

環境生態學書 - 永續社

第 10 章 農業與食物資源



農業與食物資源是人類文明發展的基石，其生產、分配與消費模式深刻影響著全球生態系統的穩定性與人類社會的永續性。本章將探討農業從起源到現代工業化體系的演變歷程，分析糧食生產與營養需求之間的關係，並檢視畜牧業在食物系統中的角色及其環境代價。進一步地，本章將剖析現代農業實踐對生態系統造成的多重衝擊，包括生物多樣性喪失、土壤退化與水資源壓力等問題。最後，本章將聚焦於永續農業的核心理念與實踐策略，探討如何透過生態原則的應用、技術創新與系統性轉型，重建一個既能滿足人類營養需求，又能與自然環境和諧共存的食物生產體系。

農業的發展史實質上是人類與自然關係不斷調整的過程。從早期採集狩獵的游牧生活，到約一萬年前在新月沃土等地區出現的定居農業，人類開始主動馴化植物與動物，從而獲得更穩定的食物來源。這項轉變不僅促成了人口增長與社會複雜化，也開啟了人類大規模改造地景的序幕。二十世紀中葉的綠色革命透過高產作物品種、化學肥料、農藥與灌溉技術的推廣，大幅提升了全球糧食產量，緩解了許多地區的飢餓危機，但同時也導致農業系統趨向單一化，並加深了對化石燃料與化學投入的依賴。當代全球食物系統更進一步受到貿易自由化與全球供應鏈整合的影響，使得少數主食作物如小麥、稻米、玉米與黃豆佔據了極大比例的耕地與飲食結

構，這種單一化趨勢不僅壓縮了傳統作物多樣性的生存空間，也增加了全球糧食系統面對氣候變遷與病蟲害爆發的系統性風險。

糧食的本質在於提供人體維持生命與健康所需的營養素。這些營養素可分為巨量營養素與微量營養素兩大類：醣類、蛋白質與脂肪屬於巨量營養素，是人體能量的主要來源與組織建構的基礎；維生素與礦物質則屬於微量營養素，雖然需求量較小，但在新陳代謝、免疫機能與骨骼健康等方面扮演關鍵角色。此外，充足的水分攝取對於營養素的運輸、體溫調節與廢物排除至關重要。然而，全球營養狀況呈現嚴重的不均衡現象：一方面，仍有數億人口面臨飢餓與營養不良，特別是缺乏蛋白質與關鍵微量營養素；另一方面，過度消費高熱量、低營養的加工食品，導致肥胖、心血管疾病與糖尿病等健康問題日益普遍。這種營養不均衡不僅是公共衛生挑戰，也反映了食物資源分配不公、飲食文化變遷與農業生產目標偏頗等深層結構性問題。

畜牧業在食物資源體系中佔有重要地位，它將人類無法直接利用的植物性資源轉化為高品質的動物性蛋白質，並為許多農村社區提供生計與經濟安全。然而，集約化畜牧生產模式伴隨著顯著的資源消耗與環境代價。畜牧業是全球土地與水資源的主要使用者之一，大規模的飼料作物種植往往導致森林砍伐與棲地喪失。反芻動物如牛、羊在消化過程中會產生甲烷，這是一種強效溫室氣體，使得畜牧業成為全球溫室氣體排放的重要來源。此外，密集飼養所產生的動物排泄物若未妥善處理，易造成水體優養化與地下水污染。面對這些挑戰，發展替代蛋白質來源，如植物肉、培養肉或昆蟲蛋白，已成為減輕畜牧業環境負荷的潛在方向，但其技術成熟度、成本可及性與社會接受度仍有待提升。

現代農業在追求高產量的過程中，對生態系統產生了廣泛而深遠的衝擊。化學農藥與化肥的過度使用，在殺滅害蟲與雜草的同時，也毒害了非目標生物，破壞土壤微生物群落，並透過逕流與滲漏污染水體。單一栽培的大面積推廣，導致農業景觀趨向均質，使得與傳統農田共存的野生動植物棲地大幅減少，作物遺傳多樣性也因依賴少數高產品種而急遽萎縮。不當的灌溉管理則可能引發土壤鹽鹼化，使肥沃耕地逐漸退化為不毛之地。更根本的生態困境在於，現代工業化農業試圖維持一個「顛倒的生態金字塔」——即大量飼養處於高營養階的牲畜（如牛、豬、雞）以滿足人類肉食需求，這需要耗費遠比直接食用植物更多的初級生產力（作物），從能量流動角度觀之是極其無效率的，並對土地、水與能源資源構成巨大壓力。

為因應上述挑戰，永續農業應運而生，其核心理念在於模仿自然生態系統的運作原則，追求生產力、生態健康與社會福祉的長期平衡。永續農業強調維護土壤有機質與生物活性，視土壤為活的生態系統而非單純的生長介質。有機農業透過禁止使用合成化學物質，並採用輪作、覆蓋作物與生物防治等方法，來維持地力與控制有害生物。生物多樣性農業則進一步將農田視為鑲嵌式地景的一部分，透過保留樹籬、生態廊道與混農林業等方式，為野生生物提供棲所，並增強農業系統對極端氣候與病蟲害的韌性。最終，真正的永續性需要超越生產端的改革，推動整個糧食系

統的轉型，這包括促進在地化與季節性飲食、減少食物浪費、建立公平的貿易體系，以及引導消費者選擇對環境與社會友善的食品，從而構建一個從農場到餐桌全面永續的食物未來。



10.1 農業的起源與演變

農業作為人類文明發展的基石，其起源與演變過程深刻地塑造了人類社會的結構、文化與生態環境的互動模式。農業的出現標誌著人類從被動適應自然環境的採集狩獵者，轉變為主動改造生態系統以生產食物的生產者。這一轉變不僅帶來了人口增長、定居社會的形成與技術進步，同時也開啟了人類對自然資源進行大規模管理與利用的時代。農業系統的發展並非線性進程，而是受到氣候變遷、地理條件、社會組織與技術創新等多重因素的交互影響，在不同地區呈現出多樣化的發展路徑與適應策略。從最早的作物馴化中心到現代的全球糧食體系，農業的演變史實質上是一部人類與環境共同演化的歷史，其中既包含著對生態規律的巧妙運用，也伴隨著資源過度消耗與環境退化的深刻教訓。

農業起源的具體時間與地點一直是考古學與環境史研究的重要課題。目前學界普遍認為，農業獨立起源於全球多個地區，包括西亞的肥沃月灣、東亞的黃河與長江流域、中美洲、南美洲的安第斯山區與亞馬遜地區、非洲的薩赫勒地帶以及新幾內亞高地等。這些起源中心在約一萬年前的全新世初期，幾乎同時開始了對野生植物的有意識栽培與對動物的馴化。氣候條件的穩定化被認為是農業誕生的重要前提，末次冰期結束後相對溫暖濕潤的氣候，為多年生植物的生長與人類的定居生活提供了有利條件。然而，農業的採納並非一蹴可幾，而是一個漫長的過渡時期，其間採集狩獵與早期耕種並存，人類逐步累積了關於植物生長習性、土壤特性與季節循環的知識，並發展出相應的耕作工具與技術。

從採集狩獵到定居農業的轉型，帶來了深遠的社會與生態後果。定居生活促進了財產觀念的產生、社會階層的分化以及更複雜政治組織的出現。人口密度因食物供應增加而上升，但同時也帶來了新的挑戰，包括傳染病更容易在密集人群中傳播、對特定作物依賴所導致的營養單一化風險，以及因灌溉等集約化農業實踐可能引發的土壤鹽鹼化與生態系統簡化。農業社會的發展也加速了自然景觀的改變，森林被開墾為農田，自然植被被人工選育的作物所取代，生物多樣性在農業區域內顯著下降。然而，傳統農業系統中往往蘊含著高度的生態智慧，例如輪作、間作、農林混作等實踐，有助於維持土壤肥力、控制病蟲害並保護生物多樣性，體現了人類在利用自然的同時尋求與生態系統和諧共存的努力。

近代以來的農業演變，特別是二十世紀中葉以降的「綠色革命」，標誌著農業進入以高投入、高產出為特徵的工業化階段。綠色革命通過引入高產作物品種、大量使用化學肥料與農藥、擴大灌溉面積以及推廣機械化耕作，顯著提高了全球糧食產量，緩解了許多地區的饑荒威脅。然而，其生態與社會代價也日益顯現：化學投入品導致水體優養化、土壤退化與生物多樣性喪失；灌溉過度抽取地下水造成水資源枯竭；單一化栽培增加了作物對病蟲害的脆弱性，並導致傳統地方品種的遺失；能源密集的生產模式加深了農業對化石燃料的依賴，貢獻了溫室氣體排放。綠色革命在提高產量的同時，也強化了全球糧食體系對少數幾種主要穀物（如水稻、小麥、玉米）的依賴，影響了全球飲食結構的多樣性。

全球化與貿易自由化進一步重塑了當代農業的面貌。農產品成為全球商品鏈中的重要一環，農業生產日益與國際市場價格波動、跨國公司策略以及全球供應鏈緊密相連。這種整合一方面使得消費者能夠享用來自世界各地的食物，另一方面也導致生產地與消費地的分離，加劇了地方糧食系統的脆弱性，並產生了巨大的「食物里程」碳足跡。農業的工業化與全球化伴隨著生產資料的集中化與農民權益的邊緣化等問題，許多小規模農戶在面對大規模企業化農場的競爭時難以生存，傳統農耕知識與社區凝聚力逐漸流失。同時，生物技術的發展，特別是基因改造作物的推廣，帶來了關於糧食安全、生態風險與社會公平的新一輪爭論。

面對當前農業系統所面臨的生產力瓶頸、環境退化與氣候變遷挑戰，永續農業的概念與實踐應運而生，旨在重新構建農業與生態系統之間的平衡關係。永續農業強調模仿自然生態系統的運作原理，透過增強生物多樣性、改善土壤健康、優化水資源利用與減少外部投入，來實現農業生產的韌性與長期生產力。這包括推廣有機農業、再生農業、生態農業、農林業以及都市農業等多樣化的實踐模式。這些模式不僅關注糧食產出，也重視生態系統服務的維護、農村社區的生計保障與文化傳承。農業的未來演變將取決於人類能否成功整合傳統生態智慧與現代科學知識，發展出既能滿足全球糧食需求，又能修復生態系統、適應氣候變遷並促進社會公平的創新農業體系。

10.1.1 從採集狩獵到定居農業的轉變

人類社會從採集狩獵到定居農業的轉變，是環境生態學中探討人與自然關係演進的關鍵節點。這一轉變並非單一事件，而是一個歷時數千年、在全球多個地區獨立發生的漸進過程，約始於一萬多年前的全新世初期。採集狩獵社會依賴於對自然環境的直接索取，其生活方式高度適應於當地的生態系統，人口密度低且活動範圍廣，對環境的影響相對分散且可逆。然而，隨著末次冰期結束，氣候趨於穩定溫暖，全球生態系統發生重組，某些地區的動植物資源變得更加豐富且可預測，為人類嘗試馴化動植物創造了條件。這種轉變的驅動力複雜多元，包括氣候變遷、人口壓力、資源波動以及人類對植物生長週期觀察累積的知識，共同促使人類從被動適應環境轉向主動管理與改造環境。

定居農業的興起標誌著人類開始大規模介入生態系統的物質與能量流動。早期農業中心，如西亞的肥沃月灣、中國的黃河流域、中美洲及安第斯山區，人類選擇性地培育野生植物，如小麥、稻米、玉米，並馴化動物如牛、羊、豬。這一過程深刻改變了地表景觀，森林被開墾為農田，自然植被組成被人為作物單一化所取代，土壤養分循環因耕作與收穫而加速。農業生產提供了更穩定且集中的食物來源，導致人口得以增長並形成永久性聚落。然而，這種穩定性是脆弱的，它將人類的生存基礎繫於少數幾種作物，增加了對特定環境條件（如降雨、土壤肥力）的依賴，並可能因作物歉收而引發糧食危機。同時，定居生活產生了廢棄物集中處理的問題，開始對局部水體和土壤造成累積性影響。

從生態角度審視，農業轉型大幅提升了人類社會的能量獲取效率，但同時也開啟了環境退化的序幕。採集狩獵社會的能量獲取主要依賴於太陽能通過自然食物鏈的現成積累，人類處於消費者的位置。農業則使人類扮演了初級生產管理者的角色，通過耕作直接干預光合作用的產出，並將更多太陽能導向人類可食用的部分。這種干預導致生態系統簡化，生物多樣性下降，自然調節功能減弱。為了維持農業生產力，人類不得不發展出灌溉、施肥、輪作等技術來對抗日趨嚴重的土壤耗竭、鹽鹼化與病蟲害問題，形成了人與環境之間不斷升級的「管理—退化—再管理」循環。這一轉變不僅重塑了自然環境，也重構了人類社會組織、知識體系以及對自然界的認知，為後續數千年的文明發展與環境互動奠定了基礎，同時也埋下了當代許多環境問題的歷史根源。

