

藍碳與淨零：非典型藍碳生態系

時 間：113 年 1 月 12 日（五）9:00-11:00

地 點：線上直播

主辦單位：國科會「原住民族社會永續科技發展平台計畫」

主 講 人：劉少倫（東海大學生命科學系教授）

主 持 人：李馨慈（國立屏東大學文化發展原住民專班副教授）

與 談 人：蔡政良（國立臺東大學公共與文化事務學系教授）

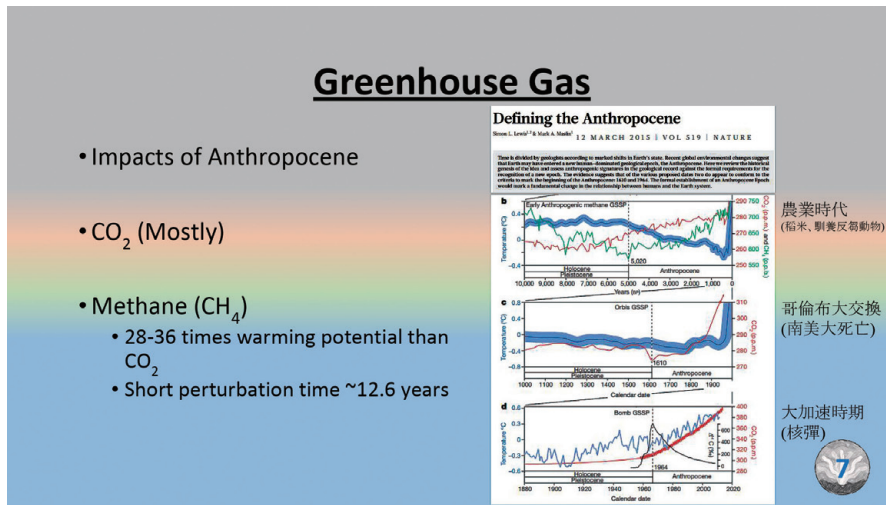
記 錄：主講人劉少倫教授整理

一、前言

走入「人類世（Anthropocene）」，人類的歷史就是一部溫室氣體生成的故事。2015 年發表在 *Nature* 的一篇研究文章試圖定義這個新時代出現的地質時間點，並提出三個可能的關鍵時間，這些時間點都在地質上很明顯的看出人類活動對地球氣候影響（圖一）（Lewis & Maslin, 2015）。其中，工業革命後的大加速時代，科技進步使人類能對地球造成更大的衝擊，核彈的發明讓地質上這個時間點能夠看到更高濃度的放射性碳-14 同位素。這些時間點顯示人類活動高低對全球氣候和生態系統的影響。

自工業革命以來，人類對化石燃料的大量使用，大氣中 CO₂ 濃度增幅驚人。數據顯示，其他溫室氣體如甲烷、一氧化二氮的含量也在飆升，這些氣體源於人類的經濟活動和農業行為，而要應對這一挑戰，我們必須採取更積極的減碳行動。溫室氣體的控制是關鍵，在聯合國呼喊淨零碳排（Net Zero）的口號，使得各國一窩蜂的尋找碳權，希望維持經濟成長的同時寄望綠碳或藍碳成為解緩這個問題的自然解方。

本文從海藻的視角探討非典型藍碳生態系對淨零碳排的貢獻。透過整理國外文獻，希望帮助大家理解研究重點，並探討藻類在淨零碳排框架的作用，及海藻在碳封存（Carbon Sequestration）中的應用，以應對全球氣候變化提供新的思路。



圖一：人類對於地球的影響（圖片來源：講者簡報）

二、淨零碳排與全球生物多樣性保護

2018年發表在 *Science* 的一篇重要文章，通過生物多樣性數據和數學模擬，分析了二氧化碳排放對全球氣候變化的影響（Warren et al., 2018）。文章比較了兩種全球平均升溫情境：1.5°C 和 2°C。根據模擬，若全球溫度升高至 2°C，到 2100 年將有 18% 的昆蟲、16% 的植物和 8% 的脊椎動物物種滅絕；而如果升溫限制在 1.5°C，這些數字則分別降至 6%、8% 和 4%。這說明，即使只是 0.5°C 的差異，也會對生物多樣性造成巨大的影響。控制在 1.5°C 內，可減少一半以上的生物多樣性損失，這正是聯合國和科學家呼籲控制升溫的主要原因。淨零碳排的核心價值在於維護全球生態系統和生物多樣性，從而保障地球和人類的未來。

