

朝向淨零排放之森林負碳排技術

- ◎林業試驗所主任秘書室・林俊成(ljc@tfri.gov.tw)
- ◎林業試驗所森林經營組・王培蓉
- ◎林業試驗所林業經濟組・徐韻茹

淨零排放為國際社會共同努力目標

人類活動所導致的地球暖化，已高出前工業革命水準約1.0°C，可能的範圍為0.8°C至1.2°C之間。若以目前暖化速度持續增加，可能在2030年到2052年之間，地球暖化便會達到1.5°C(環境資訊中心，2018)。在地球暖化的情況下，自然和人類系統相關之氣候風險亦會提高。聯合國政府間氣候變遷委員會(IPCC)最新報告指出，「2°C」目標已不符需求，要把工業革命以來的溫度上升更積極控制在1.5°C，依此12年內，全球每年碳排必須要減為2017年的一半。此一目標雖遠大，但各國減碳步伐緩慢。依國際科學機構「全球碳計畫」(Global Carbon Project)公布報告指出，2018年全球二氧化碳排放量將比2017年增加2.7%，達到371億公噸，這份報告顯示，各國政府幾乎達不到2015年巴黎氣候協定的重要目標(註：巴黎協定(Paris Agreement)呼籲將全球溫度的上升幅度限制在低於工業化前的2°C以下，並希望將上升幅度限制在1.5°C以下。)

所謂「淨零排放」依據2018年IPCC所發表《全球變暖1.5°C特別報告》的定義：即當一個國家(組織)一年內所有溫室氣體排放量與溫室氣體清除量達到平衡時，就是淨零溫室氣體排放。迄今(2021年3月底)全球已有歐盟等128個國家宣示或規劃淨零排放(Net Zero Emissions)目標，丹麥、法國、紐西蘭、瑞典和英國等國已將淨零排放目標納入立法；

蘇利南和不丹已經實現二氧化碳負排放；智利、歐盟、斐濟和西班牙已提出針對淨零排放目標的立法提案。此外，15個地方、398個城市、786家企業和16位投資者也表示他們正努力實現淨零排放目標。從以上各國、團體與個人行動顯示，現有氣候行動計畫不足以減少人類社會、人類自身以及自然系統面臨的氣候風險(World Bank，2020)。

在臺灣，蔡英文總統在今(2021)年4月22日「世界地球日」時，明確宣示「2050年淨零轉型」是全世界的目標，也是臺灣的國家目標。行政院蘇貞昌院長也於行政院國家永續發展委員會會議中，要求環保署積極辦理「溫室氣體減量及管理法」修法作業，並納入「2050年淨零排放」目標。農委會陳吉仲主委宣布農業部門要在2050年達成淨零碳排放，並於2021年9月成立農業淨零專責辦公室，加強政策落實與對外溝通，將氣候變遷調適與淨零排放策略列入重點施政項目，滾動檢討農業部門因應氣候變遷的各項措施。至於農業部門的淨零排放策略，農委會要從「減排」、「增匯」、「農業綠能」三大方向著手。其中碳匯(Carbon Sink)機制更可望打造出「負碳」農業，需要大量討論來擬訂具體措施。為此，本文特分析國際森林負碳排技術內涵，以供未來研究與施政措施之方向。

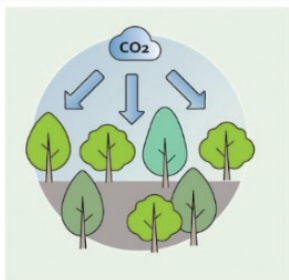
負碳排技術對溫室氣體減量的重要性

將全球暖化控制在《巴黎協定》限制範

負碳排可行的方法

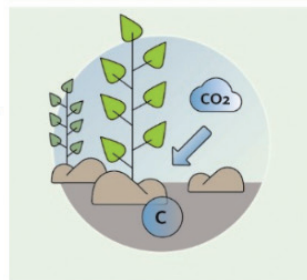
植樹造林/重新造林、森林管理、木材利用

樹木在生長過程中會從空氣中去除二氧化碳。二氧化碳可以儲存在樹木、土壤和木製品中



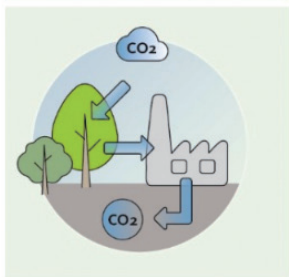
土壤管理 (包含生物碳)