10.1.2 綠色革命的背景、技術與成就

綠色革命是二十世紀中葉一場影響深遠的農業轉型運動，其核心目標在於透過科技創新大幅提升糧食產量，以應對全球人口快速增長所帶來的糧食安全危機。這場運動的興起有其深刻的歷史背景。二次世界大戰結束後，許多發展中國家，特別是亞洲與拉丁美洲國家，面臨著嚴峻的人口壓力與糧食短缺問題。傳統農業生產方式已無法滿足需求，饑荒的陰影籠罩著大片區域。在此背景下，由國際研究機構、

各國政府與基金會共同推動的綠色革命，旨在透過科學與技術的介入，徹底改造農業生產體系。其哲學基礎是相信透過高產品種、化學投入與灌溉設施的結合，能夠突破土地與勞動力的限制，實現糧食產量的躍升。

綠色革命的技術核心主要圍繞著三大支柱：高產作物品種的育成、化學肥料與農藥的大量使用，以及灌溉設施的擴建與現代化。在品種改良方面，以諾曼·博洛格為代表的科學家們成功培育出半矮稈、抗倒伏且對氮肥反應敏感的小麥與水稻品種。這些品種具有分蘖力強、穀稈比高的特性，能夠將更多的光合產物轉移至穀粒，從而顯著提高單位面積產量。與此同時，化學農業的推廣成為必然配套。合成氮肥的普及為高產品種提供了充足的養分，確保其產量潛力得以發揮；而各種殺蟲劑、除草劑的應用，則旨在控制病蟲害與雜草，減少產量損失。此外，大規模的水利工程建設與抽水灌溉技術的推廣，使得農業生產得以擺脫降雨的制約，實現了作物的穩定與集約化栽培。

這場技術驅動的農業變革取得了舉世矚目的成就，其最直接的影響體現在全球糧食產量的顯著提升。從二十世紀六〇年代到八〇年代，許多參與綠色革命的國家，如印度、巴基斯坦、墨西哥與菲律賓，其小麥與水稻產量實現了翻倍甚至數倍的增長。印度從一個依賴糧食進口的國家，轉變為能夠基本自給並有餘糧儲備的國家，便是其中最著名的成功案例。這場革命被認為在關鍵時期避免了全球範圍的大規模饑荒，養活了數以億計的人口，並為許多發展中國家的經濟起飛提供了基礎。它不僅改變了農業生產的技術面貌，也深刻影響了農村社會結構與經濟模式，促使農業朝向更資本密集、技術導向的方向發展。

然而，綠色革命的成就背後也伴隨著一系列複雜的環境與社會代價，這些代價在後續年代逐漸顯現，並促使人們對其進行深刻的反思。在環境方面，對化學肥料與農藥的過度依賴導致了土壤退化、水體優養化、生物多樣性喪失以及害蟲抗藥性等問題。單一高產品種的大面積推廣，擠壓了地方品種的生存空間，導致作物遺傳多樣性急遽萎縮，增加了生產系統面對病蟲害爆發與氣候變遷的脆弱性。在社會經濟層面，新技術的採用往往需要大量的資金投入，這使得資源較豐富的大農戶更能受益，而小農則可能因無法負擔成本而邊緣化，加劇了農村內部的貧富差距。此外，對灌溉的嚴重依賴也導致了許多地區地下水超抽與土壤鹽鹼化的問題。因此，綠色革命不僅是一段關於技術勝利的故事，更是一個提醒我們必須以更全面、更永續的視角來審視農業發展路徑的關鍵歷史篇章。

10.1.3 全球對少數主食作物的依賴現況

現代全球糧食系統呈現出高度集中於少數幾種主食作物的特徵，這種依賴性不僅塑造了農業生產的景觀，也深刻影響了全球的飲食結構與糧食安全。目前，小麥、水稻和玉米這三種穀物合計提供了全球人口超過百分之四十的熱量攝取，若再加上馬鈴薯、大麥、高粱等作物，前十種主要作物便構成了人類飲食能量來源的絕

大部分。這種高度集中的現象是數千年農業歷史演變與近半世紀綠色革命雙重作用的結果。綠色革命透過培育高產量品種、擴大灌溉面積與大量施用化肥農藥，顯著提升了這些特定作物的單位面積產量，成功緩解了許多地區的飢餓問題，但同時也加速了農業系統的單一化與標準化進程。作物多樣性的萎縮意味著全球糧食供應的基礎日益狹窄，使得整個系統面對氣候變遷、病蟲害爆發等衝動時顯得更加脆弱。

從地理分布來看，這種依賴具有明顯的區域性差異。小麥主要種植於溫帶地區，是歐洲、北美、北非及中亞許多國家的主食；水稻則是亞洲熱帶與亞熱帶地區的命脈，養活了全球近半數人口；玉米的用途則更為多元，既是拉丁美洲與部分非洲地區的重要糧食，也是全球畜牧業飼料與工業原料的主要來源。然而，這種區域專化生產模式強化了全球糧食貿易的結構，也導致許多地區的傳統作物與地方品種逐漸被邊緣化。例如，在非洲，引入的玉米和小麥在一定程度上取代了傳統的粟、高粱和根莖類作物；在安地斯山區，馬鈴薯的品種多樣性也因市場偏好而減少。這種轉變不僅是作物種類的更迭，更伴隨著相關耕作知識、飲食文化與生態適應性的流失。

這種對少數主食作物的深度依賴，帶來了多方面的風險與挑戰。在生態層面上，大規模的單一栽培（單作）導致農業生態系統簡化，削弱了其對病蟲害的自然抵抗力，從而增加了對化學農藥的依賴，形成惡性循環。單作也加速了土壤養分的不平衡消耗與土壤退化。在遺傳層面上，商業化農業普遍採用少數幾個高產商業品種，使得作物遺傳基礎變得極為狹窄。全球小麥、水稻生產高度依賴極少數的遺傳系譜，一旦遭遇新型病原菌或極端氣候事件，可能引發大範圍的產量損失，歷史上的愛爾蘭馬鈴薯饑荒便是慘痛教訓。從糧食安全角度審視，這種依賴使全球糧食供應鏈更容易受到國際市場價格波動、地緣政治衝突與極端氣候事件的衝擊。

面對此一現況，國際社會已逐漸意識到促進作物多樣性的重要性。許多研究與保育計畫致力於發掘、保存與利用被忽視及未充分利用的作物種類，例如藜麥、苜蓿、畫眉草等，這些作物通常具有較好的營養價值與環境適應力。此外，推動農林複合系統、間作與輪作等生態農業實踐，有助於在農田尺度上重建生物多樣性，提升系統韌性。從根本而言，減輕對少數主食作物的過度依賴，需要從育種政策、農業補貼、市場機制與消費者飲食習慣等多方面進行系統性調整，促使糧食系統朝向更為多元、均衡與永續的方向轉型。

10.1.4 自由化、私有化與全球化對農業的影響

自由化、私有化與全球化是過去數十年間重塑全球農業體系的三股關鍵力量，其影響深遠且複雜，不僅改變了農業生產的組織方式，也重新定義了糧食貿易、農民生計與鄉村社會的結構。自由化主要指政府減少對農業市場的干預，包括降低關稅、取消進出口配額以及削減農業補貼，旨在透過市場機制提升效率與競爭力。私有化則是將原本由政府或集體控制的農業資源，如土地、水利設施、研究機構乃至

推廣服務，轉移給私人部門經營或擁有。全球化則是在貿易與投資壁壘降低的背景
下，促使農業生產、加工、貿易與資本流動跨越國界，形成高度整合的全球糧食系
統。這三股力量往往相互交織，共同推動了農業從地方性、多樣化的生產模式，轉
向為集中化、專業化與商品化的全球產業鏈。

自由化政策對農業的影響呈現顯著的區域差異。在已開發國家，農業自由化常
伴隨著對直接補貼的調整，但大型農企業往往能透過規模經濟與技術優勢，在國際
市場上維持競爭力，甚至擴大出口。然而，在許多開發中國家，特別是糧食淨進口
國，突然開放市場導致廉價的進口農產品湧入，嚴重衝擊本地小農的生計。這些小
規模生產者缺乏資本與技術來提升產量或降低成本，在價格競爭中處於劣勢，可能
被迫放棄耕作，加劇鄉村貧困與人口外流。此外，自由化強調出口導向的現金作物
生產，可能促使農民將資源從供應本地市場的多樣化糧食作物，轉向單一化的經濟
作物，如咖啡、可可或花卉，這雖能賺取外匯，卻也提高了本地糧食供應的脆弱
性，使其更容易受到國際價格波動的影響。

私有化進程改變了農業資源的掌控與分配。灌溉系統、種子供應與農業信貸的
私有化，理論上旨在提升服務效率與投資誘因。然而，實踐中常導致資源取得的不
平等加劇。大型農場或資本充裕的生產者能夠投資於私有化的高效率灌溉設備或購
買優良商業種子，而小農則可能因無法負擔使用費或貸款門檻，而被排除在這些關
鍵資源之外。種子產業的私有化與集中化尤為明顯，少數跨國公司掌控了全球商業
種子與農業化學品的絕大部分市場，這強化了農民對外部投入品的依賴，也可能侵
蝕地方品種的多樣性與農民自行留種的傳統權利。私有化雖可能帶來技術進步，但
若缺乏適當的監管與配套措施，往往會邊緣化小農，深化農業部門的社會經濟分
化。

全球化透過貿易協定、跨國公司投資與供應鏈整合，將世界各地的農業生產者
納入同一競爭平台。這創造了新的市場機會，例如開發中國家的特色水果、蔬菜或
水產品得以進入富裕國家的超市。但全球化也強化了農業生產的「買方驅動」特
性，大型零售商、食品加工商與貿易商憑藉其市場力量，能夠設定嚴格的品質、安
全與交貨標準，並壓低收購價格。農民，特別是契約農，在議價中處於弱勢，利潤
空間受到擠壓。同時，全球化加速了農業生產的空間重組，勞動密集型作物或畜牧
業的生產基地可能轉移至環境規制較寬鬆、勞動成本較低的國家，這在創造當地就
業的同時，也可能帶來環境污染、土地爭奪與勞動權益等問題。全球化的糧食系統
在提升某些地區糧食可及性的同時，也因其長途運輸、過度加工與高度包裝，增加
了能源消耗與環境足跡。

綜觀而言，自由化、私有化與全球化對農業的影響是一體兩面的。它們促進了
全球糧食貿易量的增長、某些農產品生產效率的提升，以及消費者可獲得的食物種
類增多。然而，其過程也加劇了市場風險、資源分配不均、小農生計脆弱化，以及
地方糧食系統與文化多樣性的侵蝕。這些轉變凸顯了在追求經濟效率與整合的同
時，必須正視糧食主權、社會公平與生態永續性的重要性。未來的農業政策需要在

全球市場整合與在地韌性建設之間尋求平衡，確保農業發展的果實能夠被更廣泛地分享，並維護農業在提供糧食、生計與生態服務方面的多元功能。

10.2 糧食的營養組成與人體需求

糧食作為人類生存與發展的基礎，其營養組成直接關係到個體健康、族群活力乃至社會的生產力。從生態學的角度審視，糧食本質上是生態系統初級生產力與次級生產力經由特定途徑轉化而成的生物能量與物質載體，其組成反映了生物地球化學循環中碳、氮、磷等關鍵元素在食物鏈中的流動與累積狀態。人類對糧食的需求，不僅是攝取足夠的熱量以維持基礎代謝與活動，更涉及一系列複雜的巨量與微量營養素，這些營養素共同支持著人體生長、修復、免疫與各種生理功能的正常運作。因此，理解糧食的營養組成與人體需求，是連結農業生產系統、生態環境承载力與公共衛生健康的重要橋樑，也是評估糧食安全內涵從「量」到「質」深化的重要指標。

人體所需的營養素大致可分為提供能量的巨量營養素，以及雖不直接供能但對生理調節至關重要的微量營養素。巨量營養素包括醣類、蛋白質與脂肪，它們是構成身體組織與供應日常活動能量的主要來源。這些營養素的最終來源均可追溯至生態系統的初級生產者——綠色植物透過光合作用固定的太陽能，以及從土壤中吸收的礦物元素。例如，醣類直接來自植物光合作用的產物；蛋白質的合成則依賴植物或藉由食物鏈傳遞的氮、硫等元素；脂肪則多為生物體儲存能量的形式。從生態效率的角度看，能量與物質沿食物鏈傳遞時存在大量耗損，這意味著人類飲食結構中不同營養素的來源比例，深刻影響著土地、水等自然資源的利用效率與環境足跡。

