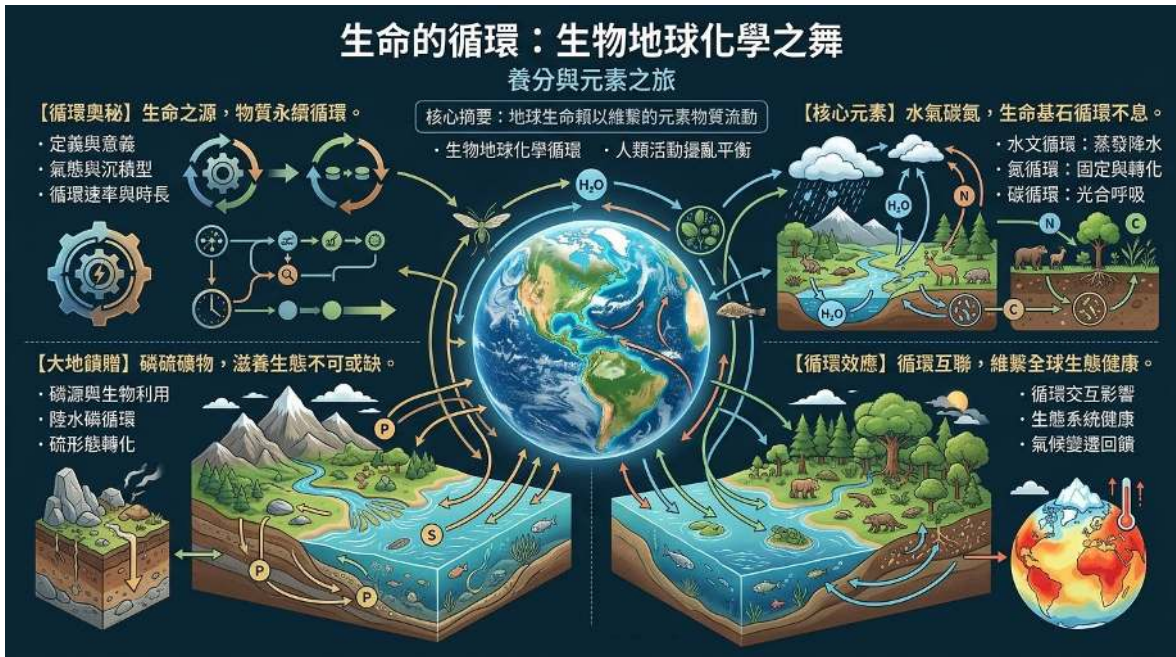


環境生態學書 - 永續社

第5章 生物地球化學循環



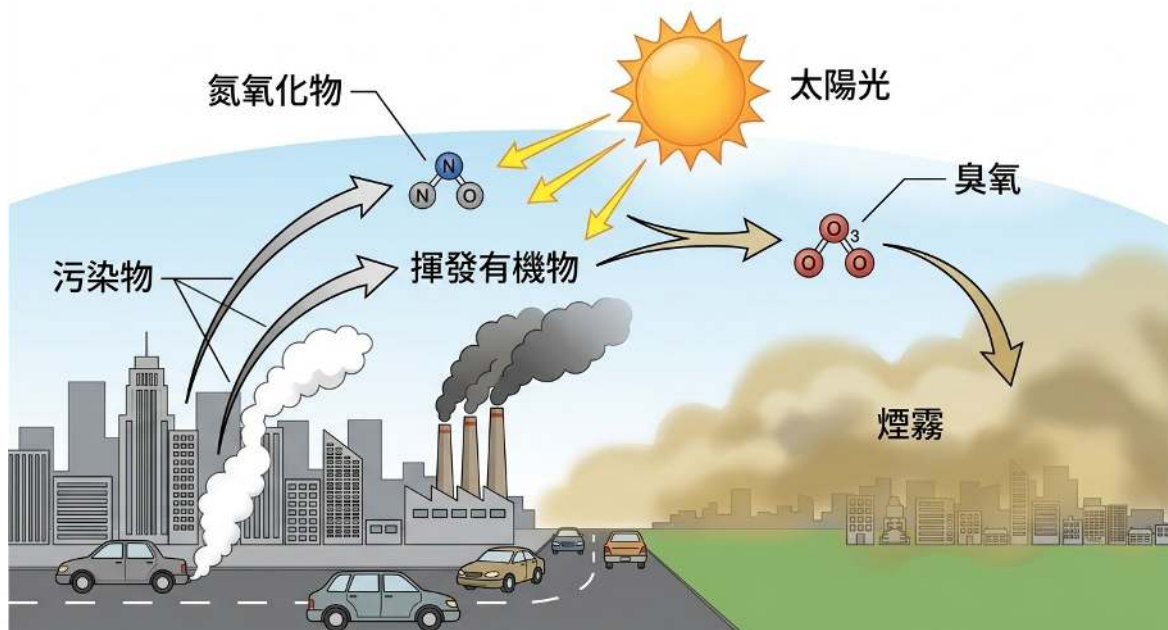
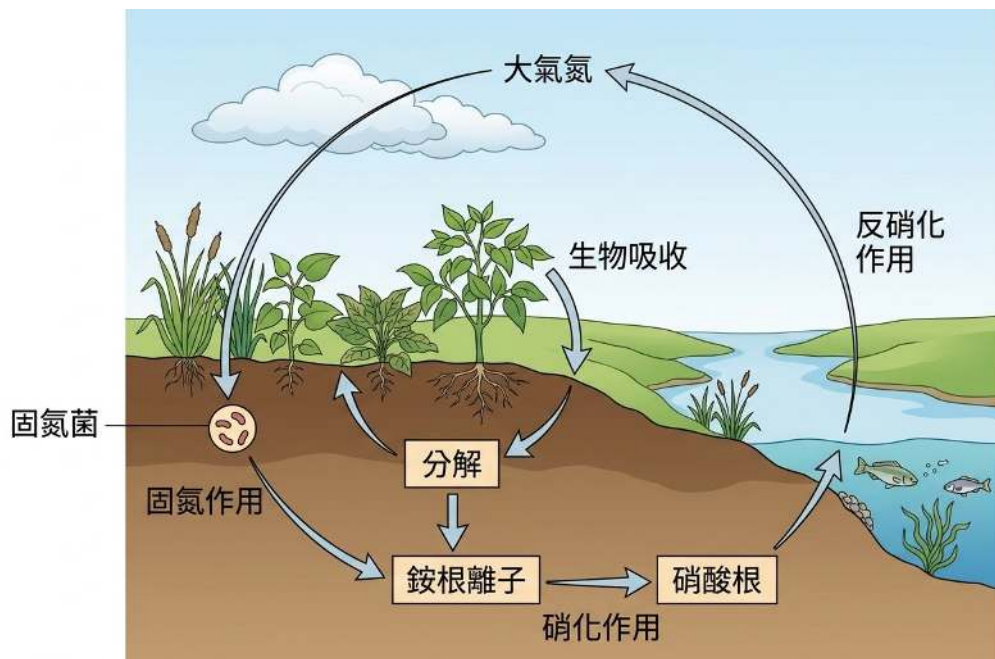
生物地球化學循環是生態系統中物質流動與轉化的核心過程，它描述了化學元素在生物圈、大氣圈、水圈和岩石圈之間持續不斷的移動與交換。這些循環將地球上的生命與非生命環境緊密地連結在一起，形成一個動態的整體系統。從前一章探討的群落生態學可知，生物群落的組成與演替深受環境中養分可用性的影響，而養分的供應與分布，正是由生物地球化學循環所驅動。這些循環不僅決定了生態系統的生產力與結構，更維繫著全球生態的平衡。例如，碳、氮、磷等關鍵元素的循環路徑，直接影響植物的生長、微生物的活動，乃至整個食物網的能量基礎。理解這些循環的機制，是分析環境問題如優養化、酸雨乃至氣候變遷的根本前提。

循環的過程涉及物理、化學及生物作用的複雜交互。元素以各種化學形態存在於不同的「儲庫」中，例如大氣中的二氧化碳、海洋中的溶解無機碳、沉積岩中的碳酸鹽，以及生物體體內的有機碳。元素在儲庫間的移動速率差異極大，有些循環如碳循環的部分路徑可在數年內完成，而沉積型循環如磷循環則可能跨越數百萬年的地質時間尺度。生物，特別是微生物，在這些轉化過程中扮演著不可或缺的催化角色，例如固氮菌將大氣中的氮氣轉化為生物可利用的形態，而分解者則將有機物分解，釋放出元素回歸環境。這種由生命驅動的化學轉換，是生物地球化學循環有別於單純地質循環的關鍵特徵。

人類活動已成為驅動生物地球化學循環的一股強大力量，其影響程度在許多方面已可與自然過程相匹敵，甚至超越。工業革命以來，大量燃燒化石燃料急遽加速了碳從地質儲庫向大氣層的流動，破壞了原有的碳平衡。同時，哈伯法合成氨技術使人為的活性氮生產量翻倍，加上磷礦的大規模開採，導致氮、磷等養分以前所未有的速率進入陸域與水域生態系統。這些擾動不僅改變了元素循環的通量與路徑，更引發了一系列連鎖環境效應，包括全球暖化、水體優養化與生物多樣性喪失。因此，當代環境生態學的研究，必須將人為驅動因子納入循環模型的考量，方能準確評估生態系統的現狀與未來趨勢。

本章將系統性地探討主要生物地球化學循環的運作機制、各儲庫間的流動關係，以及人類活動對其造成的深刻改變。首先將闡明循環的基本概念與類型，接著依序深入分析水文循環、氮循環、碳與氧循環，以及磷與硫循環。每一種循環都有其獨特的動力學與生態意義，但它們並非獨立運作，而是彼此耦合、相互影響。例如，碳循環與水文循環緊密相連，降水格局影響植被生長與碳吸收，而碳濃度則調節全球氣溫與水循環強度。最後，本章將整合性地檢視這些循環之間的交互作用，並探討其全球性環境意義，為後續篇章討論自然資源管理、生物多樣性保育及人為環境破壞等議題，奠定堅實的科學基礎。





大氣化學：探索地球氣候與環境的幕後推手

化學組成、反應與人類影響

研究大氣組成變化，理解氣候與污染。

【大氣基礎】
研究組成、反應與人為影響。

氮78% 氧21%

- 涵蓋自然與人為
- 氣體、顆粒物行為
- 影響地球氣候

【臭氧層】
平流層臭氧吸收紫外光護地球。

15至35公里

- 吸收有害紫外線
- CFCs破壞臭氧
- 兩極臭氧洞

【對流層污染】
對流層污染物損害生態。

PM2.5 細顆粒

- 對流層臭氧有害
- SO₂形成酸雨
- PM深入肺部



【溫室氣體】
甲烷增溫高，多元方法助研究。

甲烷壽命10年

- 甲烷強溫室效應
- NO_x/VOCs 生次污
- 實地、實驗與模型

科普系列：大氣化學

應用與意義】
共解決環境問題的
科學工具與實踐
物修復技術開發
與廢水處理
境監測與污染控制

土壤化學：探究生命之基石的奧秘

理解土壤化學是維護土壤健康的基礎

【土壤組成】 固液氣三相，生命基石

- 礦物質與有機質
- 水氣養分交換
- 理解土壤健康

重點事實：

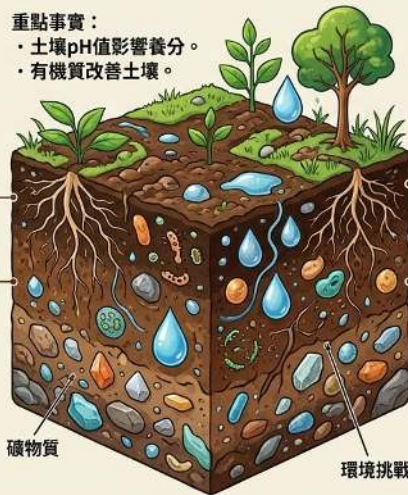
- 土壤pH值影響養分。
- 有機質改善土壤。

【養分循環】 氮磷硫動態，植物所需

- 氮循環易流失
- 磷易固定難吸收
- 硫靠微生物活化

【核心參數】 pH、緩衝與養分保持

- pH影響養分吸收
- 緩衝抵抗酸鹼變
- CEC吸附陽離子



【環境挑戰】 污染防治與生態修復

- 重金屬吸附毒性
- 氧化還原影響
- 多種修復技術

專業土壤化學解析

底部說明：資料來源：章節內容

環境微生物學：微觀世界的宏偉作用

生態系統的無名英雄

微生物是地球生態、物質循環與污染修復的關鍵

【基礎概述】
微生物廣泛分佈，代謝多樣

- 研究環境中微生物
- 分佈土壤水體大氣
- 適應極端環境條件

【核心功能】
驅動地球物質循環

- 生物化學反應轉化
- 驅動碳氮磷硫循環
- 固氮菌轉化大氣氮

【環境影響】
分解污染物，調控生態

- 降解石油農藥有機物
- 生物膜增強抵抗力
- 根際促進植物生長

【應用展望】
生物修復，應對氣候

- 生物修復環境污染
- 極端微生物應用潛力
- 分子技術分析群落

重點事實
大氣78%氮，賴微生物
生物修復核心技術

章節：環境微生物學原理

微生物分解之美：生物降解過程全解析

自然界淨化機制

【何謂降解】
微生物分解有機物，轉化無機物。

- 微生物核心作用
- 完全降解(礦化)
- 部分降解(毒性增)

微生物分解有機物，轉化為無機物，維持生態平衡。

生物降解維持生態穩定
微生物在土壤水體廣泛存在

【降解途徑】
好氧快速，厭氧緩慢且多樣。

- 好氧代謝：氧為受體
- 厭氧代謝：替代受體
- 共代謝：聯合降解

【影響因素】
溫度pH氧養分，影響降解速率。

20-35°C

pH

- 溫度：中溫最旺盛
- pH值：中性或弱酸
- 氧氣營養供應

【應用挑戰】
淨化環境，難降解物是挑戰。

- 處理油污農藥
- 污水淨化應用
- 難降解物：PAHs, PCBs

資料來源：生物降解章節



5.1 生物地球化學循環的基本概念

生物地球化學循環是生態系統功能運作的核心機制，它描述了地球系統中各種化學元素與化合物在不同環境庫之間，透過生物、地質與化學過程所進行的持續性流動與轉換。這些循環將生物圈、大氣圈、水圈與岩石圈緊密地連結在一起，形成一個動態且相互依存的整體。從本質上而言，生物地球化學循環是能量流動的物質基礎，生態系統中的生產者、消費者與分解者皆仰賴這些循環所供應的養分來建構其身體組織、驅動代謝活動，並維持生命過程。因此，理解這些循環的路徑、速率與調控因子，不僅是生態學研究的基石，更是評估生態系統健康、預測環境變遷以及制定永續管理策略的關鍵。

循環中的化學元素依據其在地球系統中的主要儲存庫與循環路徑，可大致區分為兩大類型：氣態型循環與沉積型循環。氣態型循環的主要儲存庫位於大氣或海洋中，元素以氣體形態參與循環，例如碳、氮、氧等。這類循環通常具有較高的流通速率、較強的全球性以及相對快速的自我調節能力，因為大氣庫的混合作用能較快地平復局部擾動。相反地，沉積型循環的主要儲存庫是地殼岩石與沉積物，元素如磷、硫、鈣等，其循環路徑較多涉及岩石風化、沉積作用等緩慢的地質過程。這類循環的全球性較弱，元素容易在局部沉積庫中累積或流失，循環速率也相對緩慢，因此對人為擾動的反應可能更為持久且具有滯後性。

無論是何種類型的循環，其基本架構皆包含幾個關鍵組成部分：儲存庫、流動通量、滯留時間與生物參與。儲存庫是指元素以特定形態大量儲存的地球化學區間，例如大氣中的氮氣、海洋中的溶解無機碳、地殼中的磷酸鹽礦物等。不同儲存庫之間元素交換速率即為流動通量，它決定了元素在系統中循環的活躍程度。滯留時間則是指一個原子或分子平均停留在某個特定儲存庫中的時間長度，從大氣中水氣數天的滯留時間，到深海沉積物中碳數百萬年的滯留時間，差異極大，這反映

了不同庫之間交換速率的快慢以及該庫的穩定性。生物，特別是微生物，在幾乎所有重要的生物地球化學循環中都扮演著催化劑與轉運者的核心角色，例如固氮菌、硝化菌、分解者等，它們驅動著元素形態的轉化，使其能在生物與非生物環境間流通。