將碳引入土壤，例如透過作物殘留物或植物碳，可以在土壤中積累碳。



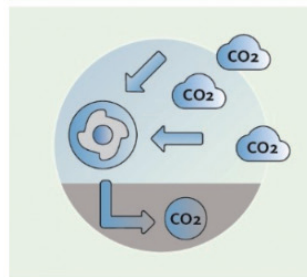
BECCS

植物將二氧化碳轉化為生物質，提供能量。二氧化碳在地下進行捕集



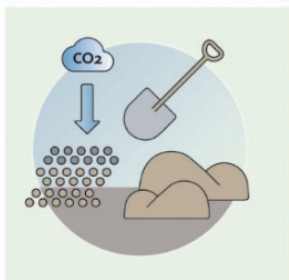
DACCS

透過化學過程從環境空氣中提取二氧化碳並儲存於地下



風化作用

粉碎的礦物以化學方式結合二氧化碳，然後可以儲存在產品、土壤或海洋中



海洋施肥

將鐵或其他營養素添加到海洋中以增加藻類對二氧化碳的吸收

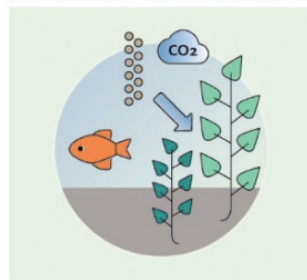


圖1 有多種方法可以從大氣中去除CO₂(資料來源：FOEN)

圍內的氣候情景，依賴於可以從空氣中大規模去除二氧化碳(carbon dioxide, CO₂)的技術應用(EASAC, 2018)。歐盟科學顧問委員會(European Academies Science Advisory Council, EASAC)報告指出，考量減緩氣候變化所需的減碳規模，從空氣中吸取CO₂的方法，不是冒著破壞環境的風險，就是非常昂貴(EASAC, 2018)。根據IPCC計算，2050年後，每年必須抵換和儲存大約120億噸碳，相當於今日全球排放量的1/3左右。CO₂減少速度太慢，不足以迅速達到零排放，必須靠「負碳排技術(negative emission technologies, NETs)」來解決(環境資訊中心，2018b)，因此NETs已成為氣候科學和政策熱烈討論的焦點。

NETs也稱為「二氧化碳去除(carbon

dioxide removal, CDR)」，意指從地球大氣中永久去除溫室氣體CO₂，從而干擾地球的碳循環，直接解決氣候變化的根本原因。

目前負碳排技術主要有生物能源與碳捕集和儲存(Bioenergy with carbon capture and storage, BECCS)和直接空氣碳捕獲、使用和儲存(direct air carbon capture, use and storage, DACCS)、植樹造林/重新造林(Afforestation/Reforestation, AR)、森林管理、木材利用、土壤管理、風化作用(enhanced weathering)和海洋施肥，如圖1所示。其中BECCS和DACCS屬於技術方案，而AR、森林管理、木材利用、土壤管理、風化作用和海洋施肥則屬於基於自然的解決方案(Nature-based Solutions, NBS)。

2018年，國際氣候變化專門委員會

(International Panel on Climate Change, IPCC) 為因應全球氣溫上升1.5°C提出了四個示範模型(IPCC, 2018)如圖2，其中路徑1(P1)和路徑4(P4)均依賴NETs。

路徑1(P1)：仰賴社會、商業和技術創新，且預期至2050年能源需求降低、生活水平提高，尤其是在南半球。縮小規模的能源系統可以實現能源供應的快速脫碳。植樹造林是唯一考慮的CDR選項；不使用CCS與BECCS等技術方案。

路徑2(P2)：廣泛關注永續性的情景，包括能源強度、人類發展、經濟融合和國際合作，以及轉向永續和健康的消費模式、低碳技術創新和管理良好的土地系統，但社會對BECCS的接受度有限。

路徑3(P3)：中間情景，其中社會和技術發展遵循歷史模式。減排主要透過改變能源和產品的生產方式來實現，在小幅程度上透過減少需求來實現。

路徑4(P4)：一種資源和能源密集型情景，其中經濟增長和全球化導致廣泛採用溫室氣體密集型生活方式，包括對運輸燃料和畜牧產品的高需求。減排主要透過BECCS技術實現，充分利用CDR。