除了巨量營養素，維生素與礦物質等微量營養素雖然人體所需量極少，但其生理功能不可或缺。它們多作為輔酶、激素或結構成分，參與新陳代謝、骨骼形成、神經傳導、抗氧化等關鍵過程。這些微量營養素在自然界的分布與生物地球化學循環緊密相連。例如，碘的缺乏與地區土壤和水中碘含量低有關；鐵、鋅等礦物質的生物可利用性受土壤酸鹼度與有機質含量影響；維生素的合成則與植物種類、日照條件及動物飼料組成相關。因此，區域性的生態環境條件會直接塑造當地食物中的微量營養素譜，從而影響人群的健康狀況。歷史上許多地方性疾病，如壞血病、腳氣病、克山病等，都與特定生態環境下食物中微量營養素缺乏密切相關。

水分雖不被歸類為傳統的營養素，但其對於人體營養安全與健康的重要性不亞於任何固態食物。水是體內所有生化反應的介質，負責運輸營養物質、排除代謝廢物、調節體溫。人體對水分的需求與氣候條件、活動強度及飲食內容息息相關。從生態系統服務的視角看，清潔、安全的飲用水供應是水文循環提供的一項關鍵服務，其可獲得性與品質受到氣候變遷、水資源管理、土地利用以及汙染狀況的多重制約。水資源短缺或汙染不僅直接威脅生存，也會透過限制農業灌溉、影響食物生

產與衛生條件，間接加劇營養不良的問題。因此，水資源安全與糧食安全、營養安全構成了一個相互依存、不可分割的整體。

當前全球面臨的營養不均衡問題，呈現出飢餓、隱性飢餓與過營養並存的複雜圖景，這實質上是全球糧食系統與生態系統脫鉤的深刻反映。一方面，在許多發展中地區，糧食獲取不足導致能量-蛋白質缺乏型飢餓；同時，由於飲食多樣性不足或土壤貧瘠，即使熱量攝取足夠，仍普遍存在維生素A、鐵、碘、鋅等微量營養素缺乏的「隱性飢餓」，影響數億人的健康與發展潛能。另一方面，在工業化國家及新興經濟體，過度攝取高能量密度但營養密度低的加工食品，導致肥胖、心血管疾病、糖尿病等過營養相關疾病激增。這種營養不均衡的雙重負擔，根源於全球農業與食物系統過度追求少數主食作物的產量，忽視作物多樣性與營養品質，以及食物加工、分配與消費模式受市場力量驅動而遠離生態與健康原則。這不僅是公共衛生危機，也是生態系統服務被不當利用與分配的結果。

10.2.1 三大巨量營養素：醣類、蛋白質與脂肪

人類維持生命活動與身體機能所需的基本營養素中，醣類、蛋白質與脂肪被歸類為三大巨量營養素，其需求量遠高於維生素與礦物質等微量營養素。這三類營養素不僅是構成身體組織的主要材料，更是提供日常活動所需能量的關鍵來源。從生態學的角度審視，這些營養素本質上源自於初級生產者透過光合作用所固定的太陽能，並藉由食物鏈在不同營養層間傳遞與轉化，最終成為人類飲食的基礎。因此，理解巨量營養素的生態來源、化學結構、生理功能及其在食物系統中的流動，是連結農業生產、食物資源與人體健康的重要橋樑。

醣類，主要由碳、氫、氧元素組成，是自然界最豐富的有機化合物，也是人類飲食中最主要的能量來源。在生態系統中，綠色植物透過光合作用將二氧化碳和水轉化為葡萄糖等簡單醣類，並進一步合成澱粉、纖維素等多醣體。人類攝取的醣類主要來自穀物、根莖類作物、水果等植物性食物。澱粉經消化分解為葡萄糖後，可直接為細胞代謝提供能量；而膳食纖維雖無法被人體消化酶分解，卻對維持腸道微生物群落健康、調節血糖與血脂具有重要功能。從能量流動的角度看，醣類是人類直接利用初級生產力的最短路徑，其生產效率深刻影響著全球糧食供應的穩定性。

蛋白質是由胺基酸以肽鍵連結而成的大分子，除碳、氫、氧外，必定含有氮元素，部分還含有硫、磷等。蛋白質是構成與修復身體組織（如肌肉、器官、酶、激素）的核心材料，亦可在醣類與脂肪供應不足時提供能量。生態系統中，蛋白質的合成始於植物吸收土壤中的氮、硫等礦質元素，將其轉化為胺基酸並組裝成蛋白質。人類透過攝取植物性食物（如豆類、穀物）或動物性食物（如肉、蛋、奶）獲取蛋白質，後者本質上是將植物蛋白經由消費者轉化而成的二次產物。蛋白質的營養價值取決於其胺基酸組成是否完整，這反映了食物在生態營養結構中所處的位置及其轉化效率。

脂肪，亦稱脂質，是一類疏水性有機化合物的總稱，主要功能包括儲存與供應能量、構成細胞膜、協助脂溶性維生素吸收以及維持體溫。在化學結構上，膳食脂肪多以三酸甘油酯的形式存在，由甘油與三個脂肪酸分子酯化而成。脂肪酸的飽和程度決定了脂肪的物理性質與生理效應。生態層面上，脂肪是能量高度濃縮的儲存形式，植物將光合作用產物轉化為油脂儲存於種子中（如油料作物），動物則將過剩能量以脂肪形式儲存於體內。人類飲食中的脂肪來源廣泛，包括植物性油脂、動物性脂肪以及水產品中的魚油。脂肪的攝取與健康關係密切，其種類與比例受到食物來源、動物飼料乃至農業生產方式的深刻影響，體現了從生產端到消費端的複雜生態與營養連結。

10.2.2 微量營養素：維生素與礦物質的來源與功能

微量營養素雖然在人體所需總量上遠低於巨量營養素，但其在維持生理機能、促進生長發育以及預防疾病方面扮演著不可或缺的角色。維生素與礦物質這兩大類微量營養素，無法由人體自行合成或合成量不足，必須仰賴食物攝取。它們作為輔酶、抗氧化劑、荷爾蒙前驅物或結構成分，參與體內數百種生化反應，從能量代謝、神經傳導到免疫防禦，幾乎涉及所有生命過程。缺乏任何一種微量營養素都可能導致特定的缺乏症，影響健康甚鉅；然而，過量攝取某些維生素或礦物質亦可能產生毒性，因此均衡且多樣化的飲食是確保攝取適量微量營養素的關鍵。

維生素依據其溶解性可分為水溶性與脂溶性兩大類。水溶性維生素包括維生素B群（如B1、B2、B6、B12、葉酸、菸鹼酸等）與維生素C，它們主要作為輔酶參與能量代謝、紅血球生成、胺基酸代謝以及抗氧化作用。這類維生素廣泛存在於全穀類、豆類、瘦肉、乳製品、深綠色蔬菜及柑橘類水果中。由於水溶性維生素不易儲存於體內，多餘部分會隨尿液排出，因此需要每日規律攝取。脂溶性維生素包括維生素A、D、E、K，它們可溶於脂肪並儲存於肝臟與脂肪組織中。維生素A對視覺、免疫及上皮組織健康至關重要，來源如肝臟、蛋黃及富含 β -胡蘿蔔素的深色蔬果。維生素D主要透過日照由皮膚合成，亦可從魚肝油、多脂魚類中獲取，其功能在於調節鈣磷平衡與骨骼健康。維生素E是重要的抗氧化劑，保護細胞膜免受氧化損傷，常見於植物油、堅果與種子。維生素K則參與凝血機制與骨骼代謝，綠葉蔬菜與發酵食品是其良好來源。

礦物質是構成身體組織與調節生理功能的無機元素，可依人體需要量分為巨量礦物質與微量礦物質。巨量礦物質如鈣、磷、鎂、鈉、鉀、氯，需求量較大。鈣與磷是骨骼與牙齒的主要成分，鈣還參與肌肉收縮與神經傳導，乳製品、深綠色蔬菜與豆製品是鈣的優良來源。鈉與鉀共同維持體液平衡與神經衝動傳遞，但現代飲食往往鈉攝取過量而鉀攝取不足，增加高血壓風險，應多攝取蔬果以補充鉀。微量礦物質或稱微量元素，包括鐵、鋅、銅、錳、硒、碘等，需求量雖微，但功能關鍵。鐵是血紅素的核心成分，負責氧氣運輸，缺乏導致貧血，紅肉、內臟、深綠色蔬菜與強化穀物是重要來源。鋅參與酵素活性、免疫反應與傷口癒合，存在於牡蠣、紅

肉與南瓜籽中。碘是甲狀腺激素的組成元素，調節新陳代謝，碘鹽、海帶與海魚可提供碘。硒作為抗氧化酵素的重要成分，保護細胞，可從巴西堅果、海產與肉類中獲取。

在現代農業與食物系統中，微量營養素的攝取面臨雙重挑戰。一方面，土壤礦物質耗竭與作物品種選育可能導致食物中微量營養素密度下降；另一方面，高度加工食品的普及，在加工過程中常流失維生素與礦物質，即使後續強化，也難以完全取代天然食物中的複雜營養基質。此外，飲食模式單一化，過度依賴少數主食作物，加劇了「隱性飢餓」現象，即熱量攝取充足但微量營養素缺乏，這在全球範圍內都是一項重要的公共衛生議題。因此，推動飲食多樣化，增加全食物、蔬菜、水果、堅果與種子的攝取，是確保微量營養素充足、維護個人健康與生態系統營養循環平衡的根本之道。這也與永續農業強調生物多樣性與土壤健康的理念相互呼應，因為健康的生態系統才能生產出營養密度高的食物。

10.2.3 水分攝取與營養安全的關係

水分攝取是維持人體生理機能與營養安全不可或缺的基礎，其關係遠超過單純的解渴需求。水作為人體最主要的組成成分，參與了體內幾乎所有生化反應，包括營養素的消化、吸收、運輸與代謝廢物的排除。從營養安全的宏觀角度來看，充足且安全的水分供應是確保食物生產、加工、烹調乃至最終被人體有效利用的先決條件。當水分攝取不足時，即使攝取了足夠的熱量與巨量營養素，人體的代謝效率也會顯著下降，導致營養素無法被充分吸收利用，進而引發隱性營養不良。例如，蛋白質的合成、維生素的溶解與運送、以及礦物質的電解質平衡，皆高度依賴於體內穩定的水合狀態。因此，水分攝取不足不僅直接導致脫水，更會間接削弱個體從食物中獲取營養效益的能力，構成營養安全體系中的脆弱環節。

營養安全的概念強調個人持續獲得充足、安全且營養均衡食物的能力，而水資源的可及性與品質是實現此目標的關鍵環境決定因子。在家庭層面，安全飲用水的缺乏會迫使人們使用受污染的水源進行烹飪與清洗，大幅增加食源性疾病的風險。腹瀉等水媒疾病不僅直接危害健康，更會嚴重損害腸道功能，導致營養吸收不良，特別是對兒童的成長發育造成不可逆的影響。此外，農業生產是全球淡水資源的最大消耗者，水資源的短缺或不穩定會直接衝擊作物產量與畜牧業生產，減少食物供應量並推高價格，從源頭威脅區域乃至全球的營養安全。尤其在雨養農業區，降雨模式的改變與乾旱頻發，使得水分壓力與糧食不安全之間的關聯日益緊密，形成惡性循環。

從公共衛生與政策角度審視，水分攝取與營養安全的連結突顯了跨部門整合管理的必要性。單純追求糧食產量的增加，若忽略水資源的永續管理，將難以實現長期的營養安全。推廣節水農業技術、改善灌溉效率、以及發展耐旱作物品種，是同時應對水資源壓力與保障食物營養價值的關鍵策略。在個人與社區層次，營養教育

應涵蓋水分攝取的重要性，教導民眾辨識脫水跡象，並理解在氣候炎熱或身體活動量大的情況下，增加水分攝取以維持營養代謝效率的必要性。對於弱勢群體，如嬰幼兒、老年人及從事重勞動者，其水分需求與營養狀況的關聯更為敏感，需要針對性的社會支持與衛生介入。總而言之，將水資源管理納入營養安全框架，並在個體健康促進中強調水合作用的核心地位，是構建韌性食物系統與健康社會不可或缺的思維與行動路徑。