這些循環並非獨立運作，而是透過複雜的耦合與回饋機制相互關聯。例如，水文循環驅動著沉積型養分的侵蝕與運輸；碳循環透過光合作用與呼吸作用與氧循環緊密相連；氮循環的硝化與反硝化過程會影響溫室氣體（如一氧化二氮）的產生，進而干擾氣候系統。這種交互作用意味著對單一循環的擾動，往往會產生跨系統的連鎖效應。工業革命以來，人類活動以前所未有的規模與速率介入這些自然循環，例如透過化石燃料燃燒大幅增加大氣二氧化碳通量、透過哈伯法固氮將大氣氮氣轉為活性氮、以及大規模開採磷礦並將其施加於農業土壤。這些人為通量在許多情況下已等同甚至超越自然通量，導致元素循環的加速、路徑的改變與全球分布的重新洗牌，從而引發優養化、酸沉降、海洋酸化與氣候變遷等一系列環境問題。

因此，掌握生物地球化學循環的基本概念，是理解當前全球環境挑戰根源的起點。它提供了一個系統性的框架，讓我們得以追蹤污染物的命運、評估生態系統的養分限制或過剩狀態、並預測環境變遷下元素循環的可能演變。從永續管理的角度，這套概念強調了人類社會必須學習在行星邊界的約束下運作，即我們對養分循環的擾動不應超越地球系統的緩衝與恢復能力。這需要我們從線性的「開採-使用-丟棄」模式，轉向更接近自然循環的循環經濟模式，致力於減少養分流失、提高資源利用效率、並修復已受破壞的循環路徑，以維持生態系統的長期穩定與服務功能。

5.1.1 養分循環的定義與意義

養分循環是指生命必需元素在生物體與其非生物環境之間，透過生物、化學和物理過程不斷轉換與移動的閉合路徑。這些元素，如碳、氮、磷、硫、水等，是構成生物體結構、驅動新陳代謝與能量轉換的基礎物質。在生態系統中，沒有任何養分是憑空創造或永久消失的，它們僅是在不同的儲存庫之間轉換形態，並在不同時間尺度上進行流動。這種循環過程將大氣圈、水圈、岩石圈和生物圈緊密地連結在一起，形成一個全球性的交互網絡。養分循環的核心在於其封閉性與連續性，確保了地球上的生命得以在有限的物質基礎上持續繁衍與演化。從微觀的細胞代謝到宏觀的全球生物地球化學過程，養分循環體現了物質不滅定律在生態系統中的具體實踐，是維持生態系統結構完整與功能運作的基石。

理解養分循環的意義，首先在於認識其對生態系統生產力與穩定性的根本性支撐。初級生產者，如綠色植物與藻類，必須從環境中獲取無機養分，透過光合作用將其轉化為有機物質，從而啟動生態系統的能量流動與食物網基礎。若養分循環中斷或失衡，例如關鍵元素如磷或氮的供應受阻，將直接限制初級生產力，進而影響

整個生態系統中消費者和分解者的生存與繁衍。此外，養分循環的速率與路徑決定了生態系統的恢復力與抵抗力。一個健全、通暢的循環路徑能夠有效緩衝外來干擾，例如在遭受汙染或自然災害後，系統能透過加速分解或改變養分流動路徑來逐步恢復平衡。反之，循環受阻的生態系統則顯得脆弱，容易因養分流失或累積而導致結構崩解，例如湖泊的優養化便是磷循環被人類活動加速而失衡的典型後果。

從更宏觀的地球系統科學角度審視，養分循環的意義延伸至全球尺度的氣候調節與生命維持。例如，碳循環透過大氣中二氧化碳濃度與海洋、森林等碳庫之間的動態平衡，直接調控著地球的溫室效應與長期氣候模式。氮循環與磷循環則共同調控著海洋與陸地生態系的初級生產力，影響著全球氧氣的生產與生物量的分布。這些循環並非獨立運作，而是彼此耦合、相互影響。水循環作為溶劑與載體，驅動並媒介了其他養分的傳輸與轉化。因此，養分循環的順暢與否，關乎整個生物圈的健康與地球生命支持系統的穩定性。人類活動，如化石燃料燃燒、化肥大量使用、大規模土地變更，已顯著改變了多種關鍵元素循環的速率與規模，這種擾動被視為地球系統進入「人類世」的重要標誌，其長期後果正深刻挑戰著全球生態的韌性。

對環境管理與永續發展而言，掌握養分循環的知識具有極強的實踐意義。它為解決諸如空氣與水汙染、土壤退化、生物多樣性喪失、氣候變遷等複雜環境問題提供了系統性的分析框架。例如，在農業管理中，依據養分循環原理設計的養分管理計畫，旨在提高肥料利用效率、減少營養鹽流失至水體，從而兼顧生產與環境保護。在廢棄物管理上，推動有機廢棄物堆肥化，即是將廢棄物重新納入養分循環，促進資源的閉環利用。此外，國際間針對氣候變遷、酸雨、海洋保護的協議，其科學基礎很大程度上建構在對碳、硫、氮等全球生物地球化學循環的理解之上。因此，深入探究養分循環的定義與運作機制，不僅是生態學的核心課題，更是人類社會尋求與自然系統和諧共存、邁向永續未來不可或缺的科學指南。

5.1.2 沉積型循環與氣態型循環的區別

生物地球化學循環依據養分元素的主要儲存庫與循環路徑，可區分為沉積型循環與氣態型循環兩大基本類型。沉積型循環，亦稱為沉積物循環，其特徵在於元素的主要儲存庫位於地殼的岩石、沉積物或土壤中，而非大氣中。這類循環涉及元素從陸地岩石經風化作用釋出，進入土壤與水體，被生物吸收利用後，最終透過沉積作用返回地殼，完成一個相對緩慢且封閉性較高的循環。典型的沉積型循環元素包括磷、硫、鈣、鉀以及多種重金屬元素。由於其主要儲存庫是岩石圈，循環過程常受到地質作用的強烈影響，例如板塊運動、抬升與侵蝕，使得元素在生物圈與非生物環境間的流通速率相對較慢，且容易在局部環境中因人類活動而累積或耗竭，造成區域性的環境問題，如湖泊的優養化或土壤的重金屬汙染。

相較之下，氣態型循環的元素其主要儲存庫是大氣層或水圈（溶解氣體），循環路徑涉及氣體形態在大氣、海洋與生物體之間的高速交換。這類循環的特點是元

素以氣態形式（如二氧化碳、氮氣、氧氣、水蒸氣）進行全球性的流通，循環速率快，且由於大氣混合均勻，使得元素在全球尺度上的分布相對均一。以碳循環為例，大氣中的二氧化碳透過植物的光合作用被固定為有機碳，隨後經由呼吸作用、分解作用或燃燒過程重新釋回大氣，整個過程在區域乃至全球尺度上迅速進行。氣態型循環對大氣化學組成與全球氣候具有直接且深遠的影響，其循環過程也更容易受到人類大規模活動的干擾，例如化石燃料燃燒大幅增加大氣二氧化碳濃度，進而驅動全球暖化。

兩類循環的核心區別首先體現在「主要儲庫」的性質與位置。沉積型循環的儲庫是固態的地殼物質，其總量雖大，但生物可直接利用的有效部分常受限於緩慢的風化釋放速率，形成養分供應的瓶頸。氣態型循環的儲庫則是氣態的大氣或溶解於海洋的氣體，其總量可能相對較小，但由於氣體分子運動快速，生物可利用的庫存周轉率極高，使得養分供應較為即時且廣泛。其次，在「循環速率與空間尺度」上，沉積型循環通常較為緩慢，且易受局部地形、地質與水文條件影響，循環路徑較具區域性；氣態型循環則因大氣環流與海洋洋流的傳輸，具有高度的全球性與快速的混合能力，能在短時間內影響遙遠的地區。

此外，兩類循環對「人類活動干擾的敏感性與反應模式」也有所不同。對沉積型循環的干擾，例如磷礦開採與化肥施用，往往導致元素在局部生態系統（如農田、湖泊、河流）中異常累積，引發點源或區域性的污染與生態失衡。而對氣態型循環的干擾，如燃燒化石燃料排放二氧化碳或工業固氮增加活性氮，其影響會透過大氣迅速擴散至全球，改變全球性的生物地球化學通量，觸發氣候變遷、海洋酸化或氮沉降等跨國界環境問題。理解這兩類循環的根本區別，是分析養分限制、評估環境污染擴散範圍，以及制定有效全球或區域環境管理策略的關鍵基礎。

5.1.3 循環速率與養分的滯留時間

生物地球化學循環的速率與養分在各環境庫中的滯留時間，是理解生態系統功能與穩定性的關鍵參數。循環速率指的是特定元素或化合物在生物圈、大氣圈、水圈和岩石圈之間轉移與轉化的速度，它決定了養分在生態系統中的可用性與流動性。一般而言，氣態型循環的元素如碳、氮、氧，由於有大氣作為巨大的儲存庫和快速交換的媒介，其全球循環速率相對較快。例如，大氣中的二氧化碳通過光合作用進入生物體，再經由呼吸或分解作用返回大氣，整個過程可能在數年至數十年內完成。相反地，沉積型循環的元素如磷、鈣，主要儲存在地殼岩石中，必須經過緩慢的地質風化過程才能釋出，進入生物可利用的形態，其循環速率往往以地質時間尺度（數萬年至數百萬年）來衡量。這種速率上的根本差異，直接影響了不同養分對生態系統初級生產力的限制作用，也決定了人類活動擾動所可能引發的後果在時間尺度上的巨大分別。

養分在特定環境庫（或儲存池）中停留的平均時間，即為滯留時間。滯留時間的長短取決於該庫的規模大小以及養分流入與流出該庫的速率。以碳循環為例，大氣碳庫的規模相對較小，但碳在其中停留的時間僅約數年，因為光合作用與海洋吸收等過程不斷地將二氧化碳移出大氣，而呼吸作用、燃燒等過程又持續將其注入，形成動態平衡。相比之下，海洋溶解無機碳庫的規模極為龐大，碳在深海水體中的滯留時間可長達數百年至數千年；至於儲存在沉積岩或化石燃料中的碳，其滯留時間更可達數百萬年以上，直到被人類開採燃燒或經由地質抬升與風化作用才重新進入活躍循環。滯留時間的概念有助於我們評估環境變化的持久性與恢復力，例如，排放到大氣中的二氧化碳，其過量部分雖可被海洋與陸地生態系統逐步吸收，但由於這些過程的速率限制，大氣中二氧化碳濃度的升高效應將持續數百年之久。

循環速率與滯留時間受到一系列生物、化學與物理因子的調控。生物因子方面，微生物的活動至關重要，例如固氮菌、硝化菌與反硝化菌主導了氮的形態轉化與流動速率；分解者的活性則控制了有機質分解與養分釋放的速度。環境條件如溫度、水分、氧氣含量等，會顯著影響這些生物過程的速率，從而改變養分循環的步調。物理因子則包括風化速率、水文流動、大氣環流與海洋環流等，它們決定了養分在不同空間尺度上的輸送效率。例如，上升流將富含營養鹽的深層海水帶至表層，大幅提升了該海域的初級生產力與碳固定速率。這些因子之間存在複雜的交互作用，使得全球養分循環呈現出高度的動態性與區域異質性。理解這些調控機制，不僅是生態學研究的核心，也是預測氣候變遷、優養化等全球環境問題發展趨勢的基礎。

對循環速率與滯留時間的量化研究，是評估生態系統健康與預測其對擾動反應的基石。一個養分循環速率適中的生態系統，通常能維持穩定的生產力與生物多樣性。若循環速率過快，例如因過量化肥輸入導致氮循環加速，可能引發養分流失、水體優養化等問題；若循環速率過慢，則可能導致養分限制，抑制生態系統生產力。人類活動正以前所未有的規模改變著全球養分循環的速率與模式，例如燃燒化石燃料將地質儲存庫中長滯留時間的碳快速釋放到大氣中，遠超過自然過程的吸收能力；大規模的磷礦開採與使用，則加速了磷從岩石庫向水體庫的轉移，造成局部循環過快而全球資源分布失衡。這些擾動往往縮短了養分在穩定儲存庫中的滯留時間，並將其轉移至反應更靈敏、對生命支持系統更關鍵的環境庫中，從而增加了生態系統的脆弱性與不確定性。

5.1.4 人類活動對養分循環的擾動

自工業革命以來，人類活動已成為驅動全球生物地球化學循環變化的主導力量，其影響規模與速率遠超過自然過程的變動範圍。這種擾動不僅改變了養分在環境庫之間的流動路徑與通量，更打破了歷經數百萬年演化所形成的微妙平衡，導致一系列連鎖的生態與環境問題。人類對養分循環的干擾，主要體現在兩個相互關聯的層面：一是通過農業、工業與能源消耗，直接向環境中輸入或移除大量特定元

素；二是通過改變土地利用方式，間接影響生態系統吸收、儲存與釋放養分的能力。這些活動共同作用，使得原本相對封閉或緩慢的循環過程變得開放且急遽加速，進而威脅到生態系統的穩定性與功能。

在氮循環方面，人類活動的擾動最為顯著。透過哈伯-博世法進行工業固氮，以及廣泛種植豆科作物進行生物固氮，全球人為固定的氮素總量已與自然固氮過程相當，甚至超越。此外，化石燃料燃燒釋放的大量氮氧化物，也成為大氣活性氮的重要來源。這些額外增加的活性氮，通過大氣沉降與農業施肥進入陸域與水域生態系統，遠遠超過了許多生態系統的消化與吸收能力。其結果導致了土壤酸化、水體優養化、生物多樣性喪失，並可能透過反硝化作用增加一氧化二氮這種強效溫室氣體的排放。氮循環的加速已使其成為超越行星邊界框架中安全操作空間的關鍵地球系統過程之一。

碳循環的擾動則主要源於化石燃料燃燒與大規模的土地利用變遷，特別是森林砍伐。工業化以來，大氣中的二氧化碳濃度已從約 280 ppm 急遽上升至超過 400 ppm，這種增加速率在地質時間尺度上是前所未有的。燃燒煤炭、石油和天然氣，將地質歷史時期封存於地下的碳在極短時間內釋放回大氣圈。同時，將森林、草原轉變為農田或城市用地，不僅減少了植被的碳儲存容量，也加速了土壤有機碳的分解與釋放。這種雙重壓力導致大氣碳庫迅速膨脹，成為驅動全球暖化與氣候變遷的核心因子。海洋雖然吸收了部分多餘的二氧化碳，但也引發了海洋酸化的嚴重後果，威脅著珊瑚礁和許多鈣化生物的生存。

對於磷、硫等沉積型循環的元素，人類活動的擾動同樣深刻。磷循環的加速主要來自於磷礦開採與化學肥料的大量使用。這些磷肥施用到農田後，僅有一部分被作物吸收，其餘則通過地表逕流進入河川、湖泊與海洋，造成廣泛的水體優養化問題，如湖泊中的藻華爆發與近海的死亡區擴張。與氮不同，磷沒有重要的氣態形式，其循環主要通過岩石風化與沉積作用，人為開採與使用實質上是將地質儲庫中的磷快速動員到生物活躍的表層系統中，並最終大量流失到海洋沉積物中，可能造成未來農業生產的磷資源短缺。硫循環則因燃煤等活動排放大量二氧化硫而受到嚴重干擾，導致酸雨問題，對森林、土壤和水生生物造成廣泛損害。

這些對養分循環的擾動並非孤立發生，而是彼此交織、產生協同或拮抗效應。例如，大氣中過量的氮沉降可能促進森林生長，從而增加碳匯能力，但同時也可能改變土壤化學性質，加速其他養分的流失。二氧化碳濃度上升可能提高植物水分利用效率，但也可能改變植物組織的碳氮比，進而影響分解速率與養分釋放。人類活動的擾動已使地球系統的養分循環偏離了其自然變異的範圍，這種改變是系統性且全球性的。要減緩這些擾動的負面影響，需要從源頭減少養分（特別是氮、磷）的過量輸入，保護和恢復能夠調節養分循環的自然生態系統（如森林、濕地），並推動資源循環利用的社會經濟模式，以重建人與自然之間相對平衡的養分流動關係。

5.2 水文循環

水文循環是地球上水分子在大氣、陸地、海洋與生物體之間持續移動與轉換的動態過程，它不僅是生物地球化學循環的核心組成，更是驅動全球能量流動、氣候系統運作以及維繫所有生命形式的關鍵機制。此循環的本質在於水透過相變與空間位移，將太陽能轉化為地球系統的動力，並將各種養分與物質在不同環境庫之間進行傳輸與再分配。從宏觀角度來看，水文循環是一個封閉系統，地球上的總水量大致保持恆定，然而水的形態與分布卻在不斷變化之中，這種變化直接影響著氣候模式、生態系統的生產力以及人類社會的水資源可利用性。水文循環的驅動力主要來自太陽輻射，太陽能促使地表水蒸發，並為大氣運動提供能量，從而推動水汽的全球輸送。此外，重力作用則引導降水、地表逕流與地下水流的運動方向，這兩種力量的交互作用構成了水文循環的基本物理框架。

