

# 環境生態學書 - 永續社

## 第8章 土地與土壤資源



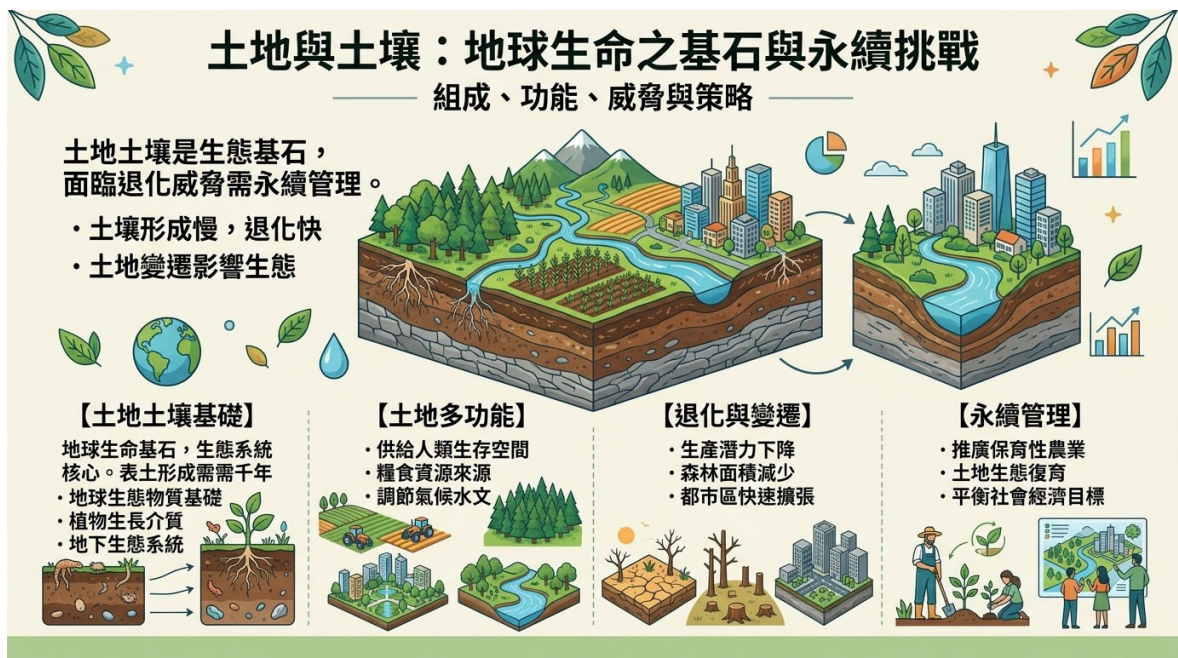
土地與土壤資源構成了地球陸地生態系統的物質基礎，不僅是農業生產與人類居住的載體，更是維繫生物多樣性、調節水文循環與氣候的關鍵介質。本章旨在系統性地探討土地與土壤的組成、功能、面臨的退化壓力，以及保育與永續管理的策略。土地資源的利用方式深刻反映了人類社會與自然環境的互動關係，從原始的採集狩獵到集約農業與都市化，土地利用的變遷直接驅動了地表覆蓋的改變，進而影響全球生態過程。土壤作為一種動態且複雜的自然體，由礦物質、有機質、水分、空氣及無數生物組成，其形成過程緩慢，往往需要數百年至數千年才能發展出具有生產力的表土層，然而其退化或流失卻可能在極短時間內發生。

土壤不僅是植物生長的媒介，更是一個充滿生命活動的生態系統。土壤中的微生物、真菌、原生動物及小型節肢動物等生物群落，共同參與有機質分解、養分循環、土壤結構形成及病原抑制等重要生態功能。這些地下生物多樣性與地上生態系統的健康息息相關，維持著土壤的肥力與生態服務。然而，現代農業的密集耕作、化學品投入以及不當的土地管理措施，往往破壞了土壤的物理結構、化學平衡與生物活性，導致土壤生態系統的脆弱性增加。

全球面臨的土地資源挑戰多元且相互關聯，主要包括土地退化、土壤侵蝕與荒漠化。土地退化泛指土地生產潛力、生物多樣性或生態服務功能的長期下降，其驅動因子涵蓋自然過程與人為活動。森林砍伐為農業或都市發展讓路，不僅移除了重

要的植被覆蓋，更破壞了土壤的穩定結構，加劇水土流失。氣候變遷透過改變降雨型態、增加極端天氣事件頻率，進一步加速了土地退化的進程。土壤侵蝕則是指表土因水或風的作用而被移走的過程，這不僅帶走了富含養分的有機層，降低土地生產力，被沖刷的泥沙還會淤塞河道、水庫，影響水資源系統。

面對這些挑戰，整合性的土地與土壤資源管理策略至關重要。這需要從生態系統的整體性出發，將土壤健康、水資源保育與生物多樣性維護視為相互依存的目標。實踐上，這涉及推廣保育性農業、實施水土保持工程、進行退化土地的生態復育，以及制定促進永續土地利用的政策框架。透過科學管理與社會經濟機制的結合，方能確保土地與土壤資源的永續利用，為當代及未來世代提供不可或缺的生態服務與生活支持。



## 8.1 土地資源的類型與功能

土地資源是人類社會賴以生存與發展的基礎，其類型與功能的多樣性構成了地球生態系統服務的核心。從廣義上而言，土地資源不僅指地球表面可供人類利用的陸地部分，更是一個綜合了土壤、地形、水文、植被及附著於其上之氣候因子的複雜自然綜合體。這個綜合體不僅為人類提供了居住、生產和活動的空間，更支撐著從初級生產到複雜生態過程的運作。土地資源的功能遠超乎單純的空間載體，它是一個動態的、具有生產力與調節能力的生命支持系統。其功能的發揮取決於土地本身的自然屬性，也深受人類土地利用方式與管理策略的影響。因此，理解土地資源的類型與功能，是實現土地永續管理、平衡人類需求與生態保護的先決條件。

土地資源的類型劃分可依據多種標準，包括其自然屬性、覆蓋狀況、利用潛力以及人類賦予的社會經濟功能。從自然屬性觀之，土地可依地形分為平原、丘陵、

山地、高原、盆地等；依地質與土壤條件可分為沖積土、紅壤、黑鈣土、荒漠土等；依植被覆蓋則可分為森林地、草原、荒漠、凍原等。這些自然類型決定了土地的基本生態特徵與生產潛力。例如，沖積平原通常土壤肥沃、水源充足，具有高度的農業生產潛力；而陡峭的山地則土壤淺薄、易受侵蝕，其主要功能可能轉向水土保持、生物多樣性保育與水源涵養。每一種土地類型都承載著一套獨特的生態過程與服務功能，這些功能相互關聯，共同維持區域乃至全球的生態平衡。

在人類社會的框架下，土地資源的功能被進一步具體化與多元化。其核心功能可歸納為生產功能、生態調節功能、承載功能與文化功能四大面向。生產功能是最直接且歷史最悠久的利用方式，包括農業耕作、林業生產、畜牧放牧以及礦產開採。土地通過其土壤肥力、氣候條件與水文特徵，直接轉化太陽能為生物質能，成為糧食、纖維、木材與能源的來源。生態調節功能則往往較為隱性但至關重要，包括氣候調節、水文調控、侵蝕控制、廢棄物分解、養分循環以及污染物淨化等。例如，森林與濕地土地類型在涵養水源、調節局部氣候、淨化水質方面扮演不可替代的角色。

土地的承載功能為人類及基礎設施提供了物理空間，是城市化、工業化、交通建設與居住的基礎。此一功能直接將自然土地轉化為人造環境，其過程往往對土地的原有生態功能造成顯著且通常是不可逆的改變。文化功能則體現在土地所提供的審美、精神、教育與休閒價值上，自然景觀、國家公園、文化遺址乃至鄉村地景都承載著人類的文化認同與精神寄託。這些功能並非彼此獨立，而是相互交織、相互影響。一塊土地可能同時具備多種功能，例如兼具農業生產與鄉村文化景觀的價值；然而，不同功能之間也可能產生競爭與衝突，例如城市擴張侵佔優質農地，或工業開發破壞具有重要調節功能的濕地。

土地資源功能的永續發揮，取決於人類對其利用的強度與方式是否在土地生態系統的承載力與恢復力範圍之內。當利用方式與土地的自然屬性相匹配，並採用適當的管理措施時，土地的多重功能得以協調並長期維持。反之，過度或不當的利用，如陡坡開墾、濕地排乾、森林過度砍伐或都市無序蔓延，將導致土地退化、功能喪失，進而引發一系列環境與社會經濟問題，如土壤侵蝕、生物多樣性下降、水資源短缺與洪澇風險增加。因此，對土地資源類型與功能的深入認知，是進行科學的土地利用規劃、實施永續土地管理策略的基石，旨在最大化土地對人類福祉的綜合貢獻，同時確保其生態完整性得以世代傳承。

### 8.1.1 土地資源的多元用途分類

土地資源的多元用途分類是理解其管理與保育的基礎，其分類方式並非單一，而是依據不同的目的與視角，發展出多套相互補充的系統。從最宏觀的角度，土地可依據其覆蓋類型與自然屬性進行分類，例如森林地、草原、農耕地、濕地、荒漠、冰川與裸露岩地等。這種基於生態系統或植被類型的分類，有助於掌握全球或

區域的土地覆蓋現狀，並評估其生態功能與生物多樣性價值。例如，森林地不僅提供木材資源，更承擔碳儲存、水源涵養及棲地提供等關鍵生態服務；濕地則在淨化水質、調節洪水及維護生物多樣性上扮演無可替代的角色。此種自然屬性的分類，是後續進行功能劃分與利用規劃的科學依據。

進一步從人類利用的角度，土地資源可依據其社會經濟功能進行用途分類，這通常體現在官方的土地利用規劃與地籍管理中。常見的類別包括農業用地、居住與商業用地、工業用地、交通用地、休憩與保育用地等。農業用地又可細分為耕地、果園、牧草地等，其劃分與土壤肥力、水源供應及氣候條件密切相關。居住與商業用地則反映了人口分布與經濟活動的集中程度，其擴張往往直接衝擊周邊的自然或農業用地。工業用地與交通用地是支持現代經濟運作的基礎，但其開發常伴隨污染與生態隔離等問題。休憩與保育用地，如國家公園、自然保護區及都會公園，則明確賦予土地提供生態服務、文化體驗及生物庇護的功能。

此外，隨著永續發展理念的深化，土地資源的分類也逐漸融入「多功能性」的思維。同一塊土地可能同時具備生產、生活、生態及文化等多重功能，而非單一用途所能概括。例如，一處鄉村景觀可能同時是糧食生產的農田、涵養水源的綠地、承載地方文化的場域，以及提供休閒遊憩的空間。這種多功能性的認知，促使土地管理從傳統的單一目標分區管制，轉向更為整合的景觀尺度規劃，旨在協調與優化土地提供的各項服務，避免因過度強調某項功能（如最大化農業產出）而損及其他同等重要的生態或社會文化價值。

最後，土地資源的分類亦需考量其動態變遷特性與法律權屬面向。土地用途並非一成不變，會隨著自然演替與人類活動而轉變，例如農地廢耕後自然復育為次生林，或森林被砍伐轉為農牧用地。因此，動態監測與分類系統的更新至關重要。在法律權屬上，土地可分為公有地、私有地及原住民或社區共有地等，不同的權屬制度深刻影響其管理方式、利用強度與保育成效。一套完善的多元用途分類系統，必須能夠整合自然屬性、社會經濟功能、多功能性、動態變遷及權屬制度等多重維度，方能為永續土地管理提供堅實的決策基礎。

### 8.1.2 土地利用變遷的全球趨勢

土地利用變遷是全球環境變遷的核心驅動力之一，其趨勢深刻反映了人類社會經濟活動與自然生態系統之間的互動關係。自工業革命以來，特別是二十世紀下半葉，全球土地利用模式經歷了劇烈且快速的轉變。這些變遷主要體現在農業用地擴張、森林面積減少、都市化加速以及自然棲地破碎化等方面。驅動這些變遷的根本力量，源自全球人口增長、經濟發展、消費模式改變以及技術進步等多重因素的疊加效應。值得注意的是，土地利用變遷並非均勻分布於全球各地，而是呈現顯著的區域差異性，這與各地的自然條件、發展階段、政策導向及文化背景密切相關。

從宏觀的全球尺度觀察，農業用地擴張是過去數十年最顯著的趨勢之一。為了滿足不斷增長的糧食、飼料及生質燃料需求，大量自然生態系統，特別是熱帶雨林與草原，被轉換為農田或牧場。這種轉換在拉丁美洲的亞馬遜盆地、東南亞的印尼與馬來西亞等地尤為劇烈。然而，在部分已開發國家或地區，由於農業集約化與生產效率提升，農業用地的總面積可能呈現穩定甚至下降的趨勢，但這往往伴隨著農藥與化肥投入的增加，對環境造成另一種形式的壓力。與此同時，森林覆蓋率的持續下降是全球性的關切焦點，雖然部分溫帶地區的森林面積因造林與自然恢復而有所增加，但無法抵消熱帶地區因農業擴張、木材採伐及基礎設施建設導致的森林喪失。

都市化進程是另一項主導性的全球趨勢。全球城市人口比例持續攀升，導致建成區面積迅速擴張。都市擴張不僅直接佔用周邊的農業用地或自然棲地，更透過改變地表覆蓋、影響局部氣候、產生熱島效應以及增加資源需求與廢棄物排放，對區域環境產生深遠影響。都市擴張的模式亦從過去的緊湊型，逐漸轉向低密度、蔓延式的發展，這種模式往往導致更高的能源消耗與交通排放，並加劇棲地破碎化。此外，基礎設施網絡，如道路、水壩及礦區的建設，雖是經濟發展所需，卻也切割了自然景觀，阻礙物種遷徙與基因流動，進一步削弱生態系統的完整性與恢復力。

這些全球趨勢共同指向一個核心問題：土地資源的競爭性使用日益加劇。糧食安全、生物多樣性保育、氣候變遷調適與減緩、以及人類居住與經濟發展的需求，都在爭奪有限的土地資源。未來土地利用變遷的軌跡，將在很大程度上決定全球生態系統的健康與人類社會的永續性。面對此一挑戰，需要發展更為整合的土地利用規劃框架，協調相互競爭的目標，並在決策過程中納入對生態系統服務價值的評估，以引導全球土地管理朝向更為平衡與永續的方向發展。

### 8.1.3 文化倫理與社會經濟目標對土地規劃的影響

土地規劃不僅是技術性的空間配置，更是一項深植於社會文化脈絡與價值判斷的決策過程。文化倫理與社會經濟目標在其中扮演著關鍵的引導角色，深刻影響著土地的利用方式、優先順序與最終樣貌。文化倫理層面，涉及一個社會對於土地的根本認知與價值觀，例如土地是否被視為神聖不可侵犯的祖靈居所、世代傳承的家族資產，抑或是可自由買賣的商品。這些深層的文化信念會形塑人們對待土地的態度，進而反映在規劃法規與實踐中。例如，許多原住民族群將土地視為具有生命與靈性的存在，其傳統領域的規劃強調與自然和諧共存的永續利用，而非最大化的經濟產出。這種文化倫理若能被納入主流規劃體系，將有助於發展出更具生態敏感性的土地管理模式。

社會經濟目標則是驅動土地規劃變革的另一股強大力量，通常與國家發展策略、經濟增長、就業創造及社會福利等議題緊密相連。在工業化與都市化進程中，政府往往將經濟成長置於優先地位，土地規劃便傾向於支持工業區開發、交通基礎

