

IPCC 第二工作分組之第四次評估報告：影響、調適與脆弱性

第四章 生態系特質、所提供的物資和服務

臺灣大學生物及生態學與演化生物學研究所 李玲玲

摘要

自上個世紀以來，全球各類生態系普遍受到氣候變遷、各類擾動（洪水、乾旱、野火、蟲害、海洋酸化等）和人類導致的環境變化（土地利用、污染、過度利用資源、引進外來入侵種等）的衝擊。如果這些衝擊在本世紀繼續惡化，超過生態系的耐受度（自然因應環境變化的調適能力），將會造成生物多樣性的流失，生態系組成的改變，繼而影響生態系的功能以及提供人類的各項服務。

儘管目前的研究成果與模式預測仍無法準確的預測未來氣候變遷與各類生態系變化的程度，但整合既有資料讓我們更瞭解氣候變遷對各類生態系的衝擊，以及對生態系組成、功能與服務可能的影響。這些衝擊與影響主要包括：

陸域生態系中一些主要的碳庫（carbon stock）極易受到氣候變遷與土地利用的衝擊，如果情況不變或惡化，這些碳庫原本碳吸存的能力可能在 2100 年前達到飽和，繼而轉而成為碳源，包括海洋原本緩衝大氣中溫室氣體增加的能力也會達到飽和。

當地球平均溫度上升超過 2-3°C 時，20-30% 已被評估的動植物物種，滅絕的危機會顯著升高，而目前的保育措施無法因應這種可能的變化。

當地球平均溫度上升超過 2-3°C 時，25-40% 陸域生態系的結構與功能將有顯著的改變。其中非洲和南半球的旱地可能因氣候變化而受惠，但中高緯度和熱帶的森林地

則會受到負面的衝擊。

當地球平均溫度上升超過 2-3°C，伴隨著大氣中 CO₂濃度增高時，海洋和其他水域生態系的結構與功能將有顯著的改變。氣候變化與海洋酸化將衝擊浮游和底棲生物，其中對南半球海域和冷水珊瑚衝擊最大。海冰的快速消失更影響許多依靠海冰為棲地的生物。熱帶與亞熱帶內陸水域的水質、生物多樣性、生態系提供的物資與服務也會受到影響。

不同的生態系和生物物種對於氣候變遷的反應不盡相同，其中受氣候變遷影響威脅較大的生態系包括珊瑚礁、海冰、高緯度生態系（北方森林）、山區生態系和地中海氣候區；威脅較小的則草原、沙漠。但真正的影響程度仍有其不確定性。

一、前言

生態系是指一個地區所有生物和其非生物環境交互作用的總合。各類生態系提供人類各樣的物資與服務，包括：

1. 支援服務 (supporting services) :

例如初級和次級生產力、生物多樣性、各類的物品、原料以及支援其他服務的基礎。

2. 供應服務 (provisioning services) :

例如產品、食物、纖維、藥品和化粧品等。

3. 調節服務 (regulating services) :

例如：(1) 碳吸存；(2) 調節氣候、供水；

- (3) 對抗自然灾害 (如洪水、山崩、落石等)；(4) 淨化空氣、水源；(5) 調控病蟲害等。
4. 文化服務 (cultural services)：
滿足人類精神層面、美學的需求。

這些服務對人類的生存與發展，至為重要。然而自上個世紀以來，日益加劇的氣候變遷、各類擾動 (洪水、乾旱、野火、蟲害、海洋酸化) 和人類導致的環境變化 (土地利用、污染、過度利用資源、引進外來入侵種等) 對全球各類生態系都產生嚴重的衝擊。在可預見的未來，這些衝擊的整體效應可能繼續擴大，甚至超過生態系原本可以調適的耐受能力，而造成生物多樣性的流失，生態系組成的改變，繼而影響生態系的功能以及提供人類的各項服務。