10.2.4 全球營養不均衡：飢餓、過營養與微量元素缺乏

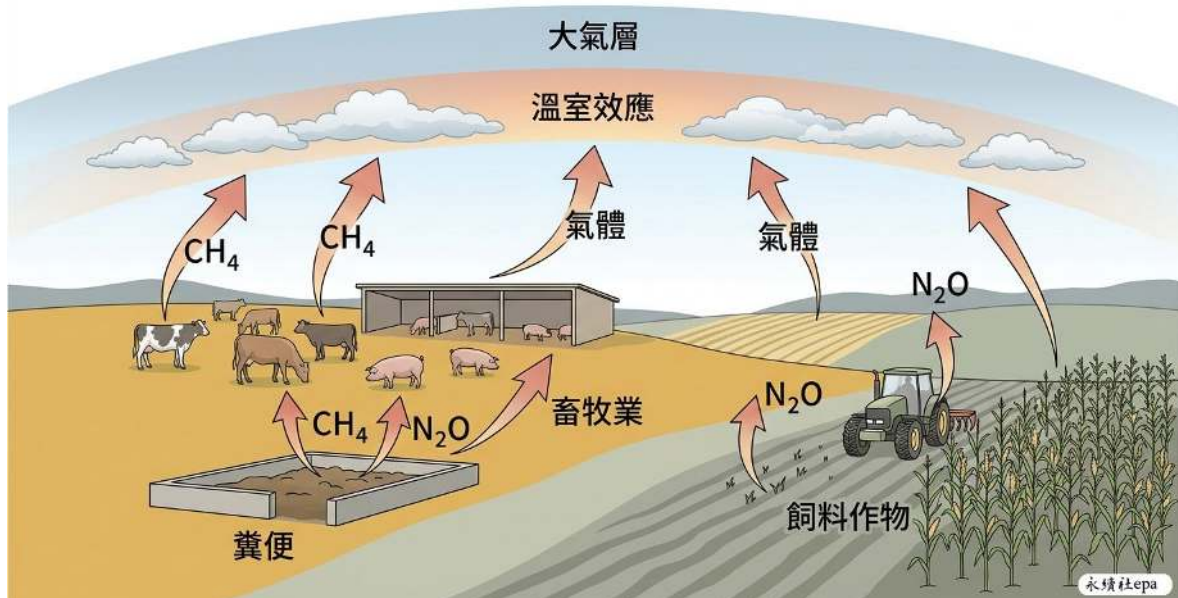
全球營養不均衡呈現一種複雜且矛盾的圖景，同時存在著營養不足與營養過剩的雙重負擔。飢餓問題主要影響發展中國家，特別是在撒哈拉以南非洲、南亞及部分拉丁美洲地區，其根源往往與貧困、政治動盪、氣候變遷導致的農業生產不穩定，以及糧食分配體系不公直接相關。長期熱量攝取不足不僅導致兒童發育遲緩、體重不足，更削弱個體的免疫系統，增加罹患傳染病的風險，形成健康與貧困的惡性循環。然而，飢餓並非僅是熱量短缺，更常伴隨著「隱性飢餓」，即關鍵微量營養素的缺乏，這在資源有限的社群中尤為普遍。

與此同時，過營養問題，特別是肥胖與相關慢性疾病，在已開發國家及日益富裕的發展中國家都市地區急遽蔓延。這與飲食模式轉向高熱量、高脂肪、高糖分及高度加工食品密切相關，同時身體活動量因都市化與機械化而下降。過度攝取熱量導致肥胖、第二型糖尿病、心血管疾病及某些癌症的發病率攀升，對公共衛生體系造成沉重負擔。值得注意的是，過營養與微量營養素缺乏可能並存於同一個體或社群中，例如攝取大量空熱量食物卻缺乏維生素與礦物質，形成所謂的「營養不良肥胖」現象。

微量元素缺乏，即隱性飢餓，是全球最普遍卻常被忽視的營養問題。鐵、碘、維生素A、鋅等關鍵微量營養素的攝取不足，影響著全球數十億人口的健康與發展。缺鐵性貧血會導致認知功能受損、勞動生產力下降及孕產婦死亡率增加；碘缺乏是智力障礙與甲狀腺疾病的主因；維生素A缺乏則會損害視力與免疫系統；鋅缺乏則妨礙兒童生長與發育。這些缺乏症往往源於飲食多樣性不足，過度依賴少數主食作物，而這些作物可能缺乏人體所需的全面營養素。

解決全球營養不均衡需要多層次、系統性的策略。這包括透過農業生物強化技術培育富含微量營養素的作物品種，推行多樣化飲食教育，強化食品安全網與社會保護計畫以保障脆弱群體的食物獲取，以及規範食品工業以促進健康飲食環境。此外，必須認識到營養安全與整體糧食系統、水資源安全、生態永續性及社會經濟公平緊密相連。唯有透過整合性的政策與跨部門合作，才能同時應對飢餓、過營養與隱性飢餓這三重挑戰，邁向確保所有人獲得充足、安全且營養均衡食物的目標。

10.3 畜牧業的角色與影響



畜牧業作為人類農業活動中不可或缺的一環，其角色與影響深遠且複雜。從歷史演進來看，畜牧業的發展與人類文明的進步緊密相連，不僅提供了穩定的蛋白質來源，更成為許多社會經濟結構的基礎。在現代全球化的食物系統中，畜牧業的規模與集約化程度不斷提升，滿足了日益增長的人口對肉類、乳製品及相關產品的需求。然而，這種擴張也伴隨著顯著的环境代價與資源壓力，使得畜牧業的永續性成為當前環境生態學與農業政策中備受關注的議題。畜牧業的影響層面廣泛，涵蓋了社會經濟、資源利用、生態系統健康以及氣候變遷等多個維度，需要從系統性的角度進行全面評估。

畜牧業的社會經濟貢獻體現在多個方面，包括就業機會的創造、農村經濟的穩定以及全球貿易的參與。在許多開發中國家，畜牧養殖是農村家庭的重要收入來源，特別是對於小農與邊緣社群而言，牲畜不僅是生產資料，更兼具儲蓄與保險的功能。此外，畜牧業相關的產業鏈，如飼料生產、獸醫服務、肉品加工與銷售，創造了大量的就業崗位，促進了地方經濟的發展。在全球層面上，肉類與乳製品是重要的貿易商品，某些國家甚至將畜牧產品出口作為外匯收入的主要來源。然而，這種經濟貢獻的分配並不均衡，大型企業在產業鏈中往往佔據主導地位，導致小規模生產者面臨市場競爭與價格波動的風險。

從資源消耗的角度分析，畜牧業對土地、水資源及糧食的利用效率引發了諸多討論。為了生產動物性蛋白質，需要投入大量的飼料作物，而這些作物本身的種植就佔用了大片的農業用地。據估計，全球約有三分之一的農地直接用於飼料生產，若將牧場用地納入計算，畜牧業相關的土地利用佔比更高。水資源方面，從飼料灌溉、牲畜飲用到加工過程，整個畜牧生產鏈的耗水量極為可觀，使得畜牧業成為淡

水消耗的主要部門之一。更進一步而言，將穀物轉化為動物性產品的過程存在能量損失，這意味著畜牧業在營養轉換效率上相對較低，加劇了全球糧食系統的壓力，特別是在糧食安全本就脆弱的區域。

畜牧業對環境的衝擊主要表現在溫室氣體排放、水汙染、土壤退化及生物多樣性喪失等方面。反芻動物如牛、羊在消化過程中會產生甲烷，這是一種強效的溫室氣體，其全球暖化潛勢遠高於二氧化碳。此外，畜牧場的糞便管理若處理不當，會釋放氧化亞氮，進一步加劇氣候變遷。水汙染問題則源自於集約化養殖場排放的廢水，其中含有高濃度的營養鹽、病原體與藥物殘留，容易導致水體優養化與地下水汙染。過度放牧則是許多地區土地退化與荒漠化的主要驅動因子，它破壞了植被覆蓋，加速了土壤侵蝕，並導致棲地破碎化，進而威脅野生動植物的生存。

面對畜牧業帶來的環境挑戰，尋求替代蛋白質來源與推動生產系統轉型已成為重要的發展趨勢。植物性肉類、細胞培養肉以及昆蟲蛋白等創新產品，正逐漸進入市場，這些替代品旨在提供相似的營養價值，同時大幅降低環境足跡。在生產端，永續畜牧實踐的推廣也日益受到重視，例如改善飼料配方以減少甲烷排放、實施糞肥資源化利用、採用輪牧系統以恢復草地生態等。這些措施有助於緩解畜牧業的負面影響，但其實施成效往往受到經濟成本、技術門檻與政策支持的制約。未來畜牧業的發展必須在滿足營養需求、保障生計與維護生態完整性之間取得平衡，這需要跨領域的合作與創新思維的引入。

10.3.1 畜牧業的社會經濟貢獻

畜牧業作為人類社會發展的基石之一，其社會經濟貢獻深植於全球各地的文化、經濟與日常生活之中。從歷史脈絡來看，馴化動物不僅標誌著人類從採集狩獵社會過渡到農業社會的關鍵轉折，更為定居文明的興起提供了穩定的食物來源與勞動力。在當代，畜牧業已發展成一個高度複雜的產業體系，其價值遠超過單純的肉、奶、蛋等動物性產品生產。它構成了全球數十億人口，特別是發展中國家農村地區，生計與糧食安全的核心支柱。畜牧業的經濟活動貫穿初級生產、加工、運輸、銷售乃至相關服務業，創造了龐大的就業機會，並成為許多國家，尤其是農業經濟體，出口收入與國內生產總值的重要組成部分。其貢獻不僅體現在直接的經濟產值上，更在於它支撐了上下游產業鏈的運作，並在維持農村社區活力、防止人口過度向都市集中方面扮演了緩衝角色。

在社會層面，畜牧動物往往與人類社群有著深厚的文化與情感連結。許多傳統節慶、儀式與社會結構都與特定的畜牧活動或動物息息相關，例如游牧民族的遷徙文化、某些社會中以牲畜作為財富與社會地位象徵的習俗。此外，畜牧業在提供高品質營養方面具有不可替代性。動物性產品是優質蛋白質、必需胺基酸、維生素B12、鐵、鋅等關鍵營養素的重要來源，對於兒童生長發育、孕婦健康以及整體人口的營養均衡至關重要。在糧食系統中，畜牧業還扮演了「升級循環者」的角色，能

夠將人類無法直接利用的副產品、農業殘餘物及邊際土地上的植被，轉化為高價值的食物資源，從而提高了整個食物系統的資源利用效率。

從經濟貢獻的具體數據來看，全球畜牧業直接或間接雇用了約十三億人口，其中許多是小型農戶或牧民，這對於減貧與鄉村發展具有實質意義。在許多低收入國家，畜牧資產是家庭應對風險（如作物歉收）的重要緩衝，也是一種可移動的儲蓄形式。貿易方面，肉類、乳製品、皮革、羊毛等畜產品是國際農產品貿易中的重要商品，為出口國帶來可觀的外匯收入。同時，畜牧業的發展也驅動了飼料作物種植、獸醫服務、屠宰加工、冷鏈物流、零售乃至餐飲服務等相關產業的成長，形成了乘數效應，顯著放大了其對整體經濟的影響力。

然而，在肯定畜牧業社會經濟貢獻的同時，也必須將其置於更廣泛的生態與資源脈絡中審視。畜牧業的發展模式、規模與集約化程度，深刻影響著其對環境資源的壓力，以及其長期永續性。傳統的混合農牧系統或粗放式放牧，與現代化工業化集約飼養模式，在資源效率、廢棄物排放及對社區的影響上存在顯著差異。因此，理解畜牧業的社會經濟角色，是後續探討其資源消耗與環境代價，以及思考如何向更永續生產模式轉型的必要基礎。這需要平衡糧食安全、民生經濟、文化傳承與生態保育等多重目標，在發展中尋求適應當地環境與社會條件的優化路徑。

10.3.2 畜牧業的資源消耗與環境代價

畜牧業作為全球食物生產體系的重要環節，其運作不僅依賴龐大的資源投入，更對自然環境產生深遠且多面向的衝擊。從資源消耗的角度來看，畜牧生產，特別是集約化的肉類與乳製品生產，是水資源、土地資源及糧食資源的高度密集使用者。以水資源為例，生產一公斤牛肉所需的水足跡高達數千公升，這包含了飼料作物灌溉用水、動物飲用水及加工過程中的用水。相較於植物性蛋白質的生產，動物性蛋白質的水資源需求往往高出數倍至數十倍，這在許多水資源緊缺的地區構成了嚴重的資源分配壓力。此外，全球約有三分之一的耕地被用於種植飼料作物，如玉米與大豆，這些土地若直接用於生產人類食用的糧食，理論上可以養活更多人口，凸顯了畜牧業在土地資源利用上的機會成本。

除了直接的資源消耗，畜牧業的環境代價更體現在對生態系統的多重污染與破壞上。集約化畜牧場產生的大量動物排泄物，若未經妥善處理，將成為水體與土壤的重要污染源。這些排泄物富含氮、磷等營養鹽，經由逕流進入河川、湖泊後，容易引發優養化現象，導致水中溶氧耗竭、藻類大量繁殖，進而破壞水域生態平衡，形成死亡水域。同時，排泄物中的病原體、抗生素殘留及重金屬也可能滲入地下水層，威脅飲用水安全。在土壤方面，過度放牧是導致土地退化與荒漠化的關鍵驅動因子之一，牲畜的啃食與踐踏會破壞植被覆蓋，降低土壤有機質，加劇土壤侵蝕，使原本肥沃的土地逐漸喪失生產力。