建設擴張以及新市鎮的建設，以吸引投資、創造就業並提升國家競爭力。這種以經濟發展為導向的規劃思維，雖然可能帶來短期的繁榮，卻常導致農業用地流失、自然棲地破碎化，以及都市蔓延等問題。此外，社會目標如提供可負擔住宅、促進社會融合或保障糧食安全，也會直接影響土地使用的分區管制與開發許可，例如劃設社會住宅用地或訂定農地保護政策。

文化倫理與社會經濟目標之間時常存在緊張關係，這種張力在土地規劃的場域中尤為明顯。舉例而言，為了達成經濟成長目標而計畫在海岸地區興建大型工業區或觀光飯店，可能與當地社區珍視的海岸景觀、傳統漁撈文化或宗教信仰場所產生直接衝突。規劃者與決策者因此必須在這些相互競爭的價值觀之間進行權衡與協調。成功的土地規劃並非單方面壓倒另一方，而是透過民主審議的程序，讓不同的文化價值與社會經濟需求得以對話，尋求共識或創造性的解決方案。例如，透過參與式規劃，讓社區居民、原住民、開發商與政府部門共同商議，可能發展出既能保留文化地景，又能引入適當經濟活動的混合使用方案。

在全球化的影響下，地方的文化倫理與社會經濟目標還需面對國際規範與市場力量的衝擊。跨國企業的投資、全球農業貿易體系、以及國際環保公約（如拉姆薩公約對濕地的保護）等，都對主權國家的土地規劃自主性構成一定程度的制約。這使得現代土地規劃必須具備多層次治理的視野，在尊重地方文化倫理與追求在地社會經濟福祉的同時，也需考量全球性的環境責任與經濟連動效應。最終，一個健全的土地規劃框架，應能靈活整合文化傳承、社會公平、經濟活力與生態完整等多重目標，引導土地朝向永續利用的方向發展。

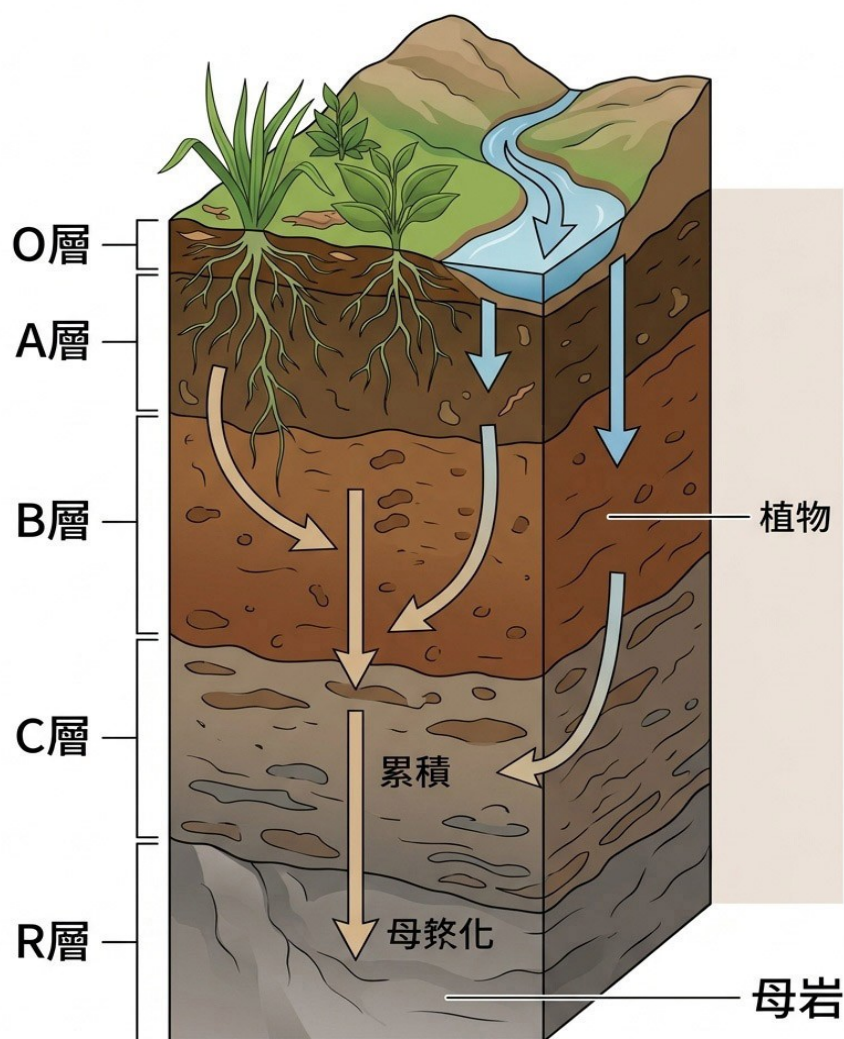
#### 8.1.4 土地資源的生態服務功能

土地資源不僅是承載人類活動的物理基礎，更是一個動態且多功能的生態系統，提供一系列至關重要的生態服務功能。這些服務是人類社會得以維繫與發展的根本，卻往往在傳統的經濟評估中被低估或忽略。生態系統服務的概念將土地視為一個活生生的實體，其功能涵蓋了供給服務、調節服務、支持服務與文化服務四大類。供給服務最為直觀，包括土地生產糧食、纖維、燃料、淡水以及各種生物化學物質，直接滿足人類的物質需求。調節服務則涉及氣候調節、洪水緩衝、水質淨化、疾病控制以及授粉等過程，這些過程雖然不易察覺，卻對維持環境穩定與人類健康至關重要。支持服務是所有其他服務的基礎，包括土壤形成、養分循環、初級生產力以及提供棲息地，確保了生態系統的運作與生物多樣性的存續。文化服務則關乎土地的非物質效益，如精神與宗教價值、休閒與生態旅遊、美學啟發以及教育與科學研究的場所。

具體而言，不同類型的土地資源提供著差異化但互補的生態服務。森林土地不僅生產木材，更扮演著碳匯的角色，吸收大氣中的二氧化碳，調節全球氣候；其複雜的結構能涵養水源、減少土壤侵蝕，並為無數物種提供棲所。農業用地首要功能

是糧食生產，但健康的農田生態系統也能支持授粉者族群、維持土壤肥力與有機質，並在景觀層次上形成生物移動的廊道。濕地與洪氾平原被譽為「地球之腎」，具有卓越的水質淨化能力，能過濾污染物、吸收過量養分，同時在暴雨期間滯留洪水，減緩下游地區的洪峰威脅。即使是都市化土地，其內的公園、綠地與都市林也能提供降溫、空氣淨化、噪音減緩及居民心理健康促進等服務。

這些生態服務功能的維繫，高度依賴於土地生態系統的完整性與健康狀態。當土地因過度開發、污染或管理不善而退化時，其提供服務的能力便會隨之下降甚至喪失，例如土壤侵蝕會直接削減土地的農業生產力與養分循環能力；棲地破碎化則會破壞授粉網絡與害蟲天敵的棲息環境，影響農業的授粉服務與自然病蟲害控制服務。因此，認識並量化土地資源的生態服務功能，是進行永續土地規劃與管理的科學基礎。這要求我們在決策中超越狹隘的經濟產值計算，將生態系統服務的價值內化，透過如生態補償、支付生態系統服務等機制，確保土地資源的多功能性能在社會經濟發展過程中被妥善權衡與保育，從而實現人類福祉與生態系統健康的長期平衡。



永續社epa

## 8.2 土壤的組成與生態系統

土壤作為陸域生態系統的基礎，不僅是植物生長的介質，更是一個充滿生命活力且結構複雜的動態系統。它位於岩石圈、水圈、大氣圈和生物圈的交界處，是地球系統中物質循環與能量流動的關鍵節點。土壤生態系統由物理基質、化學養分與龐大的生物群落共同構成，這些組成之間存在著緊密且微妙的交互作用，共同決定了土壤的肥力、結構、健康狀態及其所支撐的陸地生態系統的生產力與穩定性。理解土壤的組成與其生態系統功能，是進行永續土地管理、應對土地退化與確保糧食安全的根本前提。

從物理組成來看，土壤是由不同粒徑的礦物顆粒所構成的多孔介質，主要分為砂粒、粉粒與黏粒。這些顆粒的比例決定了土壤的質地，進而影響其通透性、保水

性與耕性。土壤結構則是指這些顆粒聚集形成的團粒狀態，良好的團粒結構能創造穩定的孔隙網絡，利於空氣流通、水分滲透與根系伸展。土壤中的孔隙佔據相當體積，其中充滿空氣與水，這兩者是土壤生物與植物根系生存不可或缺的要害。土壤的顏色、密度與溫度等物理性質，也直接或間接地影響著其中的生物活動與化學過程。

土壤的化學組成極為多樣，主要包括礦物質、有機質、空氣與土壤溶液。礦物質源自母岩的風化，提供植物所需的鉀、鈣、鎂、磷等大量元素及鐵、錳、鋅等微量元素。土壤有機質則是生態系統的關鍵成分，由動植物殘體及其分解產物構成，特別是腐植質，它能改善土壤結構、增強保水保肥能力，並作為土壤微生物的能量與養分來源。土壤溶液中含有各種離子、養分與溶解性有機物，是植物吸收養分的主要媒介。土壤酸鹼度（pH值）與氧化還原電位（Eh）是重要的化學指標，它們顯著影響養分的有效性、微生物的活性以及污染物的形態與毒性。

土壤生物群落是土壤生態系統中最具活力的部分，其多樣性甚至可與熱帶雨林相比擬。這個地下生物網絡包括微生物（如細菌、真菌、放線菌、藻類）、微動物（如原生動物、線蟲）、中型動物（如蟎類、跳蟲）以及大型動物（如蚯蚓、螞蟻、白蟻、哺乳動物）。每一類群都在生態過程中扮演獨特角色。微生物是分解作用與養分循環的引擎，真菌的菌絲網絡能協助植物吸收水分與養分，並連結不同植物形成「地下網際網路」。土壤動物則參與有機質的破碎、混合與傳播，其中蚯蚓被譽為「土壤工程師」，其鑽孔活動能大幅改善土壤的通氣與排水。

這些物理、化學與生物組成並非獨立存在，而是透過複雜的交互作用形成一個功能完整的生態系統。例如，植物根系分泌有機物滋養根圈微生物，微生物則協助植物獲取養分；真菌菌絲與土壤礦物顆粒結合，協助形成穩定的團粒結構；土壤動物的活動重新分配有機質與微生物，促進分解與養分均勻化。這些過程共同驅動著土壤中的養分循環，特別是碳、氮、磷、硫等元素的轉化與流動，使土壤成為一個能夠自我維持、具備一定恢復力的生命支持系統。

然而，土壤生態系統也具有其脆弱性。其形成過程緩慢，數百年才能累積數公分的表土，但卻可能因人為不當管理而在短時間內退化。物理組成方面，重型機械壓實會破壞土壤結構，減少孔隙度，導致根系生長困難與逕流增加。化學組成方面，過量化肥與農藥的施用可能破壞養分平衡、酸化土壤、殺害有益生物並累積有毒物質。生物組成方面，單一耕作、清除有機覆蓋物或殺菌處理會嚴重削弱土壤生物多樣性，破壞其生態功能。這些干擾一旦超過土壤生態系統的承受閾值，將導致土壤健康惡化、生產力下降，並引發一系列連鎖環境問題，如侵蝕加劇、養分流失與生物多樣性喪失。因此，維護土壤生態系統的完整性，必須從理解並尊重其複雜的組成與交互作用開始。

### 8.2.1 土壤的物理、化學與生物組成

土壤作為陸域生態系統的基礎，其組成極為複雜，是物理、化學與生物成分相互作用的動態混合體。物理組成決定了土壤的結構與質地，主要取決於礦物顆粒的大小與比例。這些顆粒依粒徑可分為砂粒、粉粒與黏粒，三者不同的組合形成了土壤質地分類，例如壤土即為三者比例均衡的理想類型。土壤質地直接影響孔隙度、透水性、通氣性以及保水能力，進而左右植物根系的生長環境與養分獲取。土壤結構則是指這些顆粒如何團聚成更大的次級單位，如團粒、塊狀或柱狀結構，良好的團粒結構能創造穩定的孔隙網絡，利於水分滲透、空氣流通及根系發展，是土壤健康的重要指標。土壤的物理性質並非靜態，會受到水分含量、有機質多寡以及生物活動的影響而持續變化。

化學組成是土壤養分供應能力的核心，涉及礦物風化釋出的無機離子、有機質分解產生的養分，以及土壤溶液的化學平衡。土壤中的主要營養元素包括氮、磷、鉀、鈣、鎂、硫等巨量元素，以及鐵、錳、鋅、銅等微量元素。這些元素以各種離子形態存在於土壤溶液中，或被吸附於土壤膠體表面。土壤膠體，特別是有機膠體（腐植質）與無機黏粒礦物，具有巨大的表面積與電荷，能吸附並交換養分離子，此即土壤的陽離子交換能力，是土壤保肥力的關鍵機制。土壤酸鹼度則是一項綜合性化學指標，影響養分的溶解度、微生物活性以及重金屬的移動性。大多數植物與土壤生物適於在中性至微酸性的環境中活動，過酸或過鹼的土壤會導致養分固定或鋁、錳等元素的毒害。

生物組成是賦予土壤生命力的關鍵，將物理與化學組成緊密連結成一個活躍的生態系統。土壤生物群系極為多樣，從微觀的細菌、真菌、原生動物，到中觀的線蟲、蟎類、彈尾蟲，乃至宏觀的蚯蚓、螞蟻、鼯鼠等。這些生物在土壤中形成複雜的食物網，驅動著養分循環的關鍵過程。微生物，特別是細菌與真菌，是分解有機物質的主力，將動植物殘體轉化為簡單的無機養分或穩定的腐植質。菌根真菌則與植物根系形成共生關係，大幅擴展植物吸收水分與養分（尤其是磷）的範圍。土壤動物如蚯蚓，透過攝食與掘穴活動，混合有機與無機物質，改善土壤結構與通氣性，其排泄物形成的團粒是優良的土壤構造單元。土壤生物的多樣性與活性，直接決定了土壤的肥力狀態與生態功能。

這三種組成並非獨立存在，而是透過持續的交互作用構成一個整體。例如，有機質（生物活動的產物）能促進團粒結構的形成（物理性質），並提升陽離子交換能力（化學性質）。黏粒礦物（物理與化學組成）能保護有機質免於快速分解，並為微生物提供棲所。土壤水分與空氣在孔隙中的分布（物理性質）則調控著微生物的呼吸類型（好氧或厭氧），進而影響氮、硫等元素的化學形態轉化。因此，理解土壤必須從其物理、化學與生物組成的整合視角出發，任何一方面的失衡，例如有機質耗竭、酸鹼度極端化或生物多樣性喪失，都將損害土壤生態系統的完整性與服務功能，並連帶影響其上發展的農業生產與自然植被。

