

小規模減量方法撰寫格式

減量方法封面應包含下列資訊：

TMS-I./II./III.000←僅由本部編列

小規模減量方法

{紅樹林植林}

版本 01.0→僅由本部編列

範疇別：B-12 農業及土地利用

林幸助、呂佳宜、陳冠宇

2024年4月

I. 減量方法提案緣起及背景

氣候變遷不僅影響生態環境，更緊密連繫著全球經濟發展與人類健康，隨著各國陸續宣示溫室氣體淨零排放的目標，臺灣亦於2022年3月正式公布「2050淨零排放路徑藍圖」。為了達到碳中和之目標，透過「自然碳匯」之負碳技術是抵減溫室氣體排放的重要方法之一，其生態系服務亦能帶來多樣化的附加價值。臺灣四面環海，是典型的海島國家，因具備優越地理位置、海域棲地型態多樣與生態交會區效應等多重因子，使臺灣具有相當豐富且多元的海洋自然資源，具有發展「海洋碳匯」之潛力。依據聯合國之評估¹，全球海洋生物所捕獲和封存的碳中，至少有一半是儲存於海岸濕地「濱海藍碳生態系統」之中。

聯合國清潔發展機制 (Clean Development Mechanism, CDM) 是現行較嚴格的溫室氣體減量方法學。目前 CDM 有「劣化紅樹林棲地的造林與植林」(Afforestation and reforestation of degraded mangrove habitats) (AR-AM0014) 之方法學，然而其內容具有專業性與複雜性，直接在臺灣推行有困難。考量臺灣之法律規範、在地環境狀況、實際造林作業方式、量測程序之操作技術與專案執行可行性等，對其方法學進行調整與補充，目的在建立一套符合臺灣環境狀況且具可行性及品質之紅樹林棲地的植林碳匯效益評估方法，以確保專案所產生碳匯量可進行量測、報告、查證，並促進臺灣紅樹林棲地植林專案的溫室氣體自願性減量專案之執行，而向環境部提請新減量方法之認可。

II. 既有減量方法差異說明

表一為本減量方法與相關的 CDM AR-AM0014 差異說明，項目包含適用條件、專案邊界、基線排放量、專案排放量、洩漏、人為溫室氣體淨移除量與量測方法/參數之說明。

表一、本減量方法與既有減量方法差異比較表

差異說明	本減量方法 {編號/紅樹林植林}	既有減量方法 {CDM AR-AM0014/ Afforestation and reforestation of degraded mangrove habitats }
出處		CDM AR-AM0014 ver. 03.0
涉及之減量措施	植林	造林與植林
(1)適用條件	<ol style="list-style-type: none"> 專案起始時間不得早於西元2000年1月1日。其專案邊界之土地或海域權屬清晰，具有土地所有權證明或經主管機關核可之使用證明文件。 本方法學之專案活動適用於紅樹林棲地之植林。包含濱海濕地之劣化紅樹林棲地，其劣化紅樹林棲地是指植被狀況無法同時滿足樹密度每公頃 ≥ 1050 株且鬱閉度 (crown cover) \geq 	<ol style="list-style-type: none"> 專案活動用地為劣化紅樹林棲地。其劣化定義為濕地之紅樹林的森林鬱閉度低於第 5/CMP.1 號議文之林地定義「面積應大於 0.05~1.0 公頃以上，且應有 10~30% 以上的面積比例為高度在 2~5 公尺高的林木樹冠所鬱閉」之標準。 專案區域內，紅樹林樹種 (mangrove species) 之種植面積應逾 90%；若非紅樹林物種 (non-

¹ Blue future: Coastal wetlands can have a crucial role in the fight against climate change. Nature, 2016, 529: 255–256.

	<p>0.20之條件。【調整劣化紅樹林棲地的定義，以更加明確界定劣化條件】</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. 專案活動不得違反國家相關法律、法規、政策措施，且應符合相關技術規範。【補充規範】 4. 專案區域內 (project area)，臺灣原生紅樹林樹種之種植面積應逾90%；若非臺灣原生紅樹林樹種之種植面積超過10%，則專案活動不得導致專案區域之水文、上下坡相連之濕地區域水文之變化。【補充規範為紅樹林原生樹種】 5. 專案活動後，專案邊界內所引起的土壤擾動不得使土壤有機碳變動大於10%。【修改土壤擾動之規範，並針對土壤有機碳進行規範】 6. 專案活動所種植之紅樹林樹種須為臺灣原生樹種，並配合環境條件選用合宜樹種。【補充規範所植栽之紅樹林原生樹種】 7. 專案活動不得採取人為引火焚燒方式對林地進行清除或管理。【依據臺灣造林作業規範修改】 8. 專案活動不得移除地表植株、枯落物、樹根、枯木。【補充規範】 9. 專案活動不會造成專案開始前農漁業活動的變更。【補充規範】 	<p>mangrove species) 之種植面積逾10%，則專案活動不得導致專案區域之水文、上下坡相連之濕地區域水文之變化。</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. 由 CDMA/R 專案活動引起的土壤擾動不得超過專案面積的10%²。
(2)專案邊界	<p>1. 專案邊界範圍</p> <p>專案活動之「專案邊界 (project boundary)」係指，專案申請者 (project participants, PPs) 所管理的專案活動之地理範圍，其範圍可包含多筆分散之土地，每筆分散的土地皆應證明具土地合格性。此外，</p>	<p>1. 專案邊界範圍</p> <p>專案活動之「專案邊界」係指擁有土地所有權或使用權的專案申請者所實施專案活動之地理範圍，植林的每塊毗林土地應有地理位置識別。</p> <p>2. 土地合格性</p>

² 依據 CDM AR-AM0014。舉例來說，以 0.50 公尺×0.50 公尺（長×寬）大小挖掘坑洞，坑洞間之間距為 3 公尺×3 公尺，此耕作方式之覆蓋率為 2.78%，而連續耕作(continuous ploughing)則會達到 100% 覆蓋率。

應提供土地所有權或政府相關單位核發的使用權證明。其專案邊界應分為「專案前邊界」及「專案後邊界」，其「專案前邊界」係指專案設計與開發階段所訂定之計畫實施專案活動之邊界。

2. 土地合格性

專案申請者須提供資料以證實專案邊界內紅樹林棲地，於專案活動起始前(即基線情境)符合適用條件，得透過下列任一方式及文件進行專案活動起始前之情況證明：(a) 能表示過去土地利用狀況的高解析度地理空間資料(如航空照片圖或衛星影像圖)；(b) 林業調查規劃的地理空間資訊資料(如紅樹林分佈圖、林相圖)；(c) 地面基本調查資料，如土地清冊及所有權人登記等。

3. 碳庫及溫室氣體排放源之計算項目

(1) 碳庫

計算項目必須計入「地上部生物量、地下部生物量、土壤有機碳」，可自選是否計入「枯木」，不計入「枯落物」。

(2) 溫室氣體排放源

溫室氣體排放源分為三部分，分別為自然火災、海岸濕地土壤、化石燃料使用之排放。

4. 鑑別基線情境及證明外加性

引用本減量方法學的專案，基線情境為專案活動實施前的土地使用方式。為達到本方法學增加碳匯之目的，專案申請者應評估並提供「外加性」證明相關的資料、原理、假設、理由和文本。外加性分析之規範，應符合「溫室氣體自願減量專案管理辦法」針對自願減量方法之外加性規範(法規外加性、財務外加性、普遍性及障礙分析等)。

5. 分層採樣

於 AR-AM0014 ver. 03.0 並未明文定義。但 CDM 執行理事會有提供造林與植林專案活動土地合格性的程序工具 (Procedures to demonstrate the eligibility of lands for A/R CDM project activities)，以協助評估與證明專案邊界內之土地具合格性。

3. 碳庫及溫室氣體排放源之計算項目

(1) 碳庫

計算項目必須計入「地上部生物量、地下部生物量」，可自選是否計入「枯木及土壤有機碳」，不計入「枯落物」。

(2) 溫室氣體排放源

AR-AM0014 ver. 03.0 允許因整地或是作為森林管理之目的而燃燒木質生物量，必須計入 CH₄及 N₂O。

4. 鑑別基線情境及證明外加性

可應用「在 A/R CDM 專案活動中使用於鑑別基線情境以及證明外加性之結合工具」(Combined tool to identify the baseline scenario and demonstrate additionality in A/R CDM project activities) 或應用適合其專案且經過批准的標準化基線。

5. 分層採樣

若專案區域的生物量分佈不均時，應採取碳庫之「分層」採樣以提高生物量估算的精準度。

	<p>若專案邊界內紅樹林生物量分布不均時，則應採取碳庫之「分層 (stratification)」採樣，以增加基線及專案活動期間碳匯估算的準確性。因此，應依據影響碳儲量的因素做為分層標準。碳儲量的影響因子有植被種類、密度、土地利用方式、潛在土地利用方式、土壤性質、地貌特徵 (地質特徵、排水狀況)、距海遠近等 (Hiraishi 2014)。</p>																																					
<p>(3)基線排放量 (含基線排放量計算式)</p>	$\Delta C_{BSL,t} = \Delta C_{MangroveBSL,t} = \Delta B_{MangroveBSL,t} + \Delta C_{DWBSL,t} + \Delta SOC_{BSL,t}$ <table border="1" data-bbox="363 705 847 1749"> <thead> <tr> <th>參數</th> <th>定義</th> <th>單位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$\Delta C_{BSL,t}$</td> <td>t年間(未實施專案活動)的基線溫室氣體淨移除量</td> <td>t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td>$\Delta C_{Mangrove}$</td> <td>t年間之基線紅樹林碳儲量的年變化量</td> <td>t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td>$\Delta B_{Mangrove}$</td> <td>t年間之基線紅樹林生物碳儲量的年變化量</td> <td>t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td>$\Delta C_{DWBSL,t}$</td> <td>t年間之基線枯木碳儲量的年變化量</td> <td>t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td>$\Delta SOC_{BSL,t}$</td> <td>t年間之紅樹林土壤碳儲量的年變化量</td> <td>t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td>t</td> <td>專案執行之年份，t=1, 2, 3...</td> <td>yr</td> </tr> </tbody> </table>	參數	定義	單位	$\Delta C_{BSL,t}$	t年間(未實施專案活動)的基線溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq	$\Delta C_{Mangrove}$	t年間之基線紅樹林碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq	$\Delta B_{Mangrove}$	t年間之基線紅樹林生物碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq	$\Delta C_{DWBSL,t}$	t年間之基線枯木碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq	$\Delta SOC_{BSL,t}$	t年間之紅樹林土壤碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq	t	專案執行之年份，t=1, 2, 3...	yr	$\Delta C_{BSL,t} = \Delta C_{TREEBSL,t} + \Delta C_{SHRUBBSL,t} + \Delta C_{DWBSL,t}$ <table border="1" data-bbox="877 705 1402 2045"> <thead> <tr> <th>參數</th> <th>定義</th> <th>單位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$\Delta C_{BSL,t}$</td> <td>t年內碳匯的基線溫室氣體淨移除量</td> <td>t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td>ΔC_{TREEBS}</td> <td>t年內專案邊界中基線喬木 (tree) 碳儲量的變化；根據工具「估算 A/R CDM 專案活動中喬木和灌木的碳儲量和碳儲量變化」所估算</td> <td>t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td>$\Delta C_{SHRUBBS}$</td> <td>t年內專案邊界中基線灌木 (shrub) 碳儲量的變化；根據工具「估算 A/R CDM 專案活動中喬木和灌木的碳儲量和碳儲量變化」所估算</td> <td>t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td>$\Delta C_{DWBSL,t}$</td> <td>t年內專案邊界中基線內枯木 (dead wood) 碳儲量的變化；根據工具「估算 A/R CDM 專案活動中枯木和枯落物的碳</td> <td>t CO₂eq</td> </tr> </tbody> </table>	參數	定義	單位	$\Delta C_{BSL,t}$	t年內碳匯的基線溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq	ΔC_{TREEBS}	t年內專案邊界中基線喬木 (tree) 碳儲量的變化；根據工具「估算 A/R CDM 專案活動中喬木和灌木的碳儲量和碳儲量變化」所估算	t CO ₂ eq	$\Delta C_{SHRUBBS}$	t年內專案邊界中基線灌木 (shrub) 碳儲量的變化；根據工具「估算 A/R CDM 專案活動中喬木和灌木的碳儲量和碳儲量變化」所估算	t CO ₂ eq	$\Delta C_{DWBSL,t}$	t年內專案邊界中基線內枯木 (dead wood) 碳儲量的變化；根據工具「估算 A/R CDM 專案活動中枯木和枯落物的碳	t CO ₂ eq
	參數	定義	單位																																			
$\Delta C_{BSL,t}$	t年間(未實施專案活動)的基線溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq																																				
$\Delta C_{Mangrove}$	t年間之基線紅樹林碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq																																				
$\Delta B_{Mangrove}$	t年間之基線紅樹林生物碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq																																				
$\Delta C_{DWBSL,t}$	t年間之基線枯木碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq																																				
$\Delta SOC_{BSL,t}$	t年間之紅樹林土壤碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq																																				
t	專案執行之年份，t=1, 2, 3...	yr																																				
參數	定義	單位																																				
$\Delta C_{BSL,t}$	t年內碳匯的基線溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq																																				
ΔC_{TREEBS}	t年內專案邊界中基線喬木 (tree) 碳儲量的變化；根據工具「估算 A/R CDM 專案活動中喬木和灌木的碳儲量和碳儲量變化」所估算	t CO ₂ eq																																				
$\Delta C_{SHRUBBS}$	t年內專案邊界中基線灌木 (shrub) 碳儲量的變化；根據工具「估算 A/R CDM 專案活動中喬木和灌木的碳儲量和碳儲量變化」所估算	t CO ₂ eq																																				
$\Delta C_{DWBSL,t}$	t年內專案邊界中基線內枯木 (dead wood) 碳儲量的變化；根據工具「估算 A/R CDM 專案活動中枯木和枯落物的碳	t CO ₂ eq																																				

			儲量和碳儲量 變化」所估算	
(4)專案排 放量 (含專案 排放計算 式)	$\Delta C_{ACTUAL,t} = \Delta C_{P,t} - GHG_{E,t} - GHG_{fuel,t}$		$\Delta C_{ACTUAL,t} = \Delta C_{P,t} - GHG_{E,t}$ $\Delta C_{P,t} = \Delta C_{TREEPROJ,t} + \Delta C_{SHRUBPROJ,t} + \Delta C_{DWPROJ,t} + \Delta SOC_{PROJ,t}$	
	參數	定義	單位	
	ΔC_{ACTUAL}	t年間碳匯的實際溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq	
	$\Delta C_{P,t}$	t年間之特定碳庫中碳儲量的總變化	t CO ₂ eq	
	$GHG_{E,t}$	t年間由於實施 A/R 專案活動，在專案邊界內增加的非 CO ₂ GHG 排放量；並將「專案前」之估算設為零	t CO ₂ eq	
	$GHG_{fuel,t}$	t年間由於實施 A/R 專案活動，在專案邊界內使用化石燃料的排放量。參照 CDM AR-TOOL05 「A/R CDM 專案活動中與化石燃料燃燒有關的溫室氣體排放量估算工具」	t CO ₂ eq	
	$\Delta C_{P,t}$ 計算方式同基線溫室氣體淨移除量。即 $\Delta C_{P,t} = \Delta C_{BSL,t} = \Delta C_{MangroveBSL,t}$			
	參數	定義	單位	
	ΔC_{ACTUAL}	t年內碳匯的實際溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq	
	$\Delta C_{P,t}$	t年內選定碳庫中碳儲量的變化	t CO ₂ eq	
$GHG_{E,t}$	t年內由於實施 A/R 專案活動，在專案邊界內增加的非 CO ₂ GHG 排放量。根據工具「估算在 A/R CDM 專案活動中可歸因於生物質燃燒而產生的非 CO ₂ 溫室氣體排放量」	t CO ₂ eq		
ΔC_{TREEPR}	t年內專案邊界中喬木碳儲量的變化；根據工具「估算 A/R CDM 專案活動中喬木和灌木的碳儲量和碳儲量變化」所估算	t CO ₂ eq		
ΔC_{SHRUBP}	t年內專案邊界中灌木碳儲量的變化；根據工具「估算 A/R CDM 專案活動中喬木和灌木的碳儲量和碳儲量變化」所估算	t CO ₂ eq		
ΔC_{DWPRO}	t年內專案邊界	t CO ₂ eq		

		<table border="1"> <tr> <td data-bbox="869 159 1013 495"></td> <td data-bbox="1013 159 1262 495">中枯木碳儲量的變化；根據工具「估算A/R CDM 專案活動中枯木和枯落物的碳儲量和碳儲量變化」所估算</td> <td data-bbox="1262 159 1391 495"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="869 495 1013 622">ΔSOC_{PRO}</td> <td data-bbox="1013 495 1262 622">t年內專案中土壤有機碳儲量的變化</td> <td data-bbox="1262 495 1391 622">t CO₂eq</td> </tr> </table>		中枯木碳儲量的變化；根據工具「估算A/R CDM 專案活動中枯木和枯落物的碳儲量和碳儲量變化」所估算		ΔSOC_{PRO}	t年內專案中土壤有機碳儲量的變化	t CO ₂ eq																								
	中枯木碳儲量的變化；根據工具「估算A/R CDM 專案活動中枯木和枯落物的碳儲量和碳儲量變化」所估算																															
ΔSOC_{PRO}	t年內專案中土壤有機碳儲量的變化	t CO ₂ eq																														
(5)洩漏	<p>依據本方法學之適用條件之第9點，專案活動的實施不會引起專案前農漁業活動之轉移，因此不考慮農漁業活動轉移所造成之排放；而專案活動中運輸工具與燃油機械已歸類於專案排放源，因此本方法學下，植林活動不具潛在洩漏，即 $LK_t = 0$，其中 LK_t 為第 t 年專案活動所產生的洩漏排放量。</p>	$LK_t = LK_{AGRIC,t}$ <table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="869 734 975 779">參數</th> <th data-bbox="975 734 1262 779">定義</th> <th data-bbox="1262 734 1391 779">單位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="869 779 975 904">LK_t</td> <td data-bbox="975 779 1262 904">t年內因碳洩漏產生的溫室氣體排放量</td> <td data-bbox="1262 779 1391 904">t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td data-bbox="869 904 975 1283">LK_{AGR}</td> <td data-bbox="975 904 1262 1283">t年內農漁業活動轉移造成的碳洩漏 (t CO₂eq)；根據工具「估算因A/R CDM 專案活動替換先前農漁業活動而增加的溫室氣體排放量」</td> <td data-bbox="1262 904 1391 1283">t CO₂eq</td> </tr> </tbody> </table>	參數	定義	單位	LK_t	t年內因碳洩漏產生的溫室氣體排放量	t CO ₂ eq	LK_{AGR}	t年內農漁業活動轉移造成的碳洩漏 (t CO ₂ eq)；根據工具「估算因A/R CDM 專案活動替換先前農漁業活動而增加的溫室氣體排放量」	t CO ₂ eq																					
參數	定義	單位																														
LK_t	t年內因碳洩漏產生的溫室氣體排放量	t CO ₂ eq																														
LK_{AGR}	t年內農漁業活動轉移造成的碳洩漏 (t CO ₂ eq)；根據工具「估算因A/R CDM 專案活動替換先前農漁業活動而增加的溫室氣體排放量」	t CO ₂ eq																														
(6)人為溫室氣體淨移除量	$\Delta C_{AR,t} = \Delta C_{ACTUAL,t} - \Delta C_{BSL,t} - LK_t$ <table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="355 1317 480 1361">參數</th> <th data-bbox="480 1317 710 1361">定義</th> <th data-bbox="710 1317 857 1361">單位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="355 1361 480 1576">$\Delta C_{AR,t}$</td> <td data-bbox="480 1361 710 1576">實施紅樹林植林專案活動而產生的人為溫室氣體淨移除量</td> <td data-bbox="710 1361 857 1576">t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td data-bbox="355 1576 480 1697">$\Delta C_{ACTUAL,t}$</td> <td data-bbox="480 1576 710 1697">t年間之實際溫室氣體淨移除量</td> <td data-bbox="710 1576 857 1697">t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td data-bbox="355 1697 480 1868">$\Delta C_{BSL,t}$</td> <td data-bbox="480 1697 710 1868">t年間(未實施專案活動)之基線溫室氣體淨移除量</td> <td data-bbox="710 1697 857 1868">t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td data-bbox="355 1868 480 2033">LK_t</td> <td data-bbox="480 1868 710 2033">t年間之洩漏所產生之溫室氣體排放量，依據本方法學</td> <td data-bbox="710 1868 857 2033">t CO₂eq</td> </tr> </tbody> </table>	參數	定義	單位	$\Delta C_{AR,t}$	實施紅樹林植林專案活動而產生的人為溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq	$\Delta C_{ACTUAL,t}$	t年間之實際溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq	$\Delta C_{BSL,t}$	t年間(未實施專案活動)之基線溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq	LK_t	t年間之洩漏所產生之溫室氣體排放量，依據本方法學	t CO ₂ eq	$\Delta C_{AR-CDM,t} = \Delta C_{ACTUAL,t} - \Delta C_{BSL,t} - LK_t$ <table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="869 1451 994 1496">參數</th> <th data-bbox="994 1451 1262 1496">定義</th> <th data-bbox="1262 1451 1391 1496">單位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="869 1496 994 1576">$\Delta C_{AR-CDM,t}$</td> <td data-bbox="994 1496 1262 1576">t年內之人為溫室氣體淨移除量</td> <td data-bbox="1262 1496 1391 1576">t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td data-bbox="869 1576 994 1657">$\Delta C_{ACTUAL,t}$</td> <td data-bbox="994 1576 1262 1657">t年內之實際溫室氣體淨移除量</td> <td data-bbox="1262 1576 1391 1657">t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td data-bbox="869 1657 994 1738">$\Delta C_{BSL,t}$</td> <td data-bbox="994 1657 1262 1738">t年內之基線溫室氣體淨移除量</td> <td data-bbox="1262 1657 1391 1738">t CO₂eq</td> </tr> <tr> <td data-bbox="869 1738 994 1868">LK_t</td> <td data-bbox="994 1738 1262 1868">t年內因碳洩漏產生的溫室氣體排放量</td> <td data-bbox="1262 1738 1391 1868">t CO₂eq</td> </tr> </tbody> </table>	參數	定義	單位	$\Delta C_{AR-CDM,t}$	t年內之人為溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq	$\Delta C_{ACTUAL,t}$	t年內之實際溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq	$\Delta C_{BSL,t}$	t年內之基線溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq	LK_t	t年內因碳洩漏產生的溫室氣體排放量	t CO ₂ eq
參數	定義	單位																														
$\Delta C_{AR,t}$	實施紅樹林植林專案活動而產生的人為溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq																														
$\Delta C_{ACTUAL,t}$	t年間之實際溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq																														
$\Delta C_{BSL,t}$	t年間(未實施專案活動)之基線溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq																														
LK_t	t年間之洩漏所產生之溫室氣體排放量，依據本方法學	t CO ₂ eq																														
參數	定義	單位																														
$\Delta C_{AR-CDM,t}$	t年內之人為溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq																														
$\Delta C_{ACTUAL,t}$	t年內之實際溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq																														
$\Delta C_{BSL,t}$	t年內之基線溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq																														
LK_t	t年內因碳洩漏產生的溫室氣體排放量	t CO ₂ eq																														