水分子在循環過程中經歷蒸發、凝結、降水、逕流、入滲等多個階段，這些過程並非線性進行，而是形成一個複雜的網絡，其中包含著大量的回饋機制。例如，蒸發作用將液態水轉化為水汽進入大氣，此過程會吸收大量潛熱，對地表能量平衡產生冷卻效應；而當水汽在大氣中凝結成雲並最終形成降水時，所釋放的潛熱則成為驅動大氣環流的重要能量來源。這種相變伴隨的能量吸收與釋放，使得水文循環與全球能量循環緊密耦合，共同調節著地球的氣候狀態。此外，降水落到地表後，其去向呈現多樣化，一部分形成地表逕流直接匯入河流與湖泊，一部分滲入土壤補充地下水，另一部分則被植物吸收後通過蒸散作用返回大氣，這些路徑的分配比例受到地表覆蓋、土壤特性、地形與氣候條件等多重因子的影響。

從時間與空間尺度來看，水文循環展現出極大的變異性。在時間上，循環速率各不相同，大氣中的水汽停留時間平均僅約九天，而深海或極地冰蓋中的水則可能停留數千年甚至更久。這種停留時間的差異意味著水在不同儲庫中對氣候與環境變化的響應速度存在顯著不同。在空間上，水文循環的強度與模式存在明顯的地理差異，例如在熱帶地區，強烈的太陽輻射導致旺盛的蒸發與對流活動，降水豐沛且循環迅速；而在副熱帶高壓區，下沉氣流為主，蒸發量大於降水量，形成乾旱與半乾旱氣候。這種不均勻的分布正是全球水資源空間分配失衡的根本原因，也直接塑造了不同的生態系統類型與生物群落結構。

水文循環與其他生物地球化學循環存在著深刻的交互作用。水作為溶劑與載體，參與並促進碳、氮、磷、硫等養分元素的遷移與轉化。例如，在碳循環中，降水溶解大氣中的二氧化碳形成碳酸，影響岩石的風化速率，從而調節地質時間尺度上的碳收支；逕流則將陸地生態系統中的有機碳與無機碳輸送至海洋，成為海洋碳庫的重要輸入來源。在氮循環中，降水能將大氣中的活性氮（如氨、氮氧化物）帶至地表，形成氮沉降，影響陸域與水域生態系統的養分狀況。此外，水循環的強度與路徑變化會直接改變侵蝕與沉積過程，進而影響磷等沉積型元素的全球循環通量。因此，水文循環可視為連結各大元素循環的樞紐，其變動會對全球生物地球化學過程產生連鎖效應。

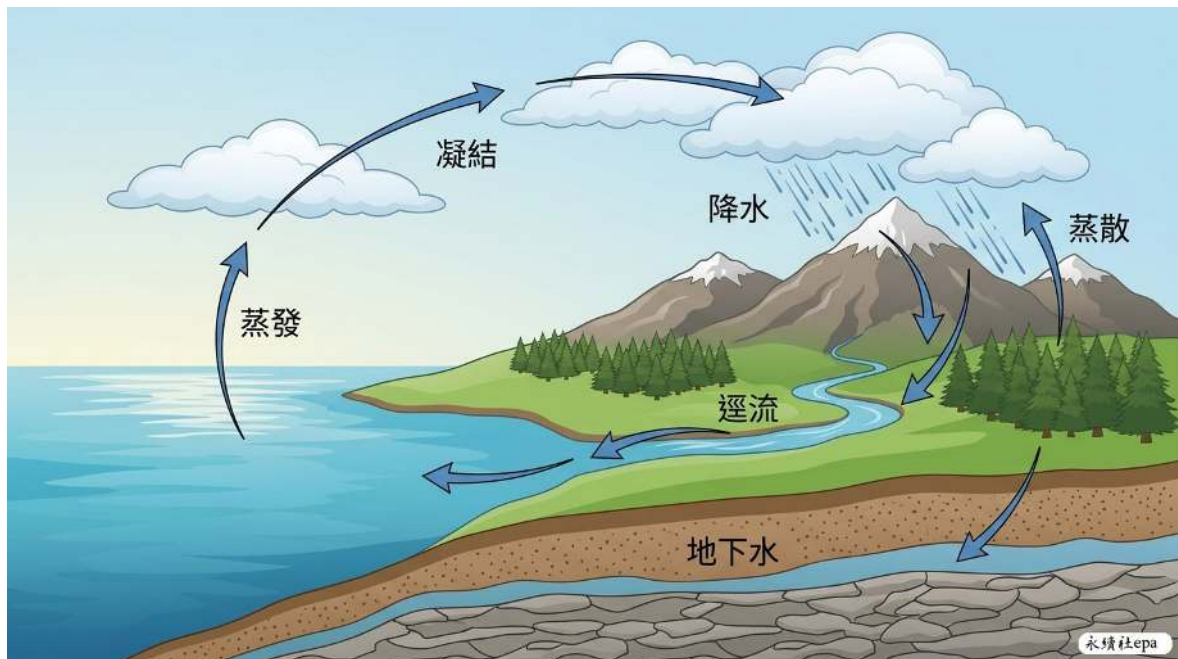
人類活動已對全球水文循環產生了顯著且深遠的干擾。大規模的土地利用變更，如森林砍伐、都市化與農業擴張，改變了地表的反照率、粗糙度與土壤入滲能力，從而影響區域的蒸散量與逕流生成，甚至可能改變局部降水模式。水利工程建設，如築壩、引水與河道整治，直接改變了水流的自然時空分布，影響下游生態系統的水文情勢與泥沙輸送。更為關鍵的是，人為排放的溫室氣體導致全球暖化，從根本上改變了驅動水文循環的能量平衡。氣溫上升加速了全球的蒸發散過程，改變大氣持水能力，導致降水強度、頻率與空間分布的重新調整，表現為極端乾旱與暴雨事件的增加，並加劇水文循環的整體強度。這種人為氣候變遷下的水文循環變異，正對全球水資源安全、糧食生產、生態系統穩定性及人類聚居環境構成前所未有的挑戰。

5.2.1 水在各環境庫中的分布與儲量

水作為地球上生命維繫的關鍵介質，其總量雖相對恆定，但在地球各環境庫中的分布卻極度不均。全球水資源總量約為 13.86 億立方公里，其中絕大部分，約 97.5%，是以鹽水的形式儲存於海洋之中。海洋不僅是最大的水庫，更是驅動全球氣候系統與水文循環的核心，其龐大的熱容量與洋流系統調節著全球的能量分布。剩餘的 2.5% 為淡水，然而，這看似微小的比例中，約有 68.7% 的淡水以冰帽和冰川的形式被封存於南極、格陵蘭及高山地區，這些固態淡水庫對海平面變化具有決定性影響，其穩定性是當前氣候變遷研究的重要焦點。

其餘的淡水則分布於地下水、湖泊、河流、土壤水、大氣水汽及生物體內水等環境庫中。地下水是最大的液態淡水儲庫，約佔淡水總量的 30.1%，主要儲存於地下的含水層中。這些含水層的補注速率緩慢，許多被視為「化石地下水」，其形成歷經數千年甚至更久，一旦過度開採便難以在人類時間尺度內恢復。湖泊儲存了約 0.26% 的淡水，其中貝加爾湖與北美五大湖便佔了相當大的比例；而河流中的動態水量僅佔約 0.006%，雖然比例極微，卻是人類社會最直接依賴且最活躍的水源，承擔著供水、運輸、灌溉及生態支持等多重功能。

土壤水與大氣水汽的儲量分別約佔淡水總量的 0.05% 和 0.04%，儘管其絕對量不大，但在生態與氣候過程中扮演著不可或缺的角色。土壤水是陸地植物吸收水分的主要來源，直接關乎初級生產力與農業收成；大氣中的水汽則是天氣現象的原料，通過降水過程完成水循環的關鍵一環。此外，生物體內所含的水分，雖然在全球總量中微不足道，卻是所有生命代謝活動的基礎。這種分布的不均勻性，加上各環境庫間水交換速率的巨大差異——從大氣水汽的數天更新周期到深層地下水的數千年——共同構成了地球水文系統的複雜性與脆弱性，也決定了不同區域水資源可利用性的根本差異。



5.2.2 蒸發、凝結與降水的循環過程

蒸發、凝結與降水是水文循環中驅動水分子在大氣、陸地與海洋之間連續移動的核心物理過程。蒸發作用主要發生於海洋、湖泊、河流等水體表面，以及潮濕的土壤與植被，其速率受到太陽輻射強度、溫度、濕度、風速及水體表面積等多重因子影響。太陽能提供相變所需的潛熱，使液態水轉化為水蒸氣進入大氣。此外，植物的蒸散作用亦貢獻大量水汽，尤其在森林與農田生態系統中，蒸散往往是區域水汽回歸大氣的重要途徑。這些過程共同構成大氣中水汽的主要來源，並決定了區域乃至全球的水汽通量。

當富含水汽的空氣因上升運動而冷卻，或遇到冷空氣團時，便達到飽和狀態，多餘的水汽會凝結成微小的水滴或冰晶，形成雲或霧。凝結過程通常需要凝結核的存在，例如空氣中的懸浮微粒、鹽粒或污染物，這些微粒提供表面讓水分子附著，促進雲滴的形成。雲的類型、高度與厚度取決於大氣穩定性、濕度垂直分布及溫度剖面，進而影響後續的降水特性。凝結不僅是降水的前兆，雲層本身也對地球輻射平衡有重要影響，能反射太陽短波輻射並吸收地表長波輻射，從而調節氣候。

降水是水從大氣返回地表的主要方式，包括雨、雪、霰、冰雹等多種形式。其發生機制涉及雲內微物理過程與大尺度氣象條件的交互作用，例如對流性降水常見於熱帶地區，因強烈上升氣流導致水汽快速凝結與碰併；而鋒面降水則與氣團交界面上的系統性抬升有關。降水的地理與季節分布極不均勻，受制於大氣環流模式、地形抬升效應（如迎風坡降水）及海陸分布。降水落至地表後，一部分形成地表逕流，迅速匯入河川；另一部分則入滲至土壤，補注地下水或為植物吸收。

這三個過程緊密相連，構成一個動態平衡的循環系統。蒸發與降水在全球尺度上大致維持平衡，但區域尺度上存在顯著差異，例如熱帶海洋是淨蒸發區，而赤道輻合帶則是強降水區。氣候變遷正透過升高全球氣溫、改變大氣環流與濕度場，進

而影響蒸發速率、雲物理特性及降水強度與頻率。極端降水事件增加、乾旱區擴張等現象，皆與此循環過程的改變息息相關，凸顯理解這些基礎機制對於預測未來水資源變化與調適策略至關重要。

5.2.3 地表逕流、入滲與地下水補注

降水抵達地表後，其去向主要受到地表特性、土壤條件與地質結構的影響，形成地表逕流、入滲與地下水補注三個關鍵的水文過程。這三個過程不僅決定了水資源在地表的分配與儲存，更深刻影響著陸域生態系統的水分供應、土壤發育以及地貌侵蝕的速率。當降水強度超過土壤的入滲能力，或地表因不透水層覆蓋而無法吸收水分時，多餘的水分便會沿著地表坡度流動，形成地表逕流。逕流匯聚成溪流、河川，最終注入湖泊或海洋，是塑造地表景觀的主要營力之一，同時也是將陸地物質與養分輸送至水域生態系統的重要媒介。然而，過度的地表逕流，特別是在植被覆蓋不足的地區，會導致嚴重的水土流失，沖蝕表土，並將農藥、化肥等污染物質攜入水體，引發非點源污染問題。

入滲是水分從地表進入土壤孔隙的過程，其速率取決於土壤的質地、結構、有機質含量、初始含水量以及地表覆蓋狀況。疏鬆、富含有機質且具有良好團粒結構的土壤，例如森林下的腐植質層，通常具有較高的入滲能力，能像海綿一樣吸收大量雨水，減緩地表逕流的產生。反之，緊實、黏重或已被壓實的土壤，其入滲率則大幅降低。植被在此過程中扮演至關重要的角色，植物的根系能創造土壤孔隙，枯枝落葉層能緩衝雨滴對地表的直接衝擊，維持土壤結構，從而促進水分下滲。入滲的水分首先滿足土壤的田間持水量，供植物吸收與土壤蒸發，多餘的水分則在重力作用下繼續向下移動。

當入滲的水分穿透土壤層，到達下方的飽和帶時，便成為地下水補注的來源。地下水補注是指水分從非飽和帶（通氣層）進入飽和帶（含水層）的過程，是維持地下水儲量的根本機制。補注的速率與量體受到氣候、地質、地形與土地利用的綜合影響。透水性良好的地層，如砂礫層或裂隙發達的岩層，有利於地下水的補注與儲存；而不透水層，如緻密的黏土層或岩盤，則會阻礙水分的垂直運動，有時甚至形成受壓含水層。自然狀態下，地下水補注是一個相對緩慢的過程，其更新週期可能長達數年、數十年甚至更久。然而，人類活動透過大規模的地表不透水化（如都市建設）、地下水超抽導致含水層蓄水空間改變，以及氣候變遷引發的降雨型態改變，正顯著地干擾著地下水補注的自然節奏，對水資源的永續性構成嚴峻挑戰。

5.2.4 全球水文循環的氣候調節功能

全球水文循環不僅是地球上水資源的分配與移動過程，更扮演著調節全球與區域氣候的關鍵角色。其氣候調節功能主要透過水相變過程中的能量吸收與釋放、水

汽輸送對熱量的再分配，以及海洋與大氣間的複雜交互作用來實現。水具有極高的比熱容，這意味著水體能夠吸收或釋放大量的熱能而自身溫度變化相對緩和。海洋作為地球最大的熱庫，吸收了進入地球系統的大部分太陽輻射，特別是低緯度地區的海洋表面水溫升高，儲存了巨量熱能。隨後，透過洋流運動與蒸發過程，這些熱能被從赤道區域向兩極輸送，有效緩和了赤道與極地之間的溫差，維持了全球熱量平衡。若無此調節機制，地球的晝夜溫差與季節性溫度波動將遠比現今劇烈，許多地區將不適宜生物生存。

蒸發與凝結是水文循環中能量轉換的核心環節。當液態水蒸發為水汽時，需要吸收環境中的潛熱，此過程能有效冷卻地表，特別是廣闊的海洋與植被茂密的地表。反之，當水汽在大氣中凝結成雲或降水時，會釋放出相同的潛熱，加熱周圍的空氣。這種潛熱的釋放是大氣運動的重要能量來源，驅動了對流活動、風系形成乃至熱帶氣旋等天氣系統的發展。因此，水文循環實質上是將地表吸收的太陽能，轉化為驅動大氣環流的動能之重要引擎。雲層的生成進一步體現了水文循環的雙重氣候效應：一方面，雲能反射大量的太陽短波輻射，增加地球反照率，產生冷卻效應；另一方面，雲（特別是低雲）也能吸收地表釋放的長波輻射，產生溫室效應，阻止熱量散逸至太空。這兩種效應的淨結果取決於雲的高度、厚度與類型，使得雲成為氣候模型中最大的不確定性因素之一。

此外，水文循環透過降水分布直接影響全球的氣候分區與生態系統類型。例如，赤道附近因對流旺盛、水汽充足而形成熱帶雨林氣候；而副熱帶高壓帶下沉氣流區，因空氣乾燥、蒸發大於降水，則形成了廣闊的沙漠地帶。季風系統更是海陸熱力差異與水文循環結合的典型產物：夏季大陸增溫快，氣壓低，海洋上相對涼爽的濕潤空氣吹向陸地，帶來豐沛降水；冬季則相反，形成乾季。這種季節性的水汽輸送與降水，塑造了東亞、南亞等地區特有的農業節律與社會經濟活動。極地地區的水文循環則以固態形式為主，冰雪覆蓋的高反照率表面將大部分太陽輻射反射回太空，是維持地球低溫狀態的關鍵。一旦全球暖化導致冰雪融化，反照率降低，將吸收更多熱量，形成加速暖化的正回饋循環。

人類活動正透過氣候變遷顯著干擾全球水文循環的氣候調節功能。大氣溫度上升導致飽和水汽壓增加，使得大氣持水能力提升，這可能改變降水強度、頻率與空間分布，導致某些地區暴雨成災，另一些地區乾旱加劇。海洋暖化影響洋流模式，如可能削弱大西洋經向翻轉環流，進而影響歐洲的氣候。這些變化不僅衝擊原有的氣候穩定性，也削弱了水文循環原本的緩衝與調節能力，使極端天氣事件更為頻繁。理解全球水文循環的氣候調節功能，對於預測氣候變遷影響、制定調適策略至關重要，它提醒我們水循環不僅是資源問題，更是維繫地球氣候穩定的生命支持系統。