## 8.2.2 土壤生物群落的多樣性與功能

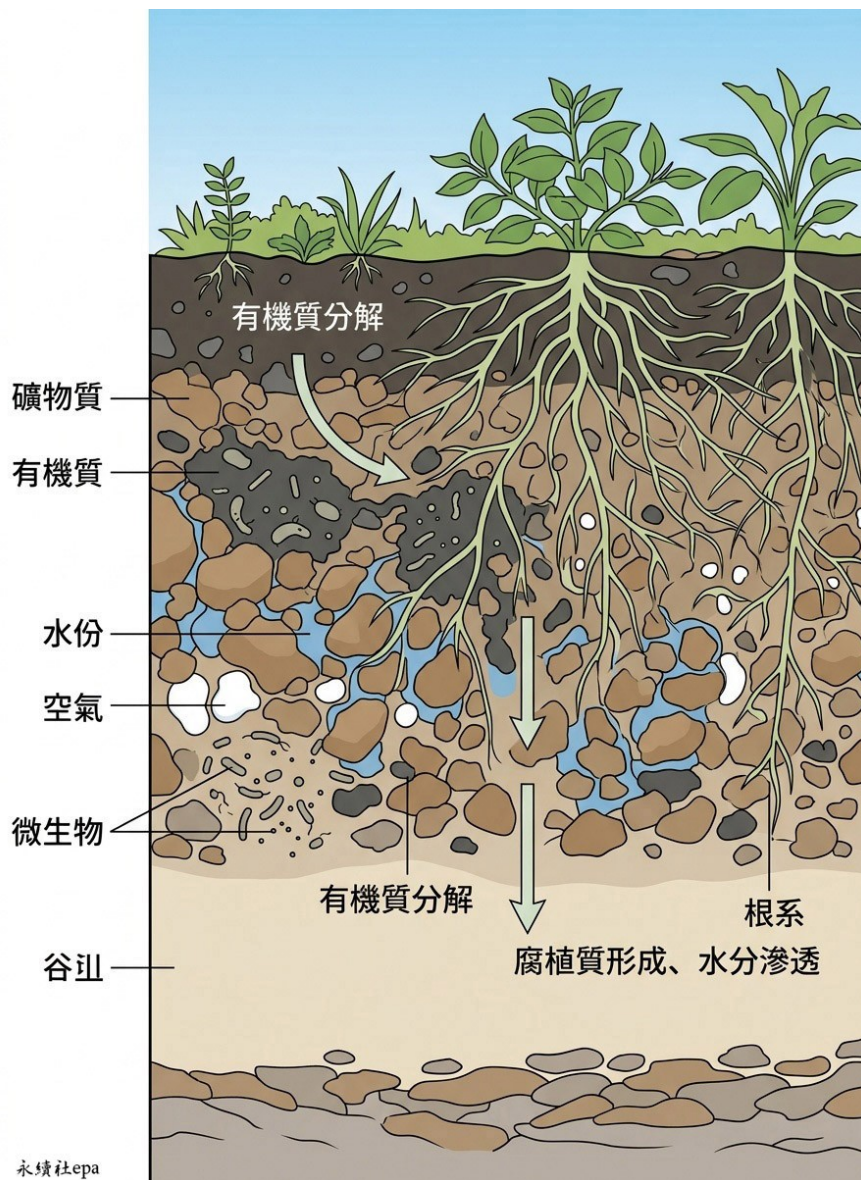
土壤生物群落是地球上生物多样性最為豐富且功能最為關鍵的生態系統之一，其組成涵蓋了從微觀的細菌、真菌、原生動物，到中觀的線蟲、蟎類、彈尾蟲，乃至宏觀的蚯蚓、螞蟻、甲蟲等無脊椎動物，甚至包括部分脊椎動物如鼩鼠。這些生物在土壤中形成了極其複雜的食物網與交互作用網絡，其物種數量與功能多樣性遠超過地表生態系統。一公克健康的土壤中可能含有數十億個細菌細胞、數百萬個真菌菌絲、數以萬計的原生動物以及數千個線蟲，其生物多样性之高，使得土壤被喻為「地下的熱帶雨林」。這種多样性並非隨機分布，而是受到土壤質地、有機質含量、水分、pH值以及植被類型等多重環境因子的嚴格篩選與調控，形成了具有高度空間異質性的微棲地結構。

土壤生物群落在生態系統中扮演著無可替代的關鍵功能，首要功能在於有機質的分解與養分循環。真菌與細菌作為主要的分解者，能分泌各種酵素將動植物殘體中的複雜有機物，如纖維素、木質素等，分解為較簡單的化合物，進而釋放出氮、磷、硫等無機養分，供植物再次吸收利用。此一過程不僅是生態系統養分循環的核心環節，也直接影響土壤有機碳的累積與穩定，對全球碳循環具有深遠意義。此外，菌根真菌與植物根系形成的共生關係，能大幅擴增植物吸收水分與養分（特別是磷）的範圍，此種互利共生是許多自然生態系統生產力的基礎。

其次，土壤生物對土壤結構的物理塑造功能至關重要。例如，蚯蚓的鑽孔與攝食活動能混合土壤礦物顆粒與有機質，形成穩定的團粒結構，這些孔道同時改善了土壤的通氣性與排水性，有利於植物根系生長與水分入滲。螞蟻和白蟻的築巢行為同樣能翻動土壤，改變其物理性質。微生物分泌的多醣類等代謝產物，能作為膠結劑促進土壤團聚體的形成，增強土壤抗侵蝕的能力。這些生物工程師的活動，共同創造並維持了適宜生命存續的土壤孔隙網絡與三相結構。

再者，土壤生物群落構成了複雜的地下食物網，調節著族群動態與生態平衡。捕食性線蟲、原生動物及某些蟎類以細菌、真菌或其他微小動物為食，此種營養級間的互動控制了微生物族群的數量，並加速了養分在食物網中的礦化速率。這種生物調控機制有助於維持土壤生態系統的穩定性與恢復力。此外，部分土壤生物能抑制植物病原菌的生長，或與病原菌競爭資源，發揮著天然的生物防治功能，減少農業對化學農藥的依賴。

然而，土壤生物群落極易受到人為活動的干擾而退化。集約農業中的深耕、化學農藥與化肥的過度使用、重金屬污染、土壤壓實以及有機質的流失，都會直接毒殺土壤生物或破壞其棲息環境，導致生物多样性下降與功能喪失。一旦關鍵功能群（如蚯蚓或菌根真菌）消失，土壤的肥力維持、結構穩定及養分循環效率將受到嚴重損害，形成難以逆轉的退化。因此，理解並保育土壤生物多样性，不僅是生態學研究的重要課題，更是實現永續土地管理與農業生產的基石。維護土壤生物完整性，意味著維護土壤生態系統服務的源頭，這對於全球糧食安全與生態平衡具有不可估量的價值。



### 8.2.3 土壤剖面與土壤發育過程

土壤剖面是土壤垂直切面的層次結構，是土壤發育過程的具體展現。一個完整的土壤剖面通常由數個可區分的層次所組成，這些層次稱為土壤發生層，主要可分為O層、A層、E層、B層、C層及R層。O層位於最表層，主要由有機物質構成，包括新鮮或部分分解的枯枝落葉；其下的A層為表土層，富含有機質與礦物質，顏色通常較深，是生物活動最為活躍的區域；在某些土壤中，A層下方可能出現E層，這是一個淋溶層，可溶性物質與黏粒被水帶走，留下砂粒或粉粒，顏色較淺；B層為澱積層，接收來自上層淋洗下來的黏粒、鐵鋁氧化物或有機膠體，結構緊實；C層是風化中的母質層，由鬆散的岩石碎屑或沉積物組成，受土壤發育過程影響較小；最底部的R層則是未風化的基岩。這些層次的組合、厚度與特徵，直接反映了土壤的類型、年齡及其所經歷的成土作用。

土壤的發育是一個極其緩慢而複雜的自然過程，受到五大成土因子的綜合影響：母質、氣候、生物、地形與時間。母質是土壤發育的物質基礎，其礦物組成與質地影響了土壤的初始性質與養分潛力。氣候因子，特別是溫度與降水，主導了風化作用的類型與速率，以及有機質的分解與累積。生物因子，包括植物、動物與微生物，不僅貢獻有機質，其活動也促進了土壤結構的形成與養分的循環。地形則透過影響排水、侵蝕與沉積，決定了水分與物質在景觀中的再分配，從而影響不同位置土壤的發育方向。時間是土壤發育的維度，從年輕土壤到成熟土壤，其剖面特徵會隨著時間演進而愈趨明顯與分化。

具體的土壤發育過程涉及一系列物理、化學與生物作用。物理風化作用，如凍融、熱脹冷縮，將母質破碎成細小顆粒。化學風化作用，如水解、氧化、溶解，則改變了礦物的化學組成，釋放出可溶性離子。生物活動，特別是植物根系的穿透與土壤生物的挖掘，改善了土壤的通氣與排水。同時，物質在剖面中的移動是關鍵過程，包括淋溶作用，即水分向下移動將可溶性鹽基、黏粒或有機膠體帶至下層；以及澱積作用，這些被帶下的物質在特定層次中沉澱累積。此外，表層有機質的添加與分解，形成了腐植質，對土壤的肥力與結構至關重要。這些過程的強度與組合，塑造了土壤剖面的獨特樣貌。

不同氣候帶與生態系統下的土壤發育，會形成特徵迥異的土壤類型與剖面。例如在寒冷潮濕的針葉林下，強烈的淋溶作用與酸性有機質累積，可能形成灰化土，其特徵是具有明顯的灰白色E層。在熱帶雨林高溫多雨的環境中，強烈的化學風化與淋溶作用會導致鹽基養分大量流失，形成鐵鋁氧化物富集的氧化土，其剖面深厚但B層堅硬。草原生態系統下，豐富的草類根系與季節性氣候，則有利於有機質在表土累積，形成肥沃的黑土或栗鈣土。透過觀察與分析土壤剖面，我們不僅能了解土壤當前的性質與肥力狀態，更能解讀其過去的發育歷史與所處的環境條件，這對於土地利用規劃、農業管理及生態保育都具有根本性的重要意義。

#### 8.2.4 土壤生態系統的脆弱性

土壤生態系統的脆弱性，指的是土壤系統在面對自然或人為干擾時，其結構、功能與生物多樣性容易遭受損害，且恢復能力有限的特性。這種脆弱性並非單一因素所致，而是源於土壤本身複雜的物理、化學與生物組成之間的緊密耦合關係，以及其與外部環境的動態交互作用。土壤生態系統的穩定性建立在生物與非生物因子長期演化形成的平衡之上，一旦此平衡被打破，系統便可能偏離原有狀態，甚至引發不可逆的退化。脆弱性評估需綜合考量土壤的內在屬性，如質地、有機質含量、酸鹼度、生物活性等，以及外在壓力源的強度、頻率與持續時間。理解土壤生態系統的脆弱性，是預測土地退化風險、制定有效保育策略的關鍵基礎。

土壤生態系統的脆弱性首先體現在其物理結構的易損性上。土壤團粒結構是維持孔隙度、通氣性與水分滲透能力的基礎，主要由有機質與黏粒透過微生物分泌物

膠結而成。然而，不當的農業耕作，如重型機械反覆碾壓，會破壞團粒結構，導致土壤壓實。壓實的土壤孔隙減少，不僅阻礙植物根系生長與水分下滲，更嚴重影響土壤中氣體交換，造成缺氧環境，進而抑制好氧微生物活動。此外，缺乏植被覆蓋的土壤表面，其團粒結構也極易受到降雨沖擊而分散，細小顆粒堵塞下層孔隙，形成地表結皮，進一步加劇逕流與侵蝕風險。這種物理結構的損傷往往是隱蔽且漸進的，但一旦發生，恢復所需的時間遠長於破壞的時間，顯示出其結構恢復力的侷限性。

在化學層面，土壤生態系統的脆弱性主要與其緩衝能力有關。土壤緩衝能力是指土壤抵抗酸鹼度劇烈變化的能力，這依賴於黏土礦物、有機質及碳酸鹽等成分。當面臨酸沉降、過量化肥施用或工業污染物輸入時，土壤的化學平衡可能被迅速瓦解。例如，長期施用銨態氮肥會經硝化作用釋放氫離子，導致土壤酸化。酸化會加速鋁、錳等有毒金屬的溶出，毒害植物根系與土壤生物，同時促使鈣、鎂等營養鹽流失，降低土壤肥力。此外，土壤對重金屬等污染物的吸附容量有限，當輸入量超過其負荷，污染物便會進入土壤溶液，對生物產生直接毒害或經食物鏈累積。化學性質的惡化常伴隨生物多樣性的喪失，形成負面循環，削弱系統的整體恢復力。

土壤生物群落是生態系統功能的執行者，其多樣性與活性直接關乎系統的脆弱性。土壤中蘊含著地球上最豐富的生物多樣性，從微生物、真菌、原生動物到中小型土壤動物，形成複雜的食物網，驅動著養分循環、有機質分解、土壤結構形成等關鍵生態過程。這類生物網絡具有冗餘性，即多個物種可能執行相似功能，從而提供系統穩定性。然而，當干擾過於劇烈或持續，導致關鍵功能群（如菌根真菌、蚯蚓）消失或數量銳減時，系統的冗餘性可能被耗盡，特定生態功能便會衰退或停擺。例如，殺蟲劑或殺菌劑的廣泛使用，雖針對特定害蟲或病原，但常非特異性地傷害有益土壤生物，破壞分解與養分礦化過程。生物群落的簡化會降低土壤生態系統應對後續干擾的彈性，使其更加脆弱。

最後，土壤生態系統的脆弱性必須置於更大的景觀與氣候脈絡中審視。土壤並非孤立存在，其健康狀態深受地形、水文、植被覆蓋及氣候條件影響。例如，坡地土壤本就因重力作用而較不穩定，若再移除森林植被，其侵蝕脆弱性將急遽升高。氣候變遷帶來的極端降雨、乾旱或溫度波動，更構成新的壓力源。乾旱會導致土壤有機質加速分解，並使土壤生物脫水死亡；暴雨則直接加劇侵蝕。這些外在氣候衝擊與既有的人為管理失當產生加乘效應，顯著提升土壤退化的風險。因此，管理土壤脆弱性不能僅聚焦於土壤本身，必須採取景觀尺度的整合性策略，包括維持植被覆蓋、改善土地利用方式、以及建構氣候調適能力，方能有效增強土壤生態系統的韌性，降低其面對內外壓力的脆弱性。

## 8.3 土地退化

土地退化是指土地生產力、生態功能或經濟潛力因自然過程或人為活動而長期下降的現象。這是一個複雜且多面向的過程，不僅涉及土壤本身的劣化，更涵蓋了整個土地生態系統的衰退，包括植被覆蓋減少、生物多樣性喪失以及水文循環的改變。土地退化並非單一事件，而是多種壓力因子長期累積作用的結果，其影響深遠，直接威脅到全球糧食安全、生態系統服務的維繫以及數億人口的生計。從生態學角度審視，土地退化實質上是土地生態系統結構與功能的簡化與失衡，當系統承受的干擾超過其自我調節與恢復的閾值時，便會進入一種生產力低下的退化狀態。

土地退化的驅動因素可大致分為自然與人為兩大類。自然因素包括長期乾旱、洪水、颶風等極端氣候事件，以及地質侵蝕等緩慢的自然過程。然而，當代全球土地退化的主導力量無疑是人類活動。不當的農業實踐，如過度耕作、過度放牧、森林砍伐以及灌溉管理不善，是導致土地退化的核心人為驅動因子。這些活動破壞了土壤結構，耗竭土壤有機質與養分，加速了水土流失。此外，工業化與都市化的快速進展，透過大規模的土地轉用、基礎建設開發以及污染排放，進一步加劇了土地資源的壓力與退化。這些人類活動往往與社會經濟因素緊密交織，例如人口增長、貧困、土地權屬不清以及短視的經濟政策，共同構成了一個促使土地退化的複雜社會生態系統。