	適用條件可視為零	
(7) 量測方法/參數	<p>「量測方法」分為兩大部分說明，分別為「專案量測」、「樣區設置與量測」。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 「專案量測」：說明項目包含「專案活動之量測」、「量測頻率」、「精準度要求」。 2. 「樣區設置與量測」：說明項目包含「樣區設置」、「碳儲量變化的量測」、「精準度控制和校正」以及「水質量測」。 	<p>「量測程序」分為四個部分，分別為「量測計畫」、「實施量測專案」、「精準度要求」、「數據要求」。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 「量測計畫」：量測計畫應提供收集所需的相關數據，以供查證 (Verification) 碳庫之碳儲存變化、專案排放和洩漏排放量。收集的相關數據應至少保存至最後一次核發減量權證後2年。 2. 「實施量測專案」：專案設計文件 (PDD) 中應提供並記錄資訊，以確認主辦國實施受普遍公認的原則、森林盤查方法和森林管理。 3. 「精準度要求」：參照「估算 A/R CDM 專案活動中喬木和灌木的碳儲量和碳儲量變化」之要求。 4. 「數據要求」：本方法學中使用的工具可找到數據和參數的描述並依其要求進行量測。

III. 減量方法計算式設計概念

表二詳述本減量方法計算式之設計概念，主要說明基線排放量、專案排放量及其他計算式呈現之目的、原理與參採來源。

表二、本減量方法計算式設計概念

	計算式	說明及參採來源
(1)基線排放量	$\Delta C_{BSL,t} = \Delta C_{Mangrove_{BSL,t}}$ $= \Delta B_{Mangrove_{BSL,t}} + \Delta C_{DW_{BSL,t}}$ $+ \Delta SOC_{BSL,t}$	基線排放量之方法主要參酌 IPCC 方法。
(2)專案排放量	$\Delta C_{ACTUAL,t} = \Delta C_{P,t} - GHG_{E,t}$ $- GHG_{fuel,t}$ <p>$\Delta C_{P,t}$ 計算方式同基線溫室氣體淨移除量。即 $\Delta C_{P,t} = \Delta C_{BSL,t} = \Delta C_{Mangrove_{BSL,t}}$</p>	專案排放量之方法主要參酌 IPCC 方法，而 $GHG_{fuel,t}$ 則依據 CDM AR-Tool05 之工具加入化石燃料之二氧化碳排放量。

IV. 小規模減量方法(草案)

1. 介紹

下表為本減量方法的重要特性：

表三、減量方法重要特性

減量專案一般用法	本方法主要透過對紅樹林棲地進行植林，進而達到增加專案邊界內碳儲量之目的。
溫室氣體移除類型	移除型

2. 範疇、適用條件及生效日

2.1 範疇

本方法主要透過對紅樹林棲地進行植林，進而達到增加專案邊界內有機碳儲量之目的。

2.2 適用條件

本方法學適用於臺灣的紅樹林植林。使用本溫室氣體減量方法學之紅樹林植林專案必須滿足以下適用條件：

本減量方法之適用條件如下：

- (1) 專案起始時間不得早於西元 2000年1月1日。其專案邊界之土地或海域權屬清晰，具有土地所有權證明或經主管機關核可之使用證明文件。
 - (2) 本方法學之專案活動適用於紅樹林棲地之植林，包含濱海濕地之劣化紅樹林棲地；劣化紅樹林棲地是指植被狀況無法同時滿足樹密度每公頃 ≥ 1050 株，且鬱閉度 (crown cover) ≥ 0.20 之條件。
 - (3) 專案活動不得違反國家相關法律、法規、政策措施，且應符合相關技術規範。
 - (4) 專案區域內 (project area)，臺灣原生紅樹林樹種之種植面積應逾 90%；若非臺灣原生紅樹林樹種之種植面積超過 10%，則專案活動不得導致專案區域之水文、上下坡相連之濕地區域水文之變化。
 - (5) 專案活動後，專案邊界內所引起的土壤擾動不得使土壤有機碳變動大於 10%。
 - (6) 專案活動所種植之紅樹林樹種須為臺灣原生樹種，並配合環境條件選用合宜樹種。
 - (7) 專案活動不得採取人為引火焚燒方式對林地進行清除或管理。
 - (8) 專案活動不得移除地表植株、枯落物、樹根、枯木。
 - (9) 專案活動不會造成專案開始前農漁業活動的變更。
- 此外，使用本方法學時，還須滿足相關步驟中的其他條件。

2.3 生效日

生效日係以□年□月□日「環境部溫室氣體抵換專案暨自願減量專案審議會第□次會議」決議審核通過為準。

3. 名詞定義 (若適用)

出於本方法學之目的，其相關名詞定義如下：

本減量方法相關名詞定義如下：

- (1) 紅樹林 (mangroves)：由天然生長於海岸環境和海灣邊緣，平均海平面以上潮間帶之潮汐棲地的樹木、灌木、棕櫚或地被蕨類植物組成之森林，高度一般超過 1.5 公尺。臺灣紅樹林現存樹種為海茄苳 (*Avicennia marina*)、水筆仔 (*Kandelia obovata*)、欖李 (*Lumnitzera racemosa*) 及五梨跤 (*Rhizophora stylosa*)。臺灣北部以水筆仔為優勢，南部則以海茄苳為優勢，欖李及五梨跤則分布於嘉義以南沿海地區。目前從自然棲地消失的細蕊紅樹 (*Ceriops tagal*) 與紅茄苳 (*Bruguiera gymnorhiza*) 曾分布於高雄沿海地區。
- (2) 植林 (reforestation)：藉由植樹、播種或人為促進種子自然傳播，使過去 50 年內曾經為紅樹林棲地轉變為無林地的土地後，因人為活動再次轉變為紅樹林。

- (3) 碳庫 (carbon pool)：儲存在土壤、植被、水體和大氣等碳儲載體中可以吸收和排放的碳。
- (4) 碳儲量 (carbon stock)：生態系統中儲存的碳總量，特別指每公頃特定深度(紅樹林通常是1公尺深)土壤的碳含量。碳儲量可包含一個或者多個碳庫的碳總量。本方法學統一以二氧化碳溫暖化潛勢轉換，單位為 $t CO_2eq ha^{-1}$ 。
- (5) 碳匯 (carbon sink)：指將二氧化碳或其他溫室氣體自排放源或大氣中持續移除後，吸收或儲存之樹木、森林、土壤、海洋、地層、設施或場所。
- (6) 濱海濕地 (coastal wetland)：底質土壤通常由有機土或礦物土組成。這些土壤可能全年或部分時間被潮汐淡水、半淡鹹水或鹹水所淹沒或飽和含水，並有維管束植物生長。
- (7) 紅樹林原生樹種：臺灣現存紅樹林原生物種為海茄苳 (*Avicennia marina*)、水筆仔 (*Kandelia obovata*)、欖李 (*Lumnitzera racemosa*) 及五梨跤 (*Rhizophora stylosa*)。
- (8) 自源性碳 (autochthonous carbon)：有機碳由紅樹林本身吸收固定海洋和大氣中的碳並轉移到植物組織中，或在紅樹林周遭土壤中堆積或分解。
- (9) 外源性碳 (allochthonous carbon)：來自於紅樹林以外的有機碳來源。
- (10) 地上部生物量 (aboveground biomass)：土壤層以上的植物體生物量，單位為乾重 (dry matter)，如枝、葉、種子、花、果實等。
- (11) 地下部生物量 (belowground biomass)：土壤層以下的植物體生物量，單位為乾重 (dry matter)，如粗根、細根等。
- (12) 劣化紅樹林棲地 (degraded mangrove habitat)：因自然(颱風、病蟲害等)或人為因素(污染、水利海岸工程、砍伐、鹽田開闢、養殖漁塭等)，導致紅樹林植被無法同時滿足樹密度每公頃 ≥ 1050 株，且鬱閉度 ≥ 0.20 之條件，或生態系結構和功能受損，其穩定度、抗干擾能力下降，且難以自然恢復之紅樹林。
- (13) 枯木：枯落物以外的死亡生物量，如枯立木、枯倒木，以及直徑 ≥ 5.0 公分的枯枝、枯根與樹樁。
- (14) 枯落物：從紅樹林落下的葉、枝、莖、樹皮、花果等。
- (15) 喬木：樹高大於或等於1.3公尺且屬於附錄1中7種喬木樹幹型態。
- (16) 灌木：樹高小於1.3公尺，已是樹冠層，以葉子及枝條為主的樹木且不屬於附錄一中7種喬木樹幹型態，無法量測樹胸徑之矮樹叢。
- (17) 異速生長方程式 (allometric equation)：建立易於直接測定的生物特徵參數(如樹高、胸徑和基徑)和難以直接測定的生物特徵參數之間的數量關係式，常用於估算林木生物量。
- (18) 有機碳含量百分比 (carbon fraction)：單位質量中有機碳含量，以百分比表示之。
- (19) 地表高程監測系統 (surface elevation table, SET)：用於量測地表高程變化的可攜式手動操作裝置，在95%的信賴區間內的分辨率為 ± 1.5 mm。
- (20) 土壤擾動 (soil disturbance)：導致土壤有機碳 (soil organic carbon, SOC) 減少的任何活動，例如：耕作、翻土、鬆土、挖坑和溝渠、清除樹樁等。

(21) 基線情境：指未執行自願減量專案活動之情境，為既存措施或活動情形。

(22) 專案情境：指執行自願減量專案活動之情境。

(23) 專案邊界 (project boundary)：指事業或各級政府依溫室氣體減量方法之設計框架及要求，規劃之自願減量專案實施範圍，包含在執行減量措施前後，具有控制權之溫室氣體排放源及碳匯。

(24) 基線排放量：指在沒有進行紅樹林棲地植林專案活動前，基線情境之下所產生的溫室氣體排放量。

(25) 基線溫室氣體淨移除量：指在沒有專案活動時，專案邊界內未來溫室氣體排放量及移除量之總和。

(26) 專案溫室氣體淨移除量：指進行專案活動時，專案邊界內溫室氣體排放量及移除量之總和。

(27) 單位

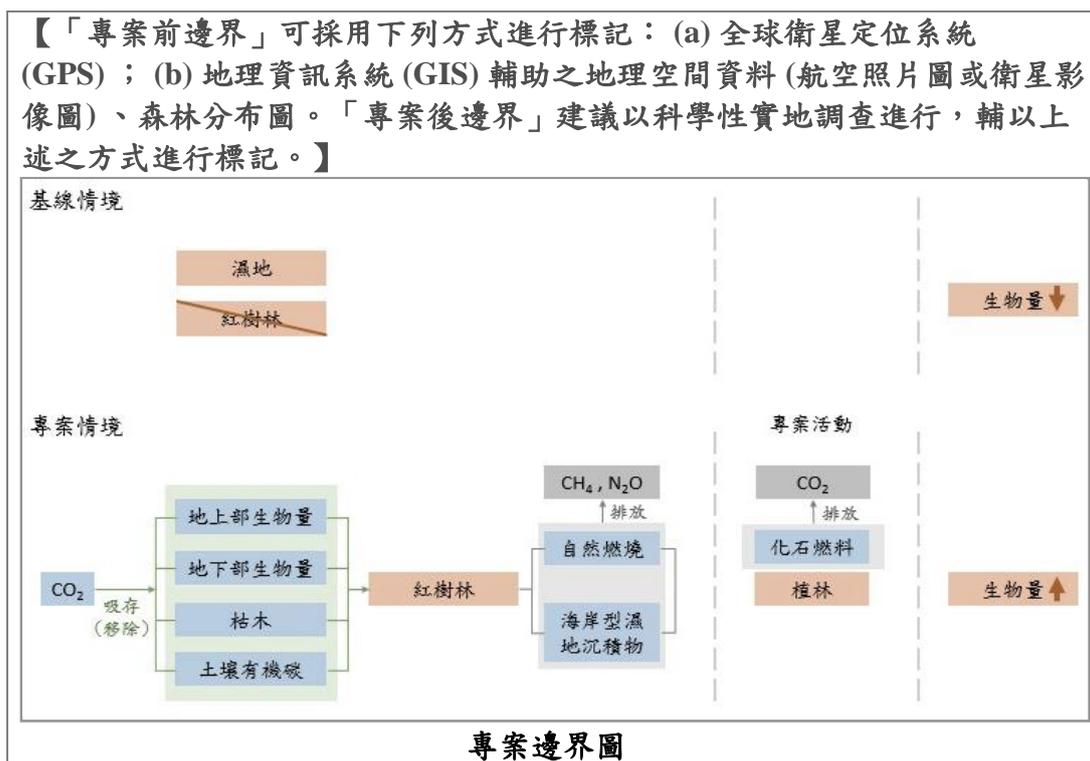
中文	英文	縮寫
二氧化碳當量	carbon dioxide equivalent	CO ₂ eq
噸	tonne	t
乾重	dry matter	d.m.
噸乾重	tonne dry matter	t d.m.
每公頃噸乾重	tonne dry matter per hectare	t d.m. ha ⁻¹
公頃	hectare	ha

(28) 公式中的縮寫代號

中文	英文	公式中的縮寫代號
基線情境	baseline scenario	<i>BSL</i>
專案情境	project scenario	<i>PROJ</i>
洩漏	leakage	<i>LK</i>
喬木	tree	<i>TREE</i>
灌木	shrub	<i>SHRUB</i>
生物量(生物質)	biomass	<i>B</i> 或 <i>b</i> (依公式狀況)
有機碳含量百分比	carbon fraction	<i>CF</i>
燃燒係數	combustion factor	<i>COMF</i>
排放係數	emission factor	<i>EF</i>
溫暖化潛勢	global warming potential	<i>GWP</i>
溫室氣體排放量	greenhouse gas emission	<i>GHG_E</i>
土壤有機碳	soil organic carbon	<i>SOC</i>
面積	area	<i>A</i>

4. 專案邊界

專案活動之「專案邊界 (project boundary)」係指，專案申請者 (project participants, PPs) 所管理的專案活動之地理範圍，其範圍可包含多筆分散之土地，每筆分散的土地皆應證明具土地合格性。此外，應提供土地所有權或政府相關單位核發的使用權證明。其專案邊界應分為「專案前邊界」及「專案後邊界」，其「專案前邊界」係指專案設計與開發階段所訂定之計畫實施專案活動之邊界；「專案後邊界」係指專案活動之實際實施、量測所確認以及專案查核的專案邊界。「專案後邊界」之面積誤差不得超過「專案前邊界」的 $\pm 5\%$ 。



定義專案邊界時需考量：

(1) 土地合格性

專案申請者須提供資料以證實專案邊界內紅樹林棲地，於專案活動起始前 (即基線情境) 符合適用條件，得透過下列任一方式及文件進行專案活動起始前之情況證明：

- (a) 能表示過去土地利用狀況的高解析度地理空間資料 (如航空照片圖或衛星影像圖)；
- (b) 林業調查規劃的地理空間資訊資料 (如紅樹林分佈圖、林相圖)；
- (c) 地面基本調查資料，如土地清冊及所有權人登記等。

(2) 碳庫之計算項目

碳庫變化、排放量以及移除量的估計通常會涉及五種碳庫 (IPCC 2006)。針對本方法之目的，地上部及地下部生物量為必須計入之項目；由於枯落物並非主要受影響之碳庫，因此基於保守性原則只計算地上部、地下部生物量 (紅樹林植物體之生物量) 及土壤有機碳庫；枯木則可視量測困難的程度，由專案申請者自選 (表四)。

表四、碳庫計算項目

碳庫	是否採用	理由/解釋
地上部生物量 (above-ground biomass)	是	為專案活動影響的主要碳庫。
地下部生物量 (below-ground biomass)	是	碳庫中的碳儲量預計會受專案活動的實施而增加。
枯落物 (litter)	否	枯落物的生物量由於受到潮汐與海流的影響而導致高周轉率 (turnover) 和流失 (displacement)。因為專案活動不會降低枯落物的堆積率，故保守性作法是將此碳庫排除在核算之外。
枯木 (dead wood)	自選	碳庫中的碳儲量可能會受專案活動的實施而增加，但若專案邊界內紅樹林之枯木具有量測上之困難，可基於保守性原則選擇不計入。
土壤有機碳 (soil organic carbon)	是	碳庫中的碳儲量可能會受專案活動的實施而增加。

(3) 溫室氣體排放源之計算項目

溫室氣體排放源分為三部分，分別為自然火災、海岸濕地土壤及化石燃料使用的排放。本方法不允許專案活動為整地 (site preparation) 或是森林管理之目的而燃燒木質生物量 (woody biomass)，但是受自然火災而釋出之溫室氣體項目應被納入計算。若無燃燒木質生物量之行為活動，則計為零。其燃燒木質生物量之溫室氣體與海岸濕地土壤的排放項目，應計入包含甲烷 (methane，分子式 CH₄)、氧化亞氮 (nitrous oxide，分子式 N₂O) (表五)。

表五、溫室氣體排放項目

來源	氣體	是否採用	理由/解釋
紅樹林之木質生物量	CO ₂	否	生物量燃燒所產生的 CO ₂ 排放量已被計入碳儲量變化之中。
	CH ₄	是	受火災燃燒木質生物量而導致 CH ₄ 排放，若無自然火災則可不計入。
	N ₂ O	是	受火災燃燒木質生物量而導致 N ₂ O 排放，若無自然火災則可不計入。
土壤排放	CO ₂	否	CO ₂ 排放量已被計入碳儲量變化之中。
	CH ₄	是	若低潮時海水鹽度 < 18 psu ³ ，則當次測量應計入，若海水鹽度 ≥ 18 的情境則可不計入。
	N ₂ O	是	專案活動施以高營養鹽、肥料等，或低潮時海水達到 ≥ 中度優養化等級 ⁴ ，則當次測量應

³ 依據 IPCC 《對2006國家溫室氣體清冊的2013補充指南：濕地》(2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands)，設定海水水體鹽度18的標準。

⁴ 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

			計入，若水體為低營養鹽的情境或未達條件則可不計入。
化石燃料	CO ₂	是	專案活動作業中，車輛運輸和機具設備移動是潛在的主要排放源。
	CH ₄	否	在專案中，並非主要的排放源。
	N ₂ O	否	在專案中，並非主要的排放源。

(4) 分層採樣分析法

若專案邊界內紅樹林生物量分布不均時，則應採取碳庫之「分層 (stratification)」採樣，以增加基線及專案活動期間碳匯估算的準確性。因此，應依據影響碳儲量的因素做為分層標準。碳儲量的影響因子有植被種類、密度、土地利用方式、潛在的土地利用方式、土壤性質、地貌特徵 (地質特徵、排水狀況)、距海遠近等 (Hiraishi 2014)。

基於本方法學之目的，分層現象主要取決於植林及經營管理計畫，分層可分為「事前分層」和「事後分層」。考量基線情境與專案情境可能具有不同的分層因子，其「事前分層」可再分為「基線事前分層」以及「專案事前分層」；「基線事前分層」主要有植被類型、冠層覆蓋率、土地利用類型等；「專案事前分層」則主要依據專案設計之植林或管理模式分層，有樹種、樹齡、植林時間、間伐、輪伐期等。如果受到自然或人為因素影響 (例如局部火災) 或其他因素 (例如土壤類型) 顯著變更專案邊界內生物量之分佈模式，則須相應修訂「事後分層」。分層之大小和數量應該綜合考慮精確度、所需時間和可利用資源三者的平衡。

5. 外加性

外加性分析：自願減量方法應註明專案應符合「溫室氣體自願減量專案管理辦法」外加性分析 (法規外加性、財務外加性、普遍性及障礙分析等)。引用本自願減量方法學的專案，基線情境為專案活動實施前的土地使用方式。為達到本方法學增加碳匯之目的，專案申請者應評估並提供「外加性」證明相關的資料、原理、假設、理由和文本。外加性分析之規範，應符合「溫室氣體自願減量專案管理辦法」及相關規定。

備註：本節及下節 (6. 基線排放量) 同等於 CDM 小規模減量方法之“基線”。

6. 基線排放量

「基線情境」係指專案活動起始前，實際之土地利用方式及狀況。「基線溫室氣體淨移除量」係指在基線情境下，專案邊界內碳庫的碳儲量變化之總和。專案申請者應評估在基線情境之下，專案邊界是否存在影響碳儲量重大變化之因子。基於本方法學之目的與方法，依據「估算 A/R CDM 專案活動中喬木和灌木的碳儲量和碳儲量變化 (版本 04.2)」 (Estimation of carbon stocks and change in carbon stocks of trees and shrubs in A/R CDM project activities) 之方法學工具，當滿足下列條件即可將基線中樹木之碳儲量計為零，否則應加以計算，條件包含 (a) 專案前的樹木在專案活動的計入期內不會被砍伐、清理或移除；(b) 專案前的樹木在專案活動的計入期內不會因專案中種植的樹木競爭或