畜牧生產過程中的資源轉換效率低落，是加劇其環境負擔的根本原因。由於能量在食物鏈傳遞過程中遵循十分之一定律，動物需要消耗大量的植物性飼料才能生產出少量的肉類。這種低效的能量轉換意味著，為了滿足人類對動物產品的需求，必須擴大飼料作物的種植面積，從而導致更多的森林砍伐、棲地喪失與生物多樣性下降。例如，南美洲亞馬遜雨林的大規模砍伐，相當一部分即為了開闢大豆田或牧場，以供應全球，特別是已開發國家的畜牧業需求。這種土地利用變遷不僅釋放儲存在植被與土壤中的碳，加劇氣候變遷，也直接摧毀了無數物種的棲息地。

面對畜牧業帶來的資源與環境挑戰，推動生產系統的轉型至關重要。這包括改善飼料效率、優化糞肥管理技術以實現養分循環、推廣草飼與放牧系統的永續管理，以及發展替代蛋白質來源。從消費端減少肉類的過度消費，調整飲食結構，亦是減輕畜牧業環境足跡的有效途徑。理解畜牧業龐大的資源消耗與環境代價，是邁向永續糧食系統不可或缺的一步，需要生產者、消費者與政策制定者共同採取行動，在滿足營養需求與維護生態平衡之間尋求新的平衡點。

10.3.3 畜牧業與溫室氣體排放的關聯

畜牧業與溫室氣體排放的關聯，是現代農業對全球氣候系統產生深遠影響的核心議題。畜牧生產過程直接或間接排放多種溫室氣體，包括二氧化碳、甲烷和一氧化二氮，這些氣體在大氣中積累，增強了自然的溫室效應，導致全球暖化與氣候變遷。根據聯合國糧食及農業組織等國際機構的評估，全球畜牧業供應鏈所產生的溫室氣體排放量，約占所有人為排放總量的百分之十四點五，這個比例凸顯了畜牧業在氣候議題上的顯著分量。排放來源涵蓋了飼料作物生產、動物消化過程、糞便管理以及產品加工與運輸等各個環節，形成一個複雜的排放網絡。其中，反芻動物如牛、羊等在消化過程中經由腸道發酵產生大量甲烷，這種氣體的全球暖化潛勢在百年尺度上是二氧化碳的二十八倍，使得反芻畜牧成為特別受到關注的排放熱點。

在各種溫室氣體中，甲烷排放主要來自反芻動物的腸道發酵以及動物糞便在厭氧環境下的分解。一頭乳牛每年透過打嗝和排氣可釋放出大量甲烷，其總量相當可觀。糞便管理方式，例如將糞便儲存在液態糞坑或瀉湖中，會創造出缺氧條件，促使甲烷生成菌活躍，從而顯著增加甲烷排放。另一方面，一氧化二氮是一種威力更強的溫室氣體，其百年尺度的暖化潛勢是二氧化碳的二百六十五倍。畜牧業的一氧化二氮排放主要與肥料使用及動物糞便處理有關。為了生產牲畜飼料而大量施用氮肥，部分氮素會經由土壤微生物的硝化與反硝化作用轉化為一氧化二氮並釋放到大氣中。同樣地，未經妥善管理的動物糞便中的氮化合物，也會在土壤中經歷類似過程，成為一氧化二氮的排放源。

除了甲烷與一氧化二氮，二氧化碳的排放也貫穿整個畜牧生產體系。飼料作物的種植往往涉及森林砍伐與土地利用變遷，特別是南美洲等地為了開闢牧場或大豆田而清除森林，不僅直接釋放儲存在植被和土壤中的碳，更永久喪失了森林的碳吸

存功能。此外，飼料加工、畜牧場運作、動物產品冷鏈運輸及加工廠的能源消耗，大多依賴化石燃料，直接產生二氧化碳排放。因此，畜牧業的溫室氣體足跡是一個跨越多種氣體、涵蓋直接與間接排放的綜合性問題，其影響從地方農場尺度一直延伸到全球大氣系統。

減緩畜牧業的氣候影響已成為國際氣候治理與永續農業政策的重要方向。可行的策略包括改進動物飼料配方以降低腸道發酵的甲烷產量、推行更科學的糞便管理技術如沼氣回收發電、提升飼料作物的氮肥使用效率以減少一氧化二氮逸散，以及保護與恢復森林與草原生態系統以增強碳匯功能。同時，從消費端改變飲食結構，適度減少反芻動物肉類及乳製品的攝取，被視為能夠有效降低需求從而減少整體排放的關鍵社會行為轉變。這些減排努力需要整合技術創新、政策引導與公眾意識提升，方能在保障糧食安全與營養需求的同時，緩解畜牧生產對全球氣候系統構成的龐大壓力。

10.3.4 替代蛋白質來源的發展趨勢

面對畜牧業對環境造成的顯著衝擊，包括溫室氣體排放、土地與水資源的大量消耗，尋求替代性蛋白質來源已成為全球糧食系統轉型的重要策略。這些新興的蛋白質來源主要可分為三大類：植物性蛋白、細胞培養肉以及昆蟲蛋白，每一類都代表著不同的技術路徑與發展潛力，旨在滿足未來人口增長對蛋白質需求的同時，大幅降低傳統畜牧生產的生態足跡。

植物性蛋白的發展最為成熟，市場接受度也快速提升。這類產品主要以大豆、豌豆、小麥等作物為原料，透過擠壓、分離、組織化等食品加工技術，模擬肉類的質地、風味與營養成分。近年來，技術的進步使得植物肉的口感與多汁性大幅改善，產品種類從漢堡排擴展到雞塊、香腸乃至海鮮替代品。除了直接替代肉類，從藻類（如螺旋藻、小球藻）與真菌（如菇類菌絲體）中提取蛋白質也是重點方向，這些生物通常具有生長快速、所需資源較少的優勢，且能提供豐富的維生素與礦物質。

另一項革命性的發展是細胞培養肉，亦稱試管肉或潔淨肉。此技術是從動物身上取得少量肌肉幹細胞，在生物反應器中提供適當的營養液與生長因子，使其增殖分化成肌肉組織。這項技術的核心理念是跳過飼養與屠宰動物的過程，直接生產可食用的肉品。目前技術挑戰在於降低培養基成本、實現大規模生產，以及創造出帶有脂肪與結締組織的複雜肉類結構。儘管尚未全面商業化，但多家新創公司已展示原型產品，並在法規准許的區域開始小規模銷售，其長期目標是提供與傳統肉類幾乎無異的產品，同時減少土地使用、水耗及甲烷排放。

昆蟲蛋白則被視為極具效率的替代來源。許多昆蟲，如黑水虻、黃粉蟲與蟋蟀，具有將低價值有機廢棄物轉化為高品質蛋白質與脂肪的能力，其飼料轉換率遠高於牛、豬等傳統牲畜。昆蟲養殖所需的水與土地面積極小，溫室氣體排放也較

低。目前昆蟲蛋白的主要應用在於動物飼料與寵物食品領域，用以替代魚粉與大豆粕，有助於減緩海洋漁業壓力與森林砍伐。在人類直接食用方面，雖然在西方社會仍面臨「噁心因子」的文化障礙，但將昆蟲加工成粉末添加於蛋白棒、麵粉或零食中，是提高接受度的可行策略，在許多地區已有悠久的食用歷史。

這些替代蛋白質來源的發展趨勢，不僅是技術創新的競賽，更涉及消費者行為改變、供應鏈重組、法規標準制定以及投資市場的動向。成功的關鍵在於能否在成本、口感、營養與便利性上與傳統動物性產品競爭，同時清晰傳達其環境效益。隨著永續消費意識抬頭與相關技術持續突破，替代蛋白質有望從利基市場邁向主流，成為重塑全球食物系統、減輕農業生態衝擊的關鍵力量。

10.4 農業的生態衝擊

農業作為人類文明發展的基石，其生產活動與自然生態系統之間存在著既依賴又衝突的複雜關係。現代農業的集約化與規模化發展，在滿足全球數十億人口糧食需求的同時，也對地球生態系統造成了深遠且多面向的衝擊。這些衝擊不僅改變了局部地區的環境面貌，更透過生物地球化學循環的途徑，影響了全球尺度的生態過程。農業生態衝擊的本質，在於其將原本複雜、多樣且自我調節的自然生態系統，轉變為以單一作物或牲畜生產為目標的簡化系統，這種轉變不可避免地削弱了生態系統的韌性與服務功能，並引發一系列連鎖反應。

農藥與化肥的廣泛使用，是現代農業最顯著的生態衝擊之一。為了追求高產量與穩定性，合成化肥被大量施用於農田，以補充土壤中的氮、磷、鉀等關鍵養分。然而，過量的養分並不能完全被作物吸收，其中相當一部分會透過地表逕流或淋溶作用進入水體，導致水域生態系統的優養化。優養化引發藻類大量繁殖，消耗水中溶氧，造成魚類及其他水生生物死亡，形成所謂的「死亡區」。同時，化學農藥的施用旨在控制病蟲害與雜草，但其非選擇性的毒性往往波及目標以外的生物，包括授粉昆蟲如蜜蜂、天敵昆蟲以及土壤中的有益微生物。農藥殘留更可能透過食物鏈產生生物放大效應，對更高營養層的生物，包括人類，構成健康風險。這種依賴外部化學投入的農業模式，實質上是一種對生態系統的化學簡化，它破壞了自然存在的生物防治與養分循環機制。

單一栽培的大規模推行，直接導致了農業景觀中遺傳多樣性與物種多樣性的急遽喪失。為了追求管理便利與經濟效益，廣大土地被用於種植單一基因型的高產品種，取代了傳統農業中多樣化的地方品系。這種遺傳上的均質化使得作物族群極易受到特定病蟲害或氣候異常的毀滅性打擊，愛爾蘭馬鈴薯飢荒便是歷史上的著名案例。此外，單一栽培的農田生態系統結構簡單，缺乏自然植被的緩衝帶與棲地廊道，無法支持多樣的野生動植物生存。棲地的喪失與破碎化，使許多依賴農田周邊環境的鳥類、昆蟲及其他動物族群數量下降，進一步削弱了生態系統的授粉、害蟲

控制等自然服務功能。農業區域因而成為生物多樣性的「沙漠」，而非與自然共存的鑲嵌體。

灌溉農業的擴張，特別是乾旱與半乾旱地區的灌溉，帶來了土壤鹽化的嚴重問題。當灌溉用水蒸發或作物蒸散後，水中溶解的鹽分便累積在土壤表層。隨著時間推移，土壤鹽分濃度不斷升高，最終將超過大多數作物的耐受範圍，導致土地生產力下降甚至完全荒廢。土壤鹽化是一個緩慢但往往不可逆的過程，它不僅使寶貴的耕地資源永久受損，也改變了土壤的物理結構與生物活性。此外，為了灌溉而大量抽取地表水與地下水，常常導致河流斷流、濕地萎縮及地下水水位急遽下降，引發更廣泛的水文生態危機。這種以不可持續的水資源消耗為代價的農業生產，實質上是將水資源從生態系統中轉移出來，破壞了區域水平衡與依水而生的生態群落。

現代食物生產體系在能量流動上呈現出一種「顛倒的生態金字塔」困境。在自然生態系統中，能量沿食物鏈傳遞時約有 90% 以熱能形式散失，因此較高營養層的生物量與能量通常遠低於其下方的營養層，形成基底寬闊、頂端尖銳的正金字塔結構。然而，現代集約化畜牧業為代表的生產模式卻與此相反。生產一單位的動物性蛋白質，需要投入數倍乃至十數倍的植物性飼料，這些飼料又來自需要大量土地、水、化肥與農藥的單一栽培農田。因此，最終供人類消費的肉類、奶製品等，其背後所隱含的初級生產力需求與生態足跡極為龐大，形成了一個頂端沉重、基底脆弱的倒金字塔。這種能量與資源利用效率低下的體系，加劇了土地開墾、水資源爭奪與環境污染的壓力，使得全球食物系統的永續性面臨嚴峻考驗。

10.4.1 農藥與化肥的過度使用與生態後果

現代農業為追求高產量與穩定收成，普遍大量施用化學農藥與合成化肥，此舉雖在短期內顯著提升了單位面積的糧食產出，卻對生態系統造成了深遠且多面向的負面衝擊。農藥的過度使用，旨在控制病蟲害與雜草，然而其非選擇性的毒殺特性，往往不僅針對目標生物，更廣泛地危害到非目標物種，包括授粉昆蟲如蜜蜂、天敵昆蟲如瓢蟲，以及土壤中的有益微生物與無脊椎動物。這種廣泛性的毒害作用，直接削弱了農業生態系統中天然的生物防治能力與養分循環功能，導致農田生態趨向單一與脆弱。此外，農藥經由逕流或滲漏進入周邊水域，會對水生生物構成急性或慢性毒性，破壞水域生態系的平衡，並透過生物累積與放大效應，最終可能威脅到人類的食品安全與健康。