從全球尺度觀察，土地退化已是一個不容忽視的環境危機。根據聯合國防治荒漠化公約的評估，全球超過三分之一的土地表面正遭受退化影響，每年約有 1200 萬公頃的生產性土地因退化而完全喪失。這些退化土地分布廣泛，但以乾旱、半乾旱及乾旱半濕潤地區最為嚴重，這些地區生態系統本就脆弱，對人為干擾的抵抗力較低。非洲薩赫爾地區、中亞部分地區、中國西北部以及澳洲內陸等地，都是土地退化顯著的熱點區域。然而，土地退化並非僅限於乾旱地區，在濕潤的熱帶與溫帶地區，因森林砍伐與集約農業所導致的土壤侵蝕與肥力下降問題同樣嚴峻。土地退化的後果是跨尺度的，它不僅造成地方層級的農牧業產量下降與貧困加劇，更透過生物地球化學循環的改變、塵暴的增加以及碳匯功能的喪失，對區域乃至全球環境產生深遠影響。

土地退化與氣候變遷之間存在著顯著的双向回饋關係。一方面，氣候變遷透過改變溫度與降水格局、增加極端天氣事件的頻率與強度，成為加速土地退化的重要驅動力。例如，更頻繁且嚴重的乾旱會直接導致植被死亡、土壤乾裂，加劇侵蝕與荒漠化過程。另一方面，土地退化本身也會加劇氣候變遷。健康的植被與土壤是重要的碳匯，當土地退化導致植被覆蓋減少、土壤有機碳流失時，大量溫室氣體便釋放至大氣中。此外，退化土地地表反照率的改變也可能影響區域能量平衡。這種正回饋循環使得土地退化與氣候變遷成為相互強化的全球性挑戰，突顯了採取整合性對策的必要性。

面對土地退化的嚴峻挑戰，國際社會已逐漸形成共識，並推動各項防治與土地復育行動。永續土地管理的概念應運而生，其核心在於採用那些能維持或提升土地生產力與生態服務，同時減緩退化並促進社會經濟福祉的土地利用方式。這包括推廣保育農業、實施輪牧制度、進行植樹造林與森林復育、發展農林複合系統以及修復退化濕地等。這些措施旨在重建土地生態系統的結構與功能，增強其對干擾的抵抗力與恢復力。成功的土地退化防治不僅需要適切的技術與方法，更有賴於健全的政策框架、清晰的土地權屬、社區的積極參與以及跨部門的協調合作。從全球生態系統管理的視角來看，扭轉土地退化趨勢是實現土地零退化目標、保障地球生命支持系統穩定、並邁向永續未來的關鍵一步。

### 8.3.1 土地退化的定義、範圍與全球現況

土地退化是指土地生產力、生物多樣性及其生態系統服務功能因自然過程或人為活動而長期下降或喪失的現象。這是一個複雜且多面向的過程，其核心在於土地原本具有的潛在生產力與實際生產力之間出現持續性的負向差距。廣義的土地退化不僅限於土壤本身的劣化，更涵蓋了整個土地生態系統的衰退，包括植被覆蓋的減少、生物多樣性的喪失、水文循環的破壞以及景觀層次的結構與功能惡化。從生態學角度來看，土地退化是生態系統在承受壓力或干擾後，其恢復力不足以維持原有狀態，導致系統結構與功能發生不可逆或難以逆轉的負向演替。聯合國防治荒漠化公約（UNCCD）將土地退化定義為「在乾旱、半乾旱和乾旱次濕潤地區，由於各種因素，包括氣候變異和人為活動，所導致的土地生物或經濟生產力的降低或喪失」，但現今學界普遍認為此定義應擴展至全球所有生態區域。

土地退化的範圍極為廣泛，其表現形式多樣，主要可歸納為幾個關鍵類型：土壤侵蝕、土壤肥力耗竭、土壤鹽鹼化、土壤酸化、土壤壓實、土壤汙染、植被退化以及水文狀況惡化。這些退化過程往往相互關聯、彼此加劇。例如，植被覆蓋的減少會加劇土壤侵蝕，而表土流失又進一步導致土壤肥力下降與持水能力降低，形成惡性循環。從空間尺度上，土地退化可發生在局部地塊，如單一農田因過度耕作而板結；也可擴展至區域乃至全球尺度，如大範圍的荒漠化或熱帶雨林消失。時間尺度上，退化可能是漸進且不易察覺的，歷經數十年才顯現嚴重後果；也可能因極端事件（如特大洪水或長期乾旱）而急遽加速。

全球土地退化的現況令人憂慮。根據聯合國糧食及農業組織（FAO）與聯合國環境規劃署（UNEP）的評估，全球超過三分之一的土地表面正遭受不同程度的退化，直接影響到約三十億人口的生計。其中，乾旱地區的退化問題尤為嚴峻，但濕潤與半濕潤地區也因農業集約化、都市擴張與工業汙染而面臨嚴重挑戰。亞洲與非洲是土地退化面積最廣的區域，但歐洲、美洲與大洋洲亦存在顯著問題。全球每年因土地退化而喪失的肥沃表土估計高達二百四十億噸，相當於剝去整個澳洲麥田的表土。這不僅導致農業生產力下降，威脅全球糧食安全，更造成生物多樣性急遽喪失、碳儲存能力減弱、水資源短缺加劇，以及貧困與社會不穩定等深遠的社會經濟

影響。土地退化已成為繼氣候變遷之後，影響地球生態系統穩定性與人類永續發展的最重大環境挑戰之一。

### 8.3.2 森林砍伐與密集耕作的影響

森林砍伐與密集耕作是導致土地退化最顯著且影響深遠的人為活動之一。森林作為陸域生態系統中生物多樣性與生態功能的核心載體，其大規模移除直接破壞了地表植被的保護層，使土壤暴露於風力、水力等侵蝕因子的直接作用之下。樹木根系原本能有效固結土壤，攔截降雨並減緩地表逕流速度，一旦森林消失，土壤團粒結構因有機質輸入中斷而逐漸瓦解，其抗蝕能力便急遽下降。熱帶雨林地區的土壤通常貧瘠且脆弱，養分多儲存於活體植被中，砍伐後若未經適當管理，土地生產力會在短期內迅速耗竭，最終形成難以恢復的劣化地。此外，森林砍伐亦中斷了生態系統的水文調節功能，區域降雨模式可能因此改變，並加劇洪澇與乾旱的極端事件發生頻率。

密集耕作則是農業系統中為了追求單位面積最大產量，而採取的連續性、高強度土地利用方式。這種耕作模式往往忽略土地的自然恢復週期，透過連年種植單一作物、頻繁翻耕、以及大量依賴化學肥料與農藥來維持產出。機械翻耕雖然能暫時鬆土並清除雜草，但長期下來會破壞土壤的團粒結構，加速有機質的氧化分解，導致土壤孔隙度降低、容重增加，影響根系發育與水分滲透。單一作物種植減少了土壤生物的棲息環境與食物來源多樣性，使得土壤生態系統的平衡被打破，有益微生物與蚯蚓等土壤動物族群衰退，進一步削弱土壤的天然肥力與結構穩定性。

化學投入的依賴是密集耕作另一項關鍵特徵。過量施用氮磷鉀化肥雖能短期提升作物產量，但會導致土壤酸化或鹽鹼化，改變土壤化學性質。同時，化肥中的營養元素並非完全被作物吸收，部分隨逕流或淋溶進入水體，造成水域優養化，而土壤本身的養分庫卻未得到有效補充。農藥的廣泛使用則在抑制病蟲害的同時，也無差別地毒害了土壤中的非目標生物，包括分解者與授粉者，破壞了土壤食物網的完整功能。這種耕作方式實質上是將土壤視為一種惰性基質，而非活的生態系統，其結果是土壤健康持續惡化，生產力逐漸依賴外部投入來維持，形成一種生態上的脆弱平衡。

森林砍伐與密集耕作經常在時空上相互關聯，形成土地退化的複合驅動力。許多地區的森林被清除後，土地隨即轉為農業用途，開始密集耕作。這種轉變不僅喪失了原有森林的碳儲存與氣候調節功能，新建立的農業系統若管理不善，其土壤碳庫也會因有機質分解加速而大量釋出二氧化碳，加劇全球暖化。從景觀尺度來看，大面積單一作物景觀取代了原本複雜的森林生態系統，降低了區域的生物多樣性與生態韌性，使土地系統更易受到氣候變異、病蟲害爆發等干擾的衝擊。因此，理解這兩種活動對土地退化的具體影響機制，是設計任何土地復育與永續管理策略不可或缺的科學基礎。

### 8.3.3 都市化與工業化導致的土地利用變遷

都市化與工業化是驅動土地利用變遷的兩大核心力量，其影響範圍與深度在近現代社會中日益顯著。都市化不僅意味著人口從鄉村向城市的集中，更伴隨著建成區的擴張，將原本的自然或農業用地轉變為住宅、商業、工業及交通基礎設施用地。這種轉變往往具有不可逆性，一旦土地被鋪面覆蓋或進行深度開發，其原有的生態功能，如土壤滲透、碳儲存、生物棲息等，便會大幅減損甚至完全喪失。工業化則進一步強化了此一過程，工業區的設立、礦產開採、能源設施的建設，不僅直接占用大面積土地，其運作過程中所產生的污染物更會對周邊土地與水體造成長遠的負面影響，導致土地生產力下降與生態系統退化。

從歷史進程觀察，工業革命以降，全球土地利用變遷的速率急遽加快。早期工業化國家的城市擴張往往沿著交通幹線蔓延，形成帶狀或同心圓式的發展模式，吞噬周邊的優質農地與自然植被。進入二十世紀後期，隨著全球化與產業結構轉型，已開發國家的工業用地需求可能趨於飽和或外移，但都市蔓延與郊區化的現象並未停歇，反而以低密度、依賴私人運具的形態持續消耗土地資源。與此同時，新興工業化國家則經歷著更為劇烈的轉變，為了承接全球製造業鏈的環節，大規模的工業園區與新興城市在短時間內於農田或生態敏感區上拔地而起，這種快速且大尺度的土地轉用，經常缺乏完善的環境規劃與緩衝機制。

此類土地利用變遷對土地資源本身及其生態服務功能構成多重衝擊。首先，土壤密封是都市化最直接的後果之一。鋪設瀝青、混凝土等不透水層，阻斷了土壤與大氣的水分、氣體交換，使得土壤生物群落消亡，並加劇地表逕流與都市洪澇風險。其次，工業化過程中的污染物排放，包括重金屬、有毒化學物質及酸性沉降物，會進入土壤並長期累積，改變土壤的物理化學性質，危害土壤生物與植物生長，並可能透過食物鏈影響人體健康。再者，都市與工業邊緣的零碎化土地，其生態完整性遭受破壞，成為外來入侵種的溫床，並削弱了區域的生態連結度。

面對都市化與工業化帶來的土地挑戰，整合性的土地規劃與管理策略顯得至關重要。這包括推動緊湊型城市發展，以提升土地利用效率並保護週邊農地與自然空間；實施工業生態學原則，促進產業共生與廢棄物資源化，減少工業對土地的佔用與污染；以及透過生態復育手段，對已受破壞的工業廢棄地或都市邊緣退化土地進行修復，重建其生態功能。這些措施需要跨部門的政策協調、嚴謹的環境影響評估制度，以及公眾的參與意識，方能在發展需求與土地資源永續之間取得平衡。

### 8.3.4 氣候變遷加速土地退化的機制

氣候變遷已成為驅動全球土地退化的重要加速因子，其作用機制複雜且多層次，主要透過改變溫度、降水、極端天氣事件頻率與強度等氣候參數，直接或間接地削弱土地的生態功能與生產力。全球平均氣溫的上升，首先加劇了土壤水分的蒸發散作用，特別是在半乾旱與乾旱地區，導致土壤有效水分減少，乾旱期延長。這

種水文條件的改變，不僅直接抑制植物生長，降低植被覆蓋度，更削弱了植被對土壤的保護功能，使土壤更易受到侵蝕力的影響。同時，升溫也會加速土壤有機質的分解速率，特別是在高緯度地區，原本被封存在寒冷土壤中的有機碳會因溫度升高而加速礦化，釋放出二氧化碳，進一步加劇溫室效應，形成一種惡性循環。土壤有機質的流失直接導致土壤結構惡化、保水保肥能力下降，土地生產力因而衰退。

降水模式的改變是另一項關鍵機制。氣候變遷導致許多地區的降雨強度增加，但降雨頻率可能降低，這種集中而劇烈的降雨事件對地表土壤的沖擊力遠大於和緩的降雨。高強度降雨超過土壤的入滲能力，產生大量地表逕流，逕流不僅帶走表土中肥沃的細顆粒與養分，更會形成沖蝕溝，造成嚴重的土壤流失。另一方面，在某些地區，氣候變遷可能導致降雨量減少或雨季不穩定，引發更頻繁與更嚴重的氣象乾旱。長期乾旱使土壤變得乾燥、疏鬆，植被枯萎，地表裸露，這不僅降低了土地的生態承载力，也為風蝕創造了條件，塵暴發生頻率與強度可能隨之增加。

極端氣候事件頻率與強度的增加，對土地退化產生突發性且劇烈的衝擊。例如，強烈的熱浪會導致作物大規模熱衰竭與死亡，破壞農業生態系統；超級颱風或氣旋帶來的狂風暴雨，則可能在短時間內引發嚴重的土石流、崩塌與洪水，瞬間摧毀表土層與植被，使土地退化成難以恢復的狀態。海平面上升則透過海水入侵沿海地區的含水層，導致土壤鹽鹼化，使原本肥沃的農田或濕地因鹽分累積而喪失生產力與生態功能。這些極端事件往往超出生態系統的恢復韌性，使土地從暫時性損傷轉向長期性退化。

此外，氣候變遷也透過影響生物因子間接加速土地退化。溫度與降水格局的改變會擾動原有的生態系統平衡，可能導致害蟲、病原體分布範圍擴張或爆發頻率增加，進而引發森林衰退或作物病害，削弱植被覆蓋。同時，氣候壓力可能促使農牧業者採取更不可持續的土地利用方式，例如在乾旱加劇時過度抽取地下水灌溉，或將畜牧活動推向更脆弱的生態邊緣地帶，這些適應（或 maladaptation）行為反而加劇了土地退化的進程。因此，氣候變遷並非獨立作用，而是與既有的人為壓力產生協同效應，共同推動土地朝向不可逆的退化方向發展。

## 8.4 土壤侵蝕

土壤侵蝕是土地退化最顯著且普遍的表現形式之一，指地表土壤及其母質在水力、風力、重力等外營力作用下，發生剝離、搬運和沉積的過程。這一過程不僅導致表層肥沃土壤的流失，更對農業生產力、生態系統健康以及人類社會的永續發展構成嚴重威脅。土壤侵蝕可分為自然侵蝕與加速侵蝕兩類，自然侵蝕又稱地質侵蝕，其速率通常與土壤自然形成速率相平衡，是塑造地表地貌的長期地質力量；而加速侵蝕則主要源於人類不當的土地利用活動，其侵蝕速率遠超過土壤的自然生成速率，導致土壤資源的淨損失。在氣候變遷加劇極端天氣事件的背景下，土壤侵蝕