度優養化； $3.0 < E \leq 9.0$ 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。

因專案實施而死亡；(c) 量測碳儲量時，專案前的樹木未與專案活動所種植的樹木一起量測，但專案前的樹木會持續存在並符合基線情境，且在專案活動的計入期內受到量測。

備註：本節及上節 (5.外加性) 同等於 CDM 小規模減量方法之“基線”。

基線排放量計算式如下：

(1) 基線溫室氣體淨移除量計算公式

依據所選定之碳庫，計算各基線 (BSL) 碳庫層之紅樹林碳儲量的年度總變化量，即為基線紅樹林碳儲量的年變化量 ($\Delta C_{Mangrove_{BSL,t}}$)。

$$\Delta C_{BSL,t} = \Delta C_{Mangrove_{BSL,t}}$$

(t 年間基線溫室氣體淨移除量 = t 年間基線紅樹林碳儲量的年變化量)

$$\Delta C_{Mangrove_{BSL,t}} = \Delta B_{Mangrove_{BSL,t}} + \Delta C_{DW_{BSL,t}} + \Delta SOC_{BSL,t} \quad \text{式1}$$

(t 年間基線紅樹林碳儲量年變化量 =
t 年間基線紅樹林生物碳儲量年變化量
+ t 年間基線紅樹林枯木碳儲量年變化量
+ t 年間基線紅樹林土壤碳儲量年變化量)

參數	定義	單位
$\Delta C_{BSL,t}$	t 年間 (未實施專案活動) 之基線溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq
$\Delta C_{Mangrove_{BSL,t}}$	t 年間之基線紅樹林碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq
$\Delta B_{Mangrove_{BSL,t}}$	t 年間之基線紅樹林生物碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq
$\Delta C_{DW_{BSL,t}}$	t 年間之基線枯木碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq
$\Delta SOC_{BSL,t}$	t 年間之紅樹林土壤碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq
t	專案執行之年份，t=1, 2, 3...	yr

(2) 基線生物碳儲量年變化量計算公式

依據所選定之碳庫、劃分之碳庫層與樹種面積，計算各基線 (BSL) 碳庫層之紅樹林生物碳儲量的年度總變化量，即為基線紅樹林生物碳儲量的年變化量 ($\Delta B_{Mangrove_{BSL,t}}$)。

$$\Delta B_{Mangrove_{BSL,t}} = \sum_{ijt} (A_{BSL,i,j,t} \times \Delta B_{BSL,i,j,t}) \times 44/12 \quad \text{式1-1}$$

(t 年間基線紅樹林生物碳儲量年變化量 =

$$\sum_{i \text{ 碳庫層 } j \text{ 物種 } t \text{ 年}} (\text{面積} \times \text{單位面積紅樹林生物碳儲量年變化量}) \times 44/12)$$

參數	定義	單位
$\Delta B_{Mangrove_{BSL,t}}$	t 年間之基線紅樹林生物碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq
$A_{BSL,i,j,t}$	第 t 年之基線第 i 碳庫層 j 樹種的面積	ha
$\Delta B_{BSL,i,j,t}$	第 t 年之基線第 i 碳庫層樹種 j 之單位面積紅樹林生物碳儲量年變化量	t C ha ⁻¹ yr ⁻¹
44/12	有機碳含量之二氧化碳當量轉換係數 ⁵	-
i	基線碳庫層，i = 1, 2, 3...	-
j	紅樹林樹種，j = 1, 2, 3...	-

⁵ 係數來自於二氧化碳與碳之分子量比44/12。使用於將碳量 (t C) 轉換為二氧化碳當量 (t q)。

t	專案執行年份，t=1, 2, 3...	yr
---	---------------------	----

專案申請者可以依據1-1-1式來估算單位面積紅樹林生物碳儲量年變化量($\Delta B_{BSL,i,j,t}$)。若缺乏地下部資料，可使用1-1-2式估算。

$$\Delta B_{BSL,i,j,t} = (\Delta B_{TREE_{AB,i,j,t}} \times CF_{TREE_{AB,i,j,t}} + \Delta B_{TREE_{BB,i,j,t}} \times CF_{TREE_{BB,i,j,t}}) + (\Delta B_{SHRUB_{AB,i,j,t}} \times CF_{SHRUB_{AB,i,j,t}} + \Delta B_{SHRUB_{BB,i,j,t}} \times CF_{SHRUB_{BB,i,j,t}}) \quad \text{式1-1-1}$$

(i 碳庫層 j 物種第 t 年單位面積紅樹林生物碳儲量年變化量= (紅樹林喬木地上部平均年生長量×紅樹林喬木地上部有機碳含量百分比 + 紅樹林喬木地下部平均年生長量×紅樹林喬木地下部有機碳含量百分比) + (紅樹林灌木地上部平均年生長量×紅樹林灌木地上部有機碳含量百分比 + 紅樹林灌木地下部平均年生長量×紅樹林灌木地下部有機碳含量百分比))

參數	定義	單位
$\Delta B_{BSL,i,j,t}$	第 t 年之基線第 i 碳庫層樹種 j 之單位面積紅樹林生物碳儲量年變化量	t C ha ⁻¹ yr ⁻¹
ΔB_{AB}	紅樹林地上部平均年生長量(乾重)	t d.m. ha ⁻¹ yr ⁻¹
CF_{AB}	紅樹林地上部有機碳含量百分比	%
ΔB_{BB}	紅樹林地下部平均年生長量(乾重)	t d.m. ha ⁻¹ yr ⁻¹
CF_{BB}	紅樹林地下部有機碳含量百分比	%
TREE	喬木	-
SHRUB	灌木	-
i	基線碳庫層，i=1, 2, 3...	-
j	紅樹林樹種，j=1, 2, 3...	-
t	專案執行年份，t=1, 2, 3...	yr

$$\Delta B_{BSL,i,j,t} = \sum_{ij} \{ \Delta B_{AB,i,j,t} \times (1 + R_{BSL,i,j,t}) \times CF_{BSL,i,j,t} \} \quad \text{式1-1-2}$$

(i 碳庫層 j 物種第 t 年單位面積紅樹林生物碳儲量年變化量= 紅樹林地上部平均年生長量×(1+根莖比)×紅樹林有機碳含量百分比)

參數	定義	單位
$\Delta B_{BSL,i,j,t}$	第 t 年之基線第 i 碳庫層樹種 j 之單位面積紅樹林生物碳儲量年變化量	t C ha ⁻¹ yr ⁻¹
$\Delta B_{AB,i,j,t}$	紅樹林地上部平均年生長量(乾重)	t d.m. ha ⁻¹ yr ⁻¹
$R_{BSL,i,j,t}$	第 t 年之第 i 碳庫層樹種 j 的根莖比，即地下部生物量與地上部生物量比值	-
$CF_{BSL,i,j,t}$	第 t 年之第 i 碳庫層之紅樹林有機碳含量百分比(%)	%
i	基線之碳庫層，i=1,2,3...	-
j	紅樹林樹種，j=1,2,3...	-
t	專案執行之年份，t=1,2,3...	yr

(3) 基線枯木碳儲量年變化量計算公式
基線枯木碳儲量的年變化($\Delta C_{DW_{BSL,t}}$)，估算如下。

$$\Delta C_{DW_{BSL,t}} = \sum_{ijt} (A_{BSL,i,j,t} \times C_{DW_{BSL,i,j,t}}) \times 44/12 \quad \text{式1-2}$$

(t 年間基線紅樹林枯木碳儲量年變化量=

$$\sum_i \text{碳庫層 } j \text{ 物種 } t \text{ 年 (面積} \times \text{單位面積紅樹林枯木碳儲量年變化量)} \times 44/12$$

參數	定義	單位
$\Delta C_{DW_{BSL,t}}$	t 年間之基線枯木碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq
$A_{BSL,i,j,t}$	第 t 年之基線第 i 碳庫層 j 樹種的面積	ha
$C_{DW_{BSL,t}}$	第 t 年之基線枯木碳儲量的年變化量	t C ha ⁻¹ yr ⁻¹
44/12	有機碳含量之二氧化碳當量轉換係數	-
i	基線之碳庫層，i = 1,2,3...	-
j	紅樹林樹種，j = 1,2,3...	-
t	專案執行之年份，t = 1,2,3...	yr

$$C_{DW_{BSL,t}} = B_{BSL,i,j,t} \times DF_{DW} \quad \text{式1-2-1}$$

(第 t 年單位面積紅樹林枯木碳儲量年變化量 =
i 碳庫層 j 物種第 t 年單位面積紅樹林生物碳儲量年變化量
× 枯木碳儲量與活木碳儲量的比值)

參數	定義	單位
$B_{BSL,i,t}$	第 t 年之基線第 i 碳庫層樹種 j 之單位面積紅樹林生物碳儲量年變化量	t C ha ⁻¹ yr ⁻¹
DF_{DW}	專案邊界內枯木碳儲量與活木碳儲量的比值，可使用估計值 6.23%	%

(4) 基線土壤碳儲量年變化量計算公式

提供專案申請者兩個子公式 ($aSOC_{i,t}$ 或 $dSOC_{i,j,t}$) 及估計值 (EF_{Siols})，以計算土壤有機碳儲量年變化量 ($\Delta SOC_{BSL,t}$)。使用之優先順序為 $aSOC_{i,t}$ (式 1-3-1)、 $dSOC_{i,j,t}$ (式 1-3-2)、 EF_{Siols} 。專案申請者可考量環境、成本等條件自選，但應於專案申請文件中進行說明並記錄，公式如下：

$$\Delta SOC_{BSL,t} = \sum_{ijt} A_{BSL,i,j,t} \times (aSOC_{i,j,t} \text{ 或 } dSOC_{i,j,t} \text{ 或 } EF_{Siols}) \times 44/12 \quad \text{式1-3}$$

(t 年間基線土壤有機碳儲量年變化量 =

$$\sum_i \text{碳庫層 } j \text{ 物種 } t \text{ 年 面積} \times (\text{紅樹林自源性土壤碳儲量年變化量}) \times 44/12$$

$$\text{或 } \sum_i \text{碳庫層 } j \text{ 物種 } t \text{ 年 面積} \times (\text{紅樹林自源加外源性土壤碳儲量年變化量}) \times 44/12$$

$$\text{或 } \sum_i \text{碳庫層 } j \text{ 物種 } t \text{ 年 面積} \times (\text{紅樹林土壤碳儲量年變化量係數}) \times 44/12$$

參數	定義	單位
$\Delta SOC_{BSL,t}$	t 年間之基線土壤有機碳儲量年變化量	t CO ₂ eq
$A_{BSL,i,j,t}$	第 t 年之基線第 i 碳庫層 j 樹種的面積	ha
$dSOC_{i,j,t}$	第 t 年紅樹林自源加外源性土壤有機碳儲量年變化量	t C ha ⁻¹ yr ⁻¹
$aSOC_{i,j,t}$	第 t 年紅樹林自源性土壤碳儲量年變化量	t C ha ⁻¹ yr ⁻¹
EF_{Siols}	第 t 年紅樹林土壤碳排放係數。目前僅有重建植被再濕潤土地有排放係數 (EF) 估計值 -0.43，即土壤碳儲量年變化量 0.43。	t C ha ⁻¹ yr ⁻¹
44/12	有機碳含量之二氧化碳當量轉換係數	-

(a) 自源性土壤碳儲量年變化量

$$aSOC_{i,t} = LI_{AB,i,j,t} \times W_{LI_{AB,i,j,t}} + LI_{BB,i,j,t} \times W_{LI_{BB,i,j,t}} \quad \text{式1-3-1}$$

(第 t 年紅樹林自源性土壤碳儲量年變化量=
紅樹林地上部枯落物年增加量×紅樹林地上部枯落物分解剩餘量百分比
+紅樹林地下部死亡細根年增加量×紅樹林床地下部死亡細根分解剩餘量百分比)

參數	定義	單位
$aSOC_{i,j,t}$	紅樹林自源性土壤碳儲量年變化量	t C ha ⁻¹ yr ⁻¹
$LI_{AB,i,j,t}$	紅樹林地上部枯落物年增加量	t d.m. ha ⁻¹ yr ⁻¹
$W_{LI_{AB,i,j,t}}$	紅樹林地上部枯落物分解剩餘量百分比	%
$LI_{BB,i,j,t}$	紅樹林地下部死亡細根年增加量	t d.m. ha ⁻¹ yr ⁻¹
$W_{LI_{BB,i,j,t}}$	紅樹林地下部死亡細根分解剩餘量百分比	%

(b) 地表高程監測系統 (SET)

$$dSOC_{i,j,t} = SEC_{i,j} \times SBD_{i,j} \times CF_{Soils,i,j} \quad \text{式1-3-2}$$

(第 t 年紅樹林土壤有機碳儲量的年變化量=
紅樹林地表高程年變化量×紅樹林土壤總體密度×紅樹林土壤有機碳含量百分比)

參數	定義	單位
$CAR_{i,j,t}$	紅樹林土壤有機碳儲量的變化率	t C ha ⁻¹ yr ⁻¹
$SEC_{i,j}$	紅樹林地表高程年變化量	cm yr ⁻¹
$SBD_{i,j}$	紅樹林土壤總體密度	g cm ⁻³
$CF_{Soils,i,j}$	紅樹林土壤有機碳含量百分比	%

(c) 經驗值法

當現地無法以地表高程監測系統 (SET) 進行量測時，基於保守性原則、成本有效性原則，專案申請者可以使用土壤有機碳儲量變化率的估計值 (EF_{Soils}) 進行估算。估計值請見9.1預設數據與參數說明 (若需要) 之數據與參數表8。

7. 專案排放量

專案實施後，專案邊界內受專案活動而產生的專案溫室氣體淨移除量，即專案所增加之碳匯量。其估算方式為專案邊界內各碳庫中碳儲量之總和 (即，專案邊界內碳庫在 t 年內的碳儲量總變化量， $\Delta C_{P,t}$)，扣除受專案活動而產生的非 CO₂ 溫室氣體排放量 ($GHG_{E,t}$) 以及在專案邊界內使用化石燃料的排放量 ($GHG_{fuel,t}$)。專案溫室氣體淨移除量 ($\Delta C_{ACTUAL,t}$) 計算公式如下。

(1) 專案溫室氣體淨移除量計算公式

$$\Delta C_{ACTUAL,t} = \Delta C_{P,t} - GHG_{E,t} - GHG_{fuel,t} \quad \text{式2}$$

(t 年間實際溫室氣體淨移除量=
t 年間專案所有碳庫碳儲量總變化量
- t 年間專案非 CO₂ GHG 排放量
- t 年間專案化石燃料排放量)

參數	定義	單位
$\Delta C_{ACTUAL,t}$	t 年間之實際溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq
$\Delta C_{P,t}$	t 年間之所有碳庫碳儲量總變化量	t CO ₂ eq

$GHG_{E,t}$	t 年間由於實施 A/R 專案活動，在專案邊界內增加的非 CO ₂ GHG 排放量；並將「專案前」之估算設為零	t CO ₂ eq
$GHG_{fuel,t}$	t 年間由於實施 A/R 專案活動，在專案邊界內使用化石燃料的排放量。參照 CDM AR-Tool05 「A/R CDM 專案活動中與化石燃料燃燒有關的溫室氣體排放量估算工具」	t CO ₂ eq

專案邊界內各碳庫在 t 年間特定碳庫碳儲量總變化量 ($\Delta C_{P,t}$) 之計算方式同基線溫室氣體淨移除量 (式1)，計算如下：

$$\Delta C_{P,t} = \Delta C_{MangrovePROJ,t} \quad \text{式2-1}$$

(t 年間專案所有碳庫碳儲量總變化量=t 年間專案紅樹林碳儲量年變化量)

$$\Delta C_{MangrovePROJ,t} = \Delta B_{MangrovePROJ,t} + \Delta C_{DWPROJ,t} + \Delta SOC_{PROJ,t}$$

(t 年間專案紅樹林碳儲量年變化量=
 t 年間專案紅樹林生物碳儲量年變化量
 + t 年間專案紅樹林枯木碳儲量年變化量
 + t 年間專案紅樹林土壤碳儲量年變化量)

參數	定義	單位
$\Delta B_{MangrovePROJ,t}$	t 年之專案紅樹林生物碳儲量年變化量	t CO ₂ eq
$\Delta C_{DWPROJ,t}$	t 年之專案枯木碳儲量年變化量	t CO ₂ eq
$\Delta SOC_{PROJ,t}$	t 年之專案土壤有機碳儲量年變化量	t CO ₂ eq
t	專案執行年份，t=1, 2, 3...	yr

專案申請者應將公式中代表基線情境之縮寫”BSL”替換為專案情境之縮寫”PROJ”。

(2) 專案邊界內非二氧化碳溫室氣體排放量

非二氧化碳溫室氣體排放量分為兩部分，自然火災及海岸濕地土壤排放。

$$GHG_{E,t} = \sum_{it} (GHG_{FF_TREE,t} + GHG_{SED,i,t}) \quad \text{式2-2}$$

(t 年間基線非 CO₂ GHG 排放量=

\sum_i 碳庫層 t 年 (林木地上部燃燒非 CO₂ GHG 排放量
 +海岸濕地土壤非 CO₂ GHG 排放量))

參數	定義	單位
$GHG_{E,t}$	t 年間由於實施 A/R 專案活動，在專案邊界內增加的非 CO ₂ GHG 排放量；並將「專案前」之估算設為零	t CO ₂ eq
$GHG_{FF_TREE,t}$	第 t 年之受火災所引起的林木地上部生物量燃燒，並造成非二氧化碳溫室氣體排放	t CO ₂ eq yr ⁻¹
$GHG_{SED,i,t}$	第 t 年之第 i 碳庫層的海岸濕地土壤排放量	t CO ₂ eq yr ⁻¹

依據本方法學之適用條件，專案活動不得使用火燒方式對林地進行清理，因此火災主要考慮專案邊界內受自然火災所引起的林木地上部生物量燃燒，並造成非二氧化碳溫室氣體排放，即 CH₄ 和 N₂O 排放。由於在「專案前」一般無法了解專案邊界內火災發生的狀況，因此不考慮其排放量，即 $GHG_{E,t} = 0$ ；「專案後」估算則以最近一次查證時之碳庫層與各碳庫層之

林木地上部生物量資料進行計算，自然火災所產生之非二氧化碳之溫室氣體排放量公式如下。

$$GHG_{FF_TREE,t} = 0.001 \times \sum_{i,t} \{ A_{SPF,i,t} \times b_{TREE,i,tL} \times COMF_i \times (EF_{CH_4} \times GWP_{CH_4} + EF_{N_2O} \times GWP_{N_2O}) \} \quad \text{式2-2-1}$$

(第 t 年林木地上部燃燒非 CO₂ GHG 排放量=

$$0.001 \times \sum_{i \text{ 碳庫層, 第 } t \text{ 年}} \{ \text{燃燒面積} \times \text{單位面積林木地上部生物量} \times \text{燃燒係數} \\ \times (\text{甲烷排放係數} \times \text{甲烷溫暖化潛勢} + \text{氧化亞氮排放係數} \times \\ \text{氧化亞氮溫暖化潛勢}) \}$$

參數	定義	單位
$GHG_{FF_TREE,t}$	第 t 年之受火災所引起的林木地上部生物量燃燒，並造成非二氧化碳溫室氣體排放	t CO ₂ eq yr ⁻¹
$A_{SPF,i,t}$	第 t 年之第 i 碳庫層所發生的燃燒面積	ha
$b_{TREE,i,tL}$	火災發生前，專案最近一次查證時，第 i 碳庫層的單位面積林木地上部生物量。如果只發生地表火，林木之地上部生物量未受燃燒，則設 $b_{TREE,i,t}$ 為零	t d.m·ha ⁻¹
tL	火災發生前，最近一次查證的時間	-
$COMF_i$	第 i 碳庫層燃燒係數 (combustion factor)	-
EF_{CH_4}	CH ₄ 排放係數	g CH ₄ (kg 燃燒的乾物質) ⁻¹
EF_{N_2O}	N ₂ O 排放係數	g N ₂ O (kg 燃燒的乾物質) ⁻¹
GWP_{CH_4}	CH ₄ 的全球溫暖化潛勢，依 IPCC 之 GWP 估計值	-
GWP_{N_2O}	N ₂ O 的全球溫暖化潛勢，依 IPCC 之 GWP 估計值	-
i	基線碳庫層，i = 1, 2, 3...	-
t	專案執行年份，t=1, 2, 3...	yr
0.001	單位轉換值，將公斤 (kg) 轉為噸 (t) 的常數	-

由於海岸濕地土壤具有溫室氣體排放之特徵，因此應考慮計入海岸濕地土壤之溫室氣體排放量。「專案前」之估計可設為零，即 $GHG_{E,t} = 0$ ；「專案後」則應現地測量 CH₄ 和 N₂O 之排放量。使用溫暖化潛勢 (GWP) 將非二氧化碳之溫室氣體轉換為二氧化碳當量 (CO₂eq)。專案申請者應考量下列情境狀況，鑑別是否應計入 CH₄ 和 N₂O 之排放量：

- 低潮海水鹽度為 0 至 18 度 (psu) 時，當次測量應考慮計入 CH₄ 之排放量；若鹽度高於 18 度時，則可不計入 CH₄ 之排放量。
- 專案邊界若無輸入含氮的生活污水或養殖污水，專案活動中沒有進行施肥、排乾土壤水分等活動，且退潮海水未達中度優養化等級時，當次測量可不計入 N₂O 之排放量。若退潮海水達中度優養化等級，則需測量 N₂O 之排放量。優養化指數計算方式為 $(E) = [\text{化學需氧量}] \times [\text{無機氮}] \times [\text{活性磷酸鹽}] / 4500 \times 10^6$ 。其中， $E \leq 3.0$ 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。

$$GHG_{SED,i,t} = A_{i,t} \times (GHG_{CH_4,i,t} \times GWP_{CH_4} + GHG_{N_2O,i,t} \times GWP_{N_2O}) \quad \text{式2-2-2}$$

(第 t 年海岸濕地土壤非 CO₂ GHG 排放量=

第 t 年面積×(CH₄單位面積排放量×CH₄全球溫暖化潛勢
+N₂O 單位面積排放量×N₂O 全球溫暖化潛勢))

