquatic Botany 66(3): 225-239.
- Daby, D. (2003) Effects of seagrass bed removal for tourism purposes in a Mauritian bay. *Environmental Pollution* 125(3): 313-324.
- Devereux, R., Yates, D. F., Aukamp, J., Quarles, R. L., Jordan, S. J., Stanley, R. S. & Eldridge, P. M. (2011) Interactions of *Thalassia testudinum* and sediment biogeochemistry in Santa Rosa Sound, NW Florida. *Marine Biology Research* 7(4): 317-331.
- Dos Santos, V. M., Matheson, F. E., Pilditch, C. A. & Elger, A. (2012) Is black swan grazing a threat to seagrass? Indications from an observational study in New Zealand. *Aquatic Botany* 100: 41-50.
- Dixon, L. K. & Leverone, J. R. (1995) Light requirements of *Thalassia testudinum* in Tampa Bay, Florida: final report.
- Dunton, K. H. (1996) Photosynthetic production and biomass of the subtropical seagrass *Halodule wrightii* along an estuarine gradient. *Estuaries* 19(2B): 436-447.
- Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Fourqurean, J. W., Duarte, C. M., Kennedy, H., Marba, N., Holmer, M., Mateo, M. A., Apostolaki, E. T., Kendrick, G. A., Krause-Jensen, D., McGlathery, K. J. & Serrano, O. (2012) Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience* 5(7): 505-509.
- Hackney, J. W. (2003) Morphometric variability and allometric relationships in the seagrass *Thalassia testudinum* in Florida Bay. In: University of North Carolina.
- Halun, Z., Terrados, J., Borum, J., Kamp-Nielsen, L., Duarte, C. M. & Fortes, M. D. (2002) Experimental evaluation of the effects of siltation-derived changes in sediment conditions on the Philippine seagrass *Cymodocea rotundata*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 279(1-2): 73-87.
- Hebert, A. B., Morse, J. W. & Eldridge, P. M. (2007) Small-scale heterogeneity in the geochemistry of seagrass vegetated and non-vegetated estuarine sediments: causes and consequences. *Aquatic Geochemistry* 13(1): 19-39.
- Herbert, D. A. & Fourqurean, J. W. (2008) Ecosystem structure and function still altered two decades after shortterm fertilization of a seagrass meadow. *Ecosystems* 11(5): 688-700.
- Herbert, D. A. & Fourqurean, J. W. (2009) Phosphorus Availability and Salinity Control Productivity and Demography of the Seagrass *Thalassia testudinum* in Florida Bay. *Estuaries and Coasts* 32(1): 188-201.
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., & Troxler, T. G. (2014). 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland.
- Holmer, M., Andersen, F. O., Nielsen, S. L. & Boschker, H. T. S. (2001) The importance of mineralization based on sulfate reduction for nutrient regeneration in tropical seagrass sediments. *Aquatic Botany* 71(1): 1-17.
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., & Pidgeon, E. (eds.) (2014) Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA.
- Hu, Z., Lee, J. W., Chandran, K., Kim, S. & Khanal, S. K. (2012) Nitrous Oxide (N₂O) Emission from Aquaculture: A Review. *Environmental Science & Technology* 46(12): 6470-6480.
- Huang, Y. H., Lee, C. L., Chung, C. Y., Hsiao, S. C., & Lin, H. J. (2015). Carbon budgets of multispecies seagrass beds at Dongsha Island in the South China Sea. *Marine Environmental Research*, 106, 92-102.
- Ismail, N. (1993) Preliminary study of the seagrass flora of Sabah, Malaysia. *Pertanika*