化肥的過度施用，特別是氮肥與磷肥，同樣引發一系列嚴重的生態問題。作物無法完全吸收的過量化學養分，會隨著雨水或灌溉水淋溶至土壤深層或流入河川、湖泊。進入水體的氮、磷營養鹽是導致水域優養化的主要元兇，刺激藻類與水生植物異常大量繁殖。藻華爆發期間，水體溶氧量因藻類夜間呼吸及死亡藻體分解而急遽下降，造成魚類及其他需氧生物大量死亡，形成所謂的「死亡區」。此過程不僅

摧毀水域生態系的生物多樣性與生產力，也嚴重影響水資源的飲用、灌溉與休憩功能。此外，過量的硝酸鹽淋溶至地下水層，會污染地下水源，長期飲用硝酸鹽濃度超標的水，對人體健康構成潛在風險。

從更宏觀的生物地球化學循環角度審視，化肥的過度使用實質上嚴重擾亂了自然的養分循環節奏。工業固氮技術將大量惰性的大氣氮氣轉化為活性氮化合物，其輸入生態系統的速率已遠超過自然固氮過程，導致全球氮循環失衡。過量的活性氮不僅造成前述的水體污染，也會以氮氧化物的形式揮發至大氣，貢獻於溫室效應、酸沉降及臭氧層破壞。磷肥雖源自礦物，但其開採與施用加劇了磷從岩石圈向水圈的單向流動，加速了這種不可再生資源的耗竭，同時將磷大量鎖定在沉積物或流失至海洋，難以再被陸域生態系統有效利用。

長期依賴農藥與化肥的農業模式，亦對農田土壤生態系統的健康造成根本性的損害。化學農藥在抑制害蟲與病原菌的同時，也毒殺了土壤中參與有機質分解、養分礦化與團粒結構形成的關鍵生物，如蚯蚓、菌根真菌與多樣化的微生物群落。合成化肥的連續施用，則可能導致土壤酸化、鹽化或板結，破壞其物理結構，並抑制土壤微生物的活性，降低土壤有機質含量。其結果是土壤逐漸喪失其固有的肥力、保水性與緩衝能力，從一個生機勃勃的生命系統退化為單純的植物物理支撐介質。農民為了維持產量，不得不持續增加化肥與農藥的投入，陷入一種成本遞增、環境退化加劇的惡性循環，這與永續農業所追求的活土維護與生態平衡目標完全背道而馳。

10.4.2 單一栽培導致的遺傳多樣性喪失

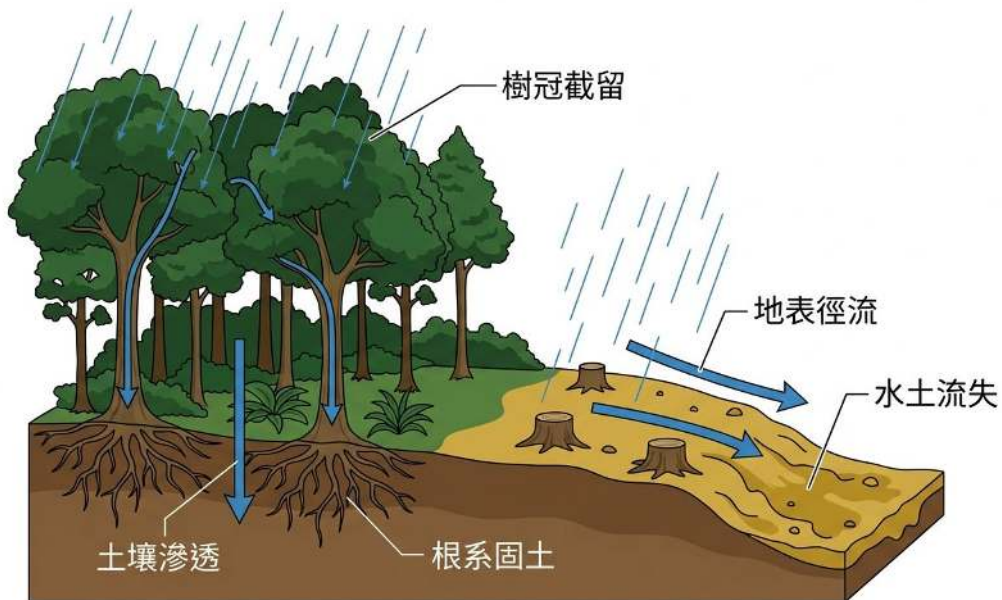
單一栽培作為現代農業生產的主流模式，其核心特徵在於大面積連續種植單一作物品種。這種高度簡化的農業系統雖然在短期內能實現規模化生產與機械化管理，卻對農業生態系統的遺傳多樣性構成深遠且系統性的威脅。遺傳多樣性是指物種內個體間或族群間的遺傳變異總和，它是物種適應環境變化、抵抗病蟲害以及未來育種改良的基礎。在自然生態系統中，野生植物族群通常保有豐富的遺傳變異，使得族群能夠應對氣候波動、病原菌侵襲等挑戰。然而，單一栽培刻意選擇並大規模複製少數具有高產、耐儲運等經濟性狀的品種，導致農田內作物個體的遺傳背景高度一致，實質上大幅削減了該作物物種在農業生產體系中的有效遺傳多樣性。

這種遺傳基礎的窄化直接導致農業系統的脆弱性增加。當大範圍的農田種植遺傳上同質的作物時，整個生產體系對特定病蟲害或環境脅迫的抵抗能力便顯著下降。因為病原菌或害蟲一旦演化出能夠克服該單一品種抗性的機制，便能在極短時間內在廣大區域內迅速傳播，引發毀滅性的病害大流行或蟲害爆發。歷史上不乏此類教訓，例如十九世紀愛爾蘭因過度依賴單一馬鈴薯品種而導致馬鈴薯晚疫病大流行，引發嚴重饑荒；二十世紀中葉，美國玉米帶因普遍種植含T型細胞質的玉米雜

交種，導致玉米小斑病大流行，造成巨大經濟損失。這些案例均凸顯了遺傳均質化所隱藏的系統性風險。

單一栽培不僅影響栽培作物本身的遺傳多樣性，更對與之相關的野生近緣種及其棲息地造成衝擊。為了擴張單一作物的種植面積，往往需要清除邊際土地上的自然植被，這些植被中可能包含作物的野生親緣種。野生近緣種是重要的遺傳資源庫，蘊藏著抗病、抗逆、高營養價值等寶貴性狀基因，是未來作物育種應對氣候變遷與新興病害的關鍵來源。棲地的喪失與破碎化使得這些野生族群數量銳減甚至局部滅絕，導致不可替代的遺傳資源永久消失。此外，大規模單一栽培景觀也減少了農田周邊的植物多樣性，進而影響授粉者、天敵等有益生物的棲息與生存，削弱了生態系統原本具有的自我調節功能。

從長遠的糧食安全與農業永續性角度審視，維護作物遺傳多樣性至關重要。面對全球氣候變遷所帶來的不確定性，如極端溫度、乾旱、洪水等逆境頻發，多樣化的作物品種與種原提供了適應性演化的素材。國際社會已意識到此問題的重要性，透過建立種子庫、基因銀行等遷地保育設施，並推動農民參與式的在地保育與品種選育，試圖保存與利用作物的遺傳資源。然而，要從根本上扭轉單一栽培導致的遺傳侵蝕，仍需從農業政策、市場機制與消費端著手，鼓勵多樣化種植、發展生態農業，並提升公眾對地方品種與農業生物多樣性價值的認識，方能使農業系統恢復韌性，邁向真正的永續。



永續社epa

10.4.3 農業灌溉造成的土壤鹽化問題

農業灌溉是支撐全球糧食生產的關鍵技術，特別是在乾旱與半乾旱地區，灌溉系統將原本不適宜耕作的土地轉化為高產農田。然而，不當的灌溉管理往往導致土

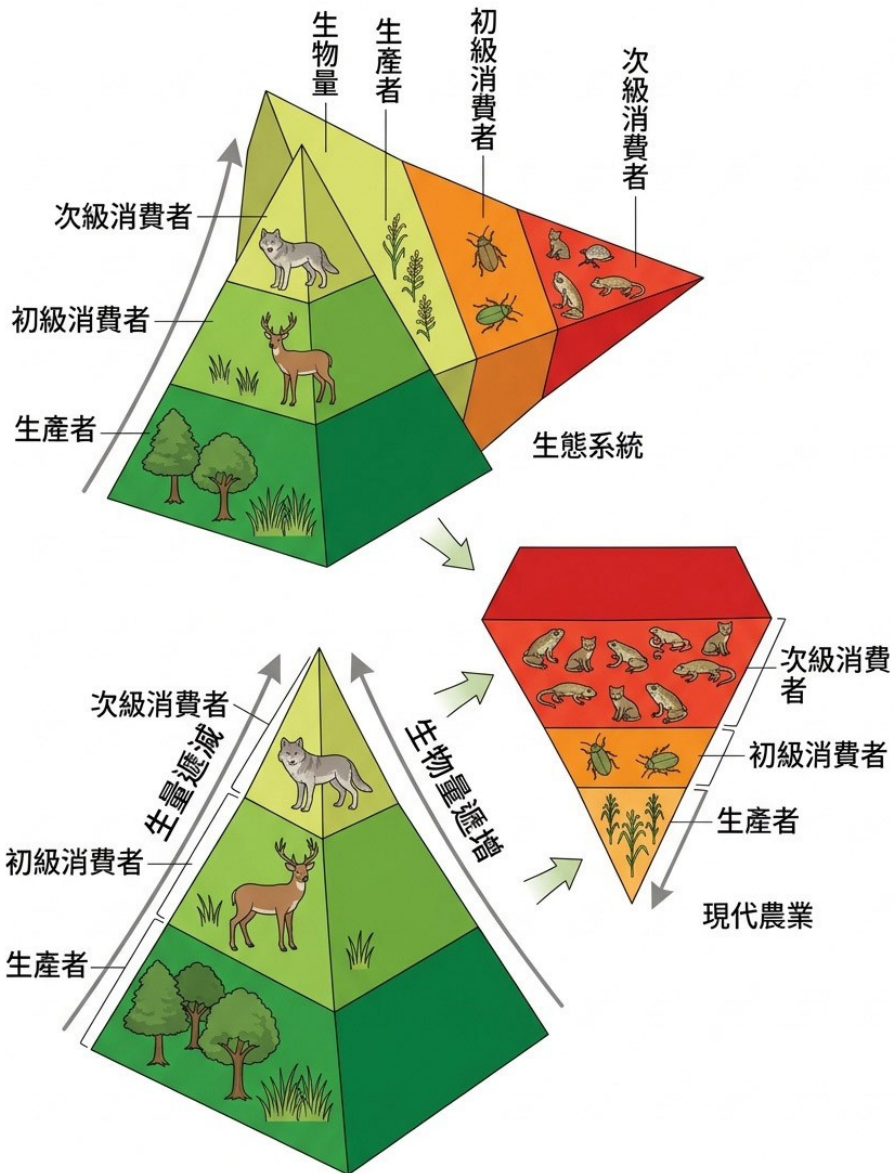
壤鹽化問題，這是指土壤中可溶性鹽類濃度累積至足以影響作物生長的過程。鹽化主要發生在蒸發量高於降水量的區域，當灌溉水滲入土壤後，水分蒸發或經植物吸收而散失，溶解於水中的鹽分則殘留於土壤表層或根系層中。隨著時間推移，這些鹽分逐漸累積，最終改變土壤的理化性質，降低土壤生產力。灌溉水本身的鹽分含量、土壤排水條件、以及氣候條件共同決定了鹽化的速率與嚴重程度。全球約有20%的灌溉農地受到鹽化影響，這不僅威脅糧食安全，也造成巨大的經濟損失與生態退化。

土壤鹽化對農業生態系統的影響是多層面的。首先，高鹽濃度會降低土壤水分的滲透勢，使植物根系難以吸收水分，即使土壤表層濕潤，植物仍可能處於生理乾旱狀態，此即滲透脅迫。其次，特定離子如鈉、氯、硼等累積至一定濃度時，會對植物細胞產生直接的離子毒性，干擾酵素活性、破壞細胞膜結構，並影響養分吸收平衡。此外，過量的鈉離子會置換土壤膠體上的鈣、鎂等離子，導致土壤顆粒分散，結構惡化。土壤孔隙度降低、通氣性變差、形成堅硬的表土結皮，進一步阻礙水分滲入與幼苗出土。鹽化土壤通常伴隨鹼化現象，高pH值會使磷、鐵、鋅等必需營養元素的有效性下降，引發作物營養缺乏症。