參數	定義	單位
$GHG_{SED,i,t}$	第 t 年之第 i 碳庫層的海岸濕地土壤排放量	t CO ₂ eq yr ⁻¹
$A_{i,t}$	第 t 年之第 i 碳庫層的土地面積	ha
$GHG_{CH_4,i,t}$	第 t 年之第 i 碳庫層的 CH ₄ 排放量	t ha ⁻¹ yr ⁻¹
$GHG_{N_2O,i,t}$	第 t 年之第 i 碳庫層的 N ₂ O 排放量	t ha ⁻¹ yr ⁻¹
GWP_{CH_4}	CH ₄ 的全球溫暖化潛勢，依 IPCC 之 GWP 估計值	-
GWP_{N_2O}	N ₂ O 的全球溫暖化潛勢，依 IPCC 之 GWP 估計值	-
i	基線碳庫層，i = 1, 2, 3...	-
t	專案執行年份，t=1, 2, 3...	yr

(3) 專案活動中化石燃料所產生的二氧化碳排放量

專案活動中，使用化石燃料之車輛運輸及機具設備是重要的二氧化碳潛在排放源。排放來源包括移動式及固定式兩種類型：移動式排放類型如卡車、拖拉機等；固定式排放類型，如鏈鋸等可攜式設備和水泵 (water pumps) 等固定設備。

$$GHG_{fuel,t} = \sum_{j=1}^J ET_{FC,j,t} \quad \text{式2-3}$$

(t 年間專案化石燃料排放量=

\sum_{jt} 第 t 年 j 類車輛/機具設備化石燃料二氧化碳排放量)

參數	定義	單位
$GHG_{fuel,t}$	t 年間由於實施 A/R 專案活動，在專案邊界內使用化石燃料的排放量	t CO ₂ eq
$ET_{FC,j,t}$	第 t 年 j 類車輛/機具設備其化石燃料燃燒所產生的二氧化碳排放量	t CO ₂ eq yr ⁻¹
j	車輛/機具設備類型	-
J	車輛/機具設備類型總數	-

其中， $ET_{FC,j,t}$ 的估算具有直接法與間接法等兩種方法，其中間接法公式中參數選擇的優先順序為 $(n \times \frac{MT_{j,t}}{TL_{j,t}} \times AD_{j,t})$ 、 $(NV_{j,t} \times TD_{j,t})$ 、 $(MT_{j,t} \times TD_{j,t})$ ，公式如下：

$$\sum_{j=1}^J ET_{FC,j,t}$$

(\sum_{jt} 第 t 年 j 類車輛/機具設備化石燃料二氧化碳排放量)

(a) 直接法

$$= \sum_{f=1}^F FC_{FC,f,j,t} \times EF_{CO_2,f} \times NCV_f \quad \text{式2-3-1}$$

($= \sum_{\text{燃料類型 } f=1}^{\text{燃料類型總數 } F}$ 車輛/機具設備類型 j 消耗的燃料類型 f 量 \times 燃料排放係數 \times 燃料淨熱值)

(b) 間接法

$$= \sum_{f=1}^F (n \times \frac{MT_{j,t}}{TL_{j,t}} \times AD_{j,t}) \text{ or } (NV_{j,t} \times TD_{j,t}) \text{ or } (MT_{j,t} \times TD_{j,t}) \times SECK_{j,f,t} \times EF_{CO_2,f} \times NCV_f$$

(移動式) 式2-3-2

($= \sum_{\text{燃料類型 } f=1}^{\text{燃料類型總數 } F}$ (回程負載 $\times \frac{\text{車輛類型 } j \text{ 運載總質量}}{\text{車輛類型 } j \text{ 載重能力}} \times \text{平均單程距離}$)

或 $= \sum_{\text{燃料類型 } f=1}^{\text{燃料類型總數 } F}$ (車輛類型 j 數量 \times 總行駛距離)

或 $= \sum_{\text{燃料類型 } f=1}^{\text{燃料類型總數 } F}$ (車輛類型 j 運載總質量 \times 總行駛距離)

\times 車輛類型 j 對燃料 f 的特定能耗 \times 燃料排放係數 \times 燃料淨熱值

$$= \sum_{f=1}^F NE_{j,t} \times TU_{j,t} \times SECU_{j,f,t} \times EF_{CO_2,f} \times NCV_f \quad (\text{固定式}) \text{ 式2-3-3}$$

($= \sum_{\text{燃料類型 } f=1}^{\text{燃料類型總數 } F}$ 機具設備類型 j 數量 \times 總使用時間

\times 機具設備類型 j 對燃料 f 的特定能耗 \times 燃料排放係數 \times 燃料淨熱值)

參數	定義	單位
$ET_{FC,j,t}$	第 t 年 j 類車輛/機具設備其化石燃料燃燒所產生的二氧化碳排放量	t CO ₂ eq
$FC_{FC,f,j,t}$	第 t 年車輛/機具設備類型 j 消耗的燃料類型 f 量	質量或體積單位 yr ⁻¹
$EF_{CO_2,f}$	燃料類型 f 的二氧化碳排放係數	t CO ₂ / GJ
NCV_f	燃料類型 f 的淨熱值 (net calorific value)	GJ/質量 或體積
n	回程負載 (return load) 的指標 ⁶	-
$MT_{j,t}$	年度 t 內車輛類型 j 運載的總質量。當無法取得參數 $\frac{MT_{j,t}}{TL_{j,t}}$ 時，可以使用 $\frac{MT_t}{TL_{av,t}}$ (總運載質量/車輛類型中運載最多負載的指標性車輛類型) 來替代	公噸
$TL_{j,t}$	第 t 年之車輛類型 j 的載重能力 (load capacity)	公噸
$AD_{j,t}$	第 t 年之車輛類型 j 的平均單程距離	公里
$NV_{j,t}$	第 t 年之車輛類型 j 的數量	-
$TD_{j,t}$	第 t 年之車輛類型 j 的總行駛距離 (包括返程)	公里
$SECK_{j,f,t}$	第 t 年之車輛類型 j 對於燃料 i 的特定能耗	燃料量/ 公里
$NE_{j,t}$	第 t 年之機具設備類型 j 的數量	-
$TU_{j,t}$	第 t 年之機具設備類型 j 的總使用時間	小時
$SECU_{j,f,t}$	第 t 年之機具設備類型 j 對於燃料 f 的特定能耗	燃料量/ 小時

⁶ 當回程負載為滿載時 (搭載其他商品), n = 1。當回程負載為空載時, n = 2。如果不能證明回程負載為滿載, 則 n = 2。

f	燃料之類型 (fuel types)	-
F	燃料之類型總數	-

8. 洩漏排放

依據本方法學之適用條件之第9點，專案活動的實施不會引起專案前農漁業活動之轉移，因此不考慮農漁業活動轉移所造成之排放；而專案活動中運輸工具與燃油機械已歸類於專案排放源，因此本方法學下，植林活動不具潛在洩漏，即 $LK_t = 0$ ，其中 LK_t 為第 t 年專案活動所產生的洩漏排放量。

9. 減量

專案活動所產生之人為溫室氣體淨移除量即人為溫室氣體之減量，等於專案碳匯量（專案溫室氣體淨移除量）扣除基線碳匯量（基線溫室氣體淨移除量）以及洩漏所產生之溫室氣體排放量。

計入期間 y 年之減量計算如下：

$$\Delta C_{AR,t} = \Delta C_{ACTUAL,t} - \Delta C_{BSL,t} - LK_t \quad \text{式3}$$

(紅樹林植林專案溫室氣體淨移除量

= t 年間實際溫室氣體淨移除量 - t 年間基線溫室氣體淨移除量 - t 年間洩漏溫室氣體排放量)

參數	定義	單位
$\Delta C_{AR,t}$	實施紅樹林植林專案活動而產生的人為溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq
$\Delta C_{ACTUAL,t}$	t 年間之實際溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq
$\Delta C_{BSL,t}$	t 年間 (未實施專案活動) 之基線溫室氣體淨移除量	t CO ₂ eq
LK_t	t 年間之洩漏所產生之溫室氣體排放量，依據本方法學適用條件可視為零	t CO ₂ eq

9.1 預設數據與參數說明 (若需要)

數據與參數表1

參數	$CF_{TREE,j}$
單位	-
描述	喬木樹種 j 生物量中的有機碳含量百分比 (%), 使用於將生物量轉換為碳量
資料來源	使用資料來源的優先順序： (a) 專案申請者於專案邊界內透過實地樹種調查之參數 (應提供透明且可信之資料佐證) (b) 現有、公開發表、當地區域或相似生態條件之參數 (c) 縣市政府的資料 (如相關研究計畫報告) (d) 國家級的資料 (如溫室氣體盤查資料) (e) CDM 方法學預計值 0.47
其他說明	基線情境以 $CF_{TREE_BSL,j}$ 表示；專案情境以 $CF_{TREE_PROJ,j}$ 表示

數據與參數表2

參數	CF_{SHRUB_j}
單位	-
描述	灌木樹種 j 生物量中的有機碳含量百分比 (%)，使用於將生物量轉換為碳量
資料來源	使用資料來源的優先順序： (a) 專案申請者於專案邊界內透過實地樹種調查之參數 (應提供透明且可信之資料佐證) (b) 現有、公開發表、當地區域或相似生態條件之參數 (c) 縣市政府的資料 (如相關研究計畫報告) (d) 國家級的資料 (如溫室氣體盤查資料) (e) CDM 方法學預計值0.47
其他說明	基線情境以 $CF_{SHRUB_BSL_j}$ 表示；專案情境以 $CF_{SHRUB_PROJ_j}$ 表示

數據與參數表3

參數	$f_j(x_{1,L}, x_{2,L}, x_{3,L}, \dots)$
單位	t d. m. ha ⁻¹
描述	使用樹種 j 的參數 (x1, x2, x3 ...) 如樹高 (H)、基徑 (D ₀)、胸高直徑 (DBH) 等，轉換為生物量的異速生長方程式，參數依樹種不同而異，再使用單位面積紅樹林植株密度轉換成單位面積紅樹林生物量
資料來源	使用資料來源的優先順序： (a) 專案申請者於專案邊界內透過實地樹種調查所獲得之樹種參數，建構之異速生長方程式 (應提供透明且可信之資料佐證) (b) 現有、公開發表、當地區域或相似生態條件之異速生長方程式 (c) 縣市政府的異速生長方程式 (如相關研究計畫報告) (d) 國家級的異速生長方程式 (如溫室氣體盤查資料)
其他說明	第 (b) 項，可參考使用附錄2紅樹林生物量異速生長方程式。

數據與參數表4

參數	$R_{TREE_BSL_j}$
單位	-
描述	根莖比，即地下部生物量與地上部生物量比值
資料來源	使用資料來源的優先順序： (a) 專案申請者於專案邊界內透過實地樹種調查之參數 (應提供透明且可信之資料佐證) (b) 現有、公開發表、當地區域或相似生態條件之參數 (c) 縣市政府的資料 (如相關研究計畫報告) (d) 國家級的資料 (如溫室氣體盤查資料)
其他說明	喬木以 R_{TREE} 表示；灌木以 R_{SHRUB} 表示。 基線情境下以 $R_{TREE_BSL_j}$ 表示；專案情境下以 $R_{TREE_PROJ_j}$ 表示

數據與參數表5

參數	B_{AB}		
單位	t d. m. ha ⁻¹		
描述	平均每公頃之地上部生物量		
資料來源	使用資料來源的優先順序： (a) 專案申請者於專案邊界內透過實地調查之資料(應提供透明且可信之資料佐證) (b) 當地區域或相似生態條件之調查資料 (c) 縣市政府的資料(如相關研究計畫報告) (d) 國家級的資料(如溫室氣體盤查資料) (e) 使用 IPCC GPG-LULUCF 2003的3A.1.4表中的估計值：		
	國家	材積(地上部) m ³ ha ⁻¹	生物量(地上部) t d. m. ha ⁻¹
	中國	52	61
	日本	145	88
	越南	38	66
	泰國	17	29
其他說明	IPCC GPG-LULUCF 2003的3A.1.4表中的數值，來源：NI代表國家清冊、ES代表估計值、F代表農糧組織數據。		

數據與參數表6

參數	DF_{DW}	
單位	%	
描述	專案邊界內枯木碳儲量與活木儲量的百分比值	
資料來源	使用資料來源的優先順序： (a) 專案申請者於專案邊界內透過實地調查之資料(應提供透明且可信之資料佐證) (b) 當地區域或相似生態條件之調查資料 (c) 使用中國紅樹林枯木與喬木碳儲量比值的估計值：	
	參數	DF_{DW}
	枯木與喬木碳儲量比值	6.23%
其他說明	-	

數據與參數表7

參數	$aSOC_t$
單位	t C ha ⁻¹ yr ⁻¹
描述	紅樹林自源性土壤碳儲量年變化量
說明	使用資料來源的優先順序： (a) 使用現地之調查資料 (b) 使用當地區域或相似生態條件之調查資料 (c) 使用具代表性之調查資料 (d) 使用具代表性之國家級的資料(如溫室氣體盤查資料)
其他說明	-

數據與參數表8

參數	EF_{Siols}																					
單位	$t\ C\ ha^{-1}\ yr^{-1}$																					
描述	t年內專案邊界中土壤有機碳儲量的變化量																					
說明	<p>使用資料來源的優先順序：</p> <p>(a) 使用現地之調查資料</p> <p>(b) 使用當地區域或相似生態條件之調查資料</p> <p>(c) 使用具國家代表性之調查資料</p> <p>(d) 估計值 (海南省生態環境廳 2023)</p> <table border="1" data-bbox="513 542 1289 757"> <thead> <tr> <th>紅樹林類型</th> <th>土壤類型</th> <th>EF_{Siols}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">開闊海岸型</td> <td>細顆粒</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>粗顆粒</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">河口、內灣、瀉湖</td> <td>細顆粒</td> <td>1.2</td> </tr> <tr> <td>粗顆粒</td> <td>0.5</td> </tr> </tbody> </table> <p>(e) 開始重建植被再濕潤有機及礦物聚合土壤的年度估計值</p> <table border="1" data-bbox="513 795 1289 987"> <thead> <tr> <th>生態系</th> <th>$EF_{RE-Soils}$ ($t\ C\ ha^{-1}\ yr^{-1}$)</th> <th>引用</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>紅樹林</td> <td>1.62</td> <td>Breithaupt et al. 2012; Chmura et al. 2003; Fujimoto et al. 1999; Ren et al. 2010</td> </tr> </tbody> </table>			紅樹林類型	土壤類型	EF_{Siols}	開闊海岸型	細顆粒	0.5	粗顆粒	0.2	河口、內灣、瀉湖	細顆粒	1.2	粗顆粒	0.5	生態系	$EF_{RE-Soils}$ ($t\ C\ ha^{-1}\ yr^{-1}$)	引用	紅樹林	1.62	Breithaupt et al. 2012; Chmura et al. 2003; Fujimoto et al. 1999; Ren et al. 2010
紅樹林類型	土壤類型	EF_{Siols}																				
開闊海岸型	細顆粒	0.5																				
	粗顆粒	0.2																				
河口、內灣、瀉湖	細顆粒	1.2																				
	粗顆粒	0.5																				
生態系	$EF_{RE-Soils}$ ($t\ C\ ha^{-1}\ yr^{-1}$)	引用																				
紅樹林	1.62	Breithaupt et al. 2012; Chmura et al. 2003; Fujimoto et al. 1999; Ren et al. 2010																				
其他說明	依據巫登-溫特瓦分級 (Udden-Wentworth grade scale) ，泥質細顆粒土壤是以粒徑 $<62.5\ \mu m$ 的顆粒為主土壤；沙質粗顆粒土壤則是以粒徑 $\geq 62.5\ \mu m$ 的顆粒為主的土壤。																					

數據與參數表9

參數	$COMF$																	
單位	-																	
描述	針對每種植被類型的燃燒係數 (Combustion factor)																	
資料來源	<p>使用資料來源的優先順序：</p> <p>(a) 專案申請者於專案邊界內透過實地調查之資料 (應提供透明且可信之資料佐證)</p> <p>(b) 當地區域或相似生態條件之調查資料</p> <p>(c) 國家級的資料 (如溫室氣體盤查資料)</p> <p>(d) CDM 方法學估計值，如下</p> <table border="1" data-bbox="513 1585 1233 1832"> <thead> <tr> <th>林型</th> <th>平均林齡(年)</th> <th>估計值</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">熱帶森林</td> <td>3-5</td> <td>0.46</td> </tr> <tr> <td>6-10</td> <td>0.67</td> </tr> <tr> <td>11-17</td> <td>0.50</td> </tr> <tr> <td>大於等於18</td> <td>0.32</td> </tr> <tr> <td>溫帶森林</td> <td>所有</td> <td>0.45</td> </tr> </tbody> </table>			林型	平均林齡(年)	估計值	熱帶森林	3-5	0.46	6-10	0.67	11-17	0.50	大於等於18	0.32	溫帶森林	所有	0.45
林型	平均林齡(年)	估計值																
熱帶森林	3-5	0.46																
	6-10	0.67																
	11-17	0.50																
	大於等於18	0.32																
溫帶森林	所有	0.45																
其他說明	-																	

數據與參數表10

參數	EF_{CH_4}						
單位	$g\ CH_4\ (kg\ 燃燒的乾物質)^{-1}$						
應用公式	3-3-1						
描述	CH ₄ 排放係數						
資料來源	<p>使用資料來源的優先順序：</p> <p>(a) 專案申請者於專案邊界內透過實地調查之資料 (應提供透明且可信之資料佐證)</p> <p>(b) 當地區域或相似生態條件之調查資料</p> <p>(c) 國家級的資料 (政府最新年度公告之排放係數)</p> <p>(d) CDM 方法學估計值，如下</p> <table border="1" data-bbox="513 622 1082 752"> <thead> <tr> <th>林型</th> <th>估計值</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>熱帶森林</td> <td>6.8</td> </tr> <tr> <td>其他森林</td> <td>4.7</td> </tr> </tbody> </table>	林型	估計值	熱帶森林	6.8	其他森林	4.7
林型	估計值						
熱帶森林	6.8						
其他森林	4.7						
其他說明	-						

數據與參數表11

參數	EF_{N_2O}						
單位	$g\ N_2O\ (kg\ 燃燒的乾物質)^{-1}$						
應用公式	3-3-1						
描述	N ₂ O 排放係數						
資料來源	<p>使用資料來源的優先順序：</p> <p>(a) 專案申請者於專案邊界內透過實地調查之資料 (應提供透明且可信之資料佐證)</p> <p>(b) 當地區域或相似生態條件之調查資料</p> <p>(c) 國家級的資料 (政府最新年度公告之排放係數)</p> <p>(d) CDM 方法學估計值，如下</p> <table border="1" data-bbox="513 1323 1082 1453"> <thead> <tr> <th>林型</th> <th>估計值</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>熱帶森林</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>其他森林</td> <td>0.26</td> </tr> </tbody> </table>	林型	估計值	熱帶森林	0.20	其他森林	0.26
林型	估計值						
熱帶森林	0.20						
其他森林	0.26						
其他說明	-						

數據與參數表12

參數	EF_{CO_2}
單位	$t\ CO_2 / GJ$
描述	CO ₂ 排放係數
資料來源	<p>使用資料來源的優先順序：</p> <p>(a) 專案申請者於專案邊界內透過實地調查之資料 (應提供透明且可信之資料佐證)</p> <p>(b) 當地區域或相似生態條件之調查資料</p> <p>(c) 國家級的資料 (政府最新年度公告之排放係數)</p> <p>(d) IPCC</p>
其他說明	-

數據與參數表13

IPCC (GWP-100)	AR1 (1990)	AR2 (1995)	AR3 (2001)	AR4 (2007)	IAR5 (2014)	AR6 (2021)
CO ₂	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
CH ₄ -non-fossil	21	21	23	25	28	27
N ₂ O	290	310	296	298	265	273

10.量測方法

說明量測作業、基線排放量、專案排放及減量計算需蒐集之相關變數，以及數據和資訊。若量測之變數涉及演算法或計算式進一步計算，則亦需加以說明其演算法或計算式，並將數據與參數完整條列於 10.1 小節「應量測之數據與參數」。

1. 專案量測

專案申請者在撰寫專案設計文件 (project design document, PDD) 時，必須提供並記錄相關量測資訊，並依據相關標準進行量測程序，且所有數據與相關資料均須以紙本與電子檔案進行保存至計入期結束後2年，包含：

- (a) 證明專案滿足本方法學適用條件之佐證資料與說明；
- (b) 計算選擇公式、碳庫與碳儲量之材料、數據與說明；
- (c) 計算專案邊界內碳排放和洩漏之材料、數據與說明。

(1) 專案活動之量測

專案申請者須對專案執行期間所有專案活動進行量測或文字紀錄與說明，專案活動主要包含如：植林、林地管理，以及與溫室氣體排放有關之活動進行量測與紀錄。

- (a) 植林：種源選擇、育苗、整地方式、存活率、試種、補植等；
- (b) 林地管理：撫育、病蟲害防治等；
- (c) 災害：毀林、颱風等。

(2) 量測頻率

專案樣區的量測頻率為至少三至五年量測一次，且每次查證時皆須要有資料。應依據紅樹林樹種的生物學特性，於撰寫專案設計文件確定樣區的定期量測頻率。

(3) 精準度要求：

- (a) 碳儲量和碳儲量變化參照 A/R CDM 「估算 A/R CDM 專案活動中喬木和灌木的碳儲量和碳儲量變化」 (Estimation of carbon stocks and change in carbon stocks of trees and shrubs in A/R CDM project activities) 之精準度要求。
- (b) 所有使用於估算之數據與係數，其精度之優先順序應由高至低的層級 (Tier)⁷，依序為層級3 主要碳庫的詳細調查、定期測量或模型計算；層級2 國家特定資料的關鍵係數；層級1 使用 IPCC 預設的排放係數。

2. 樣區設置與量測

(1) 樣區設置

⁷ 參照 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作業的三種估算層級。

參照《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》(Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows)、《臺灣紅樹林碳匯測量標準作業程序》。