- Journal of Tropical Agricultural Science 16(2): 111-118.
- Jensen, S. & Bell, S. (2001) Seagrass growth and patch dynamics: cross-scale morphological plasticity. *Plant Ecology* 155(2): 201-217.
- Kim, S. H., Kim, Y. K., Park, S. R., Li, W. T. & Lee, K. S. (2012) Growth dynamics of the seagrass *Halophila nipponica*, recently discovered in temperate coastal waters of the Korean peninsula. *Marine Biology* 159(2): 255-267
- Kirkman, H. & Reid, D. D. (1979) A study of the role of the seagrass *Posidonia australis* in the carbon budget of an estuary. *Aquatic Botany* 7(2): 173-183.
- Kowalski, J. L., DeYoe, H. R. & Allison, T. C. (2009) Seasonal Production and Biomass of the Seagrass, *Halodule wrightii* Aschers. (Shoal Grass), in a Subtropical Texas Lagoon. *Estuaries and Coasts* 32(3): 467-482.
- Larkum, A. W. D., Collett, L. C. & Williams, R. J. (1984) The standing stock, growth and shoot production of *Zostera capricorni* aschers. in Botany Bay, New South Wales, Australia. *Aquatic Botany* 19(3-4): 307-327.
- Larned, S. T. (2003) Effects of the invasive, nonindigenous seagrass *Zostera japonica* on nutrient fluxes between the water column and benthos in a NE Pacific estuary. *Marine Ecology Progress Series* 254: 69-80.
- Lebreton, B., Richard, P., Radenac, G., Bordes, M., Breret, M., Arnaud, C., Mornet, F. & Blanchard, G. F. (2009) Are epiphytes a significant component of intertidal *Zostera noltii* beds? *Aquatic Botany* 91(2): 82-90.
- Lee, K. S., Park, S. R. & Kim, J. B. (2005) Production dynamics of the eelgrass, *Zostera marina* in two bay systems on the south coast of the Korean peninsula. *Marine Biology* 147(5): 1091-1108.
- Lee, S. Y. (1997) Annual cycle of biomass of a threatened population of the intertidal seagrass *Zostera japonica* in Hong Kong. *Marine Biology* 129(1): 183-193.
- Lee, S. Y., Oh, J. H., Choi, C. I., Suh, Y. & Mukai, H. (2005) Leaf growth and population dynamics of intertidal *Zostera japonica* on the western coast of Korea. *Aquatic Botany* 83(4): 263-280
- Lillebo, A. I., Flindt, M. R., Pardal, M. A. & Marques, J. C. (2006) The effect of *Zostera noltii*, *Spartina maritima* and *Scirpus maritimus* on sediment pore-water profiles in a temperate intertidal estuary. *Hydrobiologia* 555: 175-183.
- Lindeboom, H. J. & Sandee, A. J. J. (1989) Production and consumption of tropical seagrass fields in Eastern
- Lipkin, Y. (1979) Quantitative aspects of seagrass communities, particularly of those dominated by *Halophila stipulacea*, in Sinai (Northern Red Sea). *Aquatic Botany* 7(2): 119-128.
- Longstaff, B. J. & Dennison, W. C. (1999) Seagrass survival during pulsed turbidity events: the effects of light deprivation on the seagrasses *Halodule pinifolia* and *Halophila ovalis*. *Aquatic Botany* 65(1-4): 105-121.
- Indonesia measured with bell jars and microelectrodes. *Netherlands Journal of Sea Research* 23(2): 181-190.
- Marba, N. & Duarte, C. M. (2001) Growth and sediment space occupation by seagrass *Cymodocea nodosa* roots. *Marine Ecology Progress Series* 224: 291-298.
- Mateo, M. A. & Romero, J. (1997) Detritus dynamics in the seagrass *Posidonia oceanica*: Elements for an ecosystem carbon and nutrient budget. *Marine Ecology Progress Series* 151(1-3): 43-53.
- Mateo, M. A., & Romero, J. (1996). Evaluating seagrass leaf litter decomposition: an experimental comparison between litter-bag and oxygen-uptake methods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 202(2), 97-106.
- McGlathery, K. J., Reynolds, L. K., Cole, L. W., Orth, R. J., Marion, S. R. & Schwarzschild, A. (2012) Recovery trajectories during state change from bare sediment to eelgrass dominance. *Marine Ecology Progress Series* 448: 209-221.
- McKenzie, L. (1994) Seasonal changes in biomass and shoot characteristics of a