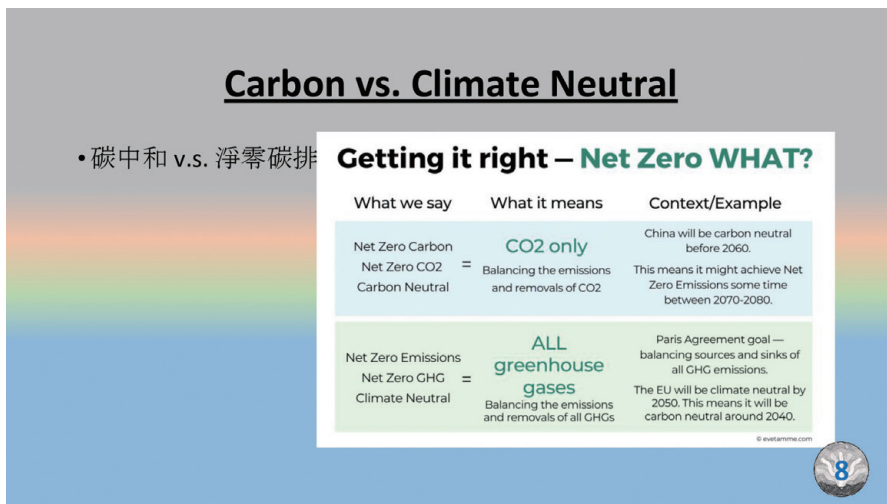
三、碳的多彩世界：氣候變遷的多元挑戰

2020 年 Zinke 的文章探討了自然界中不同種類和顏色的碳及其對全球氣候的影響，揭示了碳在全球氣候影響中的多樣面向。這些碳分為會增溫和降溫兩類。黑碳（化石燃料）、灰碳（有機質空汙）和紅碳（雪藻）會造成增溫；綠碳（森林生態系）、藍碳（沿海紅樹林、海藻等）和青碳（淡水濕地生態系）則有助於降溫（Zinke, 2020）。黑碳，即化石燃料，是氣候變遷的主要元凶，很多人誤以為天然氣比甲烷更友善，實際上它也是黑碳，嚴重影響氣候。灰碳，即有機氣溶

膠，來自生物碳的不完全燃燒（例如森林大火），會鎖住地球的熱量。紅碳來自雪藻，這些藻類在雪地生長，吸收太陽能，加速雪的融化和氣候暖化。藍碳，包括紅樹林和海草，是典型的碳吸存生態系。青碳，即淡水濕地，具有很高的碳存儲能力，但尚未被廣泛認識。最後是綠碳，如森林生態系，傳統上被視為碳吸存的重要來源。Zinke 強調生態系統的複雜性，指出並非所有藻類都對氣候變遷有益。有些情境下，藻類可能促進氣候變暖（例如紅碳）。了解不同顏色的碳及其影響，有助於更全面地應對氣候變遷挑戰。