(a) 一般性要求

- a.1. 應滿足調查目的及準確度的要求；
- a.2. 應涵蓋所有調查分層，並反映各分層的生態特徵；
- a.3. 優先選擇干擾少的位置設置；
- a.4. 地上部生物量、地下部生物量樣區應一致；
- a.5. 盡量減少對紅樹林生態系的干擾和破壞；
- a.6. 為了避免邊際效應，樣方邊緣應離地塊邊界至少10 m 以上。

(b) 樣區設置方法

可依專案區域之地形和海岸線長度設置分層，每個分層結合離岸距離和主要紅樹林植被群落類型設置調查樣區，其分層數量設置要求如下表。

紅樹林海岸線長度(公里)	分層數量
≤ 0.3	≥ 1
> 0.3 ≤ 2	≥ 2
> 2	每公里加1，≥ 2

(c) 樣區數量

每個分層依據實際地形設置至少3個重複樣區。

(d) 樣區大小

- d.1. 每個調查樣區設置3個10 m × 10 m 的固定樣區，各樣區紅樹林植被密度和生長狀況應盡量相似。
- d.2. 若調查樣區所在區域的紅樹林群落以灌木為主或是紅樹林樹密度過高(>5 株 m⁻²)，可改為5 m × 5 m 的固定樣區或依照紅樹林分布狀況設置。

(2) 碳儲量變化的量測

(a) 喬木生物碳儲量的量測，量測步驟依序如下

- a.1. 現地調查各樹種生物量異速生長方程式所需要的喬木參數，如樹高(H)、基徑(D₀)、胸高直徑(DBH)等。
- a.2. 將樣區中各樹種的喬木生物量加總。使用公式2-1-1根據樣區喬木生物量計算樣區的喬木生物碳儲量、各碳層 i 的平均單位面積喬木生物碳儲量。
- a.3. 計算第 i 碳層樣本的平均值(平均單位面積喬木生物碳儲量的估計值)(C_{TREE,i,t})及變異數(S²_{C_{TREE,i,t}})。

$$C_{TREE,i,t} = \frac{\sum_{p=1}^{n_i} C_{TREE,p,i,t}}{n_i} \quad \text{式 a-3-1}$$

(第 t 年第 i 碳庫層平均單位面積喬木生物碳儲量

$$= \frac{\sum_{p=1}^{n_i \text{ 第 } i \text{ 碳庫層的樣區數}} \text{樣區 } p \text{ 單位面積喬木生物碳儲量}}{\text{第 } i \text{ 碳庫層的樣區數}})$$

$$S_{C_{TREE,i,t}}^2 = \frac{\sum_{p=1}^{n_i} (C_{TREE,i,t} - C_{TREE,p,i,t})^2}{n_i(n_i - 1)} \quad \text{式 a-3-2}$$

(第 t 年第 i 碳庫層平均單位面積喬木生物碳儲量之變異數 = $\frac{\sum_{p=1}^{n_i} \text{第 } i \text{ 碳庫層的樣區數} (\text{平均單位面積喬木生物碳儲量} - \text{樣區 } p \text{ 單位面積喬木生物碳儲量})^2}{\text{第 } i \text{ 碳庫層樣區數} (\text{第 } i \text{ 碳庫層的樣區數} - 1)}$)

參數	定義	單位
$C_{TREE,i,t}$	第 t 年第 i 碳庫層平均單位面積喬木生物碳儲量的估計值	t CO ₂ eq ha ⁻¹
$C_{TREE,p,i,t}$	第 t 年第 i 碳庫層樣區 p 的單位面積喬木生物碳儲量	t CO ₂ eq ha ⁻¹
n_i	第 i 碳庫層的樣區數	-
$S_{C_{TREE,i,t}}^2$	第 t 年第 i 碳庫層的平均單位面積喬木生物碳儲量估計值的變異數	-
i	基線碳庫層，i = 1, 2, 3...	-
p	樣區數，p = 1, 2, 3...	-
t	專案執行年份，t = 1, 2, 3...	yr

a.4. 計算專案整體平均的估計值(平均單位面積喬木生物碳儲量的估計值) ($C_{TREE,t}$) 及變異數 ($S_{C_{TREE,t}}^2$)。

$$C_{TREE,t} = \sum_{i=1}^M (W_i * C_{TREE,p,i,t}) \quad \text{式 a-4-1}$$

(第 t 年專案邊界內的平均單位面積喬木生物碳儲量 =

$$\sum_{i=1}^M \text{碳庫層總數} (\text{碳庫層面積與專案總面積之比} \times \text{樣區 } p \text{ 單位面積喬木生物碳儲量}))$$

$$S_{C_{TREE,t}}^2 = \sum_{i=1}^M (W_i^2 \times \frac{S_{C_{TREE,i,t}}^2}{n_i}) \quad \text{式 a-4-2}$$

(第 t 年之專案內的平均單位面積喬木生物量碳儲量變異數 =

$$\sum_{i=1}^M \text{碳庫層總數} (\text{碳庫層面積與專案總面積之比}_i^2 \times \frac{\text{平均單位面積喬木生物碳儲量變異數}}{\text{樣區數}}))$$

參數	定義	單位
$C_{TREE,t}$	第 t 年專案邊界內的平均單位面積喬木生物碳儲量的估計值	t CO ₂ eq ha ⁻¹
$C_{TREE,i,t}$	第 t 年之第 i 碳庫層平均單位面積喬木生物碳儲量的估計值	t CO ₂ eq ha ⁻¹
W_i	第 i 專案碳庫層面積與專案總面積之比	-
n_i	第 i 碳庫層樣區數	-
$S_{C_{TREE,t}}^2$	第 t 年之專案總體平均(平均單位面積喬木生物碳儲量)估計值的變異數	-

$S_{CTREE,i,t}^2$	第 t 年之第 i 碳庫層的平均單位面積喬木生物碳儲量估計值的變異數	-
M	專案邊界內估算喬木生物碳儲量的碳庫層總數	-
i	基線碳庫層，i = 1, 2, 3...	-
p	樣區數，p = 1, 2, 3...	-
t	專案執行年份，t = 1, 2, 3...	yr

a.5. 計算專案整體平均單位面積喬木生物碳儲量的不確定性。

$$u_{CTREE,t} = \frac{t_{VAL} \times S_{CTREE,t}}{C_{TREE,t}} \quad \text{式 a-5-1}$$

(專案邊界內平均單位面積喬木生物碳儲量估計值的不確定性 =
 $\frac{\text{可靠度指標} \times \text{專案邊界內喬木生物碳儲量估計值變異數標準誤差}}{\text{專案邊界內喬木生物碳儲量的估計值}}$)

參數	定義	單位
$u_{CTREE,t}$	第 t 年，專案邊界內平均單位面積喬木生物碳儲量估計值的不確定性(相對誤差之上限)。相對誤差應小於10%，即抽樣精度大於90%	%
t_{VAL}	可靠度指標：信賴水準 (confidence level) 為90% 且自由度等於 n-M 的情況下 (其中 n 為專案邊界內樣區總數；M 為喬木生物量估算碳層的總數 l)，查 t 分佈雙尾分位數表 (Two-sided Student's t-value) 可獲得 t 值。 例如：信賴水準 (confidence level) 為90%，自由度為45 時，雙尾 t 分佈的 t 值在 Excel 電子表中輸入「=TINV(0.10,45)」可以計算得到 t 值為 1.679	-
$C_{TREE,t}$	第 t 年專案邊界內喬木生物碳儲量的估計值	t CO ₂ eq ha ⁻¹
$S_{CTREE,t}$	第 t 年之專案邊界內喬木生物碳儲量估計值變異數的算術平方根 (即標準誤差)	t CO ₂ eq ha ⁻¹

a.6. 計算第 t 年專案邊界內的喬木生物總碳儲量：

$$C_{TREE,t} = A \times c_{TREE,t} \quad \text{式 a-6-1}$$

(第 t 年專案邊界內喬木生物碳儲量的估計值 =

專案邊界內各碳庫層的總面積 × 單位面積喬木生物質碳儲量估計值)

參數	定義	單位
$C_{TREE,t}$	第 t 年專案邊界內喬木生物碳儲量的估計值	t CO ₂ eq
$c_{TREE,i,t}$	第 t 年專案邊界內單位面積喬木生物碳儲量估計值	t CO ₂ eq ha ⁻¹
A	專案邊界內各碳庫層的總面積	ha
t	專案執行年份，t = 1, 2, 3...	yr

a.7. 計算專案邊界內喬木生物碳儲量的年變化量。假設一段時間內，喬木生物量的呈線性變化。註：首次查證時，

$$C_{TREE,t_1} = C_{TREE,BSL} = 0 \text{ 而 } C_{TREE,t_2} \text{ 為首次查證的年份。}$$

$$dC_{TREE}(t_2, t_1) = \frac{C_{TREE, t_2} - C_{TREE, t_1}}{t_2 - t_1} \quad \text{式 a-7-1}$$

(專案邊界內喬木生物碳儲量的年變化量
= $\frac{\text{第 } t_2 \text{ 年喬木生物碳儲量} - \text{第 } t_1 \text{ 年喬木生物碳儲量}}{\text{第 } t_2 \text{ 年} - \text{第 } t_1 \text{ 年}}$)

參數	定義	單位
$dC_{TREE}(t_2, t_1)$	專案邊界內喬木生物碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq yr ⁻¹
$C_{TREE, t}$	第 t 年專案邊界內喬木生物碳儲量的估計值	t CO ₂ eq
$C_{TREE, p, i, t}$	第 t 年第 i 碳庫層樣區 p 的單位面積喬木生物碳儲量	t CO ₂ eq ha ⁻¹
t_2, t_1	專案活動開始的第 t ₁ 年和第 t ₂ 年，且 t ₁ ≤ t ₂	-

a.8. 計算第 t 年 (t₁ ≤ t ≤ t₂) 時，專案邊界內喬木生物量碳儲量的變化量：

$$\Delta C_{TREE, t} = dC_{TREE}(t_1, t_2) \times t \quad \text{式 a-8-1}$$

(專案邊界內喬木生物碳儲量變化量
= 喬木生物碳儲量的年變化量 × t 年)

參數	定義	單位
$\Delta C_{TREE, t}$	專案邊界內喬木生物碳儲量的變化量	t CO ₂ eq
$dC_{TREE}(t_2, t_1)$	專案邊界內喬木生物碳儲量的年變化量	t CO ₂ eq yr ⁻¹
t_1, t_2	專案活動開始的第 t ₁ 年和第 t ₂ 年，且 t ₁ ≤ t ₂	-
t	t 年	yr

(b) 枯木碳儲量的量測

依據保守性和成本有效性原則，專案參與者可以選擇不再對枯死木碳庫進行量測。但如果專案活動或專案邊界發生變化，專案申請者應根據調整後情況，重新計算專案邊界內枯木的儲量及其變化。

(c) 有機碳儲量的量測

專案邊界內有機碳庫的量測，應用公式1-3完成。執行方式可參考《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》。

(3) 精準度控制和校正

以喬木為例(灌木的方法相同)，喬木平均生物量最大允許相對誤差的計算公式如下：

$$RE_{max} = u_{C_{TREE, t}}$$

(相對誤差之上限)

= 專案邊界內平均單位面積喬木生物碳儲量估計值的不確定性)

參數	定義	單位
RE_{max}	相對誤差之上限	%
$u_{C_{TREE, t}}$	第 t 年，專案邊界內平均單位面積喬木生物碳儲量估計值的不確定性。相對誤差應小於10%，即抽樣精準度大於90%	%
t	專案執行之年份，t=1, 2, 3...	yr

如果 RE_{max} 大於10% (即抽樣精準度小於90%)，專案申請者可選擇 (a)額外增加樣區數量；或 (b)估算碳儲量變化時，進行不確定性折減 (uncertainty discount)，來達到精準度要求。其中，(b)使用下列方法：

- $\Delta C_{TREE(t_1,t_2)} \geq 0$ ，則
 $\Delta C_{TREE,t} = \Delta C_{TREE(t_1,t_2)} \times (1 - DR)$
- $\Delta C_{TREE(t_1,t_2)} < 0$ ，則
 $\Delta C_{TREE,t} = \Delta C_{TREE(t_1,t_2)} \times (1 + DR)$

參數	定義	單位	
$\Delta C_{TREE(t_1,t_2)}$	在前次監測時間 t_1 與後次監測時間 t_2 之間，專案邊界內喬木生物碳儲量的變化量	t CO ₂ eq	
DR	折減率 (DR)	%	
	相對誤差範圍 (不確定性)		折減率 (DR)
	≤ 10		0
	> 10 ≤ 20		6
	> 20 ≤ 30		11
> 30	需額外增加樣區數，以達到精準度要求		
t	專案執行年份，t=1, 2, 3...	yr	

(4) 水質量測

- (a) 鹽度：退潮時測量水體鹽度，界定是否小於18 psu。若小於18 psu，則當次測量需計算土壤 CH₄排放量。
- (b) 優養化：退潮時測量水體化學需氧量、無機氮及活性磷酸鹽。優養化指數計算方式為 $E = [\text{化學需氧量}] \times [\text{無機氮}] \times [\text{活性磷酸鹽}] / 4500 \times 10^6$ 。其中， $E \leq 3.0$ 為輕度優養化； $3.0 < E \leq 9.0$ 為中度優養化； $E > 9.0$ 為重度優養化。若當次測量達中度優養化等級，則需測量 N₂O 排放量。化學需氧量、無機氮及活性磷酸鹽單位為 mg/L。

10.1 應量測之數據與參數

數據與參數表14

數據/參數	A_i
數據單位	公頃 (ha)
描述	第 i 碳庫層的面積
數據來源	現地量測或地理資訊系統 (GIS) 量測
量測程序	地面面積量測儀器或地理資訊系統 (GIS) 空間資訊資料
量測頻率	每3至5年一次，抵換專案註冊前及申請查證前再進行量測
QA/QC 程序	採用國家森林資源清查或森林規劃設計調查所使用的品質保證和品質控制 (QA/QC) 程序；若沒有可用資料，則可使用 IPCC GPG LULUCF 2003 中說明的 QA/QC 程序。收集的相關數據至少保存至最後一次核發減量權證後2年
備註	喬木以 <i>TREE</i> 表示；灌木以 <i>SHRUB</i> 表示 基線情境下以 <i>BSL</i> 表示；專案情境下以 <i>PROJ</i> 表示

數據與參數表15

數據/參數	GHG_{CH_4} 、 GHG_{N_2O}
數據單位	$ha^{-1} a^{-1}$
描述	專案邊界內海岸土壤表面溫室氣體排放量
數據來源	現地量測
量測程序	-
量測頻率	每3至5年一次
QA/QC 程序	採用《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》之程序
備註	-

數據與參數表16

數據/參數	x_1, x_2, x_3, \dots
數據單位	以長度為單位，如公分 (cm)
描述	參數。喬木常見之參數如樹高 (H)、基徑 (D_0)、胸高直徑 (DBH)；灌木常見之參數如樹高 (H)、冠幅 (W)、冠徑 (P)。
數據來源	現地量測
量測程序	採用《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》之程序
量測頻率	每3至5年一次
QA/QC 程序	採用《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》之程序
備註	-

數據與參數表17

數據/參數	$N_{TREE,i,j,t}$
數據單位	株數 ha^{-1}
描述	林分密度，即第 t 年第 i 碳層樹種 j 的每公頃株數
數據來源	現地量測
量測程序	採用《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》之程序
量測頻率	每3至5年一次
QA/QC 程序	採用《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》之程序
備註	基線情境下以 <i>BSL</i> 表示；專案情境下以 <i>PROJ</i> 表示

數據與參數表18

數據/參數	$SEC_{i,t}$
數據單位	$cm yr^{-1}$
描述	紅樹林地表高程年變化量
數據來源	現地量測
量測程序	採用《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》之程序
量測頻率	每3至5年一次

QA/QC 程序	採用《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》之程序
備註	-

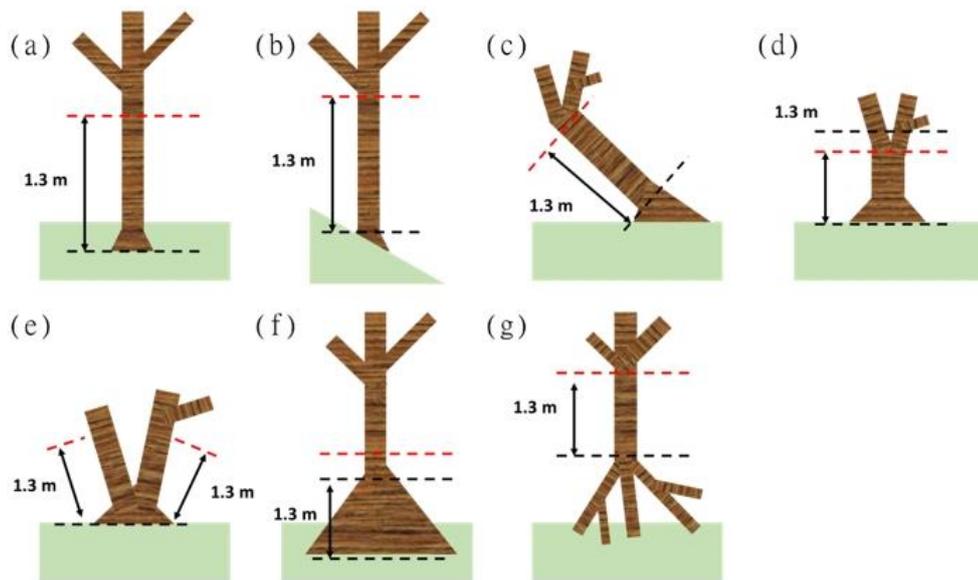
數據與參數表19

數據/參數	$SBD_{i,t}$
數據單位	g cm^{-3}
描述	紅樹林土壤總體密度
數據來源	現地量測
量測程序	採用《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》之程序
量測頻率	每3至5年一次
QA/QC 程序	採用《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》之程序
備註	-

數據與參數表20

數據/參數	$CF_{Soils,i,t}$
數據單位	%
描述	紅樹林土壤有機碳含量百分比
數據來源	現地量測
量測程序	採用《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》之程序
量測頻率	每3至5年一次
QA/QC 程序	採用《濱海藍碳—紅樹林、鹽沼、海草床碳儲量及碳排放係數評估計方法》之程序
備註	-

附錄1. 喬木各類型樹型胸徑測量處



附圖 1 各類型樹型胸徑測量處

喬木量測之測量其胸徑的方式可參考附圖1，各類樹型胸徑測量位置說明如下(林幸助與陳冠宇，2023)：

- 樹木直高且有主幹，胸徑可從地面開始平行於主幹測量至1.3 m處
- 樹木生長在斜坡上，須從斜坡上側開始平行於主幹測量至1.3 m處
- 樹木斜著生長，須根據自然角度平行於主幹測量至1.3 m處
- 樹木在1.3 m 以下就出現分叉，須量測分叉底下不遠處
- 樹木分叉很接近地面時，須當成兩棵樹分別平行於主幹測量至1.3 m處
- 樹基部隆起超過1.3 m，須於隆起處上端不遠處
- 樹幹具有支持根，以最上端的支持根往上1.3 m處

附錄2. 紅樹林生物量異速生長方程式

樹種	部位	異速生長方程式	胸徑/基徑	樹高	測定指標	生態型	參考文獻
水筆仔 <i>Kandelia obovata</i>	地上部	$B = 0.03203(D_{1/10}^2 H)^{1.058}$	-	-	-	-	Khan et al. 2009
	地下部	$B = 0.0483(D_{1/10}^2 H)^{0.834}$	-	-	-	-	Hoque et al. 2011
	地上部	$B = 0.01016 \cdot (D_0)^{2.454}$	-	< 2	D_0	幼齡植株	陳鷺真等, 2023
	地下部	$B = 0.007649 \cdot (D_0)^{2.064}$					
	地上部	$B = 0.03999 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{1.053}$	4.4-12.6	3.4-5.5	DBH, H	喬木	陳鷺真等, 2023
	地下部	$B = 0.02972 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{0.990}$					
	地下部	$B = 0.00698 \cdot DBH^{2.610}$					
海茄苳 <i>Avicennia marina</i>	地上部	$B = 0.178 \cdot (DBH)^{2.299}$	-	-	-	-	Clough et al. 1997
	地下部	$B = 1.28 \cdot (DBH)^{1.17}$	-	-	-	-	Comley and McGuinness 2005
	地上部	$B = 0.9462 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{0.529}$	8.3-14.3	3.1-5.6	DBH, H	喬木	陳鷺真等, 2023
	地下部	$B = 0.0796 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{0.615}$					
	地上部	$B = 0.076123 \cdot (D_0^2 \cdot H)^{-0.222}$	3.7-4.6	< 2	D_0, H	灌木	陳鷺真等, 2023
	地下部	$B = 0.040168 \cdot (D_0^2 \cdot H)^{-0.126}$					
五梨跤 <i>Rhizophora stylosa</i>	地上部	$B = 0.045 \cdot D_{30}^{2.868}$	-	-	-	-	Gevana and Im 2016
	地下部	$B = 0.134 \cdot D_{30}^{2.40}$					
	地上部	$B = 0.07689 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{0.989}$	<12.6	4-6.5	DBH, H	喬木	陳鷺真等, 2023
	地下部	$B = 0.09818 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{1.049}$					
欖李 <i>Lumnitzera racemosa</i>	地上部	$B = 0.114 \cdot (DBH)^{2.523}$	4.2-15.4		DBH		Perera et al. 2012
	地下部	$B = 0.118 \cdot (DBH)^{2.063}$	4.2-15.4		DBH		

注：B (生物量) 單位為 kg；DBH (胸徑) 從樹基部算起離地 1.3 m 高的樹徑，單位為 cm；D₀ (基徑) 地面根頸處的樹幹直徑，單位為 cm；D_{1/10}：1/10 樹高處直徑，單位為 cm；D₃₀：最高支持根之上 30 cm 樹高處直徑，單位為 cm；H (樹高)，單位為 m。

資料來源：林幸助與陳冠宇 (2023) 《臺灣紅樹林碳匯測量標準作業程序》。

減量方法資料

版次	日期	修訂記錄
01.0	年 月 日	「環境部溫室氣體抵換專案暨自願減量專案審議會第□次會議」決議審核通過。...