的過程與強度正經歷顯著變化，使得這一議題在當代環境管理中的重要性與日俱增。

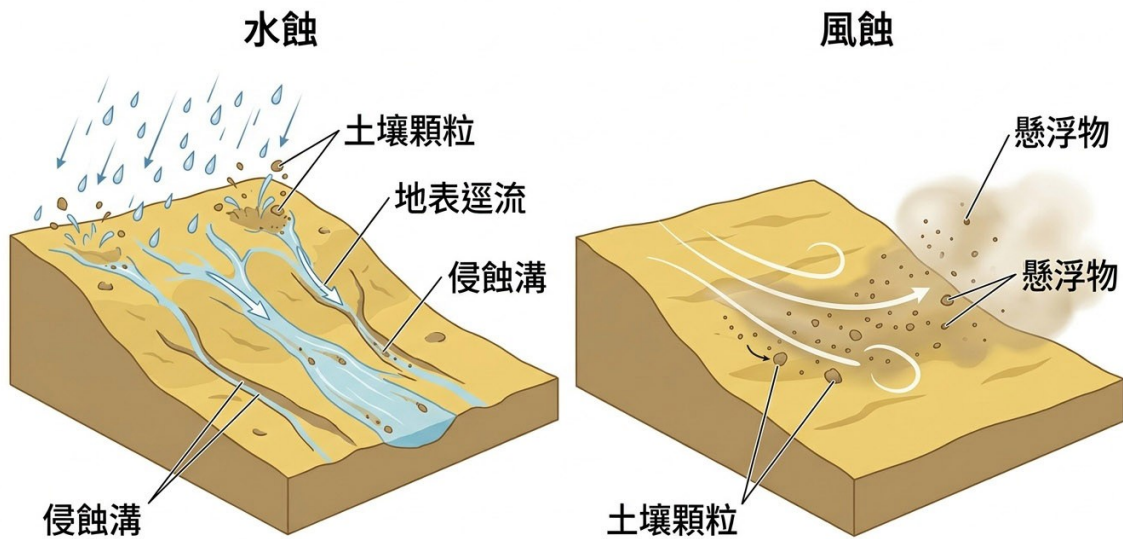
水蝕與風蝕是土壤侵蝕最主要的兩種機制。水蝕是由降雨和地表逕流所驅動，其過程始於雨滴對土壤表面的打擊，這會破壞土壤團粒結構，使細小顆粒堵塞土壤孔隙，降低入滲率並增加地表逕流。隨後，匯集的地表水流會根據其能量大小，依次形成層狀侵蝕、細溝侵蝕和沖溝侵蝕，逐步搬運並帶走土壤顆粒。水蝕的強度受到降雨強度與歷時、土壤特性、坡度、植被覆蓋以及土地利用方式等多重因子影響。風蝕則主要發生在乾燥、植被稀疏且土壤質地輕細的地區，其過程包括土壤顆粒的躍移、懸浮和表土蠕動。風蝕不僅直接吹失表土，其攜帶的沙塵還會對下風處的農田、設施及空氣品質造成二次危害。無論是水蝕還是風蝕，其根本驅動力皆源於自然營力，但人類活動往往大幅加劇了這些過程的規模與速度。



在土壤侵蝕的成因分析中，人為因子與自然因子的相對貢獻一直是研究的焦點。自然因子提供了侵蝕發生的潛在條件，例如陡峭的地形、鬆散的土壤質地、集中的降雨或強風等。然而，現代加速侵蝕的主導力量無疑是人類活動。大規模的森林砍伐移除了保護土壤的植被冠層與根系網絡；不當的農業實踐，如順坡耕作、過度放牧、連續單一作物種植以及休耕期土地裸露，都顯著降低了地表覆蓋與土壤抗蝕力；大規模的基礎建設、礦業開採和都市擴張則直接擾動地表，創造了大量易受侵蝕的裸露面。雖然氣候變遷導致的降雨模式改變與極端事件增加，作為自然因子的一部分正在強化侵蝕潛力，但這些變化所帶來的衝擊，往往是透過與脆弱的人為管理土地交互作用而放大。因此，辨識並量化各驅動因子的貢獻，對於制定有效的防治策略至關重要。

土壤侵蝕對農業生產力的影響是直接且深遠的。表土層通常富含有機質、養分和有益微生物，是作物生長的基礎。侵蝕過程優先移走這些較輕、較肥沃的細小顆粒，導致土壤質地粗化、保水保肥能力下降、土壤結構惡化。養分與有機質的流失不僅降低當季作物產量，更損害土壤的長期生產潛力。為了維持產量，農民不得不增加化肥與灌溉的投入，這不僅增加生產成本，也可能導致水體優養化與地下水耗竭等二次環境問題。此外，侵蝕造成的沖溝會分割農田，妨礙機械作業；沉積物淤塞下游灌溉渠道、水庫與河流，縮短水利設施壽命並增加清淤成本。從宏觀經濟角度看，土壤侵蝕導致的土地生產力下降，威脅區域糧食安全，並可能加劇農村貧困與人口外流，形成環境與社會經濟的惡性循環。

面對土壤侵蝕的挑戰，發展與實施有效的水土保持技術與工程措施是當務之急。這些措施可分為三大類：農藝措施、工程措施與生物措施。農藝措施旨在透過改變耕作方式來增加地表覆蓋與土壤抗蝕性，例如等高耕作、帶狀間作、覆蓋作物、少耕或免耕法等。工程措施則透過物理結構來改變地形或攔截逕流，包括修建梯田、山邊溝、排水系統、沉砂池及防風柵欄等。生物措施則著重於利用植物來穩定土壤，如營造防風林、植生草帶、緩衝帶以及進行退化地的植被復育。一個成功的水土保持計畫必須基於對當地環境條件與社會經濟脈絡的深入理解，採取綜合性的治理策略，將不同措施協同應用。此外，社區參與、政策支持（如對保育措施的補貼）以及科學監測與評估，都是確保水土保持工作得以長期持續並發揮效益的關鍵要素。在全球氣候變遷的背景下，這些措施也需具備足夠的韌性，以應對未來可能更頻繁、更強烈的侵蝕驅動力。



永續社epa

#### 8.4.1 水蝕與風蝕的作用機制

土壤侵蝕是土地退化最普遍的表現形式之一，其中水蝕與風蝕是兩種最主要的物理作用機制。水蝕是指由降雨和地表逕流所引發的土壤顆粒分離、搬運與沉積過程。其作用始於雨滴對裸露土壤表面的直接打擊，此動能會破壞土壤團粒結構，使細小顆粒分散並堵塞土壤孔隙，降低入滲率，從而增加地表逕流。隨後，匯集的地表水流會根據其流速與流量，進行片蝕、溝蝕乃至更劇烈的沖蝕。片蝕是較均勻地移走表層土壤，雖不易立即察覺，但長期累積的土壤流失量極為可觀。當水流集中，則會切入土壤形成細溝，若進一步發展為無法以一般耕犁消除的切溝，則表示侵蝕已進入嚴重階段，不僅造成耕地分割，更可能導致地形永久改變。

風蝕則主要發生在氣候乾燥、植被稀疏且土壤質地輕細的地區，其作用機制依賴風力對土壤顆粒的搬運。風蝕過程可分為三種形式：懸浮、跳躍與表面蠕動。最細小的黏土與粉砂顆粒可被風揚起至高空，進行長距離懸浮搬運；中等大小的砂粒則以跳躍方式前進，在撞擊地表時可能激發更多顆粒進入運動狀態；而較大的顆粒則沿地表滾動或滑動，稱為蠕動。風蝕的強度受風速、土壤濕度、地表粗糙度及植被覆蓋度等多重因子影響。乾燥且無保護的土壤表面在強風作用下，會發生明顯的吹蝕，導致表土中有機質和細粒物質優先喪失，土壤逐漸粗化，肥力下降。

從作用力的本質來看，水蝕與風蝕雖同為侵蝕營力，但其能量來源、作用條件與地貌影響各有特點。水蝕的驅動力主要來自水的重力與流動動能，其侵蝕與搬運能力與坡度、逕流量和土壤抗蝕性密切相關，常形成特定的溝壑系統與沉積扇。風蝕的驅動力則來自氣壓梯度造成的風，其搬運能力與風速的三次方成正比，因此對風速變化極為敏感，常形成沙丘、風蝕窪地等風成地貌。在許多地區，這兩種侵蝕機制可能交替或共同作用，例如在乾旱與半乾旱地區，短暫但強烈的降雨可能引發水蝕，而長期乾旱期間則以風蝕為主，加劇土地退化。

理解水蝕與風蝕的詳細作用機制，是有效規劃水土保持措施的科學基礎。針對水蝕，措施多著眼於降低逕流速度、增加入滲與分散水流能量，如等高耕作、階梯田、植生覆蓋等。對於風蝕，則主要透過增加地表粗糙度與降低風速來防治，如建立防風林、覆蓋作物或設置草方格沙障。這些防治策略必須基於對當地主導侵蝕類型及其作用過程的深入分析，方能對症下藥，減緩土壤流失，維護土地生產力與生態功能。

#### 8.4.2 人為因子與自然因子的相對貢獻

土壤侵蝕的發生，是自然因子與人為因子共同作用的結果，然而在全球尺度上，人類活動已成為加劇土壤侵蝕速率的主導力量。自然因子提供了侵蝕發生的背景條件與潛在驅動力，包括氣候、地形、土壤特性與植被覆蓋等。例如，降雨的強度與頻率直接決定了水蝕的潛能，強降雨事件能產生巨大的動能，剝離並搬運土壤顆粒。地形坡度則影響地表逕流的速度與侵蝕力，一般而言，坡度愈陡，土壤流失的風險愈高。土壤本身的抗蝕性，如其質地、有機質含量、結構穩定性等，決定了其抵抗侵蝕的能力。此外，自然植被透過冠層截留降雨、根系固結土壤、增加地表粗糙度等方式，扮演著關鍵的緩衝角色。在未受人為干擾的自然生態系統中，這些因子通常會達到一種動態平衡，使得土壤形成的速率與侵蝕損失的速率大致相當，從而維持地表的穩定。

相較於自然因子的背景作用，人為活動往往以劇烈且持續的方式改變地表環境，顯著放大了侵蝕過程。農業活動，特別是對土地的不當管理，是導致加速侵蝕的最主要人為因子。大規模的森林砍伐與草原開墾，移除了天然的植被保護層，使土壤直接暴露於降雨與風力之下。傳統的犁耕農業，尤其是順坡耕作，破壞了土壤團粒結構，降低了土壤入滲能力，並創造了利於逕流集中與溝蝕發展的條件。過度放牧會減少植被覆蓋，踐踏壓實土壤，削弱其抗蝕性。這些農業實踐改變了地表的微地形與水文過程，使得在相同自然氣候條件下，人為影響區域的土壤侵蝕速率可能比自然狀態高出數十倍甚至百倍。

除了農業，基礎建設、都市化與採礦等非農業活動也貢獻了顯著的土壤侵蝕。道路、建築工地與礦區的開挖，造成大面積地表擾動，產生大量鬆散土石，成為侵蝕的豐富物質來源。施工期間若缺乏適當的水土保持措施，極易在暴雨期間引發嚴重的泥流與沉積物污染。都市化過程中的不透水鋪面增加，改變了區域水文循環，使得地表逕流量與峰值增大，加劇下游地區的沖刷作用。這些工程活動通常具有高度的局部性與衝擊強度，雖然總面積可能不及農業用地，但其單位面積的土壤流失量往往極為驚人。

量化人為與自然因子的相對貢獻是一項複雜的挑戰，因其具有高度的時空變異性，且兩者經常交互作用。全球評估指出，在人類文明出現之前，全球土壤侵蝕主要由自然過程主導，但自農業革命以來，人為誘發的侵蝕已逐漸超越自然背景值。

近代，由於人口增長、糧食需求與經濟發展的壓力，人為加速侵蝕的規模與速率急遽上升。在某些生態脆弱或管理不善的集水區，人為活動對土壤流失量的貢獻可超過九成。然而，在極端氣候事件頻發的區域，如颱風、豪雨或長期乾旱後的特大暴雨，自然因子的貢獻比例會暫時性升高。總體而言，當前全球面臨的土壤侵蝕危機，其核心在於人類土地利用方式與土地承载力之間的失衡，人為因子不僅放大了自然侵蝕力，更創造了許多自然狀態下不存在的侵蝕環境與路徑。

### 8.4.3 土壤侵蝕對農業生產力的影響

土壤侵蝕對農業生產力的影響是深遠且多層次的，其作用機制不僅限於表土流失的直接損失，更涉及土壤物理、化學及生物性質的長期退化，進而削弱農業系統的生產潛力與永續性。當表層富含有機質與養分的土壤被水蝕或風蝕帶走，農田的基礎生產力便面臨根本性的動搖。表土層通常是土壤剖面中最肥沃的部分，含有高比例的有機質、氮、磷、鉀等植物必需養分，以及活躍的微生物群落。侵蝕過程移除了這層關鍵的資源庫，使得下層通常較為貧瘠、結構緊實的底土暴露出來或成為新的耕作層。這直接導致土壤的養分供應能力急遽下降，農民必須依賴更大量的化學肥料來維持作物產量，增加了生產成本，並可能引發進一步的環境問題，如水體優養化。

從物理性質來看，土壤侵蝕會破壞土壤的團粒結構，降低其孔隙度與通氣性。良好的土壤結構能維持適當的水分滲透與儲存能力，但侵蝕後的土壤往往趨向密實或形成地表結皮，這會減少雨水入滲，增加地表逕流，形成土壤流失與水分利用效率低下的惡性循環。此外，土壤持水能力的下降，使得作物在乾早期更易遭受水分脅迫，產量穩定性大打折扣。特別是在坡地農業區，侵蝕常導致土層變薄，最終使基岩或無生產力的心土出露，徹底喪失農業利用價值，這過程即所謂的「土地石化」或「劣化」，在許多地區已造成可耕地面積的實質減少。

土壤侵蝕亦對土壤生物群落與生物化學過程產生負面衝擊。隨著有機質的流失，土壤中作為分解者與養分循環引擎的微生物、蚯蚓及其他土壤動物失去食物來源與適宜的棲息環境，其數量與多樣性會顯著降低。這使得枯枝落葉等有機物的分解速率變慢，養分礦化與釋放的效率下降，土壤的自然肥力維持機制受損。同時，土壤侵蝕會改變田間的微地形，可能形成沖蝕溝，不僅分割農地、妨礙機械作業，更會導致土壤水分與養分在空間上重新分布，造成田區內生產力的不均，增加田間管理的難度。這些生物與地形的變化，長遠而言侵蝕了農業生態系統的復原力與自我調節能力。

在經濟與社會層面，土壤侵蝕導致的農業生產力下降直接威脅糧食安全與農民生計。為彌補產量損失，農民可能被迫開墾更邊際的土地，如陡坡或森林地，這又加劇了更大範圍的生態破壞與侵蝕風險。此外，生產力下降意味著單位土地面積的

產出減少，在人口持續增長的壓力下，可能迫使農業系統走向更集約化、更高外部投入的模式，進一步加劇資源耗竭與環境壓力。因此，土壤侵蝕不僅是一個農學或土壤學的問題，更是關乎農業永續性、農村發展與長期糧食供給的關鍵性環境挑戰。理解其對生產力的多重影響，是規劃有效水土保持措施與永續土地管理策略的重要基礎。

#### 8.4.4 水土保持的技術與工程措施

水土保持的技術與工程措施旨在減緩或阻止土壤侵蝕的過程，同時促進水資源的有效利用與保育。這些措施的核心目標在於降低地表逕流的流速與流量，增加水分入滲，並穩定土壤結構，從而維護土地生產力與生態系統功能。有效的土壤與水資源保育不僅是農業永續經營的基石，也是對抗土地退化、荒漠化及因應極端氣候事件的重要防線。其實施必須基於對當地氣候、地形、土壤特性及土地利用方式的深入理解，採取因地制宜的綜合策略。

在技術措施方面，農藝方法扮演著關鍵角色。這包括作物輪作、間作與覆蓋作物的種植，透過不同作物根系結構與殘體對土壤的保護，有效減少雨滴直接衝擊地表，並改善土壤團粒結構。等高耕作與等高條植是針對坡地農業的重要技術，透過沿等高線方向進行耕犁與種植，創造微地形障礙，攔截並減緩地表逕流，增加水分滯留與入滲時間。此外，施用有機質改良劑如堆肥或綠肥，能顯著提升土壤有機質含量，增強土壤保水能力與抗蝕性。這些農藝措施成本相對較低，易於農民採行，並能與現有農業系統整合，從根本上改善土壤健康。