導致灌溉引發鹽化的關鍵因素，除了自然條件外，更與人為灌溉實踐密切相關。傳統的漫灌或畦灌方式效率低下，大量灌溉水在輸送與田間應用過程中因蒸發而損失，卻將鹽分留於土壤。許多灌溉系統缺乏完善的排水設施，地下水水位因持續灌溉而上升，將底土中的鹽分帶至根系層，此過程稱為次生鹽化。在乾旱區，使用含鹽量較高的地下水或地表水進行灌溉，直接加劇鹽分輸入。此外，追求高產而過度灌溉、忽視土壤淋洗需求、以及種植不耐鹽作物而不進行輪作等管理失當，均加速鹽化進程。大型灌溉計畫若未進行詳細的水文地質評估與長期監測，往往在運作數年後即出現大規模鹽化，使良田變為廢地，這在歷史上的美索不達米亞平原、印度河谷及當代許多地區皆可見其案例。

防治土壤鹽化需採取整合性的管理策略。工程措施方面，建設有效的明溝或暗管排水系統，將多餘水分連同溶解鹽分排出農田，是控制地下水位與淋洗鹽分的基礎。灌溉技術的改良至關重要，例如滴灌或微噴灌等精準灌溉技術，能直接供水至根系區域，大幅減少灌溉水量與無效蒸發，從而降低鹽分累積。配合土壤濕度感測器進行科學灌溉排程，可避免過量灌溉。農業管理措施包括定期進行土壤鹽分監測，選擇耐鹽作物品種或利用鹽生植物進行生物修復，實施輪作與覆蓋作物以改善土壤結構，並在休耕期進行人工淋洗，將表土鹽分沖刷至深層。此外，使用改良劑如石膏來置換土壤中的鈉離子，可緩解鹼化問題。從政策層面，需建立水資源的綜合管理框架，將灌溉用水的水質標準、鹽分負荷總量管制納入規範，並推廣農民鹽化防治知識，才能從根本減緩這項隱形卻嚴重的環境問題。

10.4.4 顛倒生態金字塔：現代食物生產的生態困境



永續社epa

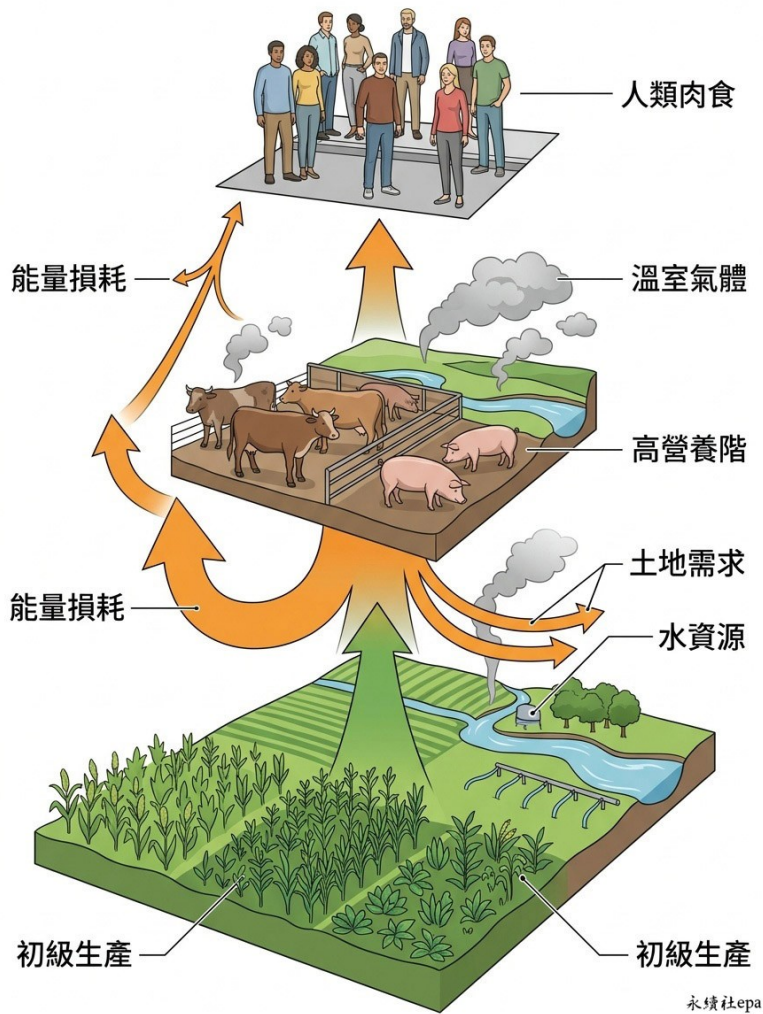
在傳統生態學的認知中，生態金字塔的結構通常呈現為寬廣的基底與逐漸收窄的頂端，這反映了能量流動過程中逐級遞減的規律。生產者，主要是綠色植物，構成了金字塔最龐大的底層，它們透過光合作用固定太陽能，支撐著上層的初級消費者、次級消費者等。然而，現代工業化農業與畜牧業所建構的食物生產系統，卻在實質上創造了一種「顛倒的生態金字塔」。這種顛倒並非指物理結構的上下翻轉，而是指人類為了生產特定食物（尤其是肉類與乳製品），所投入的初級生產力與資

源規模，遠遠超過了該食物最終所能提供的營養能量，形成一種極度低效且生態成本高昂的營養轉換模式。

這種困境的核心在於營養層級間的轉換效率。根據林德曼定律，能量在營養級之間傳遞的平均效率僅約百分之十。這意味著，當人類選擇大量消費來自高營養層的食物，例如牛肉時，背後所需的生態支撐是巨大的。生產一公斤的牛肉蛋白質，需要投入約六至二十公斤的植物性蛋白質作為飼料，這還未計入大量的水資源、土地以及化石能源的消耗。因此，支撐當代以肉食為導向的飲食結構，需要一個異常龐大的初級生產基底，這個基底透過大規模的單一作物栽培（如玉米、大豆）來實現，但其產出並非直接供人類食用，而是先流經畜牧動物這個「轉換器」，在轉換過程中損失了大量能量與營養。這使得全球農業用地中有相當比例實際上是為了服務畜牧業而存在，而非直接養活人口。

這種顛倒金字塔的運作，導致了一系列深層的生態困境。首先，它加劇了土地與水資源的壓力。為了生產足夠的飼料作物，森林、草原等自然生態系統被轉換為農田，造成棲地喪失與生物多樣性下降。同時，大量的水資源被用於灌溉飼料作物，使得水資源短缺問題更形惡化。其次，它強化了農業系統的線性代謝特徵。大量的養分（如氮、磷）從遙遠的農田被萃取，濃縮到集約化的飼養場，最終卻以糞便汙染物或都市廢棄物的形式堆積，難以回歸原來的土地，打亂了區域性的養分循環，並造成水體優養化等環境問題。此外，這種高度依賴化石燃料投入（用於化肥、農藥、機械、運輸）的生產模式，也使其成為溫室氣體排放的重要來源。

從生態系統服務的角度審視，顛倒的生態金字塔代表著一種扭曲的能量與物質流動。它將原本可相對直接供人利用的初級生產力，導向一個耗損極高的轉換路徑，並在此過程中產生大量的環境外部成本。這種生產模式的可持續性建立在對廉價能源、水資源及生態承載力的過度透支之上。面對全球人口持續增長與消費水平提升的雙重壓力，這種困境日益凸顯。要緩解此一困境，不僅需要技術層面的改良，更涉及全球飲食結構的調整、食物浪費的減少，以及對食物系統進行根本性的重新設計，使其更貼近自然生態金字塔的效率與循環原則，從而減輕對地球生態系統的整體負荷。



10.5 永續農業

現代農業在追求高產量的過程中，往往伴隨著資源過度消耗、生態系統破壞與環境汙染等問題，這些困境促使全球重新思考農業的發展方向。永續農業正是在此背景下應運而生的一種農業模式，其核心目標在於滿足當代糧食需求的同時，不損害後代滿足自身需求的能力。這種農業體系強調生態平衡、資源永續利用以及社會經濟的公平性，試圖在生產力與環境保護之間取得和諧。永續農業並非單一的技術或方法，而是一個整合性的概念框架，它涵蓋了從土壤管理、水資源利用、生物多樣性保育到能源效率提升等多個面向。其終極願景是建立一個具有韌性的食物生產系統，能夠適應氣候變遷等外部衝擊，並長期維持土地的健康與生產力。

永續農業的實踐建立在對生態系統運作機制的深刻理解之上。它認識到農業系統本身即是一個複雜的生態系統，與周遭的自然環境緊密相連。因此，永續農業致力於模仿自然生態系統的結構與功能，例如透過多樣化的作物輪作、間作與混農林業等方式，來增強系統內部的養分循環、害蟲自然控制以及水土保持能力。這種生態學途徑有助於減少對外部化學投入品（如合成化肥與農藥）的依賴，從而降低農

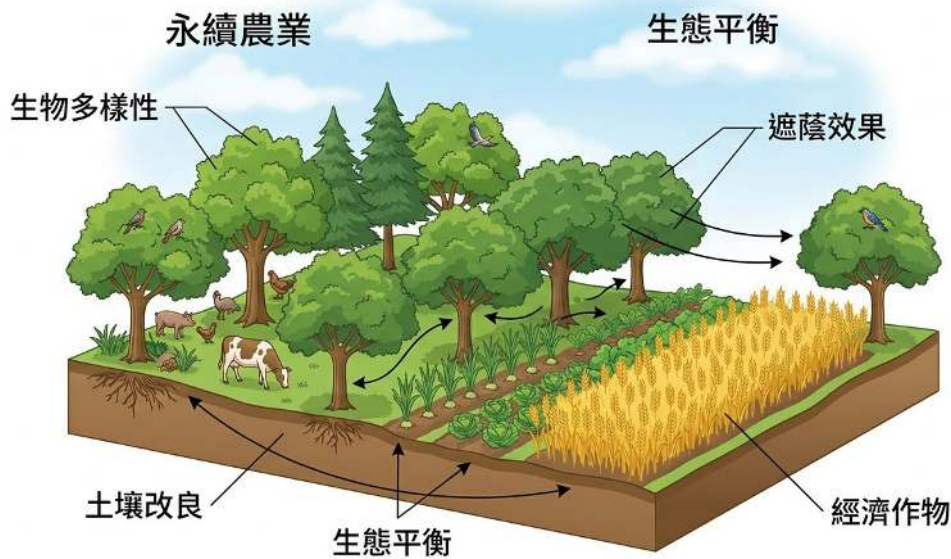
業活動對環境的負面影響。同時，永續農業也重視社會層面的永續性，關注農民生計、農村社區的活力以及消費者的健康，確保農業發展的成果能夠公平分享。

為了實現永續農業的目標，全球發展出多樣化的實踐體系與認證制度。有機農業是最為人熟知的一種，它嚴格禁止使用合成化學物質，並強調透過有機質肥料、生物防治及物理性雜草管理來維持生產。有機認證制度為消費者提供了明確的產品標識，也為農民建立了市場區隔與價格溢酬的機制。然而，永續農業的範疇遠大於有機農業，它還包括如再生農業、保育農業、生態農業以及農林複合系統等多元路徑。這些體系可能在某些技術層面上有所重疊或差異，但共同目標都是提升農業系統的生態完整性與社會經濟韌性。

生物多樣性在永續農業中扮演著基石角色。傳統的單一栽培模式雖然管理方便且利於機械化，但卻導致農業景觀的單一化，削弱了系統對病蟲害的抵抗力，也減損了授粉等關鍵生態服務。永續農業則積極擁抱生物多樣性，無論是在田間尺度上種植多種作物與覆蓋作物，還是在景觀尺度上保留或重建樹籬、緩衝帶與自然棲地。這種多樣性不僅為有益生物（如授粉昆蟲、天敵）提供棲所，增強自然控制機制，也能改善土壤微生物相，促進養分循環。此外，維護作物與家畜的遺傳多樣性，特別是地方品種與傳統品系，對於適應未來不可預期的環境變化與疾病挑戰至關重要。

土壤被視為永續農業的根本。健康的土壤不僅是作物生長的介質，更是一個充滿生命的動態生態系統。永續農業的核心實踐之一便是採取一切措施來維護與提升土壤健康，這包括最大限度地減少土壤擾動（如推行免耕或減耕法）、保持土壤常年覆蓋（利用覆蓋作物或殘茬）、以及增加有機質的投入。這些做法有助於改善土壤結構，增強保水與保肥能力，促進土壤生物活性，並將大氣中的碳封存於土壤中，對減緩氣候變遷有所貢獻。將土壤視為需要滋養與保護的「活體」，而非單純的生產工具，是永續農業思維的重要轉變。