5.3 氮循環

氮循環是生物地球化學循環中極為關鍵的一環，其複雜性與動態性深刻影響著全球生態系統的生產力與穩定性。氮元素是構成生命體蛋白質、核酸等重要分子的

基本成分，然而大氣中豐富的氮氣（ N_2 ）卻因其穩定的三鍵結構，絕大多數生物無

法直接利用。因此，將惰性的大氣氮轉化為生物可利用形式——即氮固定——成為驅動整個氮循環的起點，並串聯起一系列由生物與非生物過程共同參與的轉化步驟。氮循環不僅維繫著陸域與水域生態系統的初級生產力，其平衡與否更直接關乎水體優養化、土壤酸化、溫室氣體排放等重大環境議題。理解氮循環的完整路徑與調控機制，是評估生態系統健康、預測人類活動干擾後果，以及研擬適當管理策略的科學基礎。

氮循環的核心過程始於氮固定，將大氣中的氮氣轉化為氨或銨離子。生物固氮主要由與植物共生的根瘤菌、自由生活的固氮細菌及藍綠藻等微生物執行，它們透過固氮酶將氮氣還原為氨，此過程需要消耗大量能量。閃電等自然物理現象產生的高溫高壓也能將氮氣與氧氣結合形成氮氧化物，隨後經雨水帶至地表。然而，二十世紀以來，工業固氮透過哈伯法在高溫高壓下以催化劑將氮氣與氫氣合成氨，其規模已與自然固氮總量相當甚至超越，徹底改變了全球氮循環的格局，為農業帶來充足氮肥的同時，也埋下了氮過量的環境隱患。

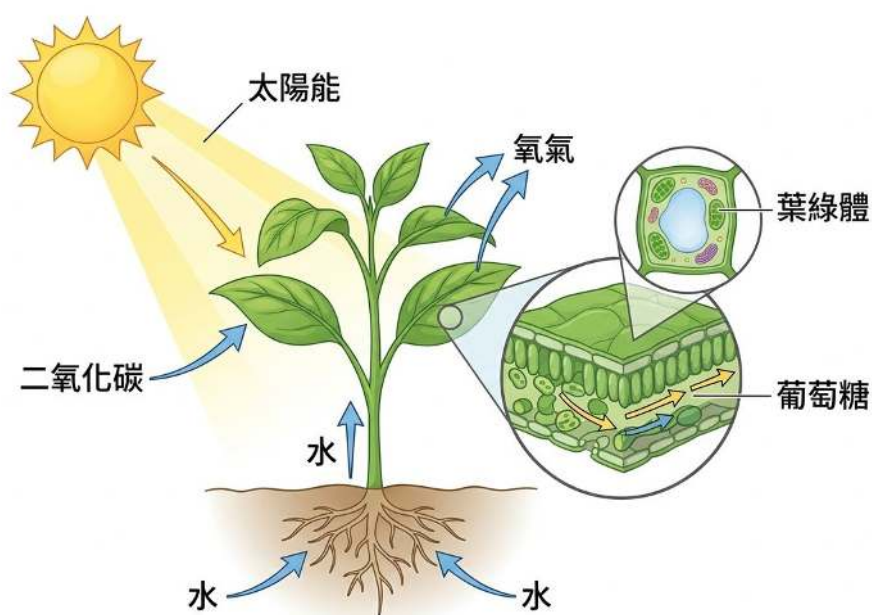
被固定的氮主要以銨鹽形式進入土壤或水體，隨後經硝化作用轉化為植物更易吸收的硝酸鹽。硝化作用分兩階段進行，首先由亞硝化單胞菌等將氨氧化為亞硝酸鹽，再由硝化桿菌等將亞硝酸鹽氧化為硝酸鹽。植物吸收硝酸鹽或銨離子後，將其同化為胺基酸、蛋白質等有機氮化合物，並透過食物鏈傳遞給各級消費者。當生物體死亡或其排泄物進入環境，有機氮經由分解者的氨化作用再度釋放出氨，完成氮在生物與環境之間的循環。此外，在缺氧環境中，硝酸鹽可作為微生物的替代電子

接受者，經反硝化作用逐步還原為氮氣或一氧化二氮（ N_2O ）釋回大氣，此過程是氮

返回大氣庫的主要途徑，同時 N_2O 也是重要的溫室氣體。

人類活動已對全球氮循環造成前所未有的擾動。工業固氮生產的化學肥料、化石燃料燃燒釋放的氮氧化物、以及集約化畜牧業產生的含氮廢棄物，共同導致活性氮（指所有生物可利用及反應活躍的氮化合物）在全球環境中大量累積。過量的氮從農業系統淋溶或逕流進入水體，是造成湖泊、河口及沿海海域優養化與缺氧死亡區擴大的主因。大氣中氮氧化物的沉降則會導致土壤酸化，影響森林健康與生物多樣性。此外，反硝化過程加劇所釋放的一氧化二氮，其全球暖化潛勢是二氧化碳的數百倍，進一步加劇氣候變遷。因此，當前氮循環研究的重點之一，在於量化人類活動導入的額外氮通量，並評估其對生態系統功能與服務的連鎖衝擊。

為減緩氮循環失衡帶來的環境問題，必須從多個層面著手管理。在農業方面，推行精準施肥、改進肥料施用技術、以及利用覆蓋作物減少氮淋失，均可提升氮利用效率並減少環境排放。發展有機農業與農林複合系統，有助於增強生態系統內部的氮循環與保留能力。在工業與能源部門，提升燃燒效率與加裝汙染控制設備，能有效降低氮氧化物排放。從政策層面，則需要建立跨介質（空氣、水、土壤）的氮管理框架，並透過經濟工具如氮稅或排放交易，將環境外部成本內部化。最終目標是促使社會朝向氮素永續利用的方向轉型，在滿足糧食與能源需求的同時，將氮循環的擾動控制在生態系統可承受的範圍內，以維護長期的生態完整性與人類福祉。



永續社epa

5.3.1 大氣氮的固定：生物、物理與工業途徑

大氣中約百分之七十八的體積由氮氣組成，然而這種以雙原子分子形式存在的氮氣化學性質極為穩定，絕大多數生物無法直接利用。將惰性的大氣氮轉化為生物可利用形式，例如氨或硝酸鹽的過程，即稱為氮固定。此過程是連接大氣氮庫與陸域及水域生態系統的關鍵橋樑，驅動著全球氮循環的起始步驟。氮固定主要透過三種途徑實現：生物途徑、物理途徑以及工業途徑，每種途徑在自然與人為系統中扮演著不同角色，其相對貢獻亦隨著人類活動的加劇而產生顯著變化。

生物固氮是自然界中最重要之氮固定途徑，主要由特定原核生物執行，包括自由生活的細菌、藍綠菌以及與植物形成共生關係之根瘤菌。這些生物體內含有固氮酶複合體，能在常溫常壓下催化氮氣還原為氨之反應。共生固氮，例如豆科植物與根瘤菌之互利共生關係，是陸域生態系統中最有效率之生物固氮形式，其固氮量約佔全球生物固氮總量之四成。非共生固氮則廣泛分布於土壤、水域及一些特殊環境中，例如藍綠菌在海洋及淡水生態系統之初級生產與固氮過程中具有重要地位。生物固氮之速率受到環境因子如溫度、水分、土壤 pH 值及養分有效性之強烈影響，其過程本身亦需消耗大量能量。

物理固氮主要指透過自然物理能量，如閃電、火山噴發或宇宙射線等，將大氣中之氮氣轉化為氮氧化物。其中，閃電固氮是最主要之物理途徑。在雷雨放電之高溫高壓條件下，空氣中之氮氣和氧氣可反應生成一氧化氮，隨後進一步氧化為二氧化氮，並溶解於雨水中形成硝酸，隨降水進入土壤與水體。儘管全球尺度上，物理固氮之總量遠低於生物固氮，但在局部地區，特別是在氮輸入有限之生態系統中，此途徑提供之氮源對初級生產力仍具有不可忽視之貢獻。此外，火山活動釋放之含氮氣體亦是地質時間尺度上氮循環之一部分。

工業固氮則是二十世紀以來人類活動對全球氮循環造成最劇烈擾動之途徑。透過哈伯-博施法，在高溫高壓及鐵催化劑之條件下，將大氣中之氮氣與氫氣合成為氨。此技術之發明與大規模應用，使得合成氮肥之生產成為可能，從根本上改變了農業生產之面貌，支撐了全球人口之快速增長。然而，工業固氮之規模已與全球自然固氮總量相當甚至超越，導致大量活性氮被引入生態系統，引發了一系列環境問題，如水體優養化、土壤酸化、大氣污染及生物多樣性喪失。工業固氮之高度集中與依賴化石能源之特性，也使其成為能源消耗與溫室氣體排放之重要來源。

5.3.2 硝化作用與反硝化作用

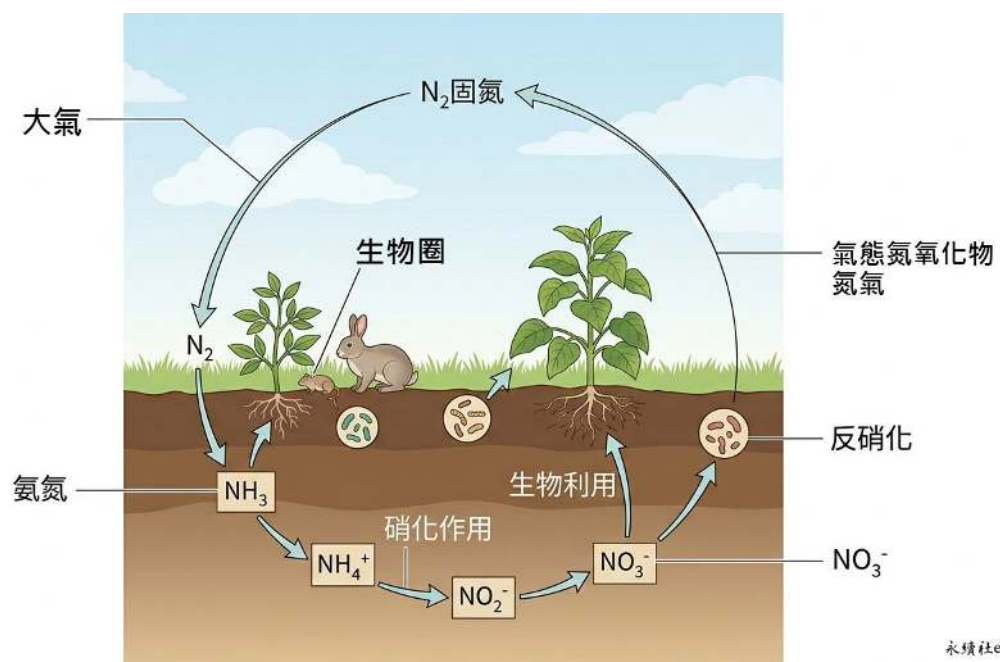
硝化作用是將氨或銨離子轉化為硝酸鹽之兩階段微生物過程，主要由兩類化能自營細菌驅動。第一階段由亞硝酸菌屬等氨氧化細菌執行，將氨氧化為亞硝酸鹽，此過程釋放能量供細菌生長。第二階段則由硝化桿菌屬等亞硝酸鹽氧化細菌接手，將亞硝酸鹽進一步氧化為硝酸鹽。硝化作用在好氧環境中進行，對土壤酸鹼度、溫度和氧氣濃度極為敏感，最適宜之 pH 值約在 6.5 至 8.0 之間。此過程在農業生態系統中至關重要，因為它將植物難以直接吸收之銨態氮轉化為易被吸收之硝酸態氮，從而提高氮肥之利用效率。然而，硝化作用也可能導致氮素以硝酸鹽形式淋失，進入地下水或地表水體，造成水體優養化與飲用水污染風險。

反硝化作用則是將硝酸鹽還原為氣態氮氧化物或氮氣之微生物過程，主要在缺氧或厭氧條件下發生，由多種異營細菌如假單胞菌屬和芽孢桿菌屬等執行。此過程包含數個還原步驟，硝酸鹽先被還原為亞硝酸鹽，再依序轉化為一氧化氮、一氧化二氮，最終形成氮氣。反硝化作用在淹水土壤、沉積物、濕地及水體底泥中尤為活

躍，它扮演著將活性氮從生態系統中移除的關鍵角色，是氮循環返回大氣氮庫的主要途徑。然而，反硝化過程中的中間產物一氧化二氮是一種強效溫室氣體，其全球暖化潛勢是二氧化碳的數百倍，因此反硝化作用也與氣候變遷議題緊密相連。

硝化作用與反硝化作用在空間與時間上常緊密耦合，構成完整的氮轉化路徑。例如，在土壤團粒內部，外層的好氧區可能進行硝化作用產生硝酸鹽，而當硝酸鹽擴散至團粒中心的厭氧區時，便可能成為反硝化作用的基質。這種微域尺度上的耦合，使得氮素在生態系統中得以循環轉化，同時也調控著氮素損失與氣體排放的平衡。在農業管理上，過度灌溉或降雨可能創造厭氧環境，促使反硝化作用加劇，導致氮肥損失並增加一氧化二氮排放；反之，適度的土壤通氣管理則能促進硝化作用，提高氮素植物有效性，但需謹慎管理以避免硝酸鹽淋失。

人類活動顯著地干擾了自然的硝化與反硝化平衡。大量施用銨態或醃胺態氮肥，大幅增加了硝化作用的基質供應，加速硝酸鹽的產生。集約農業的灌溉管理與土壤壓實常創造厭氧微域，促進反硝化作用。此外，工業與交通排放的氮氧化物沉降、畜牧業產生的含氮廢棄物，都額外增加了環境中活性氮的負荷，強化了這兩種微生物過程的速率與規模。這種人為驅動的氮通量增加，已導致嚴重的環境後果，包括水體優養化、地下水硝酸鹽汙染、大氣中一氧化二氮濃度上升，以及土壤酸化等，凸顯了理解並管理這些氮轉化過程對於維護生態系統健康與功能的重要性。



5.3.3 氮在生態系統中的生物利用

氮元素在生態系統中的生物利用，是驅動生命活動與生產力的核心過程。大氣中的氮氣經由固氮作用轉化為生物可利用形式後，便進入複雜的生物地球化學網絡，成為構成蛋白質、核酸、葉綠素等關鍵生命分子的基本元素。植物作為初級生產者，主要透過根系從土壤中吸收銨鹽或硝酸鹽形式的無機氮，並將其同化為胺基

酸等有機氮化合物。這一同化過程需要消耗能量，且不同氮源的同化途徑各異：吸收銨離子可直接同化，而吸收硝酸鹽則需先在植物體內經硝酸還原酶作用還原為亞硝酸鹽，再進一步還原為銨，方能進入胺基酸合成途徑。植物對氮的吸收效率與形態偏好，深受土壤 pH 值、水分、溫度及競爭關係影響，進而塑造了植物群落的組成與分布。

動物作為消費者，無法直接利用無機氮，必須攝取植物或其他動物體內的含氮有機物，以獲取必需的胺基酸與核酸。動物體內的氮代謝主要涉及攝入蛋白質的消化、胺基酸的吸收與重組，以及含氮廢物的排泄。不同營養層的動物對氮的利用效率存在顯著差異，這與其食性、消化生理及代謝率密切相關。肉食性動物通常能更有效地保留攝入的氮，而草食性動物則因植物組織中含有較高比例難以消化的含氮化合物（如木質素結合的蛋白質），其氮利用效率相對較低。未被同化的氮則以尿酸、尿素或氨等形式排出體外，重新返回環境，進入分解者的作用範疇。

分解者，特別是細菌和真菌，在氮的生物利用循環中扮演終結者與啟動者的雙重角色。它們將動植物遺體、排泄物中的有機氮，經由氨化作用分解為氨或銨離子，使氮元素從有機態礦化為無機態，重新可供植物吸收利用。部分微生物更參與硝化與反硝化作用，調節著生態系統中氮的形態與總量。此外，菌根真菌與植物根系形成的共生關係，能大幅擴展植物吸收土壤氮（尤其是移動性低的銨離子）的範圍與效率，此種互惠關係是許多自然生態系統維持氮素高效循環的關鍵機制。這種由生產者、消費者與分解者共同構成的生物利用網絡，確保了氮在生態系統內部的流動與再利用，維持了系統的生產力與穩定。

然而，氮的生物利用並非封閉循環，其通量與效率深受環境條件與人為干擾的影響。在自然狀態下，氮常是陸域生態系統初級生產力的限制因子之一。但人類活動，特別是工業固氮與化學肥料的廣泛使用，已大幅改變了全球氮循環的規模與路徑，向生態系統注入了過量的活性氮。這雖然短期內可能提升某些農業系統的生物生產力，但卻打破了長期演化形成的生物利用平衡。過量的氮輸入可能導致植物群落組成改變，促使適應高氮環境的物種優勢度增加，而排擠了適應低氮環境的物種，降低生物多樣性。同時，超出生態系統生物利用能力的氮，會以硝酸鹽等形式淋失至地下水或經逕流進入水體，引發一系列連鎖環境問題，為下一節討論氮沉降與過量氮的衝擊埋下伏筆。