四、氣候中和：達成全球目標的關鍵挑戰

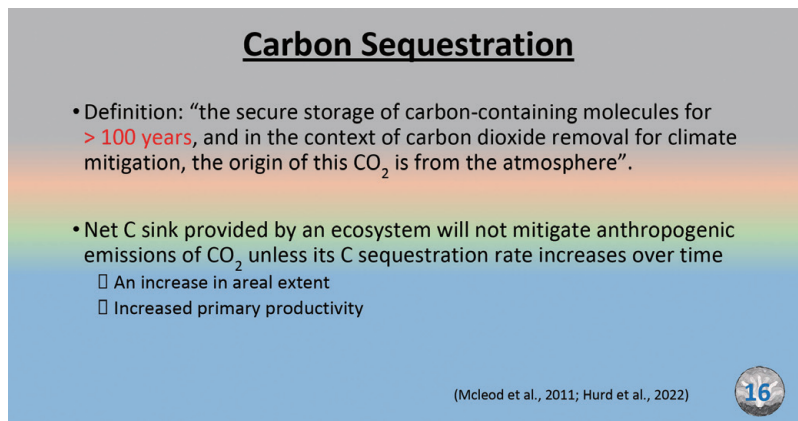
「碳中和 (Carbon Neutral)」一詞，意指二氧化碳排放與吸收達到淨零，主要在乎的是二氧化碳淨零。但若從達成守護全球生物多樣性與環境的目標來看，我們真正要做的是「氣候中和 (Climate Neutral)」，也就是減緩所有溫室氣體對地球氣候的影響（圖二）。全球暖化受到二氧化碳和其他溫室氣體的影響，包括甲烷、一氧化二氮，因此，真正的目標是要淨零所有人為排放的溫室氣體。根據聯合國的模擬數據，2051 年如果我們能夠實現二氧化碳的淨零，將有機會在 2100 年前將全球氣溫上升控制在 1.5°C 以下；然而，如果不能控制甲烷的排放，這個目標將無法實現。因此，我們需要在 2067 年之後實現所有溫室氣體的淨零，以便實現 1.5°C 的目標。時間非常緊迫，我們只剩下不到二、三十年的時間。這也是為什麼大家都對這個議題感到擔憂。



圖二：碳中和與氣候中和的差異（圖片來源：講者簡報）

五、探索海洋的藍色氣候防衛者：非典型藍碳生態系

藍碳是指沿海生態系統中的海洋植物吸收固定二氧化碳後所產生的生物碳，和長期封存於沿海生態底泥（或沉澱物）的過程，這樣的過程稱之為碳封存（Carbon Sequestration）。此外，碳封存是指生物碳（不論死活）能夠被保存**超過一百年以上的時間**（圖三）（Hurd et al., 2022）。過去，人們忽略了海藻的重要性，直到最近氣候變化日益嚴峻，科學家才開始關注海藻對藍碳的貢獻。2018年的一篇回顧文章呼籲，學界需要正視海藻在藍碳中的貢獻（Krause-Jensen et al., 2018）。借鏡綠碳的概念，綠碳是指森林吸收二氧化碳，轉換成植物的生物有機碳（簡稱生物碳），並將這些有機碳封存在植物體內和土壤中，後者土壤的保存對於有機碳更長期的封存是更為重要。類似綠碳的概念，海洋植物如紅樹林、海草、鹽草、海藻等吸收二氧化碳，轉換成生物碳後，將這些生物碳封存在植物體內或沿海底泥中。但是，由於海洋植物壽命非常短（除了鈣化殼狀珊瑚藻外），大部分海洋植物體內的生物碳保存無法符合碳封存的定義；因此，在藍碳上，沿海潮間帶和淺海底泥對於碳封存就扮演更重要的角色，它能夠將生物碳長期封存，防止其返回大氣中。因此，藍碳被認為減緩氣候暖化重要的自然解方之一。



圖三：碳封存（Carbon Sequestration）的定義（圖片來源：講者簡報）

相較於紅樹林和海草等傳統典型藍碳生態系，海藻床、藻礁等非典型藍碳生態系則相當不受學界重視，原因是學界對海藻的藍碳貢獻的研究在過去相當局限，這樣的研究局限也來自海藻對藍碳的貢獻非常難量化。二氧化碳進入海水後會溶解轉換成碳酸氫根，不像陸地植物可以直接吸收大氣的二氧化碳直接進行光合作用，海藻得吸收水中碳酸氫根，再轉換為二氧化碳進行光合作用。