參考文獻

- (1) Breithaupt, J. L., Smoak, J. M., Smith, T. J., Sanders, C. J. & Hoare, A. (2012) Organic carbon burial rates in mangrove sediments: Strengthening the global budget. *Global Biogeochemical Cycles* 26.
- (2) Chmura, G. L., Anisfeld, S. C., Cahoon, D. R. & Lynch, J. C. (2003) Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles* 17(4).
- (3) Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., & Tanabe K. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Intergovernmental Panel on Climate Change, Institute for Global Environmental Strategies (IPCC-IGES).
- (4) Fujimoto, K., Imai, A., Tabuchi, R., Kuramoto, S., Utsugi, H. & Murofushi, T. (1999) Below-ground carbon storage of Micronesian mangrove forests. *Ecological Research* 14(4): 409-413.
- (5) GOFC-GOLD (2009). A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals caused by deforestation, gains and losses of carbon stocks in forest remaining forests, and forestation (GOFC-GOLD Report Version COP15-1). Global Observations of Forest Cover and Land-use Dynamics (GOFC-GOLD) Project Office.
- (6) Heumann, B. W. (2011). Satellite remote sensing of mangrove forests: Recent advances and future opportunities. *Progress in Physical Geography*, 35(1), 87-108.
- (7) 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. IUCN.
- (8) Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., & Pidgeon, E. (2014). Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses.
- (9) Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., & Wagner, F. (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change, National Greenhouse Gas Inventories Programme (IPCC-NGGIP).
- (10) Pham, T. D., Yokoya, N., Bui, D. T., Yoshino, K., & Friess, D. A. (2019). Remote sensing approaches for monitoring mangrove species, structure, and biomass: Opportunities and challenges. *Remote Sensing*, 11(3), 230.
- (11) Ren, H., Chen, H., Li, Z. a. & Han, W. (2010) Biomass accumulation and carbon storage of four different aged *Sonneratia apetala* plantations in Southern China. *Plant and soil* 327(1-2): 279-291.
- (12) UNFCCC, U. (2022). CDM methodology booklet. Bonn, Germany: United Nations Framework Convention on Climate Change.
- (13) 林幸助與陳冠宇 (2023) 。《臺灣紅樹林碳匯測量標準作業程序》。

臺灣紅樹林碳匯
測量標準作業程序

林幸助、陳冠宇

2023年11月

1. 前言

本方法學為紅樹林碳匯納入臺灣國家溫室氣體排放清冊之評估方法，因此統一使用噸二氧化碳當量 (tCO₂eq) 為單位。負值表示排出溫室氣體到大氣或其他碳庫，正值表示移除大氣或其他碳庫的溫室氣體 (即儲存溫室氣體在自身碳庫)。本方法學主要參考：

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. Chou, M.-Q., Lin, W.-J., Lin, C.-W., Wu, H.-H., & Lin, H.-J. (2022) Allometric equations may underestimate the contribution of fine roots to mangrove carbon sequestration. *Science of The Total Environment*, 833, 155032.
2. Li, S.-B., Chen, P.-H., Huang, J.-S., Hsueh, M.-L., Hsieh, L.-Y., Lee, C.-L., & Lin, H.-J. (2018) Factors regulating carbon sinks in mangrove ecosystems. *Global Change Biology*, 24(9), 4195-4210.
3. 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.
4. Lin, W.-J., Lin, C.-W., Wu, H.-H., Kao, Y.-C., & Lin, H.-J. (2023) Mangrove carbon budgets suggest the estimation of net production and carbon burial by quantifying litterfall. *CATENA*, 232, 107421.
5. 李世博 (2015)。臺南七股紅樹林碳收支模式。國立中興大學生命科學系學位論文。
6. 吳欣恂(2021)。水筆仔與海茄苳碳收支模式。國立中興大學生命科學系學位論文。
7. 林幸助、陳渭中 (2021)。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。
8. 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。
9. 陳柏宏 (2014)。淡水河紅樹林及草澤植物的碳儲存量與碳收支。國立中興大學生命科學系學位論文，(2014)。
10. 黃日聖 (2016)。紅樹林疏伐對碳吸存的影響。國立中興大學生命科學系學位論文。
11. 賴榮一 (2021)。氣候變遷下人工濕地植物發揮「調適」功能之研究-以高雄中都濕地公園紅樹林碳吸存功能為例。科技部。

2. 術語定義

2.1. 二氧化碳當量 (carbon dioxide equivalent, CO₂eq)

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。依照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 (CO₂) 為1、甲烷 (CH₄) 為25、氧化亞氮 (N₂O) 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3.67；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1.57。

2.2. 碳庫 (carbon pool)

儲存在土壤、植被、水體和大氣等儲碳載體中可以吸收和排放的碳，系統中所有碳庫總和成為碳儲量。

2.3. 碳儲量 (carbon stock)

指生態系統中儲存的總有機碳量，紅樹林土壤則指每公頃特定深度 (通常是1公尺深) 的有機碳量。碳儲量可包含一個或者多個碳庫的總有機碳量。本方法學統一以二氧化碳溫暖化潛勢作轉換，單位為 t CO₂eq ha⁻¹。

2.4. 活動數據 (activity data)

根據地理資料顯示的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量變化。有機碳量的變化由土地利用方式改變 (如從紅樹林變成魚塭) 或土地利用類型的內部變化 (如營養污染) 所導致。本書以正號表示增加之碳匯量做計算；若應用於臺灣國家溫室氣體排放清冊時，增加之碳匯量描述為碳移除量，需將碳匯量數據乘上負號來表示。

2.6. 紅樹林 (mangroves)

由天然生長於海岸環境和海灣邊緣，平均海平面以上潮間帶潮汐棲地的樹木、灌木、棕櫚或地被蕨類植物組成之森林，高度一般超過1.5 m。臺灣紅樹林樹種有海茄苳 (*Avicennia marina*)、水筆仔 (*Kandelia obovata*)、欖李 (*Lumnitzera racemosa*) 及五梨跤 (*Rhizophora stylosa*)，臺灣北部以水筆仔為優勢，南部則以海茄冬為優勢，欖李及五梨跤則分布於嘉義以南沿海地區。從自然棲地消失的細蕊紅樹 (*Ceriops tagal*) 與紅茄苳 (*Bruguiera gymnorrhiza*) 曾分布於高雄沿海地區。

2.7. 地上部生物量 (aboveground biomass)

地表以上所有活體植物 (如葉、枝條等) 的質量，本方法學皆指生物量乾重。

2.8. 地下部生物量 (belowground biomass)

地表以下所有活體植物 (如粗根、細根等) 的質量，本方法學皆指生物量乾重。

2.9. 異速生長方程式 (allometric equation)

建立易於測定的生物特徵參數 (如樹高、胸徑和基徑) 和難以測定的生物特徵參數之間的數量關係，常用於估算林木生物量。

2.10. 有機碳含量百分比 (carbon fraction)

單位質量中有機碳含量。

2.11. 自源性碳 (autochthonous carbon)

在紅樹林生態系統中，由植物吸收固定海洋和大氣中的碳並轉移到植物組織中，或在紅樹林周遭土壤中堆積或分解。

2.12. 外源性碳 (allochthonous carbon)

來自於紅樹林以外的有機碳來源。

2.13. 土壤碳埋藏 (carbon burial)

短期內不被分解的有機碳，可長期儲存於土壤中。

2.14. 地表高程監測系統 (surface elevation table, SET)

用於量測地表高程變化的便攜式手動操作裝置，在95%的信賴區間內的分辨率為± 1.5 mm。整組系統由插入式支撐台、連接器、水平手臂和測量針共4部分組成。

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

紅樹林土壤表面相對於同一地點地底下基準點高度的變化量。

2.16. 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。

2.17. 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 (如枯落物量分解後埋藏於土壤之百分比)，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至層級3的估計值。

2.18. 通量法 (flux method)

通過直接測量或建模，估算土壤與植被、大氣與水體之間的溫室氣體排放或移除流通量，得到層級2和層級3估計值。

2.19. 分區 (habitat zoning)

將存在異質性的調查區劃分成性質均一的小區。

2.20. 測站 (station)

根據目標用於量測相關指標而設置的樣方或樣地。

2.21. 枯落物 (litterfall)

指從紅樹林落下的葉、枝、莖、樹皮、花果等。

3. 臺灣紅樹林碳匯估算流程

臺灣紅樹林碳匯估算流程依照紅樹林活動數據劃定面積，以各類活動數據紅樹林之相對應有機碳儲量或排放係數做計算。本方法學主旨在測量並建立本土紅樹林在各類活動係數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紅樹林後，土地利用類型就屬於「再濕潤、植被恢復和創建」。經過20年後，該土地仍維持紅樹林，土地利用類型才會轉換為「紅樹林的森林管理實踐」。土地利用類型即為活動數據，紅樹林各項活動數據之具體管理活動如下：

1. 紅樹林的管理實踐—種植、疏伐、皆伐、收成、木材清除、薪柴清除、木炭生產
2. 抽沙—(1) 挖掘以建設港口、海港和碼頭，包含填充或疏浚以提高土地高程(2) 水產養殖(3) 曬鹽生產
3. 排水—水產養殖、林業、滅蚊
4. 再濕潤、植被恢復和創建—透過恢復水文和重建植被，從排水性土壤轉換為飽和性土壤

紅樹林碳匯估算之精度，同樣參考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)，估算由精確度低至高分別如表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 估計的排放係數	層級 1 的評估在準確度和可靠性最低，使用簡易的假設和 IPCC 所發布的活動數據和排放係數之估計值。誤差範圍可能很大，其誤差範圍地上部碳庫正負 50%，而土壤碳庫則為正負 90%。
2	國家特定資料的關鍵係數	層級 2 的評估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。一個國家可能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	層級 3 的評估需要詳細的資料，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。

本土紅樹林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，紅樹林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排放後之結果，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(如枯落物量分解後埋藏於土壤之百分比)，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 至層級 3 的估計值。

3. 通量法：透過直接測量或建立模型，估算土壤與植被、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. 紅樹林碳匯計算

紅樹林碳匯由紅樹林有機碳儲量年變化量決定，意即涉及植物體光合作用淨生產，和植物體死有機質在土壤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紅樹林碳匯，如低鹽度環境下的 CH₄排放及高營養鹽環境下的 N₂O 排放。紅樹林溫室氣體排放量計算如公式 (1)，碳儲量增加為正值、溫室氣體排放量為負值。

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

- $CS_{Mangrove}$ —紅樹林碳匯年變化量，單位為 t CO₂eq yr⁻¹；
- $\Delta C_{Mangrove}$ —紅樹林碳儲量年變化量，單位為 t CO₂eq yr⁻¹；
- $CH_4\text{-}Mangrove$ —紅樹林 CH₄ 年排放量，單位為 t CO₂eq yr⁻¹；
- $N_2O_{Mangrove}$ —紅樹林 N₂O 年排放量，單位為 t CO₂eq yr⁻¹。

4.1. 有機碳儲量變化量

紅樹林有機碳儲量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、死有機質及土壤碳庫在不同氣溫下的分解等，如公式 (2)。

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

- $\Delta C_{Mangrove}$ —紅樹林有機碳儲量年變化量，單位為 t CO₂eq yr⁻¹；
- ΔC_B —紅樹林生物量碳儲量年變化量，單位為 t CO₂eq yr⁻¹；
- ΔC_{DOM} —紅樹林死有機質碳儲量年變化量，單位為 t CO₂eq yr⁻¹；
- ΔC_{Soils} —紅樹林土壤碳儲量年變化量，單位為 t CO₂eq yr⁻¹。

4.2. 生物碳儲量變化量

紅樹林生物碳儲量變化量計算如公式 (3)、(4)、(5)，公式 (4) 屬於層級 1，估計值如表 2、表 3、表 4；公式 (5) 可用於層級 2、3 之估算，層級 2 估計值如表 5、表 6。層級 3 之完整量測方式，如 5.2. 及 5.3. 小節。

$$\Delta C_B = \sum_{ij} (A_{ij} \times G_{Totalij}) \times 3.67 \quad \text{-----} \quad (3)$$

- ΔC_B —紅樹林生物碳儲量年變化量，單位為 t CO₂eq yr⁻¹；
- A —紅樹林面積，單位為公頃 (ha)；
- G_{Total} —單位面積紅樹林碳儲量年增加量，單位為 t C ha⁻¹ yr⁻¹；
- 3.67—有機碳含量之二氧化碳當量轉換係數；
- i —紅樹林樹種；
- j —紅樹林活動數據，即土地利用類型面積。

層級 1

$$G_{Total} = G_{AB} \times (1 + R) \times CF \quad \text{-----} \quad (4)$$

- G_{Total} —單位面積紅樹林碳儲量年增加量，單位為 t C ha⁻¹ yr⁻¹；
- G_{AB} —紅樹林地上部平均年生長量 (乾重)，單位為 t d.m. ha⁻¹ yr⁻¹；

- R —紅樹林根莖比，即地下部與地上部比例；
- CF —紅樹林有機碳含量百分比(%)。

表2、紅樹林地上部生長量層級1估計值

氣候區	區域	地上部生長量 (t d.m. ha ⁻¹ yr ⁻¹)	95% CI	參考文獻
熱帶	熱帶濕潤	9.9	9.4, 10.4	Ajonina 2008; Kairo et al. 2008; Alongi 2010
	熱帶乾燥	3.3	3.1, 3.5	
亞熱帶		18.1	17.1, 19.1	

表3、紅樹林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	區域	R	95% CI	參考文獻
熱帶	熱帶濕潤	0.49	0.47, 0.51	Golley et al. 1975; Tamai et al. 1986; Komiyama et al. 1987, 1988; Gong and Ong 1990; Lin et al. 1990; Pongparn 2003
	熱帶乾燥	0.29	0.28, 0.30	Golley et al. 1962; Alongi et al. 2003; Hoque et al. 2010
亞熱帶		0.96	0.91, 1.0	Briggs 1977; Lin 1989; Tam et al. 1995; Saintilan 1997

表4、紅樹林地上部生物量碳含量百分比(%)層級1估計值

組成	CF (%)	95% CI	參考文獻
葉+木	45.1	42.9, 47.1	Spain and Holt 1980; Gong and Ong 1990; Twilley et al. 1992; Bouillon et al. 2008; Saenger 2002; Alongi et al. 2003; Kristensen et al. 2008

層級2、3

$$G_{Total} = (G_{AB} \times CF_{AB} + G_{BB} \times CF_{BB}) + (G_{AB} \times CF_{AB} + G_{BB} \times CF_{BB})_{Scrub} \quad - \quad (5)$$

- G_{Total} —單位面積紅樹林碳儲量年增加量，單位為 t C ha⁻¹ yr⁻¹；
- G_{AB} —紅樹林地上部平均年生長量(乾重)，單位為 t d.m. ha⁻¹ yr⁻¹；
- CF_{AB} —紅樹林地上部有機碳含量百分比(%)；
- G_{BB} —紅樹林地下部平均年生長量(乾重)，單位為 t d.m. ha⁻¹ yr⁻¹；
- CF_{BB} —紅樹林地下部有機碳含量百分比(%)；
- Scrub—紅樹林幼齡植株及灌木時期。

表5、臺灣紅樹林碳儲量年增加量(t C ha⁻¹ yr⁻¹)層級2估計值

植被類型	G _{Total} (t C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	不確定性 U (%)	參考文獻
水筆仔 <i>Kandelia obovata</i>	23.96	42.4	陳柏宏 2014；黃日聖 2016；吳欣恂 2021；Li et al. 2018；Chou et al.

			2022
海茄苳 <i>Avicennia marina</i>	11.62	96.3	李世博 2015；黃日聖 2016；吳欣恂 2021；賴榮一 2021；Li et al. 2018；Chou et al. 2022
欖李 <i>Lumnitzera racemosa</i>	15.75	100.8	賴榮一 2021
五梨跤 <i>Rhizophora stylosa</i>	12.35	69.1	賴榮一 2021

其中各生物量算法使用異速生長方程式估計的冠層、樹幹及粗根生物量乾重，和使用土壤採集器直接取樣並計算的細根生物量乾重。此表數值未包含紅樹林幼齡植株及灌木時期。

表6、臺灣紅樹林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
水筆仔 <i>Kandelia obovata</i>	50.3	13.8	43.2	14.3	陳柏宏 2014；黃日聖 2016；吳欣恂 2021；Li et al. 2018；Chou et al. 2022
海茄苳 <i>Avicennia marina</i>	48.0	14.3	41.69	11.3	李世博 2015；黃日聖 2016；吳欣恂 2021；賴榮一 2021；Li et al. 2018；Chou et al. 2022
欖李 <i>Lumnitzera racemosa</i>	42.5	SD: ± 2.6	42.6	SD: ± 0.1	李世博 2015
五梨跤 <i>Rhizophora stylosa</i>	44.1	SD: ± 0.3	40.5	SD: ± 0.1	李世博 2015

碳含量百分比測量組織包含地上部葉子、枝條及地下部粗根。此表數值未包含紅樹林幼齡植株及灌木時期。

4.3. 死有機質碳儲量變化量

由於紅樹林死有機質碳庫佔整體碳庫的比例較小，而且紅樹林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。通常假設死有機質碳庫在生物量碳庫及土壤碳庫間維持動態平衡，死有機質碳庫變化為0。部分紅樹林枯木比例較高，則需要將枯木納入死有機質碳庫，並計算其碳儲量變化量，計算公式如(6)、(7)及(8)。層級3之完整量測方式，如5.4.小節。

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

- ΔC_{DOM} —紅樹林死有機質碳儲量年變化量，單位為 t CO₂e yr⁻¹；
- A —紅樹林面積，單位為公頃 (ha)；
- ΔDW —紅樹林死有機質碳儲量年變化量，單位為 t C ha⁻¹ yr⁻¹；
- 3.67—有機碳含量之二氧化碳當量轉換係數；
- i —紅樹林樹種；
- j —紅樹林活動數據，即土地利用類型面積。

層級1

$$\Delta DW = G_{Total} \times F_{D/G} \text{ -----} \quad (7)$$

- ΔDW —紅樹林死有機質碳儲量年變化量，單位為 t C ha⁻¹ yr⁻¹；
- G_{Total} —單位面積紅樹林生物碳儲量年增加量，單位為 t C ha⁻¹ yr⁻¹；
- $F_{D/G}$ —紅樹林枯木碳儲量與紅樹林生物碳儲量之比值，可參考測量值 6.23% (陳鷺真等 2023)。

層級2、3

$$\Delta DW = \Delta DW_{DS1} + \Delta DW_{DS2} + \Delta DW_{DS} \text{ -----} \quad (8)$$

- ΔDW —紅樹林死有機質碳儲量年變化量，單位為 t C ha⁻¹ yr⁻¹；
- $DS1$ —腐爛層級 1 的枯木，還殘留多數葉子及枝條，可使用生物量異速生長方程式計算其單一時間點的所有 DS1 枯木碳儲量，或是將總生物量碳儲量乘上 2.5% (Howard 2014)；
- $DS2$ —腐爛層級 2 的枯木，僅剩少數枝條，使用生物量異速生長方程式計算其單一時間點的碳儲量，再依照其殘留枝條量選擇乘上 10-20% (Howard 2014)；
- $DS3$ —腐爛層級 3 的枯木，進一步腐爛已失去大部分體積的枯立木或枯倒木，須個別計算體積、樹密度，並帶入腐爛層級 3 的枯木有機碳含量，以估算腐爛層級 3 的枯木碳儲量。

4.4. 土壤有機碳儲量變化量

紅樹林土壤有機碳儲量變化量計算如公式 (9)、(10)、(11)、(12)、(13)。層級1如公式 (9)，目前僅有再濕潤及排水土地有排放係數(EF)估計值，可參照表 7、表8；層級2、3之估算方法 (1) 屬於土壤碳庫差分法，用於考慮外源性及自源性有機碳的綜合結果，參照公式 (10)、(11)；層級2、3之估算方法 (2) 屬於增減法，能較準確量化紅樹林自源性有機碳埋藏貢獻，參照公式 (12)、(13) 估計值如表9、表10。依照臺灣河口紅樹林腹地較小、季節水流變動較大，導致土壤土壤擾動較多，建議使用層級2、3之估算方法 (2)，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：

$$\Delta C_{Soils} = A_{ij} \times EF_{ij-Soils} \times 3.67 \text{ -----} \quad (9)$$

- ΔC_{Soils} —紅樹林有機土壤碳儲量年變化量，單位為 t CO₂eq yr⁻¹；
- $EF_{ij-Soils}$ —紅樹林土壤碳排放係數，單位為 t C ha⁻¹ yr⁻¹；
- A —紅樹林面積，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 —紅樹林樹種；

- j —紅樹林活動數據，即土地利用類型面積。

表7、重建植被、再濕潤 ($EF_{RE-Soils}$) 有機及礦物聚合土壤的年排放係數 ($t C ha^{-1} yr^{-1}$) 層級1估計值

生態系	EF_{RE} ($t C ha^{-1} yr^{-1}$)	95% CI	參考文獻
紅樹林	1.62	1.3, 2.0	Breithaupt et al. 2012; Chmura et al. 2003; Fujimoto et al. 1999; Ren et al. 2010

此處正值表示土壤有機碳儲量年變化正值，即為土壤有機碳儲量增加

表8、排水性 ($EF_{DR-Soils}$) 有機及礦物土壤的年排放係數 ($t C ha^{-1} yr^{-1}$) 層級1估計值

生態系	EF_{DR} ($t C ha^{-1} yr^{-1}$)	95% CI	參考文獻
潮間帶草澤和紅樹林	-7.9	-5.2, -11.8	Camporese et al. 2008; Deverel and Leighton, 2010; Hatala et al. 2012; Howe et al. 2009; Rojstaczer and Deverel, 1993

此處負值表示土壤有機碳儲量年變化負值，即為土壤有機碳儲量減少

層級2、3之方法 (1)：

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

$$CAR_{ij} = SEC_{ij} \times SBD_{ij} \times CF_{ij-Soils} \quad \text{-----} \quad (11)$$