5.3.4 氮沉降與過量氮對生態的衝擊

氮沉降是指大氣中的活性氮化合物通過乾沉降或濕沉降方式進入陸地與水域生態系統的過程。這些活性氮主要來源於人類活動，包括化石燃料燃燒產生的氮氧化物以及農業活動中氮肥使用與畜牧業排放的氨氣。自工業革命以來，全球氮沉降速率已大幅增加，尤其在工業化與農業密集區域，氮沉降量已遠超過生態系統的自然

承受能力。過量的氮輸入對生態系統造成深遠衝擊，其影響遍及從個體生理、物種互動到整個生態系功能的各個層面。

在陸域生態系統中，過量氮沉降首先會改變土壤的化學性質。氮的輸入會加速土壤酸化過程，促使土壤中的鹼性陽離子如鈣、鎂、鉀等被淋溶流失，導致土壤肥力下降並釋放出對植物有毒的鋁離子。同時，氮的過量供應會打破生態系統中氮與其他關鍵養分如磷、鉀的平衡，引發養分限制類型的轉變。在原本氮受限的生態系如許多溫帶森林與草原中，長期氮沉降會促使物種組成朝向少數喜氮或耐氮物種集中，降低植物多樣性。例如，許多適應低氮環境的稀有地衣與苔蘚植物會因競爭劣勢而消失，而被少數快速生長的草本植物或灌木所取代，這種變化進而影響依賴特定植物生存的昆蟲及其他動物。

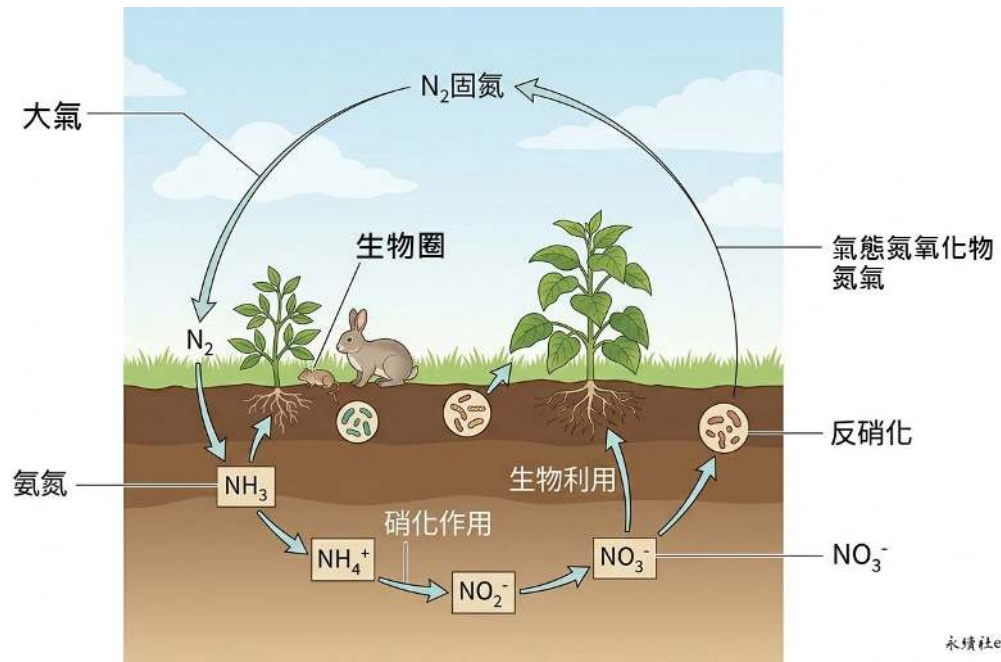
過量氮對水域生態系統的衝擊主要體現在優養化現象。經由逕流或地下水進入河流、湖泊及沿海水域的氮，會刺激藻類與水生植物過度生長。當這些生物體死亡分解時，會大量消耗水中的溶解氧，導致缺氧或無氧狀態的形成，造成魚類及其他需氧水生生物大量死亡，形成所謂的「死亡區」。此外，某些藻華種類會產生對水生生物及人類健康有害的毒素。在沿海地區，氮輸入導致的優養化已對珊瑚礁、海草床及河口生態系造成嚴重破壞，威脅漁業資源與生物多樣性。

氮沉降亦會透過間接途徑影響生態系統。例如，土壤酸化與養分失衡會削弱樹木的健康，使其更容易受到病蟲害、乾旱及極端氣候的侵害。大氣中過量的氮氧化物與氨氣也會與其他污染物反應，形成臭氧與細懸浮微粒，影響植物光合作用與人類健康。此外，氮沉降會改變生態系統的溫室氣體通量，例如可能增加土壤的一氧化二氮排放，這是一種強效的溫室氣體，進一步加劇氣候變遷。這些複雜的連鎖效應顯示，氮過量不僅是局部污染問題，更是影響全球生物地球化學循環與生態系服務的關鍵因子。

面對氮過量帶來的生態衝擊，管理策略需從減少源頭排放與增強生態系韌性雙管齊下。在農業方面，改進施肥技術、推廣精準農業及利用緩效型肥料可減少氨氣揮發與硝酸鹽淋失。在工業與能源部門，則需強化廢氣處理技術以削減氮氧化物排放。在生態系層面，保護與恢復具有氮截留功能的濕地與河岸緩衝帶，能有效減少氮進入敏感水域。最終，將氮管理納入整合性的環境政策框架，並透過國際合作監測與控制氮流動，是減緩氮過量衝擊、維護生態系統健康與功能的必要途徑。

5.4 碳循環與氧循環

碳循環與氧循環是地球生物地球化學循環中兩個最為核心且緊密耦合的過程，它們共同構成了生命維持系統的基礎。碳元素是所有有機分子的骨架，是構成生物



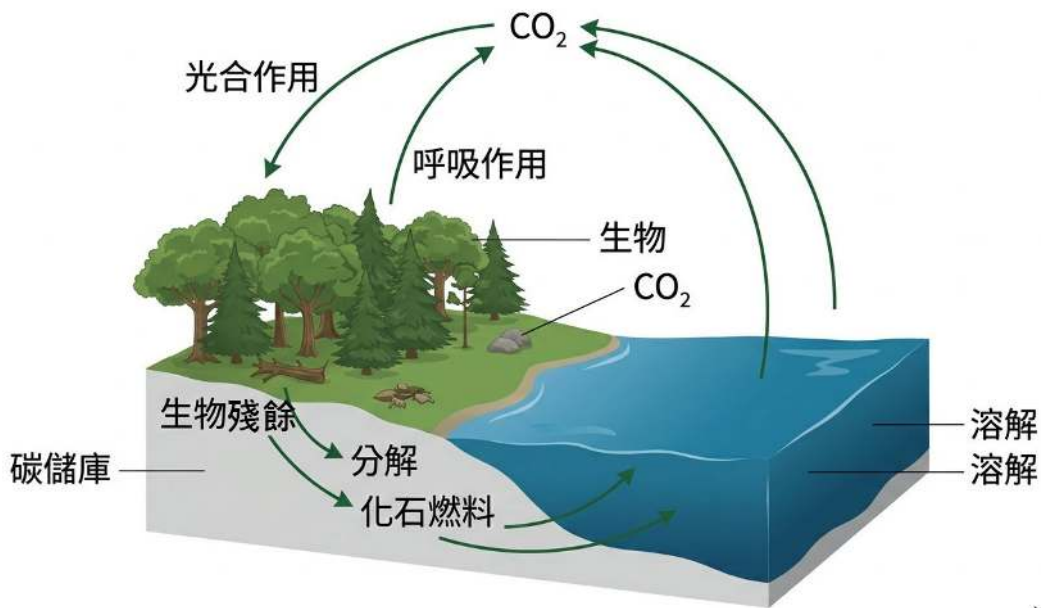
體的主要元素；而氧元素則是生命進行呼吸作用、釋放能量所不可或缺的。這兩個循環並非獨立運作，而是通過光合作用與呼吸作用這兩個關鍵的生物過程緊密連結在一起。光合作用由綠色植物、藻類及部分細菌執行，它們利用太陽能將大氣中的二氧化碳和水轉化為有機物（如葡萄糖），並釋放出氧氣。這個過程不僅固定了碳，將其從無機態轉為有機態，進入食物鏈，同時也向大氣中補充了氧氣。相反地，呼吸作用——包括植物的夜間呼吸、動物的呼吸以及分解者的分解活動——則是一個氧化過程，它消耗氧氣，將有機物分解，釋放出儲存的化學能供生命活動使用，並將碳以二氧化碳的形式歸還到大氣或水體中。這種「吸入二氧化碳，呼出氧氣」與「吸入氧氣，呼出二氧化碳」的動態平衡，是地球生態系統能量流動與物質循環的驅動核心，維持著大氣中二氧化碳和氧氣的相對穩定濃度，從而為複雜生命的演化和存續創造了條件。

碳循環的範疇遠超過生物體之間直接交換，它涉及多個巨大的儲庫以及在不同儲庫間流動的通量。主要的碳儲庫包括大氣圈（主要以二氧化碳形式存在）、水圈（溶解的無機碳和有機碳）、生物圈（活體生物中的有機碳）、土壤圈（死有機質和腐殖質）以及岩石圈（主要以碳酸鹽岩和化石燃料形式存在）。這些儲庫的大小和碳在其中的滯留時間差異極大。大氣碳庫相對較小但周轉迅速，與生物圈和水圈進行著快速的交換。海洋是最大的活躍碳庫，通過海氣交換吸收大量大氣二氧化碳，其中一部分通過「生物泵」過程——即浮游植物光合作用吸收碳，隨後通過食物鏈傳遞及生物殘骸沉降——被輸送到深海，可能被封存數百年甚至更久。陸地生態系統，特別是森林和土壤，也是重要的碳匯，植物通過光合作用將碳固定為生物量，而土壤則儲存著大量的有機碳。岩石圈中的碳，如石灰岩中的碳酸鈣，其周轉時間以地質年代計，通常通過風化作用和火山活動等緩慢過程參與循環。工業革命以來，人類通過燃燒化石燃料（將地質歷史時期固定的碳快速釋放）和大規模改變土地利用（如砍伐森林減少碳匯），顯著加快了碳從岩石圈和生物圈向大氣圈轉移

的速率，打破了原有的平衡，導致大氣二氧化碳濃度持續攀升，成為全球暖化的主要驅動因子。

氧循環與碳循環相伴相生，但其循環路徑和儲庫特性有所不同。大氣中的氧氣主要來源於光合作用，而其消耗則主要通過呼吸作用、有機物分解以及礦物質的氧化（如鐵的鏽蝕）等過程。在長期的地質時間尺度上，一部分有機物未能完全分解而被埋藏，形成煤、石油、天然氣等化石燃料或黑色頁岩，這意味著與這些有機碳對應的光合作用產生的氧氣未被完全消耗，從而逐漸積累在大氣中，造就了現代富含氧氣的大氣環境。因此，大氣氧氣水平實際上是地球歷史上光合作用產氧與有機物氧化耗氧之間長期不平衡的結果。當前大氣中的氧氣含量相對穩定，約佔 21%，這並非因為其循環總量小，而是因為其儲庫極為龐大，相對而言，人類活動直接消耗的氧氣量與總量相比微不足道。然而，這並不表示氧循環不受干擾。人類活動間接影響氧循環的主要途徑，是通過改變碳循環而實現的。例如，大規模焚燒森林和化石燃料，在釋放二氧化碳的同時，也是一個快速消耗氧氣的過程，儘管相對於大氣氧氣總量而言消耗量很小。更重要的影響是對海洋氧含量的威脅。全球暖化導致海水溫度上升，降低了氧氣的溶解度；同時，海洋分層加劇，阻礙了表層富氧水與深層水的交換；此外，陸地營養鹽輸入造成的沿海水域優養化，引發藻華後繼而細菌分解大量有機物，會導致水中溶氧耗竭，形成「死亡區」，嚴重破壞海洋生態系統。這些過程顯示，氧循環的穩定與碳循環的健康息息相關。

碳循環與氧循環的耦合關係，在當前全球變遷的背景下顯得尤為關鍵。人類活動導致的碳循環加速，正引發一系列連鎖反應，反過來又可能擾動氧循環，特別是在海洋環境中。大氣二氧化碳濃度升高，約有三分之一被海洋吸收，導致海水酸化，影響珊瑚、貝類等鈣化生物的生存，進而可能削弱海洋生物泵的效率，改變碳從表層向深海的輸送。這不僅關乎碳的封存，也關乎依賴這些生物構建的棲息地與食物網的完整性。另一方面，極地冰蓋與高山冰川的融化、永凍土的解凍，這些由暖化驅動的過程，可能釋放出封存已久的有機碳，並在分解過程中消耗氧氣，產生更多的二氧化碳或甲烷，形成加速暖化的正回饋迴路。這些複雜的交互作用凸顯了將碳循環與氧循環，乃至水循環、氮循環等其他生物地球化學循環進行整合研究的重要性。理解這些耦合循環的運作機制、反饋過程與臨界點，是預測地球系統未來變化、評估生態系統風險以及制定有效氣候與環境政策的科學基礎。這要求我們必須以系統性的視角，審視人類活動如何透過擾動一個循環，而對整個地球生命支持系統產生深遠且不可預測的影響。



永續社epa

5.4.1 光合作用與呼吸作用驅動的碳流動

碳循環的核心驅動力來自於光合作用與呼吸作用這兩個相反相成的生物地球化學過程，它們共同調控著大氣、陸域生態系統與海洋之間碳元素的流動與交換。光合作用是地球上絕大多數生命賴以維繫的基礎，綠色植物、藻類及部分細菌利用太陽能，將大氣中的二氧化碳與水轉化為有機碳水化合物，並釋放出氧氣。這個過程不僅固定了碳，將其從無機形態轉化為有機形態，構成了生態系統初級生產力的根本，更為整個生物圈提供了能量來源的物質基礎。與此同時，呼吸作用則發生於幾乎所有生物體中，包括植物本身，它將有機物分解，釋放出儲存的化學能供生命活動使用，並將碳以二氧化碳的形式返還到大氣或水體中。這兩個過程構成了碳流動的基本脈搏，決定了碳在大氣庫、生物庫和土壤庫之間交換的速率與通量。

從全球尺度來看，光合作用與呼吸作用驅動的碳流動呈現出明顯的季節性與空間差異。在北半球的春季與夏季，隨著日照增加與植物生長季的到來，陸地生態系統的光合作用速率大幅提升，吸收大量大氣二氧化碳，導致大氣中二氧化碳濃度呈現季節性下降；此現象可從全球大氣監測站的數據中清晰觀察到。相反地，在秋季與冬季，光合作用減弱而呼吸作用持續，淨碳通量轉為從陸地向大氣釋放二氧化碳。海洋生態系統同樣參與此一動態，浮游植物的光合作用在光照充足、營養鹽豐富的水域固定碳，而海洋生物的呼吸以及有機質分解則不斷將碳釋回水體。這種由生物活動主導的碳流動，其規模極為龐大，每年陸地生態系統的總初級生產力所固定的碳量，以及海洋真光層的初級生產力，共同構成了全球碳循環中最活躍的生物驅動部分。

然而，光合作用與呼吸作用之間的平衡並非靜態，它深受環境條件的調控。溫度、水分有效性、光照強度、養分供應以及大氣二氧化碳濃度本身，都會顯著影響這兩個過程的速率。例如，在溫度升高的條件下，植物的呼吸作用速率可能增加得更快，從而降低生態系統的淨碳吸收能力；水分脅迫則會導致氣孔關閉，抑制光合

作用。此外，人類活動已實質改變了這一自然平衡。大氣二氧化碳濃度因化石燃料燃燒而持續上升，理論上可能在一定範圍內促進植物光合作用，即所謂的二氧化碳施肥效應，但這種效應受到養分限制、水分壓力及其他環境因子的制約。同時，土地利用變遷如森林砍伐，直接移除了進行光合作用的主體，削弱了陸地碳匯功能，而海洋酸化則可能影響海洋浮游生物的光合作用效率。因此，理解這對生物過程驅動的碳流動，不僅是認識自然碳循環的關鍵，更是評估人類活動干擾與預測未來氣候變遷回饋效應的核心科學基礎。