本章的內容是彙整自 IPCC 第三次評估報告 (Third Assessment Report of IPCC, TAR) 以來的大量科學文獻，針對生地化循環和各類生態系 (包括沙漠、草原疏林、地中海型、森林地、苔原極地、山區、溼地和內陸水域、海洋與淺海等) 的特質、所提供的物資和服務，所面臨氣候變遷、各類擾動和人類導致環境變化的衝擊，提出綜整的報告。由於現有研究成果與模式在預測未來氣候變遷與各類生態系變化時仍有其不確定性，作者在結尾特別指出導致不確定性的原因，並據以建議未來優先的研究課題。

二、整體趨勢

本章在預測未來氣候變遷對物種與生態系衝擊時，主要是結合氣候包絡模式 (climate envelope modeling) 和全球植被動態模式 (dynamic global vegetation modeling, DGVMs) 模擬的結果。氣候包絡模式又稱為生態區位 (niche-based) 或生物氣候 (bio-

climate) 模式，是以個別物種的分布資料結合氣候資料為基礎，可以提供氣候變化下各物種分布的改變等量化的資料，但因尚未納入族群變動或遷移的資料，所以無法做區域層級或大範圍變遷的預測。DGVMs 則是以少數幾類對環境的耐受度廣，分布範圍較大的優勢植物功能群的分布與氣候變化的關係作為模式的基礎，所以適於做大範圍變遷的預測，但無法掌握個別物種或對環境變化較敏感物種的反應。由於兩類模式各有其優點與限制，再加上氣候模式預測的不準度，以及各類擾動和人類導致環境變化幅度的不確定性，因此在預測未來氣候變遷對物種與生態系衝擊時，兩類模式也有無法預測或是預測的趨勢相反的情形。相對的，當兩類模式預測相同的狀況，則可預期其發生的機率也相對較高。

整體而言，生態系對日益加劇的外在壓力的反應是非線性的，許多生態系開始的反應並不明顯，但是當壓力超過閥值後反應就會相當劇烈，甚至可能導致生態系的崩解。

在碳吸存方面，一些主要的碳庫極可能受到氣候變遷與土地利用的衝擊，原本碳吸存的能力可能達到飽和，繼而轉而成爲釋放碳的碳源。

植被方面，高緯度的北方森林及北極苔原會因暖化、生長季延長而加速生長，木本植物會向苔原擴張，但森林的南界與草原交接處會因乾旱、蟲害、野火及幼苗活存率下降而退縮。中、低緯度森林變化不確定，因為不同模式所預測氣候變異程度，特別是降雨的結果不同，所以推測植被變化的結果也不一致。預測一致的是在各緯度落葉樹林會擴張，取代部分的常綠樹林，亞馬遜流域的植被也會改變，但變化的趨勢受降雨影響很大。

遷移物種受氣候變遷的威脅較大，儘管牠們的活動力強，可以隨氣候變化移動到氣候條件適合的地區，但因為牠們同時需要良好的繁殖棲地與渡冬棲地，若新棲地的食物資源，開花結實的物候不能配合，牠們仍有存活的問題。

更重要的是土地利用的改變，造成棲地破壞、切割、污染，對生物多樣性與生態系衝擊更大。許多全球尺度的研究都顯示，2050年以前，土地利用變化是造成陸域生物多樣性損失的主要原因，氣候變遷的影響只在人類較少活動的地區較為明顯，例如苔原、北方針葉林、沙漠、草原等。低緯度地區目前豐富的生物多樣性極有可能因土地利用的變化繼續損失。相對的，高緯度地區可能因暖化而有更多的物種移居至此，但未來包括耕作活動在內的土地利用也可能增加，應及早規劃以減輕對生物多樣性的衝擊。