農業、林業和其他土地利用約佔全球淨溫室氣體(global greenhouse gases, GHG)的24%(Roe等人, 2017)。技術解決方案是值得長期關注的方案，至2050年可能會產生6250億美元的額外年收入(Inevitable Policy Response, 2020)。在所有NETs中，BECCS在與巴黎協議兼容的綜合評估模型(integrated assessment models, IAMs)路徑中的部署規模相當大，在IPCC AR5審查的116種將全球暖化限制在2°C的情景中，有101種涉及某種形式透過BECCS或AR的負碳排(Brack & King, 2021)。基於自然的解決方案是生態系統的養護、管理和恢復干預措施，可應對各種各樣的社會挑戰，同時也有利於生物多樣性和人類福祉。最近，它們已成為減少溫室氣體排放和增強對氣候變化影響的適應力的重要工具。

眾所周知，森林從大氣層吸收CO₂並將其儲存在不同的儲存庫中，稱為碳庫(carbon pools)，其中包括樹木、根系、灌木叢、森林地表和土壤，活樹的碳密度最高，其次是土壤和林地，收穫的木製品和垃圾填埋場也儲存碳(Durkay & Schultz, 2016)，因此，森林和林產品在減緩和調適中有關鍵作用，這不僅是因為它們作為碳匯和排放源的雙重作用，還因為有可

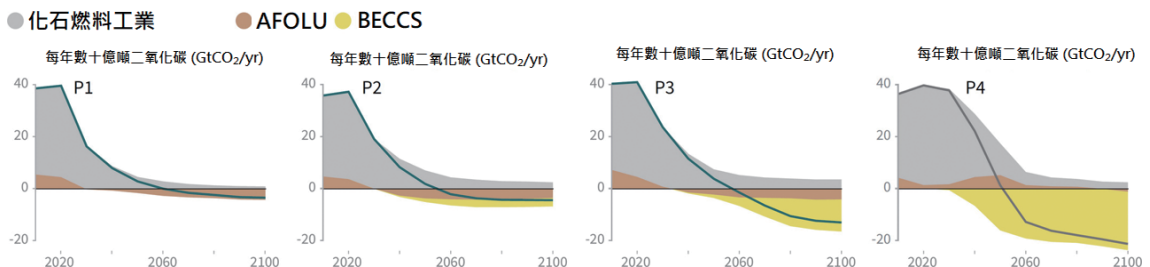


圖2 IPCC應對全球氣溫上升1.5°C提出之四個路徑(資料來源：IPCC, 2018)