5.4.2 陸域與海洋碳庫的儲存機制

地球上的碳元素主要以有機和無機形式儲存在陸域與海洋兩大碳庫中，其儲存機制涉及複雜的物理、化學與生物過程，共同調節著大氣中的二氧化碳濃度。陸域碳庫主要儲存於森林植被、土壤有機質以及泥炭地等生態系統中。森林，特別是熱帶雨林與北方針葉林，透過光合作用將大氣中的二氧化碳轉化為植物生物質，構成巨大的活體碳儲存。當植物凋落或死亡後，這些有機物質進入土壤，在分解者作用下部分轉化為穩定的土壤有機碳，其儲存能力深受氣候、土壤類型、植被組成以及土地利用方式的影響。泥炭地則是在厭氧條件下，植物殘體分解極度緩慢，經年累月堆積形成厚層有機碳儲存，單位面積碳密度極高，成為全球重要的長期碳匯。

海洋碳庫的儲存規模遠大於陸域，其機制可分為物理泵、生物泵與碳酸鹽泵三種主要途徑。物理泵涉及海水的垂直混合與溫鹽環流，二氧化碳溶解於海水表面，隨後被帶往深海，其溶解度隨水溫降低而增加，因此高緯度寒冷海域是重要的二氧化碳吸收區。生物泵則是由海洋浮游植物驅動，它們進行光合作用固定溶解無機碳，轉化為有機碳，並透過食物鏈傳遞。一部分有機碳以浮游動物糞粒、生物殘骸等「海洋雪」形式沉降到深海，將碳從表層移除並封存在深海水體或沉積物中，時間尺度可達數百年至數千年。碳酸鹽泵則涉及海洋生物如珊瑚、有孔蟲等利用碳酸鈣建造骨骼或殼體，這些含碳物質最終沉積到海底，形成石灰岩等沉積岩，是地質時間尺度上最重要的碳封存形式。

陸域與海洋碳庫的儲存穩定性存在顯著差異，且對環境變化極為敏感。陸域碳庫，特別是土壤碳，容易受到土地利用變遷、森林砍伐、農業活動及氣候暖化的影響。升溫可能加速土壤有機質的分解，將原本穩定的碳以二氧化碳形式釋回大氣，形成正回饋效應。北方永凍土融化則可能釋放儲存數萬年的古有機碳，加劇氣候變遷。海洋碳庫雖然總量龐大，但其吸收能力受制於海水化學性質。大氣二氧化碳濃度升高導致更多二氧化碳溶入海水，引發海洋酸化，降低海水 pH 值，這會侵蝕碳酸鹽泵的基礎，影響鈣化生物的生存與鈣化作用，進而削弱海洋的長期碳儲存潛力。此外，海洋暖化會降低二氧化碳溶解度，並可能增強海水分層，抑制物理泵的垂直交換效率。

理解這些儲存機制的交互作用與脆弱性，對於預測全球碳循環的未來動態至關重要。人類活動正同時擾動這兩大碳庫的平衡，例如毀林減少了陸域碳匯，同時化石燃料排放的二氧化碳約有三分之一被海洋吸收，改變其化學環境。保育森林、恢復濕地、永續土地管理有助於增強陸域碳儲存的穩定性與容量；而保護海洋生態系統，特別是維持生物泵的運作效率，則是維繫海洋碳匯功能的關鍵。這些自然碳庫的儲存機制不僅是地球系統的歷史遺產，更是未來調節氣候、邁向碳中和不可或缺的自然基礎。

5.4.3 化石燃料燃燒對碳循環的影響

化石燃料燃燒是人類活動對全球碳循環最顯著且最具影響力的干擾。煤炭、石油和天然氣等化石燃料，是地質歷史時期（主要是石炭紀至新生代）的生物有機體經由長期地質作用形成的碳儲存庫。這些碳原本被封存於地殼深處，與大氣中的活性碳庫處於相對隔離的狀態，其自然釋放速率極其緩慢。然而，自工業革命以來，人類大規模開採並燃燒這些燃料以獲取能源，實質上是將地質時間尺度上積累的碳，在短短數百年內以二氧化碳的形式快速釋放回大氣中。這種人為排放的速率，遠遠超過了自然過程（如火山活動）的碳釋放，也超出了海洋和陸地生態系統在短時間內的吸收能力，從而導致大氣二氧化碳濃度急劇上升。

燃燒化石燃料對碳循環的影響，主要體現在對大氣碳庫的輸入通量劇增，並破壞了原有碳庫之間的動態平衡。在工業化前，大氣中的二氧化碳濃度約為 280 ppm，而截至二十一世紀中葉，此數值已突破 420 ppm，增幅超過 50%。這種濃度的飆升並非均勻分布，其增加速率與全球經濟活動和能源消耗模式密切相關。燃燒過程不僅釋放二氧化碳，還會產生一氧化碳、黑碳等副產物，這些物質雖在大氣中存留時間較短，但會透過影響大氣化學和輻射平衡，間接干擾碳循環。例如，黑碳沉降到冰雪表面會降低反照率，加速冰雪融化，進而影響高緯度地區的碳匯功能。

這種人為碳通量的激增，引發了一系列連鎖的生態與地球系統反應。首先，它增強了自然的溫室效應，成為驅動全球暖化與氣候變遷的主要因子。氣候變遷反過來又會影響碳循環本身，產生複雜的回饋效應。例如，氣溫上升可能增加土壤微生物的呼吸作用，使原本儲存在土壤有機質中的碳加速釋放，形成正回饋循環。其次，約有 25%至 30%的人為排放二氧化碳被海洋吸收，導致海水酸化，影響海洋碳酸鹽系統，對珊瑚、貝類等鈣化生物構成嚴重威脅，進而可能削弱海洋生物泵的固碳效率。

從區域與全球尺度來看，化石燃料燃燒的影響存在顯著差異。工業化國家歷史累積排放量高，而新興經濟體近幾十年的排放增長迅速。這種不平衡的排放格局，引發了關於氣候責任與公平性的國際爭論。此外，燃燒排放的二氧化碳其碳同位素特徵（ $\delta^{13}C$ 值較低）與自然來源不同，這如同一個清晰的「指紋」，使科學家能夠明確區分並量化大氣中二氧化碳增量的人為貢獻比例。總體而言，化石燃料燃燒

已將碳循環從一個受自然過程主導的相對穩定系統，轉變為一個受人為活動深刻驅動的快速變化系統，其長期後果正在重塑地球的生態環境基礎。

5.4.4 氧循環與碳、水循環的耦合關係

地球系統中的氧循環並非獨立運作，而是與碳循環和水循環緊密耦合，形成一個相互依賴、相互調控的複雜網絡。這種耦合關係的核心在於生物地球化學過程的交互作用，特別是光合作用與呼吸作用這對相反的生化反應。光合作用由綠色植物、藻類及部分細菌執行，利用太陽能將二氧化碳和水轉化為有機物，並釋放出氧氣；而呼吸作用則幾乎是所有生物共有的過程，消耗氧氣將有機物分解，釋放出二氧化碳、水與能量。這兩個過程構成了氧與碳在大氣、生物體及水圈之間流動的基本驅動力，同時也將水分子中的氧原子納入循環。從地質時間尺度來看，古代海洋中藍綠菌的光合作用大量釋放氧氣，不僅徹底改變了大氣組成，促使好氧生物演化，其所固定的碳也以有機沉積物的形式埋藏，最終形成今日的化石燃料與沉積岩碳庫，這深刻說明了氧的產生與碳的固定是同一事件的兩面。

氧循環與水循環的耦合則體現在水的光解與形成過程。在大氣上層，太陽的紫外線輻射會將水蒸氣分子分解為氫原子和氧原子，此過程稱為光解作用，是大氣中氧氣來源之一，儘管其貢獻遠小於光合作用。更重要的是，在生物呼吸作用及有機物燃燒過程中，氧氣的消耗總是伴隨著水的生成。此外，水體本身是溶解氧的重要儲庫，水溫、鹽度及水體運動（如波浪、洋流）會影響氧氣在水中的溶解度，進而影響水生生物的生存與分解作用的速率。海洋表層的光合作用不僅釋放氧氣到大氣中，也為深海輸送溶解氧，支持了龐大的深海生態系統。而極地冰蓋與高山冰川作為固態水庫，其形成與融化過程會封存或釋放氣泡中的古老大氣，其中包括氧氣與其他氣體，這為科學家研究過去大氣組成提供了珍貴記錄。

碳循環的狀態直接調控著大氣中氧氣的濃度。在短時間尺度上，陸地與海洋生態系統的初級生產力變化，會影響光合作用對二氧化碳的吸收與氧氣的釋放量。例如，北半球夏季植被茂盛時，大氣中的二氧化碳濃度會出現可測量的下降，同時氧氣濃度微幅上升。然而，人類活動正劇烈干擾這種自然耦合。化石燃料燃燒與大規模森林砍伐不僅向大氣排放巨量二氧化碳，同時也消耗氧氣。雖然大氣中氧氣的總量極為龐大，約佔 21%，其輕微的消耗相對不易察覺，但精密測量已證實，由於化石燃料的燃燒，大氣氧氣濃度正以每年數 ppm 的速度緩慢下降。這種消耗主要發生在燃燒過程，因為燃燒需要氧氣作為氧化劑，將化石燃料中的碳氧化為二氧化碳。

這種耦合關係的破壞會產生一系列連鎖效應。海洋吸收過量二氧化碳導致海水酸化，會影響許多海洋生物（如珊瑚、貝類）形成碳酸鈣外殼或骨骼的能力，這可能改變海洋生態結構，進而影響海洋的初級生產力與產氧能力。此外，氣候變暖導致的海水溫度上升，會降低氧氣在水中的溶解度，可能造成某些海域出現缺氧的「死亡區」，嚴重威脅海洋生物多樣性。從系統觀點來看，維持氧、碳、水三大循

環的平衡，是地球生命支持系統穩定的基石。理解它們之間的耦合機制，不僅有助於評估人類活動對全球生態的深遠影響，更是預測未來環境變化、制定有效氣候與生態政策不可或缺的科學基礎。這強調了環境管理必須採取整合性視角，單一針對碳減排的政策若不考慮對氧循環與水資源的潛在影響，可能無法達成真正的永續目標。

5.5 磷循環與硫循環

磷與硫是生態系統中不可或缺的關鍵營養元素，它們的循環過程深刻影響著生物地球化學的動態平衡。磷循環主要屬於沉積型循環，其儲庫位於地殼的岩石和沉積物中，而硫循環則兼具氣態型與沉積型循環的特徵，在大氣、海洋和地殼中均有重要儲庫。這兩種元素的循環雖然路徑不同，但都涉及複雜的物理、化學和生物轉化過程，並且與碳、氮等其他元素的循環緊密交織。在自然狀態下，磷和硫的循環維持著相對穩定的通量，然而人類活動，特別是工業化農業和化石燃料燃燒，已顯著加速了這些元素的流動速率，導致了一系列環境問題，如淡水體的優養化與酸雨的形成。理解磷與硫循環的機制，不僅是生態學的核心課題，更是評估人類活動對全球生物地球化學過程影響的基礎。

磷循環的起點是含磷岩石的風化作用。地殼中的磷主要以磷酸鹽礦物的形式存在，如磷灰石，這些礦物經過長時間的風化作用，逐漸釋放出可溶性的磷酸根離子進入土壤和水體。在土壤中，磷酸根可被植物根系吸收，並整合進入生物體的有機分子，如核酸、ATP 和磷脂質，從而進入食物鏈。消費者通過攝食獲取磷，而分解者則將死亡生物體中的有機磷礦化，使其回歸土壤。然而，磷循環有一個關鍵特徵：其生物地球化學路徑中缺乏重要的氣態化合物階段。這意味著磷的主要流失途徑是通過地表逕流將顆粒態或溶解態磷攜帶至海洋，並最終沉積於海底，形成新的沉積岩。因此，磷從陸地生態系統向海洋的遷移在很大程度上是單向的，其返回陸地的過程依賴於極其緩慢的地質抬升，這使得磷在許多生態系統中常成為限制初級生產力的關鍵因子。

相較於磷，硫循環則呈現更為複雜的多相態特徵。硫存在於地殼礦物（如黃鐵礦）、水體和大氣中。其循環涉及多種氧化還原狀態的轉換，從還原態的硫化氫和硫化物，到中間態的硫代硫酸鹽，再到氧化態的硫酸鹽。這些轉化過程主要由微生物驅動，例如硫酸鹽還原菌在缺氧環境中將硫酸鹽還原為硫化氫，而硫氧化細菌則在好氧或厭氧條件下將還原態硫氧化為硫酸鹽。火山噴發和海洋噴口釋放的硫化氫是大氣中硫的自然來源之一。大氣中的硫主要以二氧化硫和硫酸鹽氣膠的形式存在，它們可以通過乾沉降或隨降水（酸雨）返回地表。在陸地和海洋生態系統中，硫酸鹽是植物和許多微生物可利用的主要形態，被吸收後合成含硫胺基酸（如半胱胺酸和甲硫胺酸），進而參與蛋白質的構成。硫循環與其他元素循環緊密耦合，例

如，硫酸鹽還原過程常與有機碳的分解相聯繫，而硫的氧化過程則可能產生酸性物質，影響環境的 pH 值。

人類活動已對這兩個自然循環造成了深遠的干擾。在磷循環方面，為提高農業產量而大量開採磷礦並製造磷肥，導致了兩大後果：一是加速了磷從地質儲庫向生物圈的流動，二是造成磷在環境中的不均勻分布。過量施用的磷肥未被植物完全吸收的部分，經由地表逕流和淋溶進入河流、湖泊和沿海水域，引發優養化。優養化刺激藻類和藍綠菌大量繁殖，消耗水中溶解氧，形成死亡區域，嚴重破壞水生生態系統的結構與功能。同時，磷礦作為不可再生資源，其全球分布高度集中（主要位於摩洛哥、中國和美國），開採過程也伴隨著環境破壞與能源消耗，引發了關於磷資源可持續利用的全球性關注。

在硫循環方面，工業革命以來，人類活動成為大氣中二氧化硫的主要排放源，主要來自煤炭和石油等含硫化石燃料的燃燒、金屬冶煉和石油精煉。排放至大氣中的二氧化硫經由光化學氧化或催化氧化形成硫酸鹽氣膠，並隨降水降落形成酸雨或酸沉降。酸雨對環境的影響是多方面的：它會降低土壤和水體的 pH 值，導致土壤中鋁等有毒金屬的活化與淋失，損害植物根系，並使湖泊水體酸化，危及魚類和其他水生生物的生存。此外，酸沉降還會侵蝕建築材料和文化遺產。雖然自 1970 年代以來，許多國家通過立法限制硫排放（如安裝煙氣脫硫裝置），使區域性酸雨問題有所緩解，但硫排放的全球性影響，特別是對氣候系統的間接效應（硫酸鹽氣膠對太陽輻射的散射作用具有冷卻效應），使其成為氣候變遷議題中一個複雜的因子。

綜觀磷與硫的循環，可以發現它們雖然路徑各異，但都凸顯了生物地球化學過程的整體性與人類活動的強大擾動能力。磷循環的沉積型特質使其流動相對緩慢且易受局部管理影響，而硫循環的氣態階段則使其影響能跨越國界，成為典型的跨境環境問題。對這兩種循環的管理需要不同的策略：磷的管理重點在於提高農業利用效率、減少流失並促進回收（如從廢水中回收磷）；而硫的管理則側重於源頭減排與能源結構轉型。將這兩種元素的循環置於更宏觀的生物地球化學框架下審視，有助於我們發展出更為整合的環境管理策略，以維護生態系統的養分平衡與長期健康。

5.5.1 磷的礦物來源與生物可利用性

磷元素是構成生命體不可或缺的關鍵養分之一，主要存在於核酸、磷脂、三磷酸腺苷（ATP）等生物分子中，參與能量轉移、細胞結構維持與遺傳訊息儲存等核心生理過程。相較於碳、氮等元素，磷在自然界中的循環特徵顯著不同，其全球儲量主要蘊藏於地殼的礦物相中，而非大氣中。磷的礦物來源絕大多數來自磷酸鹽岩，這類沉積岩是由古代海洋生物的骨骼、甲殼等含磷殘骸在漫長的地質年代中沉積、壓實而成。全球重要的磷酸鹽岩礦床分布具有明顯的地域性，主要集中在北非（如摩洛哥、西撒哈拉）、美國（佛羅里達、愛達荷）、中國、中東以及部分大洋島嶼