三、預測的不確定性

關於預測氣候變遷對生態系的衝擊，有下列幾項主要的不確定性：

1. 目前有關生態系與氣候系統交互作用的資料代表性不足，且影響全球變遷的互動因子多而複雜。
2. 氣候系統受到主要生物迴饋的作用不明，尤其是透過各生態系土壤所釋放的微量氣體，和濕地、泥地、永凍土、苔原富冰黃土(yedoma)所釋放甲烷的狀況。
3. 在現有 DGVMs 中無法整合不同物種的功能，以及預期物種遷移反應會立即發生的假設，造成預測的偏差。
4. 各種擾動狀況（特別是火、昆蟲、土地利用）對生物回應大氣、生態結構、功能、生物多樣性、生態系服務的總合影響不明。

5. CO_2 施肥作用對陸域生物區系及其組成影響的程度不確定。
6. 氣候模式預測個別物種對氣候變遷反應，及估計物種滅絕危機的限制。
7. 外來入侵種同時對生物多樣性及生態系功能的雙重影響。
8. 海洋表層 CO_2 增加及 pH 值下降對海洋生產力、生物多樣性、生地化學和生態系功能的影響。
9. 氣候變遷和人類使用改變生態系以及其他全球環境變遷驅動力交互作用的衝擊。

四、優先研究

為降低上述不確定性，IPCC 建議應優先進行的研究包括：

1. 確認高緯度地區永凍土—土壤—植被交互作用的耐受度，及其可能迴饋影響生物圈微量氣體組成的潛力。
2. 利用多種獨立發展的 DGVMs 和地球系統模式，發展模擬生物相與其他地理環境交互作用更有力的模式，以降低評估生態系碳吸收潛力耐受度的不確定性，包括合理估計時間差和耐受閥值。
3. 加強降雨和水源狀況的預測，尤其強調植被與大氣的交互作用，包括北半球成熟林、熱帶森林、乾燥和半乾旱草原疏林，以及 CO_2 施肥作用。
4. 改善對擾動，包括災變事件（乾旱、火、昆蟲大發生、疾病、洪水、風災）的頻度與強度，外來種入侵、污染等，如何影響生態系對氣候變遷與污染反應的瞭解。
5. 發展大空間尺度遙測與長期田野研究的整合，以合理尺度掌握生態系統的交互作用。
6. 研究大氣 CO_2 增加對海洋酸化，以及暖

化對珊瑚和其他海洋系統的衝擊。

7. 藉由檢驗模式預測與實際觀察結果來驗證以個別物種為基礎的氣候包絡模式。
8. 在人類福祉的前提下，提昇對生物多樣性與生態系服務耐受度的瞭解。
9. 確認哪些主要環境因子會影響決定生態系功能與服務的結構，並設法評估其經濟衝擊。
10. 整合耐受度分析，以了解在土地利用改變與氣候變遷壓力下，如何進行適應性管理，以維護生物多樣性和生態系服務的功能。

五、因應策略

由於各類生態系極可能持續受到氣候變遷、各類擾動和人類導致的環境變化的衝擊，除被動地監測生態系的變化，生態系經營者可以更積極地提昇生態系的耐受度，雖

然這樣做僅對較低程度氣候變遷 ($\leq 2\text{--}3^\circ\text{C}$) 下的生態系有幫助。基本的因應策略就是「事先防範原則 (precautionary principle)」，亦即主動減少對生態系的負面衝擊，包括棲地破壞或零碎化、污染、引入外來入侵種、過度利用、優養化、沙漠化、酸化等。

擴大保護區系統，及考量氣候變遷與擾動可能影響長期動植物分布的狀況規劃保護區系統，並確保遺傳多樣性各異的族群間的聯結。同時有效管理保護區外的區域，提供誘因與廣告，協助私部門參與資源永續利用，並訂定國家政策的策略，協調公私部門擴大地景尺度的生態聯結。

此外，利用管制性的引火和其他技術移除過多的燃料可減輕火災的衝擊，水源的維護與調節；棲地復育與創造新的棲地，協助物種遷移與交流等，都是可能且在發展中的作法，但這些作法的實際價值與成本效益仍需改進與評估。