- Zostera capricorni* Aschers. Dominant meadow in Cairns Harbour, northern Queensland. Marine and Freshwater Research 45(7): 1337-1352.
- McMahan, C. A. (1968) Biomass and salinity tolerance of shoalgrass and manateeegrass in Lower Laguna Madre, Texas. The Journal of Wildlife Management 32(3): 501-506
- McRoy, C. P. (1974) Seagrass productivity: Carbon uptake experiments in eelgrass, *Zostera marina*. Aquaculture 4: 131-137.
- Meling-Lopez, A. E. & Ibarro-Obando, S. E. (1999) Annual life cycles of two *Zostera marina* L-populations in the Gulf of California: contrasts in seasonality and reproductive effort. Aquatic Botany 65: 59-69.
- Mellors, J., Marsh, H., Carruthers, T. J. & Waycott, M. (2002) Testing the sediment-trapping paradigm of seagrass: Do seagrasses influence nutrient status and sediment structure in tropical intertidal environments? Bulletin of Marine Science 71(3): 1215-1226.
- Moriarty, D. J., Roberts, D. G. & Pollard, P. C. (1990) Primary and bacterial productivity of tropical seagrass communities in the Gulf of Carpentaria, Australia. Marine Ecology Progress Series 61: 145-157.
- Mukai, H., Aioi, K., Koike, I., Iizumi, H., Ohtsu, M. & Hattori, A. (1979) Growth and organic production of eelgrass *Zostera marina* L. in temperate waters of the Pacific coast of Japan. I. Growth analysis in spring–summer. Aquatic Botany 7: 47-56.
- Mumby, P. J., Edwards, A. J., Green, E. P., Anderson, C. W., Ellis, A. C., & Clark, C. D. (1997). A visual assessment technique for estimating seagrass standing crop. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 7(3), 239-251.
- Nienhuis, P., Coosen, J. & Kiswara, W. (1989) Community structure and biomass distribution of seagrasses and macrofauna in the Flores Sea, Indonesia. Netherlands Journal of Sea Research 23(2): 197-214.
- Ogden, J. C. & Ogden, N. B. (1982) A preliminary study of two representative seagrass communities in Palau, Western Caroline Islands (Micronesia). Aquatic Botany 12: 229-244.
- Olesen, B. & Sand-Jensen, K. (1994) Biomass-density patterns in the temperate seagrass *Zostera marina*. Marine Ecology-Progress Series 109: 283-283.
- Olson, J. S. (1963). Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology, 44(2), 322-331.
- Paling, E. I. & McComb, A. J. (2000) Autumn biomass, below-ground productivity, rhizome growth at bed edge and nitrogen content in seagrasses from Western Australia. Aquatic Botany 67(3): 207-219.
- Park, S. R., Kim, Y. K., Kim, J.-H., Kang, C.-K. & Lee, K.-S. (2011) Rapid recovery of the intertidal seagrass *Zostera japonica* following intense Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) harvesting activity in Korea. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 407(2): 275-283.
- Paynter, C. K., Cortés, J. & Engels, M. (2001) Biomass, productivity and density of the seagrass *Thalassia testudinum* at three sites in Cahuita National Park, Costa Rica. Rev. Biol. Trop 49(Suppl 2): 265-272.
- Poovachiranon, S. & Chansang, H. (1994) Community structure and biomass of seagrass beds in the Andaman Sea. I. Mangrove-associated seagrass beds. Phuket Marine Biological Center Research Bulletin 59: 53-64.
- Povidisa, K., Delefosse, M. & Holmer, M. (2009) The formation of iron plaques on roots and rhizomes of the seagrass *Cymodocea serrulata* (R. Brown) Ascherson with implications for sulphide intrusion. Aquatic Botany 90(4): 303-308.
- Powell, G. V., Kenworthy, J. W. & Fourqurean, J. W. (1989) Experimental evidence for nutrient limitation of seagrass growth in a tropical estuary with restricted circulation. Bulletin of Marine Science 44(1): 324-340.
- Preen, A. (1995) Impacts of dugong foraging on seagrass habitats: observational and