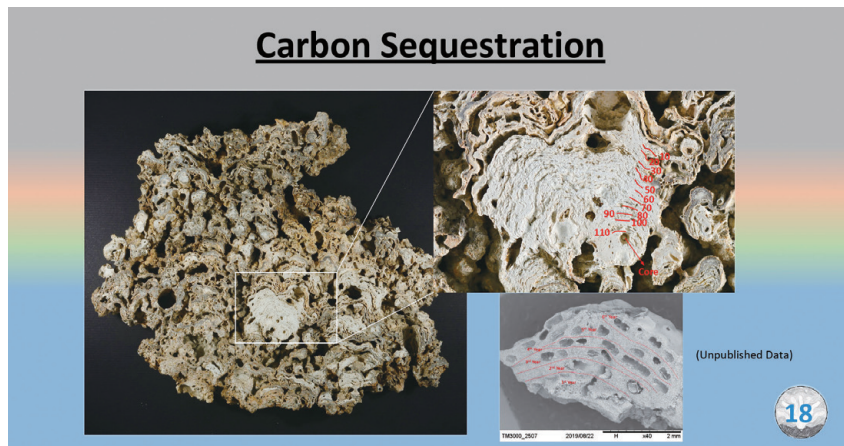
因此，評估海藻吸收和固定的二氧化碳量較評估陸地森林更難，需考量大氣和水的碳平衡，以及碳酸氫根與海藻之間的平衡，才能確切了解海藻吸收多少二氧化碳。除了上述海洋碳循環的複雜性，海洋流動使得海藻的碳貢獻可能移動到其他地方而被忽視。如果海藻沉入深海，環境的低溫和微生物活動少有助於碳長期封存。

總結來說，藍碳的定義，也就是「光合生物合成生物碳+底泥長期封存生物碳」。許多海藻生長旺盛的地區，都可以視為非典型藍碳生態系，例如桃園藻礁、彰化芳苑地區的石蓴藻華（但卻會造成蚵農農損），以及墾丁萬里桐的馬尾藻林等（圖四）。看似平凡無奇的泥灘地，如果能匯集光合生物碳的累積，也都能視為非典型藍碳生態系。

以桃園的藻礁為例，生長超過百年以上多年生的殼狀珊瑚藻（圖五），具有良好的碳封存能力。殼狀珊瑚藻能夠進行光合作用（吸碳）和鈣化作用（排碳），但因為光合作用遠大於鈣化作用，而鈣化作用產生碳酸鈣所排出的二氧化碳能



圖四：臺灣非典型藍碳生態系：桃園藻礁（右）、石蓴藻華（中）、馬尾藻林（左）
（圖片來源：講者提供）



圖五：桃園藻礁礁體中，可觀察到生長超過百年的鈣化殼狀珊瑚藻
（圖片來源：講者簡報）

促進光合作用產生氧氣，這種光合鈣化作用能力有助於殼狀珊瑚藻體內長期碳封存。此外，藻礁礁體也提供其他海藻生長，這些海藻的生物碳也能被藻礁生態底泥沉澱物封存，造就藻礁生態系良好的碳封存能力。認識並保護這些非典型藍碳生態系統，將有助守護碳的長期封存，並減緩氣候變化。

雖然藍碳生態系對於減緩氣候變化扮演很重要的角色，但這些自然系統的碳封存量遠不足以抵消化石燃料的碳排放量。儘管如此，以非典型藍碳為例，我們應該還是可以從幾個方式強化藍碳：第一、盤點非典型藍碳生態系，保護這些系統（如：桃園藻礁），而不是低估其藍碳功能及價值、隨意開發破壞；第二、針對非典型藍碳生態系進行復育，回復過往這些藍碳生態系統的面積；第三、保護沿海底泥並增加底泥上光合生物的吸碳量（提升基礎生產力）。當這些藍碳生物死亡後，生物碳將被封存在底泥中，進而實現長期的碳封存，或碳埋葬（Carbon Burial）。舉例來說，我們需要管理人為的活動，例如保護深海底泥，避免底拖網或海洋深層水開發對底泥的擾動，因為這可能間接導致更多的碳釋放，並可以嘗試在這些地區上方進行海藻養殖（但需在可行性上做好完善的評估）。