工程措施則涉及更為結構性的介入，通常用於侵蝕風險較高或已發生嚴重侵蝕的地區。梯田工程是其中最經典的型式之一，透過在坡面上構築一系列水平或近乎水平的台階，並配合邊埂與排水溝，將長坡截短，大幅降低逕流流速與侵蝕能量。山邊溝與寬壟階段則是改良式的階台式水土保持工程，特別適用於機械化耕作的地區。為了安全宣洩集中逕流，需要構築完善的排水系統，如草溝、砌石溝或混凝土襯砌的排水溝，並在適當位置設置沉砂池，以攔截泥砂，防止下游河道與水庫的淤積。

此外，植生工程結合了生物與工程方法，利用活體植物及其部分作為結構材料，以達到穩定邊坡與控制侵蝕的目的。例如，利用草帶、灌木或喬木在坡面構築活的柵欄或籬笆，或是在沖蝕溝頭及溝壁種植深根性植物以穩定溝壁。對於裸露的邊坡或施工跡地，噴植草種或鋪設植生毯能快速建立植被覆蓋，提供即時的保護。這些植生措施不僅能有效固土，還能恢復棲地、提升景觀美質，並促進生物多樣性。最終，成功的水土保持有賴於技術、工程與管理措施的整合應用，並需納入社區參與及政策支持，以確保其長期有效性與永續性。

## 8.5 荒漠化

荒漠化是土地退化的一種極端形式，通常發生在乾旱、半乾旱和乾半濕潤地區，其特徵是土地生產力顯著且持續下降，最終導致類似沙漠的景觀形成。這一過程不僅涉及土壤的物理性劣化，更包含生態系統功能的全面衰退，使得原本可供農業、畜牧或自然植被生長的土地，逐漸喪失其支持生命的能力。荒漠化的核心在於土地無法再維持其原有的生物生產力，這往往是由氣候變異與人類活動共同作用所引發。值得注意的是，荒漠化並非指沙漠的天然擴張，而是指在脆弱的生態區域中，由於人為壓力超過了環境的承載閾值，導致土地發生不可逆或極難逆轉的退化。

荒漠化的成因錯綜複雜，是自然因子與人為因子相互疊加、彼此強化的結果。在自然因子方面，長期乾旱、降雨模式不穩定、高蒸發散量以及強風等氣候條件，構成了土地退化的潛在背景。例如，降雨量的減少或時空分布不均，會直接削弱植被覆蓋，使表土暴露於侵蝕力之下。然而，當代荒漠化的加速主要歸因於不可持續的人類土地利用方式。過度放牧是最顯著的驅動因素之一，牲畜數量超過草地的承載能力，會啃食並踐踏植被，破壞土壤結構，導致草場退化與土壤侵蝕。不當的農業實踐，如在邊際土地上進行耕作、缺乏輪作或休耕、以及過度依賴灌溉導致土壤鹽鹼化，同樣剝奪了土地的肥力與恢復力。

森林砍伐則是另一關鍵人為驅因，特別是在乾旱地區邊緣的林地。為了取得薪柴、擴展農地或進行商業開發而移除植被，會破壞土壤的保護層，加劇水蝕和風蝕，並擾亂局部的水文循環。水資源管理不善，例如河流上游過度築壩或引水，導致下游地區水源枯竭，亦會促使綠洲萎縮與土地荒漠化。這些人類活動往往在氣候乾旱期的催化下，產生協同效應，使土地退化過程急遽加速，超出生態系統的自我修復能力。

從全球分布來看，荒漠化影響了世界上許多地區，尤其以非洲撒哈拉沙漠以南的薩赫勒地區、中亞、中國西北部、澳洲內陸、南美洲部分地區以及地中海沿岸最為嚴重。這些地區共同的特點是生態系統本身較為脆弱，對干擾的抵抗力低，而社會經濟壓力又迫使當地居民採取短視的土地利用策略。例如，薩赫勒地區的荒漠化與人口增長、傳統游牧模式受到壓縮、以及氣候變遷導致的降雨帶南移密切相關。在中國，過度放牧、墾荒與水資源過度利用，導致北方大面積土地面臨沙化威脅。

荒漠化對生態系統與人類社會的衝擊是深遠且多方面的。在生態層面，它導致生物多樣性急遽喪失，因為原生動植物無法在退化的棲地中生存。土壤有機質流失、養分耗竭、土壤結構破壞，使得土地幾乎無法支持任何形式的農業生產。植被覆蓋的減少會改變地表反照率，可能進一步影響局部乃至區域的氣候模式，形成惡性循環。水文循環亦受到嚴重干擾，地下水補注減少，河流與湖泊乾涸，加劇水資源短缺。

對人類社會而言，荒漠化直接威脅糧食安全與生計，特別是以農業和畜牧業為主的社區。土地生產力下降導致作物歉收、牲畜飼料不足，進而引發饑荒、貧困與人口遷移。大量「環境難民」的產生，可能加劇區域性的社會動盪與資源爭奪。經濟損失體現在農業產值下降、基礎設施被沙塵掩埋、以及治理荒漠化所需的高昂成本。此外，荒漠化衍生的沙塵暴會長距離傳輸細顆粒物，影響下風地區的空气品質與公共健康，甚至干擾航空運輸。

防治荒漠化需要一套整合性的策略，涵蓋技術、政策、社會經濟與國際合作等多個層面。技術措施包括推廣適應當地條件的永續農業與畜牧實踐，例如集水農業、等高耕作、輪牧系統與種植耐旱作物。植被復育是核心工作，透過人工造林、草場改良或建立防風林帶，以恢復地表覆蓋，固定土壤。水資源的永續管理，如雨水收集、滴灌技術與合理的水權分配，也至關重要。

在政策與社會經濟層面，關鍵在於改善土地治理制度，確立清晰的土地使用權，以鼓勵長期投資於土地保育。將在地社區，特別是農民與牧民，納入規劃與決策過程，並提供替代生計方案，才能從根源上減輕對土地的壓力。國際社會透過《聯合國防治荒漠化公約》等框架進行合作，提供資金、技術轉移與知識共享，對於支持受影響的開發中國家至為重要。防治荒漠化不僅是生態修復工程，更是促進社會公平、經濟穩定與全球環境安全的重要行動。

### 8.5.1 荒漠化的成因與全球分布

荒漠化是指乾旱、半乾旱及乾半濕潤地區的土地退化現象，其成因錯綜複雜，涉及自然與人為因素的交互作用。從自然因素來看，氣候變遷導致的降雨模式改變、乾旱頻率與強度增加，是驅動荒漠化的根本背景。長期降雨量減少或降雨不穩定，直接影響土壤水分供應，使植被覆蓋度下降，土壤裸露程度增加。此外，高蒸發散量、強風以及土壤本身的脆弱性，例如沙質土壤或結構鬆散的土壤，在缺乏植被保護下極易受到侵蝕，這些都是自然條件下可能加劇土地退化的潛在因子。然而，當代荒漠化的加速與擴展，主要驅動力已轉向人類活動。過度放牧是最顯著的成因之一，牲畜數量超過草地的承載能力，導致植被被過度啃食與踐踏，破壞土壤結構，使土地喪失恢復力。不當的農業實踐，如在不適宜的地區進行耕種、缺乏輪作或休耕、以及過度依賴灌溉導致土壤鹽鹼化，同樣嚴重耗損土地生產力。森林砍伐為取得農地、燃料或木材，移除了關鍵的植被覆蓋，使土壤直接暴露於風蝕與水蝕之下。水資源的過度開發，特別是地下水的超抽，使地下水位下降，進一步加劇地表乾旱與植被死亡。這些人類活動往往在脆弱的生態系統中形成惡性循環，當土地開始退化，其生產力下降，迫使當地居民更加強度地利用剩餘資源，從而加速退化過程。

從全球分布來看，荒漠化並非均勻發生，而是高度集中在特定的地理與氣候帶。根據聯合國防治荒漠化公約的評估，全球約有三分之一至四成的土地面積受到

荒漠化威脅，影響超過一百個國家、約二十億人口的生活。最嚴重的地區包括非洲撒哈拉沙漠以南的薩赫爾地帶，該地區長期面臨降雨不穩、人口壓力與政治動盪，土地退化與糧食危機交織。北非與中東地區，如阿拉伯半島及伊朗高原，因先天水資源匱乏與灌溉農業管理不當，鹽鹼化與風蝕問題突出。中亞地區，包括中國西北部、蒙古及中亞諸國，由於過度放牧與氣候乾旱化，草原退化與沙漠擴張現象顯著，例如中國的戈壁沙漠與塔克拉瑪干沙漠周緣。南美洲的巴西東北部、阿根廷的彭巴草原部分區域，以及澳洲內陸乾旱區，也因氣候變遷與土地利用壓力而面臨荒漠化風險。這些地區的分布清晰地與世界乾旱帶重合，顯示氣候條件是荒漠化的基礎背景，而人類活動則是觸發與加劇退化的關鍵扳機。理解其成因與分布，是制定有效防治策略的第一步，必須針對不同區域的主導驅動因子，採取因地制宜的干預措施。

### 8.5.2 荒漠化與土壤侵蝕、土地退化的關聯

荒漠化、土壤侵蝕與土地退化三者並非獨立存在的現象，而是緊密交織、互為因果的動態過程，共同構成了全球土地系統功能衰退的核心機制。從概念範疇來看，土地退化是一個最為廣泛的上位概念，泛指土地生產力、生態功能或經濟價值的任何長期性下降，其表現形式多元。土壤侵蝕則是土地退化的一種主要物理過程，特指表土及其所含養分因水或風的作用而被移離原地的現象。而荒漠化，在《聯合國防治荒漠化公約》的定義中，特指發生在乾旱、半乾旱和乾半濕潤地區的土地退化，是土地退化在特定氣候帶下的極端表現形式。因此，荒漠化本質上是土地退化的一種地域性子集，而土壤侵蝕往往是驅動並加劇這兩者的關鍵物理引擎。

土壤侵蝕作為一種強效的驅動因子，直接掏空了土地生產力的物質基礎。當植被因過度放牧、不當耕作或森林砍伐而減少，土壤表面失去保護，其對降雨沖刷和風力搬運的抵抗力便急遽下降。劇烈的水蝕不僅帶走富含有機質和養分的細小土壤顆粒，形成溝壑，破壞土地完整性；風蝕則將肥沃的表土吹揚至遠方，在原地留下粗砂與礫石。這個過程直接導致土壤物理結構惡化、保水保肥能力喪失、有機質含量下降，即構成了典型的土地退化。在年降雨量有限且蒸發旺盛的乾旱區，這種因侵蝕導致的土壤退化若持續發展，土地便逐漸失去支持植被生長的能力，生物生產力顯著且可能不可逆地下降，最終邁向荒漠化的狀態——土地變得類似荒漠，生態系統功能嚴重衰竭。

從景觀尺度觀察，荒漠化過程往往會進一步創造出加劇土壤侵蝕與土地退化的反饋循環。當一片土地開始荒漠化，植被覆蓋變得稀疏甚至消失，地表反射率（反照率）增加，可能導致局部降雨模式改變，乾旱加劇。同時，裸露且退化的地表更易在風力作用下揚起沙塵，這些沙塵可能沉降在下風處尚存的植被上，影響其光合作用，或攜帶病原體，進一步損害生態系統。此外，在乾旱區邊緣，荒漠化地帶的擴張會改變區域風場，使相鄰地區更易遭受風蝕。這種由荒漠化引發的微氣候改變

與物理環境惡化，使得土壤侵蝕的過程更加劇烈與頻繁，從而將更多土地拖入退化與荒漠化的深淵。因此，三者形成了一個不斷自我強化的惡性循環。

理解這三者間的關聯，對於制定有效的防治策略至關重要。單純治理土壤侵蝕（如修建梯田、植草）若未同時應對導致植被喪失的根本驅動力（如不可持續的農業實踐、水資源過度利用），其效果可能難以持久。同樣地，在荒漠化邊緣地區進行植樹造林，若未先控制風蝕與水蝕，穩定土壤基質，樹苗也難以存活。整合性的土地管理必須同時針對這三個層面：透過水土保持措施直接控制侵蝕過程；透過永續農牧業實踐改善土地健康，逆轉退化趨勢；並在宏觀尺度上透過植被恢復與水資源管理，遏制荒漠化的擴張。這要求我們將土地視為一個完整的生態系統，認識到土壤、植被、水與氣候之間的複雜連結，任何單一線性的干預都可能因忽略這些關聯而事倍功半。

### 8.5.3 荒漠化對生態系統與人類社會的衝擊

荒漠化對生態系統的衝擊是全面且深遠的，其影響首先體現在生物多樣性的急遽喪失。當土地逐漸乾旱、植被覆蓋減少，原本適應當地環境的動植物物種將面臨棲地破碎化與資源匱乏的雙重壓力。特化物種，尤其是那些依賴特定微棲地或有限水資源的物種，往往最先受到衝擊，族群數量下降甚至局部滅絕。植物群落的組成會發生顯著變化，多年生草本植物和灌木被一年生草本植物或耐旱但生產力低的物種取代，導致植被結構單一化。動物方面，大型草食性哺乳動物因食物來源減少而遷移或死亡，繼而影響其捕食者的生存。土壤生物多樣性同樣遭受重創，微生物、真菌及無脊椎動物的活動降低，使得土壤有機質分解與養分循環過程受阻，進一步削弱生態系統的生產力與恢復力。這種生物多樣性的流失並非孤立事件，它會引發連鎖反應，破壞生態系統內長期演化形成的複雜交互作用網絡，使系統功能退化，服務能力下降。

在生態系統功能層面，荒漠化直接導致初級生產力的下降與碳儲存能力的減弱。植被覆蓋的減少意味著透過光合作用固定大氣二氧化碳的速率降低，同時土壤有機碳因侵蝕與礦化作用而加速釋放。此過程不僅加劇全球暖化，也形成一種惡性循環：氣候變遷導致的乾旱與高溫進一步促進荒漠化，而荒漠化又釋放更多溫室氣體。此外，土地喪失其涵養水源的功能。地表植被與枯枝落葉層的消失，使降水無法有效截留與入滲，反而形成快速地表逕流，導致土壤水分儲存量下降，地下水位難以補注。區域水循環因而改變，降水事件變得更不穩定，乾旱期延長，洪水風險在降雨時反而增加。生態系統的調節服務，如氣候調節、水文調節與侵蝕控制，在此過程中嚴重受損，使得區域環境趨向不穩定與脆弱。

荒漠化對人類社會的衝擊同樣劇烈，首要體現在糧食安全與生計的威脅上。農業與畜牧業是受影響最直接的產業。土壤肥力流失、水分供應不足導致作物減產甚至絕收，牧草地退化則使牲畜承載力下降。對於依賴自然資源的農村社區，尤其是

發展中國家的乾旱地區，這意味著生計基礎被動搖，貧困問題加劇。糧食生產的不穩定會引發當地糧價波動，增加家庭用於食物的支出比例，可能導致營養不良，特別是對兒童與婦女的健康產生長期負面影響。此外，傳統的遊牧或輪耕生活方式被迫改變，可能加劇對殘存脆弱土地的壓力，或驅使人口遷移至城市邊緣，形成新的社會經濟問題。