(如諾魯)。這些礦床的開採是人類獲取磷肥與工業用磷的主要途徑，支撐著現代農業的生產體系。

然而，從磷酸鹽岩中釋放出可供生物直接利用的磷形態，是一個受多重因子制約的過程。磷的生物可利用性，通常指的是無機正磷酸鹽離子（如 H_2PO_4^- 和

HPO_4^{2-} ）的供應程度，這些離子能被植物根系或微生物吸收。原生磷酸鹽岩中的磷

多以難溶的磷灰石形式存在，其溶解度極低。在自然風化過程中，碳酸、有機酸等作用能緩慢地溶解礦物，釋放出磷酸鹽。在農業系統中，則透過工業加工生產水溶性磷肥（如過磷酸鈣），以大幅提高其生物有效性。但施入土壤的可溶性磷極易與土壤中的鈣、鐵、鋁等陽離子結合，形成次生的難溶性磷酸鹽化合物，或被土壤膠體強烈吸附固定，導致磷肥的當季利用率往往偏低，這構成了農業生產中磷資源利用效率低下的核心問題。

影響磷生物可利用性的環境因子極為複雜。土壤酸鹼度是關鍵控制因子之一；在酸性土壤中，磷易與游離的鐵、鋁氧化物形成穩定的沉澱，而在鹼性鈣質土壤中，則傾向形成磷酸鈣沉澱。土壤的氧化還原電位亦會影響磷的形態，例如在淹水還原條件下，鐵磷化合物中的鐵被還原溶解，可能暫時釋放出磷酸鹽。此外，土壤有機質扮演著雙重角色：一方面，有機質分解產生的有機酸能螯合金屬離子，減少磷的固定；另一方面，有機質本身可通過吸附或形成有機磷庫，參與磷的轉化與儲存。土壤微生物，特別是根際微生物的活動，能通過分泌酸化物質、酶解有機磷等機制，活化土壤中的潛在磷源，此過程對自然生態系統的磷供應至關重要。

磷的生物可利用性不僅是陸域生態系統生產力的限制因子，也深刻影響水域生態系統的結構與功能。從流域經由地表逕流與地下滲流進入河川、湖泊的磷，其形態與數量直接取決於源頭土壤的磷化學過程。過量可溶性磷的輸入是導致水體優養化的主要原因。因此，理解磷的礦物來源與其轉化為生物可利用形態的機制，不僅是生態學與土壤科學的基礎課題，更是攸關全球糧食安全、水資源保護與養分資源永續管理的核心知識。這為後續探討磷在陸域與水域生態系統中的具體循環路徑奠定了必要的理論基礎。

5.5.2 磷在陸域與水域生態系統的循環

磷在陸域生態系統中的循環，主要受到地質過程與生物活動的雙重調控。磷的來源絕大部分來自岩石的風化作用，特別是含磷礦物如磷灰石，經由物理、化學與

生物風化作用，將不溶性的無機磷逐漸釋放為可溶性的磷酸鹽離子。這些磷酸鹽進入土壤溶液後，成為植物根系吸收的主要形態。植物吸收磷酸鹽後，將其轉化為有機磷化合物，如核酸、磷脂與三磷酸腺苷，構成生命活動的基礎物質。當植物被草食性動物攝食，磷便隨之轉移至消費者體內，並透過食物鏈在各營養層間傳遞。動植物的殘體、枯枝落葉以及排泄物最終回歸土壤，由分解者（主要是細菌與真菌）進行分解，將有機磷礦化為無機磷酸鹽，再次供植物吸收利用，完成一個相對封閉的陸域循環迴路。然而，這個循環並非完全封閉，部分磷會隨著地表逕流與土壤侵蝕，以顆粒態或溶解態的形式進入河流、湖泊，最終匯入海洋，造成陸域生態系統的磷持續流失。

相較於陸域系統，磷在水域生態系統，特別是淡水湖泊與河流中的循環，則呈現更為動態且易受干擾的特性。輸入水體的磷主要來自流域的地表逕流、地下水滲流以及大氣沉降。磷在水體中的存在形態包括溶解性無機磷、溶解性有機磷以及吸附於懸浮顆粒上的顆粒態磷。浮游植物（如藻類）吸收溶解性無機磷進行生長，啟動水域食物網的初級生產。磷隨後透過攝食關係在浮游動物、魚類等各營養層中流動。水生生物的排泄物、殘骸等沉降到水體底部，進入沉積物中。在沉積物-水界面，複雜的生物地球化學過程決定磷的命運：在好氧條件下，磷多與鐵、鋁等金屬離子結合，形成不溶性化合物而沉積；但在厭氧條件下，這些化合物可能被還原溶解，釋放磷酸鹽回覆水層，此過程稱為磷的內部負荷，尤其在分層湖泊的底層缺氧時期顯著，可能加劇水體的優養化問題。

陸域與水域磷循環之間存在緊密的耦合關係，這種聯結主要透過水文過程實現。降雨與融雪形成的地表逕流是磷從陸地傳輸到水體的主要途徑。農業活動中過量施用的磷肥，以及都市區域因不透水面積增加而強化的逕流，都會顯著提高磷的流失通量，將原本緩慢的地質循環加速為人為驅動的快速流失過程。這種跨界面的磷輸送，不僅導致農田土壤肥力逐漸下降，更直接引發接收水體的優養化，造成藻類大量繁殖、水中溶氧耗竭、水生生物死亡等一系列生態危機。因此，管理磷循環的關鍵在於減少陸域磷的流失，並妥善處理水域沉積物中磷的內部循環。實踐上包括推行精準農業以減少化肥用量、建立河岸緩衝帶以攔截逕流中的顆粒態磷，以及對於已優養化的水體，採取人工曝氣、化學沉澱或底泥疏浚等方式，以干擾沉積物中磷的釋放，重新平衡磷在陸域與水域生態系統間的流動。

5.5.3 硫的形態轉換與微生物的角色

硫元素在地球系統中主要以多種化學形態存在，其轉換過程深刻影響著生態系統的養分供應、酸鹼平衡以及全球氣候。硫的形態轉換是一個複雜的生物地球化學過程，涉及氧化態從-2價到+6價的變化，這些轉換主要由微生物驅動，並受到環境條件如氧氣濃度、pH值和溫度的高度調控。在還原條件下，硫酸鹽還原菌利用硫酸鹽作為電子受體進行厭氧呼吸，將硫酸鹽還原為硫化氫，此過程常見於濕地土壤、沉積物和缺氧水體中。產生的硫化氫部分以氣體形式釋放到大氣，部分則與金屬離

子反應形成金屬硫化物沉澱，例如黃鐵礦，這對於重金屬的固定和礦物形成至關重要。相反地，在氧化條件下，硫化氫可被硫氧化細菌利用作為能源，將其氧化為元素硫或進一步氧化為硫酸鹽，這個過程不僅釋放能量供微生物生長，同時也產生硫酸，導致環境酸化，是酸性礦山排水等環境問題的核心機制。

微生物在硫循環中扮演著無可替代的催化角色，它們的代謝活動是不同硫形態之間轉換的主要引擎。除了硫酸鹽還原菌和硫氧化細菌，還有許多其他功能類群參與其中，例如光合硫細菌能在無氧光照環境下，以硫化氫作為電子供體進行光合作用，將其氧化為硫顆粒儲存在細胞內或進一步氧化為硫酸鹽。此外，異化型硫還原菌和各種中間產物轉化微生物共同構成了一個精密的微生物網絡，確保硫元素在生態系統中持續流通。這些微生物的活性受到基質可用性、競爭與共生關係的影響，例如在沉積物中，硫酸鹽還原區通常位於甲烷生成區之上，因為硫酸鹽還原菌對氫氣的親和力高於產甲烷菌，這種競爭關係決定了碳與硫循環的耦合方式。微生物的硫轉換過程不僅驅動著硫的形態變化，也與碳、氮、鐵等元素的循環緊密交織，形成複雜的元素互動網絡。

硫的微生物轉換過程對生態系統功能產生多重影響。在農業土壤中，硫的氧化作用有助於將有機硫或金屬硫化物轉化為植物可吸收的硫酸鹽，是作物硫營養的重要來源。然而，過度的硫氧化也可能導致土壤酸化，影響養分有效性和微生物群落結構。在淡水與海洋生態系統中，硫酸鹽還原是重要的有機質分解途徑，尤其在缺氧的底層水體和沉積物中，它與甲烷生成共同主導了碳的終極命運。硫酸鹽還原產生的硫化氫若擴散至有氧區域，會被化學氧化或由細菌氧化，這個過程可能消耗水中的溶解氧，加劇水體缺氧狀況，對水生生物造成壓力。此外，某些硫循環微生物，如某些硫氧化菌，能與無脊椎動物形成共生關係，例如在深海熱泉生態系中，它們為管蟲、貽貝等提供能量來源，支撐了獨立於太陽能的獨特食物網。因此，硫的形態轉換不僅是單純的化學過程，更是維繫特定生態系統結構與功能的生物學基礎。

5.5.4 硫排放與酸雨的形成機制

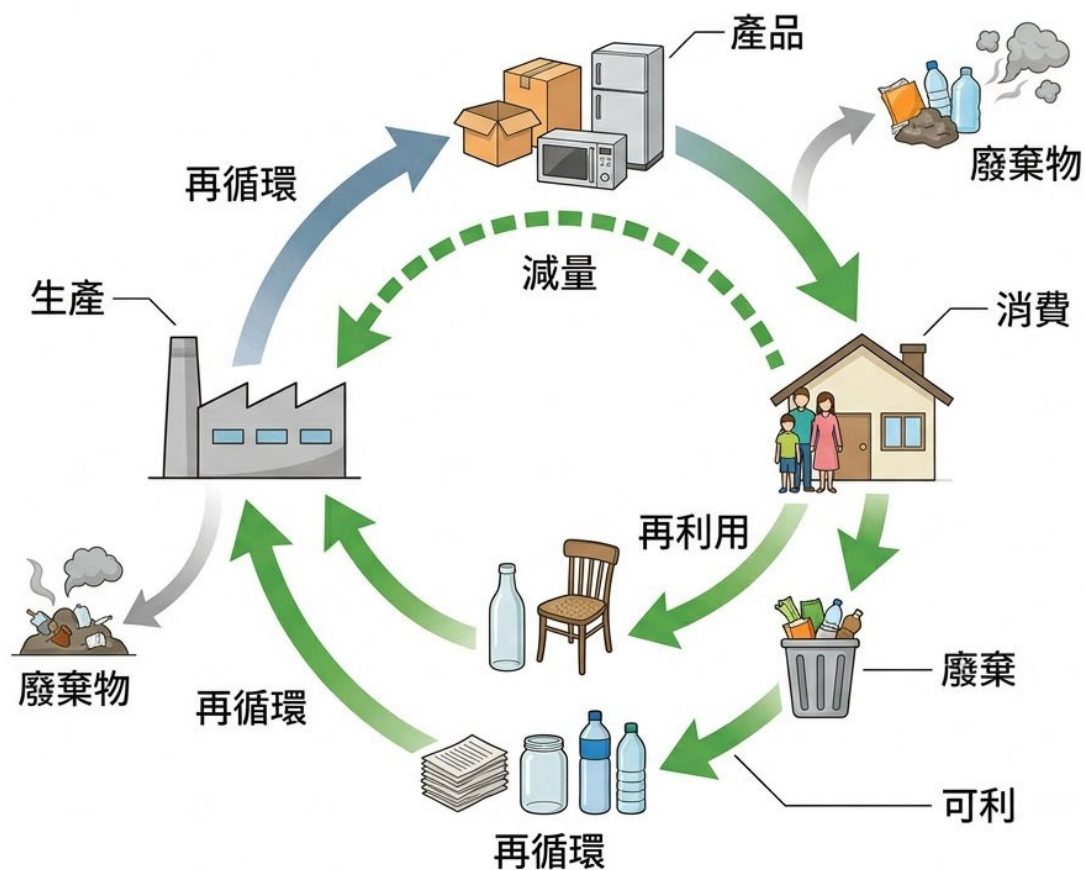
硫排放主要來自自然與人為兩大來源。自然排放包括火山噴發、海洋浪沫釋放的硫酸鹽氣膠、以及濕地與土壤中微生物活動產生的硫化氫等還原性硫氣體。然而，自工業革命以來，人為活動已成為全球硫排放的主導力量，其來源包括化石燃料（特別是煤炭和重油）的燃燒、金屬礦石的冶煉、以及石油精煉等工業製程。這些活動將地殼中儲存的有機硫和無機硫化合物，以二氧化硫和硫化氫等形式釋放至大氣中。二氧化硫是大氣中最主要的硫氧化物，其在大氣中的停留時間約為數天至一週，期間可透過長程傳輸影響下風處廣大區域的空氣品質與生態系統。

二氧化硫進入大氣後，會經歷一系列複雜的化學轉化過程，最終形成酸雨。此過程始於二氧化硫與大氣中的氫氧自由基反應，生成亞硫酸，隨後進一步氧化為硫

酸。此外，二氧化硫亦可溶解於雲滴或雨滴中，在液相中被過氧化氫或臭氧等氧化劑氧化，直接形成硫酸。這些反應生成的硫酸是強酸，會顯著降低降水的 pH 值。同時，燃燒過程排放的氮氧化物，經光化學反應形成硝酸，亦是酸雨的重要成分。因此，所謂的「酸雨」更精確地應稱為「酸沉降」，其包含濕沉降（如雨、雪、霧）與乾沉降（如硫酸鹽和硝酸鹽氣膠的直接沉降）兩種形式。

酸雨的形成機制深受氣象條件與地理環境影響。在濕潤多雲的地區，液相氧化途徑主導；而在乾燥晴朗的地區，氣相氧化則較為重要。此外，大氣中的氨氣等鹼性物質會部分中和酸性，因此農業活動密集、氮排放量高的地區，其降水酸度可能較低。然而，當硫與氮的排放量遠超過環境中和能力時，便會導致降水 pH 值降至 5.6 以下，形成對生態有害的酸雨。酸雨對環境的衝擊是全面性的，它會酸化湖泊與溪流，導致水中鋁離子溶出，危害水生生物；它會淋溶土壤中的鈣、鎂等營養鹽，同時釋放有毒金屬，損害植物根系並影響森林健康；它亦會腐蝕建築材料與文化遺產。

回顧硫循環的整體脈絡，從地殼中的儲存，經由微生物轉換、植物吸收，再到人為開採與燃燒排放，最終透過大氣化學形成酸雨並回歸地表，構成了一個受人類活動深刻擾動的全球性循環。此一小節闡明的硫排放與酸雨形成機制，不僅是硫循環的關鍵終端過程，也具體展現了人類工業活動如何顯著改變自然界的生物地球化學通量。這種改變所引發的環境問題，將自然過渡到下一節關於各循環交互影響與全球意義的整合性討論，為理解人類世背景下生態系統的整體反應提供了重要的案例基礎。



5.6 生物地球化學循環的整合與全球意義

生物地球化學循環並非孤立運作的單一過程，而是彼此緊密耦合、相互影響的複雜網絡系統。這些循環共同構成了地球生命支持系統的物質基礎，驅動著生態系統的生產力、分解作用與能量流動。從微觀的細胞代謝到宏觀的全球氣候調節，養分元素的轉換與流動貫穿其中，維繫著生物圈的動態平衡。理解這些循環的整合機制，不僅是生態學的核心課題，更是評估人類活動對地球系統影響、制定永續管理策略的科學基礎。本章將探討各主要循環之間的交互作用，分析其對生態系統健康與全球環境變遷的深遠意義，並思考如何將循環概念應用於環境修復與管理實踐。

各生物地球化學循環之間存在著深刻的化學耦合與生物調控關係。例如，碳循環與氧循環透過光合作用與呼吸作用緊密相連，綠色植物吸收二氧化碳釋放氧氣，而大多數生物則進行反向過程。水循環作為溶劑與載體，參與並影響幾乎所有其他元素的循環速率與路徑；降水與逕流將陸地上的氮、磷、硫等養分輸送至水域生態系統，同時也沖刷土壤，影響碳與礦物質的分布。氮循環與磷循環則共同限制著許多生態系的初級生產力，兩者的比例失衡可能導致優養化或生產力受限。硫循環與氣候系統相關，因為硫酸鹽氣膠會反射太陽輻射，產生冷卻效應，這與溫室氣體產生的暖化效應形成某種拮抗。這些交互作用意味著，對單一循環的人為擾動，往往會產生連鎖反應，波及其他循環乃至整體地球系統功能。

生態系統的健康與穩定，在很大程度上取決於養分輸入、輸出與內部循環之間的動態平衡。一個健康的生態系統通常能有效地保留與再利用養分，形成相對封閉的內部循環，減少對外部輸入的依賴。例如，在成熟的森林中，透過快速的凋落物分解與養分釋放，大部分氮、磷、鉀等元素能在土壤與植被之間迅速循環，僅有少量因逕流而損失。這種高效的養分保持能力是生態系統長期生產力與抵抗力的關鍵。反之，當循環過程受阻或平衡被打破時，生態系統便可能出現退化。農業集約化導致土壤有機碳庫耗竭、氮磷大量流失至水體，便是循環斷裂的典型案例。此外，生物多樣性在維持養分循環功能中扮演重要角色，不同物種具有相異的養分獲取策略與利用效率，多樣化的生物群落能促進養分在系統中的均勻分布與有效利用，增強循環的穩健性。