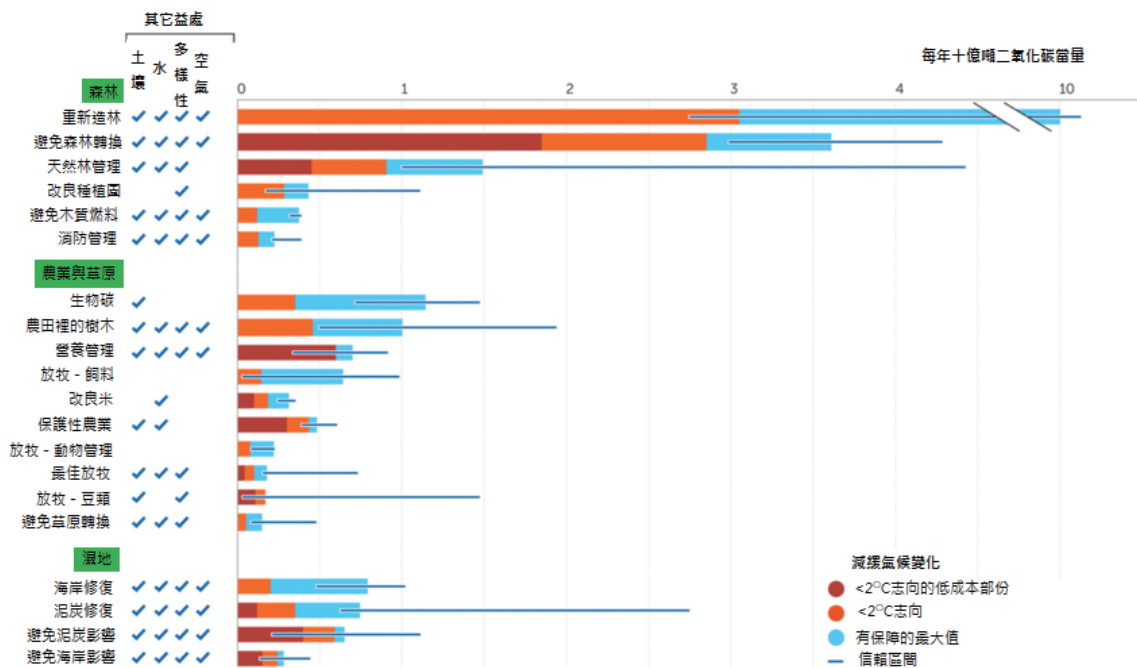


圖3 以2030年為參考年的最大氣候減緩潛力的保障措施(資料來源: Brack & King, 2021)

能更廣泛地使用木產品來替代強度更高的化石燃料產品(FAO, 2016; TNC, 2019), 因此NETs與林業息息相關。鑑於IAM情景中主要包括BECCS(IPCC, 2018), 而AR及生物炭為常見之與林業相關NETs方法, 故下文針對BECCS、AR和生物炭這三種負碳排技術進行比較。

森林相關負碳排技術內涵

一、基於技術方案的BECCS

BECCS 涉及特定的能源作物或增加森林生物量(AR), 它們取代化石燃料作為熱能來源, 並捕獲產生和將其存放在地下(EASAC, 2018)。BECCS的四大類生物能源原料包括木材、能源作物、農業殘留物和有機廢物, 以及幾種不同的碳捕獲技術, 其中專門用於能源生產的能源作物包括快速生長的樹木(如柳樹、楊樹和桉樹)和草本作物, 如芒草(elephant grass)、柳枝稷(Panicum virgatum)或能源甘蔗(基因改造甘蔗)(Brack & King, 2021)。且目前

用於供熱和發電的主要生物質原料是木材, 但在某些地方也使用城市廢棄物、農業殘留物、棕櫚油和其他植物油。木材比大多數其他原料的能量密度更高, 而且往往更容易收集、加工、儲存和運輸, 通常以木屑或顆粒形式存在(Brack & King, 2021), 由此可見, 林業對於BECCS負碳排技術的重要性。

二、基於NBS的AR與生物炭

(一) AR

森林和樹木是水、能源和碳循環中的主要調節器, 並為碳儲存、冷卻陸地表面和分配水資源奠定了基礎(EASAC, 2018)。有研究顯示專注於AR的NBS是近期最可行的機會, 至2050年可產生8000億美元的年收入, 資產價值遠超過1.2萬億美元, 超過當前石油和天然氣巨頭的資本化市場(Inevitable Policy Response, 2020)。植樹造林和再造林透過植物生長吸收CO₂, 其可讓自然森林擴張、種植新樹木和恢復伐砍或退化的森林, 可以透過生

表1 三種NETs技術的潛力比較

| | BECCS | AR | 生物碳 |
|---|---|-------------------------|--------------------------------|
| 封存潛力 | | | |
| 至2050年的潛在封存率 (GtCO ₂ y ⁻¹) | 0.5 – 5 | 0.5 – 3.6 | 0.5 – 2 |
| 至2100年的潛在利率 (GtCO ₂ y ⁻¹) | 1 – 20+ | 0.5 – 7 | 1 – 35 |
| 至2100年的累積潛力 (GtCO ₂) | 100 – 1170 | 80 – 260 | 78 - 477 |
| 至2100年每年在 2°C 情景下需要清除 | 12 | 4 | – |
| 飽和度和持久度 | 存儲的長期治理；生物能源生產和碳封存率的限制 | 森林飽和度；容易受到干擾；執行後必須的森林管理 | 平均停留時間：數十年到數百年，取決於土壤類型、管理和環境條件 |
| 成本 (\$/tCO ₂)* | | | |
| 至2050年 | 100 – 200 | 5 – 50 | 90 – 120 |
| 資源需求和影響 (2100年) | | | |
| 所需土地總數(Mha) | 380 – 700 | 320 | – |
| 土地需求(Mha GtCO ₂ ⁻¹) | 31 – 58 | 80 | 16 – 100 |
| 所需總水量(km ³ y ⁻¹) | 720 | 370 | – |
| 水需求(km ³ GtCO ₂ ⁻¹) | 60 | 92 | 0 |
| 對營養素的影響 (Mt N, P, K y ⁻¹) | 多變的 | 0.5 | N : 8.2 P : 2.7 K : 19.1 |
| 副作用(尺度相關) | | | |
| 空氣污染 | 不良變化 | 無明顯變化 | 無明顯變化 |
| 反照率 | 多變的，取決於生物燃料的來源(作物的反照率高於森林)和土地管理(例如作物免耕) | 不良變化(或在非負的情況下減少溫室氣體收益) | 無明顯變化 |
| 生物多樣性 | 不良變化 | 不良變化 | 無明顯變化 |
| 生態系統變化 | 無明顯變化 | 無明顯變化 | 無明顯變化 |
| 糧食安全 | 不良變化 | 不良變化 | 不良變化 |
| 地面/水污染 | 無明顯變化 | 無明顯變化 | 無明顯變化 |
| 土壤品質 | 無明顯變化 | 合適的變化 | 合適的變化 |
| 採礦和提取 | 無明顯變化 | 無明顯變化 | 無明顯變化 |
| 追蹤溫室氣體 | 不良變化 | 無明顯變化 | 合適的變化 |