- ΔC_{Soils} —紅樹林土壤有機碳儲量年變化量，單位為 $t CO_2eq yr^{-1}$ ；
- A —紅樹林面積，單位為公頃 (ha)；
- CAR —紅樹林土壤有機碳埋藏速率，單位為 $t C ha^{-1} yr^{-1}$ ；
- 3.67—有機碳含量之二氧化碳當量轉換係數；
- SEC —紅樹林地表高程年變化量，單位為 $cm yr^{-1}$ ；
- SBD —紅樹林土壤總體密度，單位為 $g cm^{-3}$ ；
- CF_{-Soils} —紅樹林土壤有機碳含量百分比 (%)；
- i —紅樹林樹種；
- j —紅樹林活動數據，即土地利用類型面積。

層級2、3之方法 (2)：

$$\Delta C_{Soils} = A_{ij} \times \Delta C_{A-Soils} \times 3.67 \quad \text{-----} \quad (12)$$

$$\Delta C_{A-Soils} = (LF_{ij} \times W_{ij-LF} + FRM_{ij} \times W_{ij-FRM}) \quad \text{-----} \quad (13)$$

- ΔC_{Soils} —紅樹林土壤有機碳儲量年變化量，單位為 $t CO_2eq yr^{-1}$ ；
- A —紅樹林面積，單位為公頃 (ha)；
- $\Delta C_{A-Soils}$ —紅樹林自源性土壤有機碳儲量年增加量，單位為 $t C ha^{-1} yr^{-1}$ ；
- 3.67—有機碳含量之二氧化碳當量轉換係數；
- LF —紅樹林地上部枯落物年增加量，單位為 $t C ha^{-1} yr^{-1}$ ；
- W_{LF} —紅樹林地上部枯落物分解剩餘量百分比 (%)；
- FRM —紅樹林地下部死亡細根年增加量，單位為 $t C ha^{-1} yr^{-1}$ ；
- W_{FRM} —紅樹林地下部死亡細根分解剩餘量百分比 (%)；
- i —紅樹林樹種；
- j —紅樹林活動數據，即土地利用類型面積。

表9、臺灣紅樹林土壤有機碳儲量年變化 (t C ha⁻¹ yr⁻¹) 層級2估計值

植被類型	$\Delta C_{A-Soils}$ (t C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	不確定性 U (%)	參考文獻
水筆仔 <i>Kandelia obovata</i>	1.11	89.7	陳柏宏 2014；黃日聖 2016；吳欣恂 2021；Li et al. 2018；Chou et al. 2022
海茄苳 <i>Avicennia marina</i>	1.20	75.9	李世博 2015；黃日聖 2016；吳欣恂 2021；賴榮一 2021；Li et al. 2018；Chou et al. 2022
欖李 <i>Lumnitzera racemosa</i>	1.70	160.2	賴榮一 2021
五梨跤 <i>Rhizophora stylosa</i>	1.01	151.0	賴榮一 2021

此估計值為臺灣本土研究數據，採用增減法測量並加總地上部枯落物及地下部死細根分解後剩餘的不易分解的有機碳，作為紅樹林對土壤碳埋藏的貢獻，五梨跤地下部死細根分解由水筆仔及海茄苳之平均值作推算 (Chou et al. 2022)，欖李尚未包含地下部死細根分解。此處土壤有機碳儲量年變化正值，即為土壤有機碳儲量增加。

表10、臺灣紅樹林地上部枯落物分解剩餘量百分比 (%) 層級2估計值

植被類型	W_{LF} (%)	不確定性 U (%)	參考文獻
水筆仔 <i>Kandelia obovata</i>	14.8	94.7	Lin et al. 2023
海茄苳 <i>Avicennia marina</i>	10.9	68.9	Lin et al. 2023
欖李 <i>Lumnitzera racemosa</i>			
五梨跤 <i>Rhizophora stylosa</i>			

此百分比已考慮紅樹林枯落物之碎屑橫向通量之結果 (Lin et al. 2023)。

4.5. 甲烷排放量

紅樹林 CH₄排放計算如公式 (14)、(15)，在層級1僅有再濕潤土地有估計值，如表11；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，低潮時水體鹽度小於18 psu 才需考慮甲烷排放量，如表11。在臺灣僅有少數靠近河道上游的紅樹林，在退潮時鹽度才會低於18 psu，因此一般情況下可忽略不計。

$$CH_{4-Mangrove} = \sum_{ij} (A_{ij} \times EF_{ij-CH_4} \times GWP_{CH_4}) \quad \text{-----} \quad (14)$$

$$EF_{ij-CH_4} = CH_{4-Soils} + CH_{4-Trees} \quad \text{-----} \quad (15)$$

• CH₄ Mangrove —紅樹林 CH₄ 年排放量，單位為 t CO₂eq yr⁻¹；

- A —紅樹林面積，單位為公頃 (ha)；
- EF_{ij-CH_4} —單位面積紅樹林 CH_4 年排放量，單位為 $t CH_4 ha^{-1} yr^{-1}$ ；
- GWP_{CH_4} — CH_4 溫暖化潛勢；
- $CH_4-Soils$ —單位面積紅樹林土壤 CH_4 年排放量，單位為 $t CH_4 ha^{-1} yr^{-1}$ ；
- $CH_4-Trees$ —單位面積紅樹林樹幹 CH_4 年排放量，單位為 $t CH_4 ha^{-1} yr^{-1}$ ；
- i —紅樹林樹種；
- j —紅樹林活動數據，即土地利用類型面積。

表11、由紅樹林或潮間帶草澤再濕潤土地的甲烷排放係數 ($EF_{CH_4-REwet}$) 層級1估計值

植被類型	鹽度 (psu)	$EF_{CH_4-REwet}$ ($t CH_4 ha^{-1} yr^{-1}$)	95% CI	參考文獻
潮間帶淡水和鹹水草澤及紅樹林	< 18	-1.937×10^{-1}	-9.98×10^{-2} , -3.58×10^{-1}	Keller et al. 2013; Ma et al. 2012; Poffenbarger et al. 2011; Sotomayor et al. 1994; Tong et al. 2010
潮間帶鹽水草澤和紅樹林	> 18	0		

此處負值表示有機碳儲量被甲烷排放所抵減

4.6. 氧化亞氮排放量

紅樹林 NO_2 排放估算層級2、3如公式 (16)、(17)，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，有關水產養殖活動才需考慮 NO_2 排放量，如表12。

$$N_2O_{Mangrove} = \sum_{ij} (A_{ij} \times EF_{ij-N_2O} \times GWP_{N_2O}) \quad \text{-----} \quad (16)$$

$$EF_{ij-N_2O} = N_2O_{Soils} + N_2O_{Trees} \quad \text{-----} \quad (17)$$

- $N_2O_{Mangrove}$ —紅樹林 NO_2 年排放量，單位為 $t CO_2eq yr^{-1}$ ；
- A —紅樹林面積，單位為公頃 (ha)；
- EF_{ij-N_2O} —單位面積紅樹林 NO_2 年排放量，單位為 $t N_2O ha^{-1} yr^{-1}$ ；
- GWP_{N_2O} — NO_2 溫暖化潛勢；
- N_2O_{Soils} —單位面積紅樹林土壤 NO_2 年排放量，單位為 $t N_2O ha^{-1} yr^{-1}$ ；
- N_2O_{Trees} —單位面積紅樹林樹幹 NO_2 年排放量，單位為 $t N_2O ha^{-1} yr^{-1}$ ；
- i —紅樹林樹種；
- j —紅樹林活動數據，即土地利用類型面積。

表12、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-N_2O}) 第1層級估計值

EF_{F-N_2O} ($t N_2O-N$ per 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，此處負值表示有機碳儲量被氧化亞氮排放所抵減

5. 紅樹林有機碳儲量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 (如土地利用的轉變)、生物特徵 (如紅樹林物種、樹齡及植株密度)，或是依照環境條件分區 (如水文地貌特徵、土壤類型)。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，如垂直海岸線分布的測站，可了解潮位對碳庫的影響；(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。如圖1，每個測站面積至少5 m × 5 m 或依照紅樹林分布狀況設置 (Howard et al. 2014)。



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

測量紅樹林在不同時點的單位面積生物量，相減後即為單位面積時間紅樹林生物量生長量，如公式 (18)、(19)。一般間隔為一年，最短間隔為一季。

$$G_{AB} = (AB_{t_2} - AB_{t_1}) / (t_2 - t_1) \quad \text{-----} \quad (18)$$

$$G_{BB} = (BB_{t_2} - BB_{t_1}) / (t_2 - t_1) \quad \text{-----} \quad (19)$$

- G_{AB} —紅樹林地上部平均年生長量 (乾重)，單位為 t d.m. ha⁻¹ yr⁻¹；
- AB —紅樹林單位面積地上部生物量乾重，單位為 t d.m. ha⁻¹；
- G_{BB} —紅樹林地下部平均年生長量 (乾重)，單位為 t d.m. ha⁻¹ yr⁻¹；
- BB —紅樹林單位面積地下部生物量乾重，單位為 t d.m. ha⁻¹；
- t —量測時間點。

5.2.1. 喬木

紅樹林生物量主要以異速生長方程式估算，包含樹冠層、樹幹及粗根。利用異速生長方程式計算樣區內每棵紅樹林的生物量，依照各植物組織 (地上部及地下部) 的有機碳含量百分比轉換後加總，即可得到單株紅樹林植物體碳儲量。最後利用單位面積紅樹林植株密度轉換，即可得到紅樹林單位面積碳儲量。異速生長方程式及相關參數，參考附件8.5。量測一般使用樹高尺測量樹高、樹徑尺測量樹徑，由於樹幹生長方式有許多型態，測量其胸徑的方式可參考圖2，各類樹型胸徑測量位置說明如下：

- a. 樹木直高且有主幹，胸徑可從地面開始平行於主幹測量至 1.3 m 處
- b. 樹木生長在斜坡上，須從斜坡上側開始平行於主幹測量至 1.3 m 處

- c. 樹木斜著生長，須根據自然角度平行於主幹測量至 1.3 m 處
- d. 樹木在 1.3 m 以下就出現分叉，須量測分叉底下不遠處
- e. 樹木分叉很接近地面時，須當成兩棵樹分別平行於主幹測量至 1.3 m 處
- f. 樹基部隆起超過 1.3 m，須於隆起處上端不遠處
- g. 樹幹具有支持根，以最上端的支持根往上 1.3 m 處

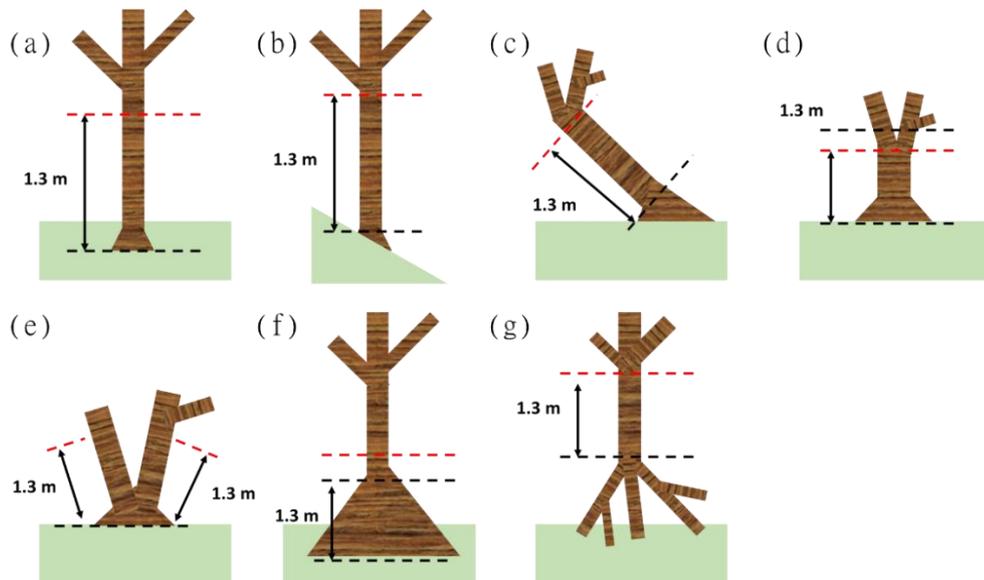


圖2、各類樹型胸徑測量位置(如圖中紅色標記處)

5.2.2. 灌木

紅樹林樹種型態多樣，部分灌木物種的成熟樹高可大於2.5 m，亦有成熟樹高小於1m的物種。臺灣紅樹林物種皆屬於喬木，因此本方法學描述的灌木是參照鄰近地區紅樹林異速生長方程式的未成熟樹苗(如附件8.5)，即不屬於圖2之七種樹幹型態且無法量測樹胸徑之矮樹叢。例如1.3 m 已經是樹冠層，以葉子及枝條為主的樹木。臺灣紅樹林灌木(矮樹叢)除了使用附件8.5的異速生長方程式，也可以使用覆蓋度、樹冠體積、樹冠面積、冠幅和支持根數量等參數，建立合適的異速生長方程式。覆蓋度一般使用2 m × 2 m 的樣框，量測灌木與棲地的相對覆蓋度。冠幅一般是測量最寬的冠幅，以及垂直最寬冠幅的最短冠幅。結合橢圓形面積公式將冠幅數據帶入橢圓長軸及短軸，就能算出樹冠面積。將冠層面積乘上冠層深度及為冠層體積。此外，灌木木材密度及有機碳含量在國際的預估值也是較少，因此可另行測量建立。

5.3. 植物體有機碳含量百分比及碳儲量

將野外採集的紅樹林植物體各組織，包含地上部葉子、枝條及地下部粗根，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，即為紅樹林植物體地上部及地下部有機碳含量百分比數值。將紅樹林生物量及有機碳含量百分比相乘，即為紅樹林單位面積碳儲量，如公式(20)、(21)。

$$C_{AB} = AB_t \times CF_{AB} \text{ ----- (20)}$$

$$C_{BB} = BB_t \times CF_{BB} \text{ ----- (21)}$$

• C_{AB} —紅樹林單位面積地上部生物碳儲量，單位為 $t C ha^{-1}$ ；

- AB —紅樹林單位面積地上部生物量乾重，單位為 $t\ d.m.\ ha^{-1}$ ；
- CF_{AB} —紅樹林地上部有機碳含量百分比 (%)；
- C_{BB} —紅樹林單位面積地下部生物碳儲量，單位為 $t\ C\ ha^{-1}$ ；
- BB —紅樹林單位面積地下部生物量乾重，單位為 $t\ d.m.\ ha^{-1}$ ；
- CF_{BB} —紅樹林地下部有機碳含量百分比 (%)；
- t —量測時間點。

5.4. 枯木

由於腐爛程度1和2的枯木可由活生物量異速生長方程式及對應估計值比例計算而來，因此在此專門說明腐爛程度3的枯木的計算方式。枯木碳儲量由枯木體積、枯木木材密度及枯木有機碳含量相乘而得。枯木體積計算方式分為2段，首先是枯立木頂端直徑可以用錐體方程式估算，如公式 (22)，其餘枯立木體積可用截頂圓錐的方式計算，如公式 (23)。

$$d_{top} = d_{base} - \{100 \times th \times [(d_{base} - d_{bh})/130]\} \quad \text{-----} \quad (22)$$

- d_{top} —頂端直徑，單位為 cm 。若計算結果為負值，以 0 代替；
- d_{base} —基徑，單位為 cm ；
- d_{bh} —胸徑，單位為 cm ；
- th —樹高，單位為 cm 。

$$v_{DW} = [\pi \times (100 \times th)]/12 \times [d_{base}^2 + d_{top}^2 + (d_{base} \times d_{top})] \quad \text{---} \quad (23)$$

- v_{DW} —紅樹林枯木體積，單位為 cm^3 ；
- th —樹高，單位為 cm ；
- d_{top} —頂端直徑，單位為 cm ，若計算結果為負值，以 0 代替；
- d_{base} —基徑，單位為 cm 。

5.5. 土壤

5.5.1. 地表高程變化

量測紅樹林地表高程變化 (SEC)，是使用地表高程監測系統 (SET) 進行。SET 系統分為固定樁和測量臂兩個部分，如圖3。固定樁是一個深達地下岩層固定點的連續不鏽鋼裝置。在安裝時，盡量使之觸及岩層無法繼續下推為止；測量臂是配有測量針的高程監測儀。在測定時，將測量臂連接到固定樁突出地表的頂部，使測量針垂直向下接觸土壤表面，記錄每根針在測量臂上方的高度。重複上述操作直至完成4個方向(東西南北)的測量。計算前後兩次測定測量針的高度差值，取每個方向測量針高度差均值作為該方向地表高程變化量。取4個方向的地表高程變化量均值作為地表高程變化量，結合前後兩次測定時間長度，得到樣方內年均地表高程變化。

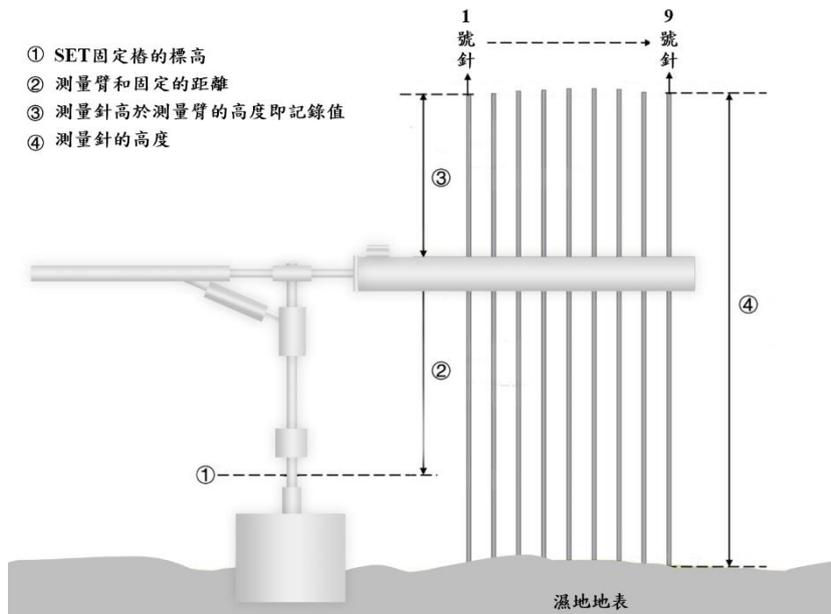


圖3、紅樹林地表高程監測系統(SET)

5.5.2. 土壤總體密度

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4a) 採集30 cm 深的土壤樣本，再用小型採集器 (圖4b) 取樣0 - 10、10 - 20和 10 - 30 cm 各層之土壤。將樣本冷藏於4°C，帶回實驗室烘乾至恆重。將每個小採集器的土壤樣本乾重除以採集體積即為土壤總體密度。

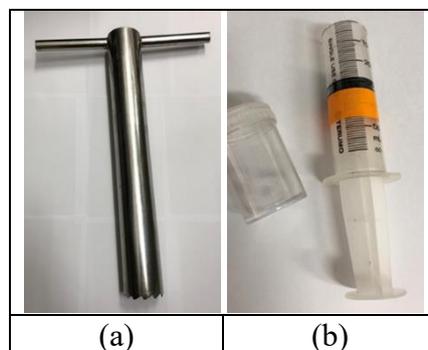


圖4、表層土壤採集器

(a)不鏽鋼底土採集管(b)小型採集器

5.5.3. 土壤有機碳含量百分比

同5.5.2.採集方法，實驗室分析階段，將採集所得之土壤樣本冷凍乾燥、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。最後將去除酸液的土壤樣本冷凍乾燥，進行碳元素分析，即可得到各層土壤有機碳含量百分比 (Howard et al. 2014)。

5.5.4. 地上部枯落物

於紅樹林樹冠下架設枯落物承接籃 (例如直徑40 cm 的塑膠籃)，承接籃內部需縫製0.5 mm 網目的網子。每2個月收集一次籃中枯落物，持續一年後加總即可

知道單位面積枯落物年增加量。每次蒐集的枯落物須經過清洗，60°C烘乾至恆重。每次枯落物回收的時間間隔需小於2個月，以避免枯落物分解過多。承接籃的架設高度也需要避開潮汐浸淹的風險 (Lin et al. 2023)。要計算枯落物對紅樹林土壤的碳貢獻，尚須綜合側向碎屑通量及分解之結果 (Lin et al. 2023)。

5.5.5. 地下部死細根

同5.5.2.土柱二次取樣法採集0 - 60 cm，每10 cm 一層之各層土壤，帶回實驗室使用0.5 mm的不鏽鋼篩網並鋪上0.1 mm的雪沙布過篩清洗，並集中其中細根 (Chou et al. 2022)。再利用比重分離法 (Robertson et al. 1993)，利用二氧化矽容液分離出活細根及死細根。隨後將各層死細根烘乾至恆重，並加總各層死細根乾重，已得到該季的死細根含量。一年採集四季，利用後一季減掉前一季得到每季之前的死細根變化量，最後將每季的死細根變化量加總即可得到死細根年增加量 (Chou et al. 2022)。

5.5.6. 分解剩餘量

用5.5.4方法收集枯落物以及5.5.5方法收集活細根，將其各自陰乾24小時，隨後取20 g 枯落物及2 g 活細根分別放入網目0.1 mm的分解袋 (規格15 cm × 10 cm)，最後將分解袋放回紅樹林地表，地下部細根分解袋需埋至10 cm、30cm 和60cm。分解袋在300天內需回收5 - 7次，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 (Chou et al. 2022; Lin et al. 2023)。