- experimental evidence for cultivation grazing. Marine ecology progress series. Oldendorf 124(1): 201-213.
- Rasheed, M. A. (1999) Recovery of experimentally created gaps within a tropical *Zostera capricorni*(Aschers.) seagrass meadow, Queensland Australia. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 235(2): 183-200.
- Rismondo, A., Curiel, D., Marzocchi, M. & Scattolin, M. (1997) Seasonal pattern of *Cymodocea nodosa* biomass and production in the lagoon of Venice. Aquatic Botany 58(1): 55-64
- Sand-Jensen, K. & Borum, J. (1983) Regulation of growth of eelgrass(*Zostera marina* L.) in Danish coastal waters. Marine Technology Society Journal 17(2): 15-21.
- Schwarz, A.-M., Morrison, M., Hawes, I. & Halliday, J. (2006) Physical and biological characteristics of a rare marine habitat: sub-tidal seagrass beds of offshore islands. Department of Conservation.
- Short, F. T., & Coles, R. G. (Eds.). (2001). Global seagrass research methods. Elsevier.
- Stankovic, M., Ambo-Rappe, R., Carly, F., Dangan-Galon, F., Fortes, M. D., Hossain, M. S., Kiswara, W., Luong, C. V., Minh-Thu, P., Mishra, A. K., Noiraksar, T., Nurdin, N., Panyawai, J., Rattanachot, E., Rozaimi, M., Htun, U. S., & Prathep, A. (2021). Quantification of blue carbon in seagrass ecosystems of Southeast Asia and their potential for climate change mitigation. Science of the Total Environment, 783, 146858.
- Stankovic, M., Tantipisanuh, N., Rattanachot, E., & Prathep, A. (2018). Model-based approach for estimating biomass and organic carbon in tropical seagrass ecosystems. Marine Ecology Progress Series, 596, 61-70.
- Townsend, E. C. & Fonseca, M. S. (1998) Bioturbation as a potential mechanism influencing spatial heterogeneity of North Carolina seagrass beds. Marine Ecology Progress Series 169: 123-132.
- Udy, J. W. & Dennison, W. C. (1997) Growth and physiological responses of three seagrass species to evaluated sediment nutrients in Moreton Bay, Australia. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 217: 253-277.
- Van Houte-Howes, K., Turner, S. & Pilditch, C. (2004) Spatial differences in macroinvertebrate communities in intertidal seagrass habitats and unvegetated sediment in three New Zealand estuaries. Estuaries 27(6): 945-957.
- Van Lent, F., Nienhuis, P. & Verschuure, J. (1991) Production and biomass of the seagrasses *Zostera noltii* Hornem. and *Cymodecea nodosa*(Ucria) Aschers. at the Banc d'Arguin (Mauritania, NW Africa): a preliminary approach. Aquatic Botany 41(4): 353-367.
- Van Tussenbroek, B. I. (1998) Above-and below-ground biomass and production by *Thalassia testudinum* in a tropical reef lagoon. Aquatic Botany 61(1): 69-82.
- Vermaat, J., Agawin, N., Duarte, C., Fortes, M., Marba, N. & Uri, J. (1995) Meadow maintenance, growth and productivity of a mixed Philippine seagrass bed. Marine ecology progress series. Oldendorf 124(1): 215-225.
- Vermaat, J., Beijer, J., Gijlstra, R., Hootsmans, M., Philippart, C., Van den Brink, N. & Van Vierssen, W. (1993) Leaf dynamics and standing stocks of intertidal *Zostera noltii* Hornem. and *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson on the Banc d'Arguin (Mauritania). Hydrobiologia 258(1): 59-72.
- Walker, D. (1985) Correlations between salinity and growth of the seagrass *Amphibolis antarctica*(labill.) Sonder & Aschers., In Shark Bay, Western Australia, using a new method for measuring production rate. Aquatic Botany 23(1): 13-26.
- West, R. & Larkum, A. (1979) Leaf productivity of the seagrass, *Posidonia australis*, in eastern Australian waters. Aquatic Botany 7: 57-65.
- Williams, S. L. (1987) Competition between the seagrasses *Thalassia testudinum* and *Syringodium filiforme* in a Caribbean lagoon. Marine Ecology Progress Series 35: 91-98.