資料來源：Brack & King, 2021

*成本資料來源：Minx 等人，2018

態復舊或作為永續林業營運的一部分來增加碳儲量(Brack & King, 2021)。如果土地面積足夠(3.2億至9.7億公頃或當前全球可耕地面積的20-60%)，全球造林和再造林潛力的容量估計

為1.1-3.3 GtC/年(EASAC, 2018)。

(二) 生物碳

其為類似於木炭的植物副產品，可以

由木材廢料、農作物殘留物等製成。在沒有氧氣的情況下緩慢加熱植被(熱解)會產生富含碳的生物炭，可以作為肥料放置在土壤中，並保存多年。生物炭如果被掩埋，可以成為淨碳匯，增加作物產量並增加土壤肥力(EASAC, 2018)。生物炭的穩定性取決於原料的類型和過程，木材比草和肥料更穩定，且生物炭可透過減少養分損失和通過其保水能力提高農業生產力(特別是在低肥力和退化的土壤中)的潛力，如果適用於所有可以永續收穫的全球生物質資源的話，其碳清除潛力高達 1.8 Gt CO₂ /年(0.5 GtC)(EASAC, 2018)。

最近研究顯示，隨著糧食安全、纖維安全和生物多樣性保護措施到位，至2030年，NBS有可能封存高達 23.8 GtCO₂e yr⁻¹(Brack & King, 2021)。其中大約一半(11.3 GtCO₂e yr⁻¹)具有成本效益，碳價格在2030年達到或低於 100 tCO₂e⁻¹ yr⁻¹美元，其中基於森林的NBS(包括重新造林和避免森林轉化)提供三分之二以上具有成本效益的選擇。

圖3橙色部分代表具有成本效益的減緩程度，假設全球目標是將升溫控制在<2°C(假設每年的碳價格等於或低於每噸二氧化碳當量 100美元 - 將升溫限制在 2°C 以下的最大減排成本)。暗紅色部分表示<2°C程度低成本的部分(每年每噸二氧化碳當量<10美元 - 與現有碳價格相近)。與每條途徑相關的生態系統服務效益由生物多樣性、水(過濾和防洪)、土壤(肥沃)和空氣(過濾)的刻度線表示。

許多NBS佔有極大優勢，特別是考慮到需要在未來幾十年內開發的額外碳封存規模，它們可以在短期內以低成本部署，並且可以透過已經存在的方法實現，而不是過

於依賴未經證實的技術。於2019-2020年間已宣布淨零目標的 42 家公司中，有26家計劃使用 NETs，這26家公司中有24家參考了 NBS(Inevitable Policy Response, 2020)。

森林相關負碳排技術比較

Brack & King(2021)的研究指出，因 BECCS 依賴定期供應森林原料，需要廣泛種植樹木並定期收穫和清理人工林，在收穫過程中每10-20年將儲存的碳釋放回大氣中，相較於可以固碳數十年的天然林，人工林所含的碳幾乎不比把土地清理來植林的碳更多；這意味著在可能的情況下停止森林伐砍和促進天然森林恢復可能是更好的碳清除選擇。NETs的目標是將碳永久鎖定在地下，而不是讓CO₂重新進入大氣，因此這種長期封存需要高度的生物炭穩定性(EASAC, 2018)。使用生物質生產生物炭顯然與使用生物能源或 BECCS 競爭，其中哪一個在減緩氣候變化方面更有效，很大程度上取決於生物炭提高作物產量和對淨土壤溫室氣體排放產生有利影響的程度(EASAC, 2018)。表1總結了BECCS、AR和生物炭方法的封存和資源利用潛力。CDR對有效減緩政策制定的核心挑戰不僅是規範和激勵CDR方法，以最大限度地減少環境和社會外部性，而且要以增強不同方法之間潛在協同作用的方式進行(Brack & King, 2021)。