氣候變遷與生物地球化學循環之間存在著強烈的雙向回饋效應，這使得全球環境問題更為複雜。一方面，人類活動釋放的二氧化碳等溫室氣體改變了大氣組成，驅動全球暖化，而暖化本身又會反過來影響各種養分循環的速率與路徑。例如，溫度升高會加速土壤微生物的分解作用，可能將長期儲存於土壤有機質中的碳以二氧化碳形式釋放，形成正回饋，進一步加劇暖化。北極永凍土融化釋放甲烷是另一個令人擔憂的正回饋迴路。另一方面，氣候變遷改變降雨模式與極端事件頻率，影響風化速率、侵蝕過程與水文路徑，從而改變磷、矽等元素的陸海通量。海洋酸化（碳循環的副產品）則影響鈣化生物（如珊瑚、浮游有孔蟲）形成碳酸鈣殼體的能力，進而擾亂海洋碳泵與相關的營養鹽循環。這些交織的回饋機制意味著，氣候政策的制定必須綜合考慮對多重循環的影響，單一目標的減排策略可能產生未預期的生態後果。

將生物地球化學循環的整體觀應用於環境管理與生態修復，是實現永續發展的關鍵途徑。傳統的環境管理往往聚焦於單一污染物或介質，例如僅處理廢水中的氮磷，或僅考慮大氣二氧化碳濃度。整合性管理則要求我們採取「生態系統途徑」，同時考量水、土、氣介質以及碳、氮、磷、水等多重循環的耦合關係。在農業領域，這體現為推行養分綜合管理，根據作物需求精準施肥，結合覆蓋作物與輪作以減少養分流失、增強土壤碳匯，從而同時應對糧食安全、水質保護與氣候減緩等多重目標。在流域管理上，則需統籌規劃上游植林（涵養水源、固碳）、中游農業（減少非點源污染）與下游濕地（淨化水質、提供棲地）的功能，讓養分在流域尺度內得到更有效的循環與利用。對於受損生態系統的修復，如礦區或退化農地，成功的復育策略必須重建土壤食物網、恢復關鍵的分解者功能，才能重新啟動養分循環引擎，使系統恢復自我維持的能力。這種以循環為核心的思維，正是邁向循環經濟與永續社會的科學基石。

5.6.1 各循環之間的交互影響

生物地球化學循環並非獨立運作的封閉系統，而是彼此緊密耦合、相互影響的動態網絡。這種交互影響體現在元素形態的轉換、通量的調節以及生態系統功能的

整合上。例如，碳循環與水循環之間存在著深刻的連結：光合作用不僅固定大氣中的二氧化碳，同時伴隨著植物的蒸散作用，將水分從土壤釋放到大氣中，影響區域水文與氣候。反之，水循環的強度與模式，如降雨分布與土壤濕度，直接制約著初級生產力，從而調控生態系統吸收大氣碳的能力。海洋作為巨大的碳匯，其吸收二氧化碳的速率與海洋的溫度、洋流及酸鹼度密切相關，而這些物理化學條件又受到全球水循環與能量平衡的驅動。這種耦合關係意味著，任何一個循環的擾動都可能透過複雜的反饋機制，放大或緩衝對其他循環的影響。

氮循環與碳循環的交互作用同樣顯著，尤其在生態系統的生產力與分解過程中。植物生長同時需要碳與氮，氮的可利用性經常是限制陸域生態系統初級生產力的關鍵因子。當氮透過生物固氮或大氣沉降進入系統，往往能促進植物生長，增加碳的固定。然而，過量的氮輸入可能改變土壤微生物群落的組成與活動，加速有機質的分解，反而將土壤中儲存的碳以二氧化碳形式釋出，形成正回饋。在海洋中，某些海域的初級生產力受限于氮或鐵等營養鹽，其碳吸收潛力因此受到這些元素循環的制約。此外，反硝化作用產生的氧化亞氮是一種強效溫室氣體，其排放通量受到土壤水分（水循環）與有機質（碳循環）的共同影響，直接連結了氮循環與氣候系統。

磷循環與其他元素循環的交互則更多地體現在地質與生物過程的長期耦合上。磷作為生命必需的營養鹽，其全球循環主要屬於沉積型循環，風化釋放是陸地生態系統磷的主要來源。風化速率受到氣候（水循環、溫度）的強烈影響，潮濕溫暖的環境能加速磷從岩石中釋放。磷的可利用性進而影響生態系統的固碳能力，尤其在淡水與海洋生態系統中，磷經常是初級生產力的主要限制因子。另一方面，碳循環透過土壤有機酸的形成影響土壤酸鹼度，從而調節磷的溶解與吸附，控制其生物可利用性。硫循環的介入則透過酸沉降現象展現，燃燒化石燃料釋放的硫氧化物形成酸雨，降低土壤與水體的pH值，這不僅可能溶出鋁等有毒金屬，也會改變磷、鈣等元素的化學形態與流動性，對陸域與水域生態系統的養分平衡產生深遠影響。

這些循環之間的交互影響最終匯聚於全球氣候系統的調節。例如，碳循環的擾動（如大氣二氧化碳濃度上升）導致全球暖化，暖化改變水循環的強度與模式，可能加劇某些地區的乾旱或洪水。水循環的改變反過來影響植被分布與土壤呼吸，調整陸域碳匯的強度。同時，暖化可能加速高緯度永凍土的融化，釋放其中儲存的大量有機碳，並改變甲烷的產生與氧化過程，將碳循環與氮循環的交互影響進一步放大。這種跨循環的耦合與反饋，使得地球系統表現出高度的複雜性與非線性特徵。理解這些交互影響對於預測人類活動（如化石燃料燃燒、化肥使用、土地覆蓋變遷）對全球環境的綜合效應至關重要，也是發展整合性環境管理策略的科學基礎。

5.6.2 生態系統健康與養分平衡

生態系統的健康狀態與其內部養分循環的平衡與否息息相關，一個功能健全的生態系統，其養分輸入、輸出與內部循環速率通常維持在一個動態平衡的狀態，足以支持系統內生物群落的生產力與多樣性，同時保持對外界干擾的抵抗力與復原力。養分平衡並非指養分總量恆定不變，而是指關鍵元素如氮、磷、鉀、硫等在生物體、土壤、水體及大氣等不同儲庫之間的流動速率與通量，能夠在自然變動範圍內維持相對穩定，不至於因某種元素的過度累積或匱乏而導致系統功能失調。這種平衡是透過一系列複雜的生物地球化學過程來維繫，包括生物固氮、硝化與反硝化、有機質分解、礦化作用以及植物與微生物的吸收與釋放等。當這些過程的速率協調一致時，養分便能有效地在系統內循環再利用，減少養分以不可利用的形式流失或沉積，從而支撐生態系統的長期生產力與結構完整性。

養分失衡往往是生態系統健康惡化的早期警訊與主要驅動因子。最常見的失衡類型是養分過量，特別是氮與磷的人為輸入大幅超過生態系統的同化能力，導致所謂的「養分飽和」現象。在陸域生態系統中，過量的氮沉降會改變土壤酸鹼值，加速土壤中鈣、鎂等鹼性陽離子的淋失，破壞土壤化學平衡並傷害對酸敏感的生物。同時，氮過剩會促使植物偏向生長而降低組織中的碳氮比，使得凋落物質量下降、分解加速，進一步改變土壤碳庫與養分釋放動態。在水域生態系統中，過量的氮與磷流入會引發優養化，刺激藻類與水生植物過度生長，隨後因大量有機質分解耗盡水中溶氧，形成缺氧或無氧的死亡區域，導致魚類與其他需氧生物大量死亡，嚴重破壞水生食物網與生態系統功能。

另一方面，養分匱乏同樣會危及生態系統健康。在高度風化或淋溶的古老土壤中，或是在遭受過度開採與侵蝕的土地上，磷、鈣等元素可能嚴重不足，限制初級生產力，並使得植物更容易受到病蟲害與環境脅迫的影響。養分匱乏也會改變物種組成，僅有那些能高效獲取或利用稀缺養分的物種得以存活，導致生物多樣性下降，並可能使生態系統更易受入侵種的侵占。此外，養分循環的斷鏈，例如因殺蟲劑或土壤壓實導致分解者群落功能衰退，會使有機質分解與養分釋放速率減緩，造成養分鎖在有機質中而無法被植物再利用，形成生產力下降的惡性循環。因此，監測關鍵養分的庫存量、通量與生物可利用性，是評估生態系統健康狀態不可或缺的指標。

維持或恢復生態系統的養分平衡，是生態保育與資源管理的核心目標。這需要採取一種系統性的管理策略，例如在農業中推行精準施肥，依據作物需求與土壤測試結果調整養分投入，並結合覆蓋作物、輪作與農林複合等實踐，以增強養分保留與內部循環。在景觀尺度上，保護與重建自然或半自然的緩衝帶，如河岸植被帶與濕地，能有效攔截從農田或都市流出的多餘養分，防止其進入水體。對於已受干擾的系統，則可能需要主動介入以修正養分失衡，例如在酸化土壤中施加石灰以中和酸度並補充鈣質，或在貧瘠生態系進行生態復育時，謹慎引入必要的養分以啟動恢

復過程。總而言之，理解並管理養分平衡，是確保生態系統能夠持續提供潔淨水源、肥沃土壤、穩定氣候與豐富生物多樣性等關鍵服務的基礎。

5.6.3 氣候變遷對養分循環的回饋效應

氣候變遷作為全球性的環境壓力因子，正透過多種途徑深刻影響著生物地球化學循環的速率、路徑與平衡。這種影響並非單向，而是形成一系列複雜的回饋效應，其中某些回饋可能加劇氣候變遷本身，形成惡性循環。最顯著的例子是碳循環與氣候變遷之間的正回饋。全球暖化導致高緯度地區永凍土融化，釋放出長期封存於土壤中的有機碳，這些碳以二氧化碳或甲烷的形式進入大氣，進一步增強溫室效應。同樣地，海洋升溫會降低海水對二氧化碳的溶解度，削弱海洋作為碳匯的能力，同時可能改變海洋分層結構，影響海洋生物泵的效率，從而改變碳從表層向深海的輸送。

溫度上升與降水模式的改變也直接調控著氮循環的關鍵過程。硝化作用與反硝化作用的速率對溫度極為敏感，暖化可能加速這些微生物驅動的轉化，導致更多氮以氧化亞氮的形式釋放到大氣中。氧化亞氮是一種強效溫室氣體，其全球暖化潛勢遠高於二氧化碳，這構成了另一個重要的正回饋迴路。此外，氣候變遷導致的乾旱或暴雨極端事件，會影響土壤濕度與氧化還原條件，進而改變氮的礦化、硝化與反硝化作用的相對強度，可能導致區域性氮流失加劇或氮氧化物排放增加。

水文循環的改變是氣候變遷影響養分循環的另一核心機制。降水強度與頻率的變化會改變地表逕流與侵蝕模式，從而影響磷、硫等沉積型循環元素的遷移。更強烈的降雨事件可能導致土壤侵蝕加劇，將更多顆粒態磷與吸附在土壤顆粒上的養分沖刷至河流、湖泊，最終進入海洋。這不僅造成農業土壤肥力流失，也可能引發下游水體的優養化。同時，乾旱頻發則可能減少陸地生態系統的初級生產力，降低植被對養分的吸收與固持能力，使養分更易於流失。

氣候變遷對生物群落的影響，間接但強烈地調節著養分循環。物種分布範圍的改變、物候期的提前或延後，以及生態系統結構的轉變，都會影響養分的吸收、儲存與釋放。例如，北方森林界線向北推移，可能改變該區域的碳儲存與氮循環動態。海洋酸化與暖化對珊瑚礁與浮游植物群落的衝擊，則會擾亂海洋中的碳、氮、磷循環的耦合關係。這些生物驅動的過程改變，使得養分循環對氣候變遷的回饋充滿不確定性，但普遍認為其可能削弱部分生態系統的調節能力，使系統更為脆弱。

綜觀而言，氣候變遷與養分循環之間存在著多層次、非線性的回饋網絡。這些回饋效應往往放大初始的氣候擾動，使地球系統偏離原有的平衡狀態。理解這些複雜的交互作用，對於預測未來環境變化、評估生態系統風險以及制定有效的緩解與調適策略至關重要。這要求我們必須以整合性的系統觀點，將氣候、水文、生物與地球化學過程置於同一框架下進行研究。

5.6.4 運用循環概念於環境管理與修復

生物地球化學循環的概念不僅是理解自然系統運作的理論基礎，更是指導環境管理與生態修復實踐的核心框架。將循環思維應用於環境問題的解決，意味著從線性的「開採—使用—丟棄」模式，轉向模擬自然系統的閉環設計，強調資源的再利用、養分的保留與系統的自我維持能力。這種思維轉變要求管理者認識到，環境問題往往是循環過程被中斷或擾動的結果，例如養分從農業系統中流失進入水體造成優養化，或是碳從地質庫中過速釋放至大氣導致氣候變遷。因此，有效的管理策略應著眼於恢復或優化這些關鍵的循環路徑，減少「漏失」，增強系統內部的循環效率，從而降低對外部輸入的依賴與對環境的負面輸出。

在農業環境管理方面，運用養分循環概念可發展出如養分閉環農業系統。傳統農業高度依賴外部的化學肥料輸入，這不僅消耗能源、加劇磷礦等不可再生資源的開採，更導致氮、磷等養分大量流失，汙染水體。借鑑自然生態系統中養分幾乎完全循環的原理，管理策略可包括：推廣作物輪作與間作以利用不同作物根系活化土壤中不同層次的養分；種植綠肥作物或利用固氮植物以自然方式增加土壤氮庫；將畜禽糞便與農業廢棄物透過堆肥或沼氣發酵轉化為有機肥料，使養分回歸農田。這些做法旨在模仿自然生態系的分解與再利用過程，建立從生產到消費廢棄物再回到生產的區域性養分循環，減少對化學肥料的依賴，同時改善土壤健康與減少面源汙染。

對於受汙染水體與退化土地的生態修復，循環概念同樣提供關鍵指引。在水體修復中，與其僅依靠成本高昂的工程手段移除汙染物，不如著重建構一個能持續淨化水質的生態系統。例如，建立人工濕地或修復自然濕地，利用濕地中植物、微生物與基質的複雜相互作用，模擬自然水循環中的過濾與淨化功能。植物吸收水中的氮、磷等過量養分，微生物分解有機汙染物，沉積作用則可固定重金屬，從而將汙染物從水相中移出並轉化或固定於生物體與沉積物中，形成一個小尺度的養分與物質循環。在土地修復，尤其是礦區或嚴重侵蝕地的復育中，首要任務是重建土壤生態系統的關鍵循環功能，包括有機質積累、養分循環與水分涵養。引入先鋒植物改善基質，逐步建立由植物、土壤微生物與小型動物組成的分解者網絡，加速枯枝落葉的分解與養分釋放，從而啟動土壤發育的正向循環，使修復後的系統逐步趨向自我維持。

在都市與工業系統的環境管理上，導入循環經濟理念正是生物地球化學循環概念的人為延伸。都市被視為一個新陳代謝系統，其線性物質流動導致資源耗竭與廢棄物堆積問題。運用循環概念的管理策略包括：推動污水資源化，將處理後的再生水用於工業冷卻、景觀灌溉或地下水補注，實現水資源的循環利用；推行廚餘與園藝廢棄物的分類收集與堆肥化，產出的堆肥用於都市綠化或周邊農業，完成有機質與養分的都市—鄉村循環；發展產業共生，將某一家工廠的廢熱、廢水或副產品作為另一家工廠的能源或原料，模擬生態系中的互利共生關係，減少整體物質與能量

的輸入與廢棄物輸出。這些策略的核心在於將都市與工業系統重新設計，使其物質流動更接近自然循環的封閉與高效特性。

最終，將生物地球化學循環概念運用於政策與治理層面，意味著制定法規與經濟工具時，需以維護或恢復關鍵生態循環為目標。例如，實施總量管制與交易制度來管理流域的氮、磷排放，以確保營養鹽輸入不超出水體生態系統的同化能力；透過徵收資源開採稅或提供循環利用補貼，來反映自然資源在循環中的真實生態價值，激勵循環技術的創新與應用。此外，在國土規劃與景觀設計中，也應有意識地維護或重建生態廊道，確保水分、養分與生物能在更大的景觀尺度上自由流動與循環，從而提升區域生態系統的整體韌性與服務功能。這種以循環為核心的環境管理與修復途徑，代表了一種從對抗自然過程轉向與之合作的根本性哲學轉變，是實現人類社會與地球生命支持系統長久和諧共存的必經之路。