- Yarbro, L. A. & Carlson Jr, P. R. (2008) Community oxygen and nutrient fluxes in seagrass beds of Florida Bay, USA. *Estuaries and Coasts* 31(5): 877-897.
- Zhongming, Z., Linong, L., Xiaona, Y., Wangqiang, Z., & Wei, L. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Zou, Y. F., Chen, K. Y., & Lin, H. J. (2021). Significance of belowground production to the long-term carbon sequestration of intertidal seagrass beds. *Science of The Total Environment*, 800, 149579.

8. 附件

8.1. 溫室氣體分析儀列表

儀器型號 (公司名稱)	測量氣體 (濃度單位)	數據記錄時間	測量範圍/誤差
LI-820 (LICOR)	CO ₂ (ppm)	LI1400 資料收集器， 每 30 秒記錄一筆	0-20000 ppm/ 野外氣溫 30°C 時±22 ppm
GLA132 (ABB)	CH ₄ (ppm)	每 20 秒記錄一筆	0-100 ppm/ ±0.2-0.5 ppb
LI-7810(LICOR)	CO ₂ (ppm) CH ₄ (ppb)	每 1 秒記錄一筆	CO ₂ :0-10000 ppm/ 400 ppm 時±3.5 ppm CH ₄ :0-100 ppm/ 2000 ppb 時±1 ppb
LI-7820(LICOR)	N ₂ O	每 1 秒記錄一筆	N ₂ O:0-100 ppm/ 330 ppb 時±0.4 ppb

資料來源：「臺灣沿海重要碳匯生態系統調查與評估計畫」成果報告 (林幸助 2022)

8.2. 沉積物溫室氣體測量常用罩蓋列表

	V (罩蓋體積，L)	A (罩蓋底面積， m^2)	使用情境
圓框 圓罩蓋	6.4 L+沉積物及積水層以上 之金屬框深度 m *圓框罩蓋 底面積 m^2	0.07	積水不深
浮體罩 蓋	6.4 L+浮體罩蓋固定腔室深 度 0.02 m *圓框罩蓋底面積 m^2	0.07	積水

資料來源：「臺灣沿海重要碳匯生態系統調查與評估計畫」成果報告 (林幸助 2022)

8.3 溫室氣體排放量計算公式及各儀器單位轉換係數

公式： $F = (flux * V * t) * (R * T * A)^{-1} * unit^{-1}$			
溫室氣體分析儀	<i>flux</i>	t	unit
LI-820	ppm CO ₂ /30 sec	120	1000
GLA132	ppm CH ₄ /20 sec	180	1
LI-7810 (CO ₂)	ppm CO ₂ /sec	3600	1000
LI-7810 (CH ₄)	ppb CH ₄ /sec	3600	1000
LI-7820 (N ₂ O)	ppb N ₂ O/sec	3600	1000
F：氣體通量(mmol CO₂/m²·h)及(μmol CH₄/N₂O/m²·h) <i>flux</i>：迴歸線斜率，數值單位因儀器不同 V：罩蓋體積(L)，數值因罩蓋不同，詳見 8.2.、8.3. t：時間轉換，數值單位因儀器不同 R：理想氣體常數，0.082 (L atm/K·mol) T：絕對溫度(K) A：罩蓋底面積(m²)，數值因罩蓋不同，詳見 8.2.、8.3. unit：單位轉換係數，數值單位因儀器不同			

資料來源：「臺灣沿海重要碳匯生態系統調查與評估計畫」成果報告(林幸助 2022)