森林相關負碳排技術面臨的瓶頸

能長期或永久從大氣中去除CO₂是實現負碳排的關鍵。然而，目前所有NETs都有一個共同特徵，即它們是可逆的，並且可以迅速開始釋放CO₂(FOEN網頁資料)。因此，必須

在措施的監管設計中考慮到這一點，以確保對整體氣候產生積極的影響。在幾乎所有與《巴黎協定》一致的氣候情景中，BECCS領先所有NETs，因為它能透過能源生產和CO₂封存提供雙倍收益(Inevitable Policy Response, 2020)，且BECCS的技術在示範和商業上已得到驗證，亦比許多其他 NETs 更適合量化建模(quantitative modelling)(Brack & King, 2021)，儘管Minx等人(2018)認為BECCS的高成本為其至今尚未廣範實行的原因之一。但氣候情景如過於依賴BECCS將會是一個問題，如表1所示，BECCS的大規模部署可能會在水資源和土地可用性方面產生問題，對環境和社會目標，例如糧食生產和提供生態系統服務和生物多樣性有確切的影響(Brack & King, 2021)。2018年的一項研究得出的結論是，能源產出具有很強的個案特異性，能源投資回報在0.5(即消耗的能源多於生產的能源)到5.7(大致與太陽能光伏solar PV相當)之間變化。提高發電廠效率在減少能源損失的同時，也減少了碳封存，從而在碳捕集和能源輸出之間實現了有效的權衡。一般來說，生物燃料發酵過程捕集更少的碳但產生更多的能量，因此，如果BECCS在未來的氣候減緩路徑中發揮作用，則最好將其主要視為碳捕集的手段而不是生產能源(Brack & King, 2021)。

基於NBS的AR和生物碳目前都缺乏廣泛採用的激勵措施(Minx等人, 2018)。AR方面，空中和陸上施用氮肥以促進森林生長，使特定生態系統中的所有樹木、植物和野生動物都可能獲得養分(Sullivan & Sullivan, 2018)。但氮肥的使用可能會增加一氧化二氮的排放量，而一氧化二氮具有很高的全球暖化潛力，

比CO₂高300倍。因此，可能會導致AR的有益影響減少75%，甚至使情況變得更糟，一氧化二氮的負面影響將超過CO₂減少的有益影響310%(EASAC, 2018)。重新種植後的樹木不會立即從大氣中吸收淨碳，並且由於種植造成的干擾可能會釋放土壤碳，這可能需要數年甚至數十年的時間來抵消(EASAC, 2018 & Brack & King, 2021)。AR的淨零效果亦不穩定，因為有可能為政治因素或非法伐砍而影響。至於生物碳方面，而在某些情況下，生物炭特性與土壤不匹配且氮可能被固定化，可能對土壤肥力產生負面影響(EASAC, 2018)。而生物碳亦面臨生物質原料可用性的問題(Minx等人, 2018)。

結語

為了達到全球控溫目標，國際社會均積極投入負碳排技術，不同NETs系統和技術的可用性、成本和性能(以及這些將如何隨著系統成熟而發展)、其整合的潛力與需求，以及負擔和收益仍然需要更深入地了解(Brack & King, 2021)。所有CDR方法的共同點是，必須在足夠短的時間內實現有意義的碳封存和儲存量，以便在考慮到整個生命週期的排放平衡後，有助於減少排放和避免超調(Overshoot)(Brack & King, 2021)。雖然這些技術在從大氣中去除碳方面提供的現實潛力有限，而且沒有達到某些氣候情景中設定的規模，即2050年後每年高達數千兆噸(Brack & King, 2021)，在未來幾十年中，無論是基於技術的還是基於自然的方法，都必須要切實履行，並取得一定程度的成功，否則要達到《巴黎協定》在2050年實現CO₂淨零排放的目標將不啻是緣木求魚、漸行漸遠了。🌱