永續農業的實現不僅依賴生產端的技術變革，更需要整個糧食系統的轉型。這意味著從線性的「生產-消費-廢棄」模式，轉向更為循環與效率的系統。在消費端，推動在地化與當季化的飲食，可以減少食物里程與能源消耗；減少食物浪費與損失，則能顯著降低整個系統的環境足跡。同時，建立更短、更透明的食物供應鏈，例如社區支持型農業與農夫市集，能加強生產者與消費者之間的連結，提升食品安全與信任。政策層面也需要相應調整，透過補貼改革、研究支持與市場機制設計，引導農業朝向更永續的方向發展。最終，永續農業的成功，有賴於生產者、消費者、企業、研究機構與政府等所有利害關係者的共同參與與承諾。



永續社epa

10.5.1 永續農業的生態原則與核心理念

永續農業的核心理念建立在對生態系統運作規律的深刻理解之上，其目標在於設計與管理農業生產系統，使其在滿足當代糧食與纖維需求的同時，不損害未來世代滿足其自身需求的能力。這項理念超越了單純的技術改良，它是一種整合性的農業哲學，強調農業活動必須與自然環境和諧共存，而非對立。其生態原則首先體現在對土壤健康的重視，將土壤視為一個活生生的生態系統，而非僅是植物生長的介質。健康的土壤生態系統包含豐富的微生物、真菌、蚯蚓及其他土壤生物，它們共同驅動養分循環、改善土壤結構、增強保水能力，並能自然抑制土傳病害。因此，永續農業實踐的核心在於培育與維護土壤生物多樣性與活性，減少對外源性合成化肥與農藥的依賴，轉而依靠生態過程來維持土壤肥力與作物健康。

從生態系統的尺度觀之，永續農業強調模仿自然生態系統的結構與功能。這包括提高農田的生物多樣性，例如透過作物輪作、間作、混農林業等方式，打破大面積單一栽培所導致的生態簡化與脆弱性。多樣化的種植系統能更有效地利用光、水、養分等資源，並為有益昆蟲與天敵提供棲所，從而增強系統對病蟲害的自然調控能力。此外，永續農業注重農場邊界與周邊自然棲地（如樹籬、池塘、林地）的保存與連結，這些區域作為生態廊道，有助於維持區域性的生物多樣性，並提供授粉、害蟲控制等關鍵生態系服務。這種將農田鑲嵌於自然景觀中的思維，有助於緩解農業擴張對野生動植物棲地造成的破碎化與喪失壓力。

在資源管理層面，永續農業遵循封閉循環的原則，致力於最小化外部投入與廢棄物輸出。這意味著盡可能將農場內部的資源進行循環利用，例如將作物殘株與動物糞便製成堆肥歸還土壤，實現養分的內部循環。同時，它高度重視水資源的保育與高效利用，採用滴灌、覆蓋作物、等高耕作等技術以減少蒸散與逕流，提升水資源生產力。能源方面，則鼓勵減少對化石燃料的依賴，轉向可再生能源，並透過優

化農事操作以提升能源效率。這種資源循環理念旨在降低農業生產的生態足跡，減少對不可再生資源的開採以及對環境的汙染負荷。

永續農業的核心理念亦包含社會經濟層面的考量，它追求的是農民生計的穩定性、農村社區的活力以及消費者的健康與知情權。這涉及支持小農經濟、發展在地食物系統、確保農業勞動者的公平待遇，並透過農民市集、社區支持型農業等模式，重建生產者與消費者之間的信任與連結。最終，永續農業視農業不僅為一種食物生產活動，更是塑造健康環境、維繫文化傳承與促進社會福祉的關鍵場域。其實踐是對工業化農業所導致之生態困境與社會問題的一種根本性回應，旨在重建一個更具韌性、公平且與地球生命支持系統和諧共處的農業與食物體系。

10.5.2 有機農業的實踐方法與認證制度

有機農業的實踐方法植根於對生態系統整體性的深刻理解，其核心在於模仿自然生態過程，以建立一個自我維持且富有生命力的農業生產系統。在田間操作層面，有機農業首要強調土壤健康的管理，視土壤為一個活的生態系統而非單純的生長介質。農民透過施用大量有機質，如堆肥、綠肥及作物殘體，來改善土壤結構、增加孔隙度與保水能力，並為土壤微生物群落提供豐富的食物來源。這些微生物，包括細菌、真菌、原生動物等，是驅動養分循環的關鍵引擎，它們能將有機質分解轉化為植物可吸收的形態，同時形成有利的土壤團粒結構。病蟲害管理則採取預防為主、綜合治理的策略，透過作物輪作、間作、種植誘集植物或忌避植物來打破病蟲害的生命週期與棲息環境，並利用物理防治如防蟲網、性費洛蒙，以及核准使用的生物防治資材，來控制有害生物族群，避免依賴合成化學農藥對環境與非目標生物造成的傷害。

為了維持系統的養分平衡與封閉性，有機農場致力於建立內部的養分循環體系。這包括利用豆科植物進行生物固氮，將畜禽糞便經妥善堆肥化後歸還農田，以及收集利用場內外的有機廢棄物。水資源管理亦講究效率與保育，採用滴灌、滲灌等節水技術，並配合覆蓋作物或敷蓋以減少土壤水分蒸發。在品種選擇上，優先選用適應當地環境、抗病蟲能力強的地方品種或傳統品種，這不僅有助於減少外部投入，也對維護農業遺傳多樣性具有重要意義。整體而言，有機農場的經營目標是創造一個生物多樣性豐富、營養循環完整、且對環境衝擊最小的農業生態系，其生產力建立在生態過程的優化而非外部化學物質的大量投入。

隨著有機農業市場的擴張與消費者對產品真實性的要求，建立可信賴的認證制度成為確保有機完整性、防止欺詐並促進公平貿易的關鍵機制。有機認證制度通常是一個由標準、驗證與標章三位一體構成的系統。首先，由國家或國際機構制定詳細的有機生產標準，這些標準明確規範了生產、加工、儲存、運輸與標示等各環節的允許與禁止事項，例如禁止使用合成化肥、化學農藥、基因改造生物及其衍生物，並對有機種子、轉型期年限、動物福利、加工添加物等有具體要求。生產者必

須依據這些標準建立完整的生產管理紀錄系統，包括投入資材的使用、田間作業、收成與銷售等可追溯的檔案。

認證過程則由獨立的第三方驗證機構執行。農民或加工業者向驗證機構提出申請後，驗證員會進行嚴格的書面文件審查與實地現場稽查，確認其操作完全符合有機標準。稽查範圍涵蓋整個生產流程，並可能採集土壤或產品樣本進行殘留檢測。通過驗證後，生產者方能獲得認證證書，並被授權在產品上使用有機標章。這個標章是傳達信任的視覺符號，告知消費者該產品是經過獨立驗證符合有機規範。全球範圍內存在多個有機標準與認證體系，如歐盟有機法規、美國國家有機計畫、日本JAS有機標準等，各國政府也大多建立本國的認證管理制度。為了促進國際貿易，不同標準體系之間透過「同等性」相互承認來進行調和。透過此一嚴謹的認證制度，不僅保障了消費者的權益，維護了誠實生產者的市場公平性，更是維繫有機農業理念在市場經濟中不被扭曲的重要基石。

10.5.3 生物多樣性農業與活土維護

生物多樣性農業的核心在於將農業系統視為一個模仿自然生態系複雜性的動態生命網絡，而非單純的作物生產工廠。這種農業實踐強調在時間與空間上最大化農田內的物種多樣性，包括作物、覆蓋作物、伴生植物、有益昆蟲、土壤微生物以及更大的動物群系。其目標不僅是生產食物，更是要重建與維護一個具有高度生態功能、能夠自我調節並抵禦干擾的農業生態系。這與有機農業有重疊之處，但更進一步地將生物多樣性視為系統設計的首要原則與核心生產力來源。透過多樣化的種植組合，例如間作、輪作、混林農業以及建立生態棲位，農民可以自然地抑制病蟲害、改善授粉、促進養分循環，並減少對外部投入的依賴，從而創造出更具韌性與永續性的生產模式。

活土維護是生物多樣性農業得以實現的基礎，其關注焦點從單純的「土壤肥力」轉向更全面的「土壤健康」。健康的土壤被視為一個充滿生命的活體生態系統，其中包含數以億計的細菌、真菌、原生動物、線蟲以及節肢動物等。這些土壤生物群構成了複雜的地下食物網，驅動著關鍵的生態過程，例如有機質分解、養分礦化、團粒結構形成以及碳封存。維護活土意味著採取一切措施來滋養與保護這個地下生物群落，其關鍵實踐包括最大限度地減少土壤擾動（如推行免耕或減耕法）、保持土壤常年有植被覆蓋（利用覆蓋作物）、增加有機質的投入（如堆肥、綠肥）、以及避免使用會傷害土壤生物的化學農藥與合成肥料。

從生態功能的角度來看，土壤中的真菌菌根網絡扮演著極其重要的角色。這些細微的菌絲網絡能與大多數作物的根系形成共生關係，大幅擴展植物吸收水分與養分（特別是磷）的範圍，同時增強植物對乾旱與病原菌的抗性。在生物多樣性農業系統中，多樣的植物群落支持著更多樣的菌根真菌群落，從而強化整個系統的養分

獲取效率與穩定性。此外，多樣化的土壤動物，如蚯蚓，能夠透過其鑽孔活動改善土壤通氣與排水，並透過消化有機物產生肥沃的蚓糞。因此，活土維護實質上是透過管理地上部的植物多樣性，來培育與引導地下部的生物多樣性，從而啟動土壤內在的生態引擎。

實踐生物多樣性農業與活土維護面臨著知識、技術與市場體系的挑戰。它要求農民具備深厚的生態學知識與觀察能力，以管理更為複雜的系統，而非依賴標準化的技術處方。在經濟面上，初期可能面臨產量波動或勞動力需求不同的情況，且其多元產出在強調單一化、規格化的主流市場中可能難以獲得適當的價格回饋。然而，其長遠效益顯著，包括提升農場對氣候變遷極端事件的韌性、降低生產成本、改善農田周邊的生態環境，並生產出營養密度更高的食物。這代表著農業範式的根本轉變，從對抗自然轉向與自然合作，為建構真正永續的糧食系統奠定了生態學基礎。

10.5.4 糧食系統轉型：從生產到消費的全面永續

糧食系統轉型意味著從線性的「生產—加工—消費—廢棄」模式，轉變為一個強調循環性、韌性與公平性的整合體系。此一轉型不僅關注農業生產端的永續實踐，更將視角擴及至整個食物供應鏈，包括加工、運輸、零售、消費乃至廢棄物處理等所有環節。其核心目標在於確保糧食安全與營養均衡的同時，大幅降低系統對環境的負面衝擊，並促進社會經濟的包容性發展。這需要系統性的思維，認識到生產端的農法革新若缺乏消費端的行為改變與市場結構的調整，其效益將大打折扣。因此，全面的糧食系統轉型涉及政策法規、市場機制、科技創新、文化價值與公民意識等多重層面的協同變革，旨在創造一個能夠滋養人類健康與地球健康的食物環境。

在生產端，轉型強調的是生態農業的普及與韌性農場的建立。這超越了單一技術的採用，而是整合多樣化的作物與牲畜系統，模仿自然生態系的運作，以增強對氣候變遷與病蟲害的抵抗力。同時，縮短食物里程與強化在地食物系統成為關鍵策略，透過支持社區支持型農業、農夫市集與在地加工設施，減少長途運輸所耗費的能源與碳排放，並加強生產者與消費者之間的連結。加工與零售環節則需致力於減少食物浪費與過度包裝，推動潔淨標示與公平貿易認證，確保食物價值鏈中的勞動者能獲得合理報酬，並提供消費者透明且健康的食物選擇。

消費行為的改變是糧食系統轉型能否成功的決定性因素。這涉及公眾教育的深化，提升消費者對食物來源、生產方式及其環境與社會影響的認知。鼓勵植物性飲食的選擇，並非要求全盤素食，而是調整飲食結構，降低對資源密集型動物性產品的過度依賴，此舉能顯著減少土地、水資源的使用與溫室氣體的排放。此外，培養「吃當季、食在地」的飲食文化，學習利用全食物並妥善規劃餐食以減少廚餘，都是個人層面可實踐的永續行動。這些消費端的選擇將形成強大的市場信號，反向驅動生產與供應鏈朝向更永續的方向調整。

最終，糧食系統的全面永續需要強而有力的治理框架與跨部門合作。政府應制定整合性的食物政策，將農業、健康、環境、教育與經濟等部門的目標加以協調，例如透過公共採購政策優先採購永續農產品，提供誘因鼓勵永續農法，並投資於鄉村基礎建設與食物教育。企業則需承擔供應鏈責任，確保其採購與營運符合環境與社會標準。公民社會、社區組織與學術機構的角色在於監督、倡議與創新，共同構建一個包容的對話平台。糧食系統轉型是一場深刻的社會變革，其成功與否，將直接關乎我們能否在養活全球人口的同時，守護生態系統的完整性，並為後代留下一個宜居的地球。