社會經濟結構因此承受巨大壓力，可能引發人口遷移、資源衝突乃至社會動盪。當土地無法養活當地人口時，居民往往被迫遷離，形成「環境難民」。這種遷移通常是由鄉村流向都市，或跨越國界，給接收地的資源、就業與社會服務帶來壓力，有時會激化族群緊張關係或引發衝突。在地方層次，水資源與牧場的稀缺可能導致社區之間或農牧使用者之間的爭奪，傳統的資源共享機制崩潰，社會凝聚力削弱。從宏觀經濟角度看，荒漠化導致可耕地面積減少，國家農業產出下降，可能影響糧食自給率，增加糧食進口依賴與外匯支出。同時，為了應對荒漠化的後果，政府需要投入大量資金進行救災、社會救助與生態恢復，擠壓了其他發展項目的資源，形成沉重的財政負擔。

最後，荒漠化對人類健康構成多重威脅。風蝕引起的沙塵暴頻率與強度增加，導致空氣中懸浮微粒濃度升高，引發或加劇呼吸系統疾病，如哮喘、支氣管炎等。沙塵長距離傳輸也可能攜帶病原菌或污染物，影響下風處廣大區域的公共衛生。水資源的質與量同時惡化，有限的水源可能受到泥沙或鹽分污染，增加水媒疾病風險，並因清潔用水取得困難而影響基本衛生條件。此外，糧食短缺與營養不良直接削弱人群的免疫系統，特別是在兒童發育階段造成不可逆的傷害。這些健康衝擊在醫療資源本就匱乏的偏遠地區尤為嚴重，形成健康貧困的惡性循環。因此，荒漠化不僅是環境退化過程，更是深刻影響人類福祉、社會穩定與長期發展的複雜危機，其衝擊在生態與社會系統間緊密交織，需以整合性視角加以理解與應對。

#### 8.5.4 防治荒漠化的國際行動與在地策略

面對全球荒漠化的嚴峻挑戰，防治工作必須結合國際層面的協調合作與在地層面的具體實踐，形成多層次、多尺度的綜合策略。國際行動主要著眼於建立全球共識、提供資金與技術支援，以及制定跨國性的監測與評估框架。其中，聯合國防治荒漠化公約（UNCCD）扮演了核心角色，自1994年通過以來，該公約致力於推動締約國制定並實施國家行動計畫，以扭轉土地退化趨勢。公約的締約方大會定期檢視全球進展，並設立了「土地退化零成長」（Land Degradation Neutrality, LDN）的全球目標，鼓勵各國在2030年前實現土地健康淨零惡化的願景。此外，國際組織如全球環境基金（GEF）與世界銀行也提供關鍵的財務機制，協助開發中國家進行能力建構與示範計畫，特別是在非洲薩赫爾地區與中亞乾旱地帶，這些援助聚焦於水土保持、植被復育與替代生計的發展。

在地策略則是防治荒漠化能否成功的關鍵，因為土地退化的驅動因素與具體表現具有高度的地域特性，必須因地制宜。成功的在地策略通常建立在社區參與的基礎上，透過賦權當地居民，使其成為土地保育的主動管理者。例如，在許多乾旱地區推廣的「農民管理自然再生」技術，鼓勵農民保護並管理農田中自然萌發的本土樹木幼苗，這些樹木能提供遮蔭、改善微氣候、增加土壤有機質，並可作為飼料或薪材，同時不影響主要作物的生產。這種低投入、高適應性的方法，相較於大規模的外來樹種造林，往往更具成本效益與生態永續性。此外，發展集水農業技術，如修建小型梯田、滯洪池與等高耕種，能有效攔截寶貴的雨水資源，增加土壤入滲，直接提升農地的生產韌性。

整合國際資源與在地知識，是提升防治效能的必然路徑。國際行動提供的科學監測工具，如遙感衛星與地理資訊系統，能協助在地社區更精準地評估土地退化熱點與監測復育成效。同時，在地社群累積的傳統生態知識，例如對本土抗旱植物物種的認識、適應當地氣候的輪作制度，以及傳統的水資源管理智慧，應被系統性地記錄、尊重並融入現代防治計畫的設計中。這種上下結合的模式，有助於避免過去一些「由上而下」計畫可能產生的脫節問題，例如忽視當地社會經濟脈絡而盲目推行植樹，最終因缺乏社區維護而失敗。未來防治荒漠化的策略，必須更強調社會生態系統的韌性建構，不僅是恢復植被覆蓋，更要同步改善社區的生計多樣性與經濟活力，從根本降低對脆弱土地資源的依賴壓力。

## 8.6 土壤、水與生物多樣性的交互保育

土壤、水與生物多樣性的交互保育，是永續土地管理的核心思維，旨在打破傳統上將土壤、水資源與生物多樣性視為獨立管理項目的分割式思維，轉而強調三者之間緊密相連、互為因果的生態關係。這種整合性保育途徑認識到，任何單一資源的退化都會引發連鎖反應，導致整體生態系統功能的衰退。例如，土壤結構的破壞會降低其保水能力，進而影響地表逕流與地下水補注，水資源的匱乏則會限制植被生長，導致生物多樣性喪失，而生物多樣性的下降又會削弱土壤形成與穩定的生物過程，形成一個惡性循環。因此，有效的保育策略必須同時考量這三個關鍵要素，透過恢復與強化其間的交互作用，來提升生態系統的韌性與生產力，以應對氣候變遷與人為干擾所帶來的複合性壓力。

土壤健康與水源涵養功能之間存在著深刻的相互依存關係。健康的土壤，特別是具有良好團粒結構、豐富有機質與活躍生物群落的土壤，如同一個巨大的海綿，能夠有效吸收並儲存降水。其高孔隙度與滲透性有助於雨水下滲，補充地下水層，同時減少地表逕流與土壤侵蝕的風險。反之，退化或壓實的土壤則會形成地表封層，導致雨水迅速流失，不僅加劇洪水風險，也使得寶貴的水資源無法有效留存於生態系統中。這種水源涵養能力直接影響著流域的水文穩定性，確保在乾旱時期仍有持續的水源供應給植被與人類使用。因此，保育土壤健康不僅是為了農業生產

力，更是維繫整個區域水資源安全與水文循環平衡的基礎。實踐上，透過覆蓋作物、減少耕作、增施有機質等措施來改善土壤結構，能顯著提升土壤的持水能力，從而強化生態系統對乾旱與暴雨極端事件的緩衝能力。

生物多樣性，特別是土壤生物多樣性與植被多樣性，對於維持土壤穩定性與健康具有不可替代的貢獻。地下的微生物、真菌、蚯蚓與其他土壤動物構成了一個複雜的食物網，驅動著養分循環、有機質分解與土壤結構形成等關鍵過程。例如，菌根真菌能與植物根系共生，協助植物吸收水分與養分，同時其菌絲網絡能將土壤顆粒黏結在一起，增強土壤抗蝕力。地上植被的多樣性則透過不同的根系深度與結構，將土壤錨定在不同土層，減少侵蝕；樹木與灌木的凋落物為土壤提供有機質來源，而多層次的植被冠層能減緩雨滴對地表的直接衝擊。單一化的農業或林業系統往往削弱了這種生物支撐功能，使得土壤更容易受到侵蝕與退化。因此，保育與恢復棲地多樣性，促進農林複合經營與多樣化輪作，是從根本強化土壤生態系統穩定性的策略。

土地復育的生態工程方法，正是應用生態學原理來整合修復土壤、水與生物多樣性的實踐典範。這類方法強調利用自然過程與生物本身的能力，而非完全依賴昂貴的硬體工程。例如，在侵蝕嚴重的坡地，可透過構建階梯式植生溝或利用本地先驅植物進行植被復育，這些植物能迅速覆蓋地表、穩定土體，其根系能改善土壤滲透性，吸引土壤生物回歸，逐步重建土壤功能。在河岸帶修復中，重建由多種本地樹種與草本植物組成的緩衝帶，不僅能過濾農業逕流中的沉積物與養分，減少水體汙染，也能為野生動物提供廊道與棲地，同時穩固河岸、調節水流。這些生態工程措施的核心在於模仿自然生態系統的結構與功能，創造一個能夠自我維持、並持續提供生態服務的修復系統，其效益遠超過單一目標的整治工程。

要實現土壤、水與生物多樣性的交互保育，需要一個跨部門、多尺度的永續土地管理政策框架。這意味著農業政策、水資源管理政策、自然保育政策與國土規劃必須進行整合與協調。政策工具可以包括提供經濟誘因，鼓勵農民採用保育性農業措施與農林複合系統；劃設與管理關鍵的生態功能區，如水源保護區、生物廊道與高生態價值的自然棲地；以及推動以流域為單位的整合性管理計畫，協調上游的土地利用與下游的水質、水量需求。此外，社區的參與與在地知識的融入至關重要，因為土地管理者最了解當地的生態條件與社會經濟脈絡。成功的政策框架應能引導社會從追求短期的資源榨取，轉向長期的生態系統資本投資，確保土壤肥沃、水資源潔淨豐沛與生物多樣性繁盛的狀態得以世代傳承，為人類福祉與地球健康奠定堅實的基礎。

### 8.6.1 土壤健康與水源涵養的相互依存

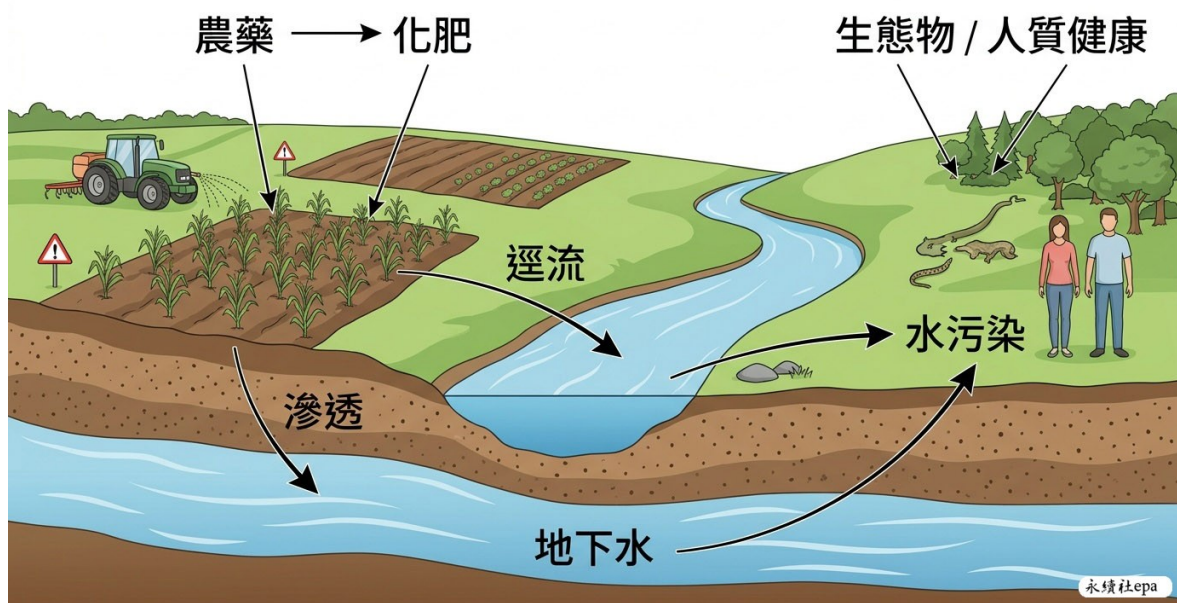
土壤健康與水源涵養之間存在著緊密且相互依存的關係，這種關係構成了陸域生態系統穩定運作的基礎。健康的土壤不僅是植物生長的介質，更是地球上最重要

的淡水調節器之一。土壤的物理結構，特別是孔隙度與團粒穩定性，直接決定了其對水分的入滲、儲存與釋放能力。一個具有良好結構的土壤，能夠在降雨時迅速吸收水分，減少地表逕流與土壤侵蝕，並將水分儲存於土壤剖面中，在乾旱時期逐步釋放供植物利用或補注地下水。這種水源涵養功能，實質上是土壤生態系統服務的核心體現，它維繫著流域的水文平衡，並緩衝極端氣候事件如暴雨或乾旱所帶來的衝擊。反之，水分的有效管理與涵養亦是維持土壤健康的關鍵因子，適當的水分條件支持著土壤生物的活動、有機質的分解與養分的循環。

從機制上分析，土壤有機質在此相互依存關係中扮演著樞紐角色。有機質如同土壤的「海綿」，其本身能吸附自身重量數倍的水分，顯著提升土壤的持水能力。同時，有機質是土壤團粒結構的主要膠結劑，促進形成穩定的孔隙網絡，這些孔隙既是水分儲存的空間，也是空氣流通與根系生長的通道。當土壤有機質含量因過度耕作、侵蝕或有機物投入不足而下降時，土壤結構便趨於緊實或分散，導致入滲率降低、地表逕流增加，進而引發更嚴重的土壤流失與下游淤積、洪水問題。水源涵養能力的衰退，又會反過來限制植被生長，減少歸還土壤的有機物，形成土壤退化與水文功能惡化的負面循環。因此，提升與維持土壤有機質含量，是同步增進土壤健康與水源涵養功能的關鍵策略。

這種相互依存性在集水區尺度上展現出更為複雜的景觀效應。不同土地覆蓋與土壤管理方式，會形成鑲嵌式的水文反應單元。例如，保存完好的森林或覆蓋良好草地的土壤，通常具有深厚的腐植質層與發達的根系，能有效截留降水、促進入滲，並透過蒸散作用調節區域微氣候。相反地，裸露的農地、過度放牧的草場或壓實的都市土壤，其水文功能則大幅削弱，雨水迅速轉為地表逕流，不僅造成土壤水分短缺，也將泥沙與污染物攜入河川。因此，集水區的整體土壤健康狀態，直接決定了河川的基流量穩定性、水質好壞以及洪旱災害的發生頻率。整合性的流域管理必須正視土壤與水之間的不可分割性，透過保育植被、改善耕作方式、恢復退化土地等措施，從源頭強化土壤的水文調節服務。

在氣候變遷加劇水文不確定性的當代背景下，強化土壤健康與水源涵養的相互依存關係更具迫切性。更頻繁的強降雨事件考驗著土壤的入滲容量，而延長的乾旱期則考驗土壤的蓄水庫功能。透過推廣保護性農業、增加土壤覆蓋、營造等高線或梯田設施、以及恢復河岸緩衝帶等土壤保育措施，實質上就是在建設分散式、具韌性的「綠色水庫」。這些措施能增強生態系統對氣候衝擊的緩衝能力，保障農業生產的水分供應，並減輕極端水文事件對社會經濟的損害。總而言之，土壤與水並非獨立的資源管理課題，而是必須被視為一個緊密耦合的系統。任何旨在永續水資源管理的政策與實踐，都必須奠基於對土壤健康的維護與提升之上，反之亦然，這正是交互保育理念的核心所在。