六、跨領域合作、新技術的使用與碳封存潛能的探索

在探討臺灣沿海生態系的非典型藍碳碳吸存潛能時，必須認識到這是一個極為複雜的議題，單靠單一學科無法全面掌握。以往對於藍碳的盤點工作往往簡化了對於底泥碳封存量的估算，並未充分考慮到其他藻類的生長對碳循環的影響。因此，需要跨領域的合作，包括遙測、實驗生態學、地質化學和數學等領域的專家，以確實計算藍碳生態系中的碳吸存和排放。在這方面，國外提出了「法醫式碳盤查（Forensic Carbon Accounting）」的概念，類比於法庭上的法醫工作，要對生態系中的碳循環過程進行精密的追蹤和計算（Hurd et al., 2022）。同時，我們須謹慎規劃海洋資源的利用，以免造成不當的碳排放。海藻大量養殖可能在錯誤的地點和實施策略下成為碳排放而非碳封存。

另外，擁抱新興工具也能改變我們對藍碳貢獻者的理解。例如，使用分子工具 eDNA，有助於辨識藍碳生態系中的有機碳來源貢獻者。透過此工具，研究者驚訝的發現許多沿海潮間帶封存的有機碳來源並不僅限於海草或紅樹林本身，而是涉及到更廣泛的生物類群（如：陸地植物、海藻等）（Ortega et al., 2020）。也因為這些新的資訊，讓研究者了解到藍碳生態系是一個更寬廣的定義，並不只有紅樹林、海草跟鹽草，也包含沿海地區潮間帶、泥灘、珊瑚礁區

等，只要能夠保存其他陸域或海洋地區輸入的光合有機碳，都能夠稱作是藍碳生態系（也就是非典型藍碳生態系）(James et al., 2024)。這些新興工具的使用加深了我們對沿海生態系碳循環的理解，也增廣了我們對於藍碳生態系的定義。

七、臺灣藍碳研究展望與原民傳統領域

過往，學界認定藍碳只有紅樹林、海草跟鹽草為藍碳生態系，但現在逐漸認知到其他非典型藍碳生態的存在。也因此，沿海非典型藍碳生態系的了解在國外也才開始起步，臺灣相關研究就更加缺乏。體認到底泥是藍碳最重要的一環，韓國學界就針對全國沿海潮間帶底泥（或沉澱物）的生物碳存量進行盤查，了解哪些海岸區域具有較高的碳封存潛能。因此，仿效韓國做法，臺灣需要更多的科學基礎資料來了解臺灣沿海不同地區非典型藍碳生態系的碳封存潛能。這樣的基礎資料對於臺灣未來的藍碳保護和復育計畫非常重要，了解哪裡有藍碳，才能真正保護跟復育藍碳。例如，被輕忽犧牲的藻礁或泥灘的碳封存，或是臺灣某處的已消失的潮間帶但卻可能是海洋沿岸流匯聚具高度碳匯（Carbon Sink）的地區。

原住民傳統領域中，東部地區的阿美族人對於海藻有一套祖傳的利用方式，如何結合原住民傳統生態知識，將會是守護藍碳資源的一種方式。

參考文獻

- Hurd CL, Law CS, Bach LT, Britton D, Hovenden M, Paine ER, Raven JA. (2022). Forensic carbon accounting: assessing the role of seaweeds for carbon sequestration. *Journal of Phycology*, 58: 347-363.
- James K, Macreadie PI, Burdett HL, Davies I, Kamenos NA. (2024). It's time to broaden what we consider a 'blue carbon ecosystem'. *Global Change Biology*, 30: e17261.
- Krause-Jensen D, Lavery P, Serrano O, Marbà N, Masque P, Duarte CM. (2018). Sequestration of macroalgal carbon: the elephant in the Blue Carbon room. *Biology Letters*, 14: 20180236.
- Lewis SL, Maslin MA. (2015). Defining the Anthropocene. *Nature*, 519: 171-180.
- Ortega A, Geraldi NR, Duarte CM. (2020). Environmental DNA identifies marine macrophyte contributions to Blue Carbon sediments. *Limnology and Oceanography*, 65: 3139-3149.
- Warren R, Price J, Graham E, Forstenhaeusler N, VanDerWal J. (2018). The projected effect on insects, vertebrates, and plants of limiting global warming to 1.5°C rather than 2°C. *Science*, 360: 791-795.
- Zinke L. (2020). The colours of carbon. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1: 141.