5.6. 非二氧化碳溫室氣體排放

使用密閉罩蓋法，將密閉罩蓋在棲地土壤、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土壤、水體或植物體上的面積，和各溫室氣體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土壤、水體或植物體的溫室氣體排放量 ($t \text{ CO}_e \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)。常用罩蓋 (圖5) 及儀器之相關參數，詳見附件8.1-8.4。紅樹林土壤溫室氣體測量需考慮棲地積水，例如封閉水域之紅樹林在積水情況可用浮體罩蓋測量溫室氣體。另外，也需考慮物種氣生根對棲地土壤之影響，例如海茄荖紅樹林土壤溫室氣體測量，須將罩蓋罩在氣生根密度具有代表性之區域。樹幹溫室氣體通量需考量樹幹形態之差異，參考 Jeffrey et al. (2019) 將每株紅樹林的樹幹依離地高度劃分為四個區間：0 - 40、40 - 85、85 - 140、140 - 200 cm，於各區間安裝樹幹罩蓋進行溫室氣體測量 (圖5d、e)。將樹幹各區間視為一圓柱體，利用各區間間距與該區間樹幹周長計算該區間樹幹的表面積。再將各區間樹幹表面積和單位樹幹表面積溫室氣體通量計算並加總，即可得到單株紅樹林的樹幹溫室氣體通量。最後利用紅樹林植株密度計算，即可得到單位面積紅樹林棲地的樹幹溫室氣體通量。

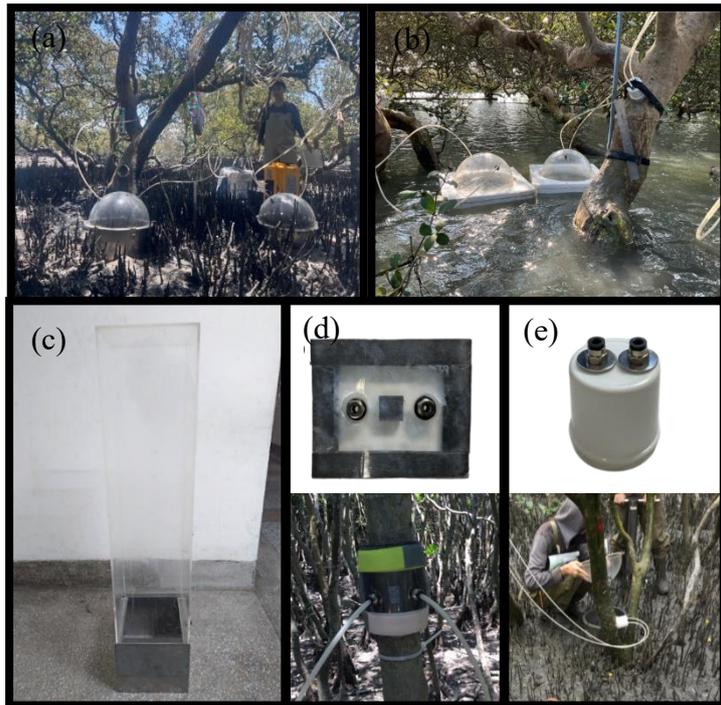


圖5、紅樹林溫室氣體量測常用之各類型罩蓋

(a) 土壤圓形罩蓋 (b) 水體浮體罩蓋 (c) 土壤長柱體罩蓋 (d) 樹幹半剛性罩蓋 (e) 樹幹圓柱形罩蓋

6. 品質保證與管控

6.1. 完整性

完整的紅樹林溫室氣體清單包括如上文所描述的管理紅樹林的排放估計值。採用高層級方法和資料的各國，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。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，這些濕地排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排放源，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；層級2、3之估計值不確性可參考可參考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。紅樹林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%。國家特定紅樹林碳儲量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 (25)；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 (26)；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 (27)。

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

• *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 —CF 數據筆數。

$$U = \frac{SD \times 1.96}{\bar{x}} \times 100\% \text{ -----} \quad (25)$$

- U —不確定性；
- SD —標準差；
- \bar{x} —文獻收集之係數平均值。

$$U_{total} = \sqrt{\frac{(U_1 \times E_1)^2 + (U_2 \times E_2)^2 + \dots + (U_n \times E_n)^2}{E_1 + E_2 + \dots + E_n}} \text{ -----} \quad (26)$$

- 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。

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \text{ -----} \quad (27)$$

- 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

明確定義紅樹林之活動數據，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，在兩次紅樹林資源調查期間，可使用內差法推得各年度紅樹林物種分布面積之數據。

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紅樹林樣區定期量測，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的紅樹林排放係數，整理各項目量測及計算方法，如表13。

表13、臺灣紅樹林排放係數估算層級2-3計算方法彙整表

紅樹林 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	重要碳匯項目	碳庫差分法- 異速生長方程式法
	地下部	重要碳匯項目	
死有機質碳庫		一般不計算，僅在 底表死有機質層明 顯時計算	碳庫差分法
土壤碳庫		重要碳匯項目	增減法(優先使用)- 計算植物體分解後，對土壤碳庫 的貢獻
			碳庫差分法- 1.用 SET 量測地表高程變化 2.無法計算高程變化時，需計算 表層各層土壤碳庫變化
非二氧 化碳 溫室氣 體排放	甲烷	一般不計算，僅在 低潮時水體鹽度 < 18psu 時計算	通量法- 密閉罩蓋法
	氧化 亞氮	一般不計算，僅在 營養污染時計算	

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。
- 李世博 (2015)。臺南七股紅樹林碳收支模式。國立中興大學生命科學系學位論文。
- 吳欣恂 (2021)。水筆仔與海茄苳碳收支模式。國立中興大學生命科學系學位論文。
- 林幸助、陳渭中 (2021)。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 (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。
- 高語岑 (2021)。臺灣紅樹林土壤甲烷排放量。國立中興大學生命科學系學位論文。
- 陳柏宏 (2014)。淡水河紅樹林及草澤植物的碳儲存量與碳收支。國立中興大學生命科學系學位論文，。
- 陳鷺真、孟越、張家林、林幸助、沈群紅、顧肖璇、吳瓏 (2023)。海峽兩岸共通紅樹林碳庫增量監測與計量技術規程。中華人民共和國福建。
- 黃日聖 (2016)。紅樹林疏伐對碳吸存的影響。國立中興大學生命科學系學位論文。
- 楊少鈞 (2023)。紅樹林樹幹溫室氣體排放量。國立中興大學生命科學系學位論文。
- 賴榮一 (2021)。氣候變遷下人工濕地植物發揮「調適」功能之研究-以高雄中都濕地公園紅樹林碳吸存功能為例。科技部。
- Ajonina, G. N. (2008). Inventory and modelling mangrove forest stand dynamics following different levels of wood exploitation pressures in the Douala-Edea Atlantic coast of Cameroon, Central Africa. *Mitteilungen der Abteilungen für Forstliche Biometrie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*, 2.
- Alongi, D. (2009). *The energetics of mangrove forests*. Springer Science & Business Media.
- Alongi, D. M., Clough, B. F., Dixon, P., & Tirendi, F. (2003). Nutrient partitioning and storage in arid-zone forests of the mangroves *Rhizophora stylosa* and *Avicennia marina*. *Trees*, 17, 51-60.
- Bouillon, S., Borges, A. V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N. C., Kristensen, E., Lee, S. Y., Marchand, C., Middelburg, J. J., Rivera-Monroy, V. H., Smith, T. J. & Twilley, R. R. (2008) Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles* 22(2).
- Breithaupt, J. L., Smoak, J. M., Smith, T. J., Sanders, C. J. & Hoare, A. (2012) Organic carbon burial rates in mangrove sediments: Strengthening the global budget. *Global Biogeochemical Cycles* 26.
- Briggs, S. V. (1977) Estimates of biomass in a temperate mangrove community. *Australian Journal of Ecology* 2(3): 369-373.
- Camporese, M., Putti, M., Salandin, P. & Teatini, P. (2008) Spatial variability of CO₂ efflux in a drained cropped peatland south of Venice, Italy. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 113(G4).
- Change, C. (2007). IPCC fourth assessment report. The physical science basis, 2, 580-595.
- Chmura, G. L., Anisfeld, S. C., Cahoon, D. R. & Lynch, J. C. (2003) Global carbon

- sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles* 17(4).
- Chou, M. Q., Lin, W. J., Lin, C. W., Wu, H. H., & Lin, H. J. (2022). Allometric equations may underestimate the contribution of fine roots to mangrove carbon sequestration. *Science of The Total Environment*, 833, 155032.
- Clough, B.F., Dixon, P., Dalhaus, O., 1997. Allometric relationships for estimating biomass in multi-stemmed mangrove trees. *Aust. J. Bot.* 45, 1023–1031.
- Comley, B.W., McGuinness, K.A., 2005. Above-and below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves. *Aust. J. Bot.* 53, 431–436.
- Deverel, S. J. & Leighton, D. A. (2010) Historic, recent, and future subsidence, Sacramento-San Joaquin Delta, California, USA. *San Francisco Estuary and Watershed Science* 8(2): 1-23.
- Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Fujimoto, K., Imaya, A., Tabuchi, R., Kuramoto, S., Utsugi, H. & Murofushi, T. (1999) Below-ground carbon storage of Micronesian mangrove forests. *Ecological Research* 14(4): 409-413.
- Golley, F. B., McGuinness, K., Clements, R. G., Child, G. I. & Duever, M. J. (1975) Mineral cycling in a tropical moist ecosystem. Athens, GA, USA: University of Georgia Press.
- Golley, F. B., Odum, H. T. & Wilson, R. F. (1962) The structure and metabolism of a Puerto Rican red mangrove forest ecosystem. Athens, GA, USA: University of Georgia Press.
- Gong, W. K. & Ong, J. E. (1990) Plant biomass and nutrient flux in a managed mangrove forest in Malaysia. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 31(5): 519-530.
- Gevana, D., & Im, S. (2016). Allometric models for *Rhizophora stylosa* Griff. in dense monoculture plantation in the Philippines. *Malaysian Forester*, 79(1&2), 39-53.
- Hatala, J. A., Detto, M., Sonnentag, O., Deverel, S. J., Verfaillie, J. & Baldocchi, D. D. (2012) Greenhouse gas (CO₂, CH₄, H₂O) fluxes from drained and flooded agricultural peatlands in the Sacramento-San Joaquin Delta. *Agriculture Ecosystems & Environment* 150: 1-18.
- 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.
- Hoque, A., Sharma, S., Suwa, R., Mori, S. & Hagihara, A. (2012) Seasonal variation in the size-dependent respiration of mangroves *Kandelia obovata*. *Marine Ecology Progress Series* 404: 31-37.
- Hoque, A.T.M.R., Sharma, S., Hagihara, A., 2011. Above and below-ground carbon acquisition of mangrove *Kandelia obovata* trees in Manko wetland, Okinawa, Japan. *Int.J.Enviro.* 1, 7–13.
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., & Pidgeon, E. (2014). Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses.
- Howe, A. J., Rodriguez, J. F. & Saco, P. M. (2009) Surface evolution and carbon sequestration in disturbed and undisturbed wetland soils of the Hunter estuary, southeast Australia. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 84(1): 75-83.
- 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.
- Jeffrey LC, Reithmaier G, Sippo JZ, Johnston SG, Tait DR, Harada Y, Maher DT. 2019. Are methane emissions from mangrove stems a cryptic carbon loss pathway? Insights from a catastrophic forest mortality. *New Phytologist* 224: 146 – 154.
- Kairo, J. G., Lang'at, J. K. S., Dahdouh-Guebas, F., Bosire, J. & Karachi, M. (2008) Structural development and productivity of replanted mangrove plantations in Kenya. *Forest Ecology and Management* 255(7): 2670-2677.
- Keller, J. K., Sutton-Grier, A. E., Bullock, A. L. & Megonigal, J. P. (2013) Anaerobic metabolism in tidal freshwater wetlands: I. Plant removal effects on iron reduction and methanogenesis. *Estuaries and Coasts* 36: 457-470.
- Khan, M.N.I., Suwa, R., Hagihara, A., 2009. Biomass and above-ground net primary production in a subtropical mangrove stand of *Kandelia obovata* (S., L.) Yong at Manko wetland, Okinawa, Japan. *Wetlands Ecol. Manag.* 17, 585–599.
- Komiyama, A., Moriya, H., Prawiroatmodjo, S., Toma, T. & Ogino, K. (1988) Primary productivity of mangrove forest. Ehime University, Ehime, Japan.
- Komiyama, A., Ogino, K., Aksornkoae, S. & Sabhasri, S. (1987) Root biomass of a mangrove forest in southern Thailand. 1. Estimation by the trench method and the zonal structure of root biomass. *Journal of Tropical Ecology* 3: 97-108.
- Kristensen, E., Bouillon, S., Dittmar, T. & Marchand, C. (2008) Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic Botany* 89(2): 201-219.
- Li, S. B., Chen, P. H., Huang, J. S., Hsueh, M. L., Hsieh, L. Y., Lee, C. L., & Lin, H. J. (2018). Factors regulating carbon sinks in mangrove ecosystems. *Global change biology*, 24(9), 4195-4210.
- Lin, C. W., Kao, Y. C., Chou, M. C., Wu, H. H., Ho, C. W., & Lin, H. J. (2020). Methane emissions from subtropical and tropical mangrove ecosystems in Taiwan. *Forests*, 11(4), 470.
- Lin, P., Lu, C., Wang, G. & Chen, H. (1990) Biomass and productivity of *Bruguiera sexangula* mangrove forest in Hainan Island, China. *Journal of Xiamen University (Natural Science)* 29: 209-213.
- Lin, P. (1989) Biomass and element cycle of *Kandelia* forest in China. Xiamen: Xiamen Univ. Press.
- Lin, W. J., Lin, C. W., Wu, H. H., Kao, Y. C., & Lin, H. J. (2023). Mangrove carbon budgets suggest the estimation of net production and carbon burial by quantifying litterfall. *CATENA*, 232, 107421.
- Ma, A., Lu, J. & Wang, T. (2012) Effects of elevation and vegetation on methane emissions from a freshwater estuarine wetland. *Journal of Coastal Research* 6: 1319-1329.
- Olson, J. S. (1963). Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44(2), 322-331.
- Perera, K. A. R. S. (2012). Carbon retention capacity of two mangrove species, *Bruguiera gymnorrhiza* (L.) Lamk. and *Lumnitzera racemosa* Willd. in Negombo estuary, Sri Lanka.
- Poffenbarger, H. J., Needelman, B. A. & Megonigal, J. P. (2011) Salinity influence on methane emissions from tidal marshes. *Wetlands* 31(5): 831-842.
- Poungparn, S., Komiyama, A., Patanaponpaipoon, P., Jintana, V., Sangtjean, T., Tanapermpool, P., Piriayota, S., Maknual, C., & Kato, S. (2003). Site-independent allometric relationships for estimating above-ground weights of mangroves. *Tropics*, 12(2), 147-158.
- Ren, H., Chen, H., Li, Z. a. & Han, W. (2010) Biomass accumulation and carbon

- storage of four different aged *Sonneratia apetala* plantations in Southern China. *Plant and soil* 327(1-2): 279-291.
- Robertson, A. I., & Dixon, P. (1993). Separating live and dead fine roots using colloidal silica: an example from mangrove forests. *Plant and Soil*, 157, 151-154.
- Rojstaczer, S. & Deverel, S. J. (1993) Time dependence in atmospheric carbon inputs from drainage of organic soils. *Geophysical Research Letters* 20(13): 1383-1386.
- Saenger, P. (2002) *Mangrove ecology, silviculture and conservation*. Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Saintilan, N. (1997) Above-and below-ground biomasses of two species of mangrove on the Hawkesbury River estuary, New South Wales. *Marine and Freshwater Research* 48(2): 147-152.
- Siegenthaler A, Welch B, Pangala SR, Peacock M, Gauci V. 2016. Semi-rigid chambers for methane gas flux measurements on tree stems. *Biogeosciences* 13: 1197 – 1207.
- Sotomayor, D., Corredor, J. E. & Morrell, J. M. (1994) Methane flux from mangrove sediments along the southwestern coast of Puerto Rico. *Estuaries* 17: 140-147.
- Spain, A. V. & Holt, J. A. (1980) The elemental status of the foliage and branch-wood of seven mangrove species from northern Queensland. In: Division of Soils divisional report; no. 49, eds. J. A. Holt & C. D. o. Soils, [Melbourne]: CSIRO.
- Tam, N., Wong, Y., Lan, C. & Chen, G. (1995) Community structure and standing crop biomass of a mangrove forest in Futian Nature Reserve, Shenzhen, China. *Hydrobiologia* 295(1-3): 193-201.
- Tamai, S., Tabuchi, R., Ogino, K. & Nakasuga, T. (1986) Standing biomass of mangrove forests in southern Thailand. *Journal of the Japanese Forestry Society* 68(9): 384-388.
- Tong, C., Wang, W.-Q., Zeng, C.-S. & Marrs, R. (2010) Methane (CH₄) emission from a tidal marsh in the Min River estuary, southeast China. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* 45: 506-516.
- Twilley, R., Chen, R. & Hargis, T. (1992) Carbon sinks in mangroves and their implications to carbon budget of tropical coastal ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution* 64(1-2): 265-288.
- Zhongming, Z., Linong, L., Xiaona, Y., Wangqiang, Z., & Wei, L. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

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. 土壤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+土壤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
方框 方罩蓋	53.125 L+土壤及積水層以上之金 屬框深度 m × 方框罩蓋底面積 m ²	0.0625	積水不深，但具有較 高的植物組織，例如 較高的紅樹林氣生根 和鹽沼植株
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. 樹幹溫室氣體測量常用罩蓋列表

公式： $V_{ts} = \left\{ \frac{HL}{(D_{stem}+2T)} \times \left[\left(\frac{D_{stem}+2T}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{stem}}{2} \right)^2 \right] - V_{wedges} \right\} / 1000$ 公式： $S_{ts} = \left[\frac{HL}{(D_{stem}+2T)} \times D_{stem} - S_{wedges} \right] / 10000$
V_{ts} ：半剛性罩蓋體積 (L) S_{ts} ：半剛性罩蓋底面積 (m ²) D_{stem} ：半剛性罩蓋所處高度之樹幹直徑 (cm) H ：半剛性罩蓋寬度 (7 cm) L ：半剛性罩蓋長度 (10 cm) T ：半剛性罩蓋厚度 (1.5 cm) V_{wedges} ：半剛性罩蓋中央氣丁橡膠 (CR) 泡沫帶之體積 (6 cm ³) S_{wedges} ：半剛性罩蓋中央氣丁橡膠 (CR) 泡沫帶之面積 (4 cm ²)

由於半剛性罩蓋體積會隨樹幹直徑而改變，因此藉由此表公式計算半剛性罩蓋於每一次測量時的體積與底面積 (Siegenthaler et al. 2016；楊少鈞，2023)

半剛性罩蓋改良自 Siegenthaler et al. (2016)，由透明的再生聚酯 (rPET) 礦泉水瓶製成：從瓶子上割下長14 cm，寬11 cm 的塑膠片，並在塑膠片周圍與中央黏上寬2 cm，厚1.5 cm 的氣丁橡膠 (CR) 泡沫帶，鑽出兩個小孔後再裝上轉接頭以接上管子。進行測量時，事先用束帶將罩蓋固定在樹幹上，即可進行測量。測量結束後，罩蓋不保留在樹幹上。圓柱形罩蓋由體積為0.2 L，白色的聚丙烯 (PP) 油墨罐製成：從蓋子上割下面積為16 cm²的正方形，並在罐子底部鑽出兩個小孔，再裝上轉接頭以接上聚氯乙烯 (PVC) 管。

8.4. 溫室氣體排放量計算公式及各儀器單位轉換係數

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

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)

8.5. 紅樹林生物量異速生長方程式

樹種	部位	異速生長方程式	胸徑/ 基徑	樹高	測定 指標	生態 型	參考文獻
水筆仔 <i>Kandelia obovata</i>	地上部	$B = 0.03203 (D_{1/10}^2 H)^{1.058}$	-	-	-	-	Khan et al. 2009
	地下部	$B = 0.0483 (D_{1/10}^2 H)^{0.834}$	-	-	-	-	Hoque et al. 2011
	地上部	$B = 0.01016 \cdot (D_0)^{2.454}$	-	< 2	D_0	幼齡植株	陳鷺真等 2023
	地下部	$B = 0.007649 \cdot (D_0)^{2.064}$					
	地上部	$B = 0.03999 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{1.053}$	4.4-12.6	3.4-5.5	DBH, H	喬木	陳鷺真等 2023
	地下部	$B = 0.02972 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{0.990}$					
	地下部	$B = 0.00698 \cdot DBH^{2.610}$					
海茄苳 <i>Avicennia marina</i>	地上部	$B = 0.178 \cdot (DBH)^{2.299}$	-	-	-	-	Clough et al. 1997
	地下部	$B = 1.28 \cdot (DBH)^{1.17}$	-	-	-	-	Comley and McGuinness 2005
	地上部	$B = 0.9462 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{0.529}$	8.3-14.3	3.1-5.6	DBH, H	喬木	陳鷺真等 2023
	地下部	$B = 0.0796 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{0.615}$					
	地上部	$B = 0.076123 \cdot (D_0^2 \cdot H)^{-0.222}$	3.7-4.6	< 2	D_0, H	灌木	陳鷺真等 2023
地下部	$B = 0.040168 \cdot (D_0^2 \cdot H)^{-0.126}$						

五梨跤 <i>Rhizophora stylosa</i>	地上部	$B = 0.045 \cdot D_{30}^{2.868}$	-	-	-	-	Gevana and Im 2016
	地下部	$B = 0.134 \cdot D_{30}^{2.40}$					
	地上部	$B = 0.07689 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{0.989}$	<12.6	4-6.5	DBH, H	喬木	陳鷺真等 2023
	地下部	$B = 0.09818 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{1.049}$					
欖李 <i>Lumnitzera racemosa</i>	地上部	$B = 0.114 \cdot (DBH)^{2.523}$	4.2-15.4		DBH		Perera et al. 2012
	地下部	$B = 0.118 \cdot (DBH)^{2.063}$	4.2-15.4		DBH		
<p>注：B (生物量) 單位為 kg；DBH (胸徑) 從樹基部算起離地 1.3 m 高的樹徑，單位為 cm；D₀ (基徑) 地面根頸處的樹幹直徑，單位為 cm；D_{1/10}：1/10 樹高處直徑，單位為 cm；D₃₀：最高支持根之上 30 cm 樹高處直徑，單位為 cm；H (樹高)，單位為 m。</p>							