### 8.6.2 生物多樣性對土壤穩定性的貢獻

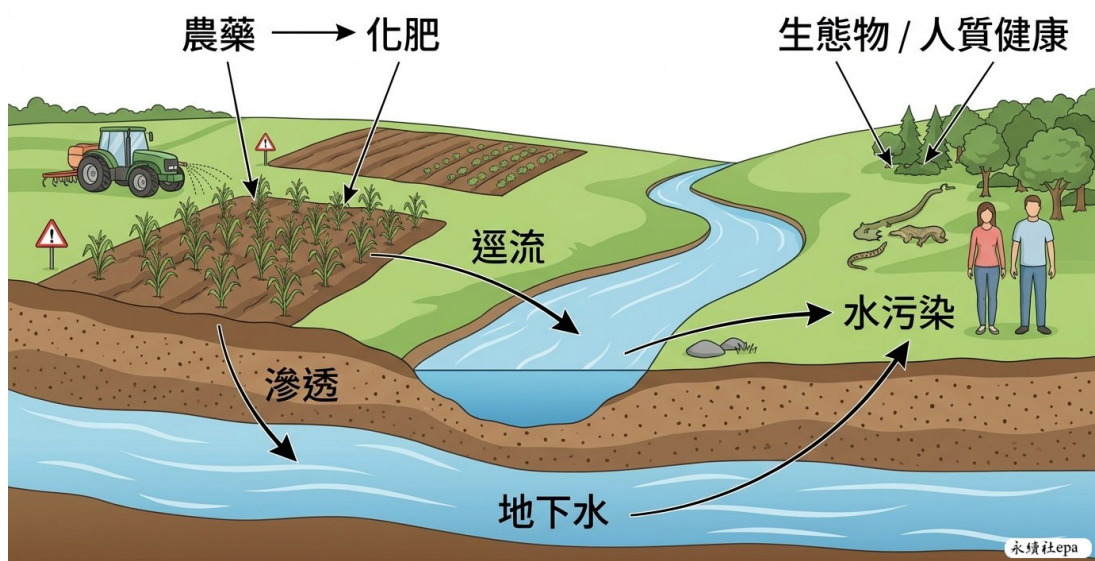
土壤生態系統的穩定性與其生物多樣性之間存在著密不可分的正向關係。生物多樣性不僅體現在地表可見的動植物種類上，更關鍵的是隱藏於土壤之中的龐大生物群落，包括細菌、真菌、原生動物、線蟲、節肢動物以及蚯蚓等。這些土壤生物透過其多樣化的生命活動，共同構築了一個複雜的地下生態網絡，此網絡是維持土壤結構、養分循環、有機質分解以及抗干擾能力的基礎。當土壤生物多樣性豐富時，各種生物在功能上往往存在互補或冗餘，這意味著即使某些物種因環境壓力而減少或消失，其他具有相似生態功能的物種能夠填補其空缺，從而確保土壤生態過程的持續運作，避免單一功能中斷導致整個系統穩定性下降。這種功能冗餘性是土壤生態系統面對氣候變遷、汙染或土地利用改變等衝擊時，能夠保持韌性的核心機制。

具體而言，土壤生物多樣性從物理、化學及生物三個層面貢獻於土壤穩定性。在物理層面，植物根系與土壤生物的活動直接影響土壤結構的形成與維持。例如，不同深度的植物根系能將土壤顆粒纏結在一起，增加土壤團聚體的穩定性；真菌菌絲如同天然的網狀結構，能將土壤微粒黏結成穩定的團粒；而蚯蚓、螞蟻等土壤動物在挖掘通道與混合土壤的過程中，不僅改善了土壤的通氣性和排水性，其排泄物更是形成水穩性團粒結構的重要膠結物質。多樣化的根系形態與動物活動模式，創造了孔隙大小各異的土壤結構，這有利於水分入滲與儲存，同時增強土壤抵抗侵蝕的能力。缺乏生物多樣性的土壤，其結構往往較為緊實或鬆散，更容易因降雨沖刷或風力作用而流失。

在化學與養分循環層面，多樣化的土壤微生物與動物群落驅動著養分轉化與有機質分解的關鍵過程。不同的微生物類群專精於分解不同種類的有機物質，例如纖維素、木質素或幾丁質等。豐富的分解者群落能確保落葉、枯枝、動物殘體等有機物被有效率地分解，將養分釋放回土壤中供植物吸收，同時形成穩定的腐植質，這

對於維持土壤肥力與碳儲存至關重要。此外，固氮菌、菌根真菌等與植物形成共生關係的特定生物，能直接提升植物獲取養分的能力。當生物多樣性高時，這些養分循環路徑呈現多元並行的狀態，即使某一條路徑受阻，養分仍可透過其他途徑流通，從而保障土壤生產力的穩定，避免因養分循環中斷而導致的土壤退化。

最後，高度的生物多樣性有助於土壤生態系統抑制病害與維持自我調節功能。土壤中存在著複雜的種間關係，包括競爭、捕食與寄生等。多樣化的土壤食物網中，可能包含能捕食或寄生於植物病原菌、線蟲的生物，從而自然抑制病害的爆發。這種「生物防治」功能減少了對化學農藥的依賴，維護了土壤健康的生物平衡。反之，單一化栽培與過度使用農藥化肥會大幅降低土壤生物多樣性，破壞這種天然的抑制機制，導致土傳病害更容易猖獗，形成對外部投入的依賴惡性循環，從根本上削弱土壤的長期穩定性與健康。因此，保育農田與自然土壤中的生物多樣性，不僅是生態保育的議題，更是確保土地永續生產力與全球糧食安全的根本策略。



### 8.6.3 土地復育的生態工程方法

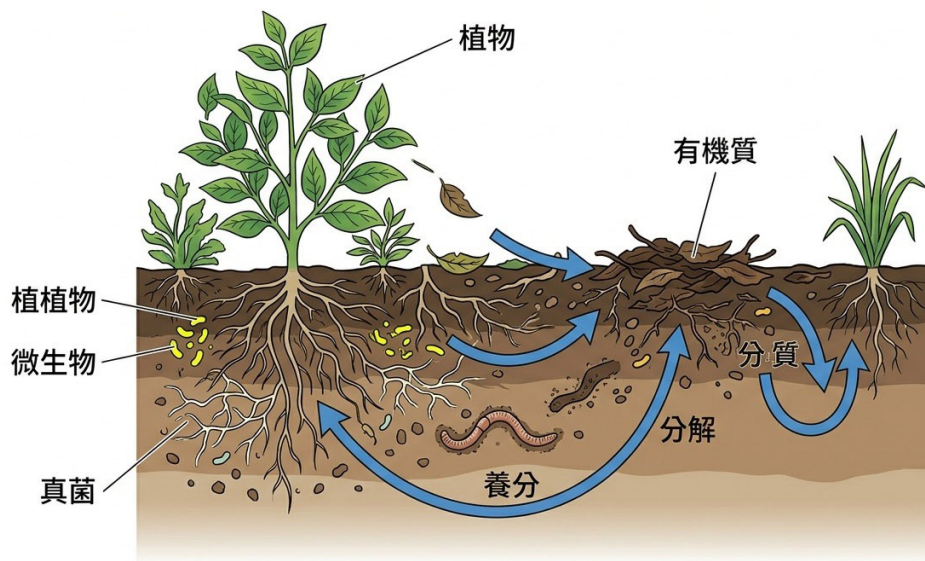
土地復育的生態工程方法，是針對已退化或受損的土地，運用生態學原理與工程技術，以促進生態系統自我恢復能力為核心的綜合性介入策略。此方法有別於傳統僅以穩定地質或快速綠化為目標的土木工程，其強調模仿自然過程，重建或修復生態系統的結構與功能，最終目標是恢復土地的生態完整性與服務價值。生態工程方法通常遵循幾項核心原則，包括優先使用本地物種以維持遺傳完整性、最小化外部能量與物質輸入以降低長期維護成本、以及設計具有韌性且能適應環境變化的系統。在實踐上，這類方法需對退化土地的成因、程度及潛在恢復力進行詳細評估，並根據土地類型、退化機制與預期功能，選擇相應的技術組合。

在礦區或嚴重侵蝕地等極度退化的場域，生態工程的首要任務往往是物理結構的穩定與基質的改良。例如，透過等高線開溝、石籠或植生毯等工程措施，可有效減緩地表逕流、防止土壤進一步流失，為後續生物復育創造基礎條件。同時，針對土壤貧瘠或酸鹼值失衡的問題，可適度添加有機質改良劑（如堆肥、綠肥）或礦物調理劑，以改善土壤的物理結構、保水能力及養分狀況。然而，這些外來物質的添加需謹慎評估，避免引入外來入侵種或造成二次污染。此階段的植被復育常採用先驅植物或耐逆境物種，這些植物能於惡劣條件下建立族群，逐步改善微氣候與土壤條件，為後續更多樣化的物種遷入鋪路。

對於受污染土地的復育，生態工程方法則側重於利用生物過程來降解、固定或移除污染物。植物復育技術便是其中一例，透過種植特定超積累植物，吸收並富集土壤中的重金屬，隨後透過收割植物體將重金屬移出場址。微生物復育則是利用本土或外接的微生物群落，分解有機污染物如石油碳氫化合物或殺蟲劑。這類生物整治技術雖耗時較長，但對土壤生態的干擾較小，且能逐步恢復土壤的生物活性。在實施時，常需結合監測系統，評估污染物濃度變化及生態毒性，以確保復育過程的有效性與安全性。

在更為廣泛的農業或草原退化地，生態工程方法著眼於重建健康的土壤食物網與養分循環。這包括引入或促進蚯蚓、線蟲、節肢動物及微生物等多樣化土壤生物群落的恢復。這些生物能促進有機質分解、改善土壤團粒結構、並增強養分可利用性。此外，建立多樣化的植物群落，特別是包含豆科植物以進行生物固氮，以及深根與淺根植物搭配以利用不同土層的養分與水分，都是關鍵策略。透過模仿自然群落的物種組成與空間配置，可以建立一個更具韌性、能自我維持的系統，減少對人工灌溉與施肥的依賴。

最終，成功的土地復育生態工程，必須將恢復後的生態系統置於更大的景觀尺度中考量。這意味著需確保復育區域與周邊健康棲地之間的連結性，例如透過建立生態廊道，促進物種與基因的交流。同時，復育計畫應納入長期監測與適應性管理框架，因為生態系統的恢復是一個動態過程，可能需要根據監測結果調整管理措施。此種以生態過程為導向、尊重自然演替規律、並整合景觀連結性的整體性方法，不僅能有效恢復土地生產力與生態功能，更是實現永續土地管理不可或缺的實踐基礎。



永續社epa

#### 8.6.4 永續土地管理的政策框架

永續土地管理的政策框架旨在建立一套系統性的指導方針與制度安排，以協調土地資源的利用、保育與復育，確保其長期生態完整性與社會經濟效益。此框架的建構必須植基於對土地系統複雜性的深刻理解，並整合生態科學、社會經濟學、法學與治理學等多領域知識。一個有效的政策框架不僅包含法規與標準的制定，更涉及執行機制的設計、監測評估體系的建立，以及多元利害關係人的參與管道。其核心目標在於平衡人類發展需求與生態系統承载力，防止土地退化、土壤侵蝕與荒漠化的進一步惡化，同時促進已退化土地的恢復。這需要從國際、國家到地方層級的多層次治理協作，將永續土地管理的原則具體化為可操作的策略與行動方案。

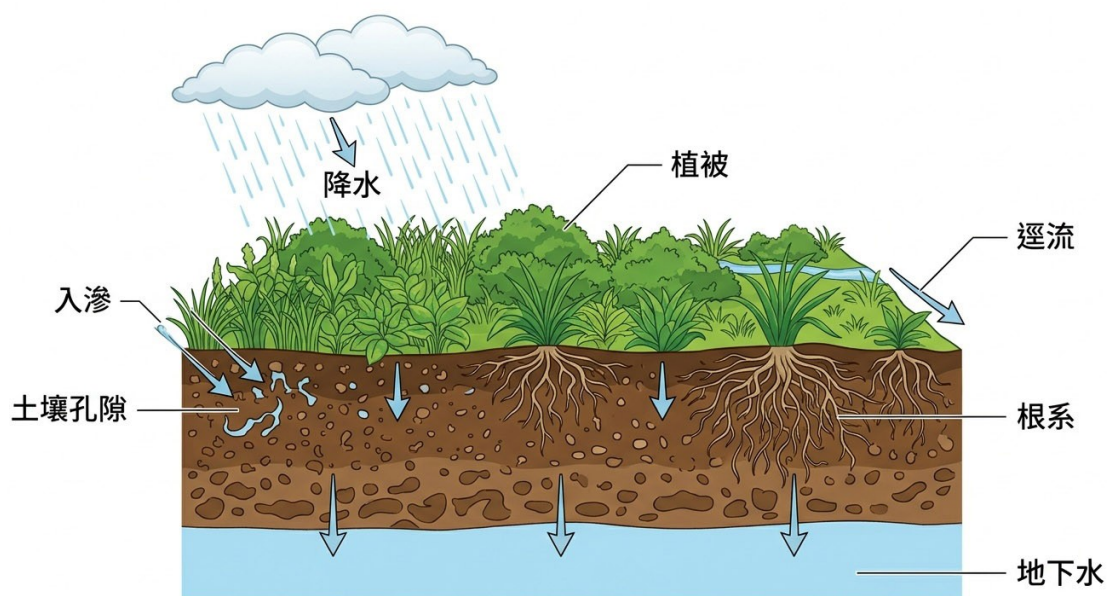
在國際層面，永續土地管理的政策框架深受全球公約與倡議的影響，例如《聯合國防治荒漠化公約》（UNCCD）明確將土地退化零成長（Land Degradation Neutrality, LDN）設為核心目標，要求締約國制定自願性目標與行動計畫。LDN 框架強調透過避免、減少及逆轉土地退化的綜合措施，維持或改善土地的健康與生產力。此外，永續發展目標（SDGs）中的目標 15（陸域生態）直接與土地管理相關，而目標 2（零飢餓）與目標 6（潔淨水與衛生）亦與土壤健康和水土保育緊密相連。這些國際規範提供了共同的願景與指標，促使各國將土地永續性納入國家發展政策與報告體系中，並透過全球環境基金（GEF）等機制獲得資金與技術支持。

國家層級的政策框架則是落實永續土地管理的關鍵，通常體現於國土計畫法、環境基本法、森林法、水土保持法及農業發展條例等法規體系中。有效的國家政策應具備幾項要素：首先，需要進行全面的土地資源調查與分類，根據土地潛力與限制進行分區規劃，例如劃設農業發展區、森林保育區、城鄉發展區及環境敏感區，並訂定相應的使用管制規則。其次，必須建立經濟誘因與財務機制，例如對實施水土保持、有機農業或造林的土地所有者提供補貼、稅賦減免或生態補償；同時，對導致土地退化的行為課徵環境稅或罰款。再者，政策應鼓勵科技研發與知識推廣，

將生態工程方法、精準農業技術及遙感監測工具納入管理實踐。最後，健全的監測、報告與驗證（MRV）系統不可或缺，用以追蹤土地覆蓋變化、土壤品質指標及管理措施的成效，作為政策調整的依據。

地方層級的參與式治理是政策能否落地的試金石。永續土地管理涉及在地的知識、文化與生計，因此政策框架必須設計機制，讓社區居民、農民、原住民團體、非政府組織及地方企業等利害關係人共同參與規劃與決策過程。例如，推動流域共同管理委員會，整合上游水源涵養與下游用水需求；或發展社區保育協議，由社區自主管理周邊的森林與土地，以換取技術支持或收益分享。這種自下而上的途徑有助於發展出契合當地社會生態條件的管理方案，提升政策的正當性與執行力。同時，政策框架也需重視能力建構，透過教育訓練與示範計畫，提升地方團體與政府人員的永續土地管理知能。

總體而言，永續土地管理的政策框架是一個動態且適應性的系統，必須隨著科學認知進步、社會價值變遷及氣候環境挑戰而持續演進。它要求跨部門的政策整



永續社epa

合，打破農業、環境、經濟、規劃等部門傳統上的藩籬，並在土地利用決策中納入生態系統服務的價值評估。面對氣候變遷加劇土地系統脆弱性的現實，未來的政策框架更需要強化氣候調適與韌性建構的面向，例如推動氣候智能型農業、保護與恢復自然碳匯等。最終，永續土地管理的成功，取決於能否將生態倫理與世代公平的長遠視野，轉化為從全球到地方、從政府到民間的一致行動。