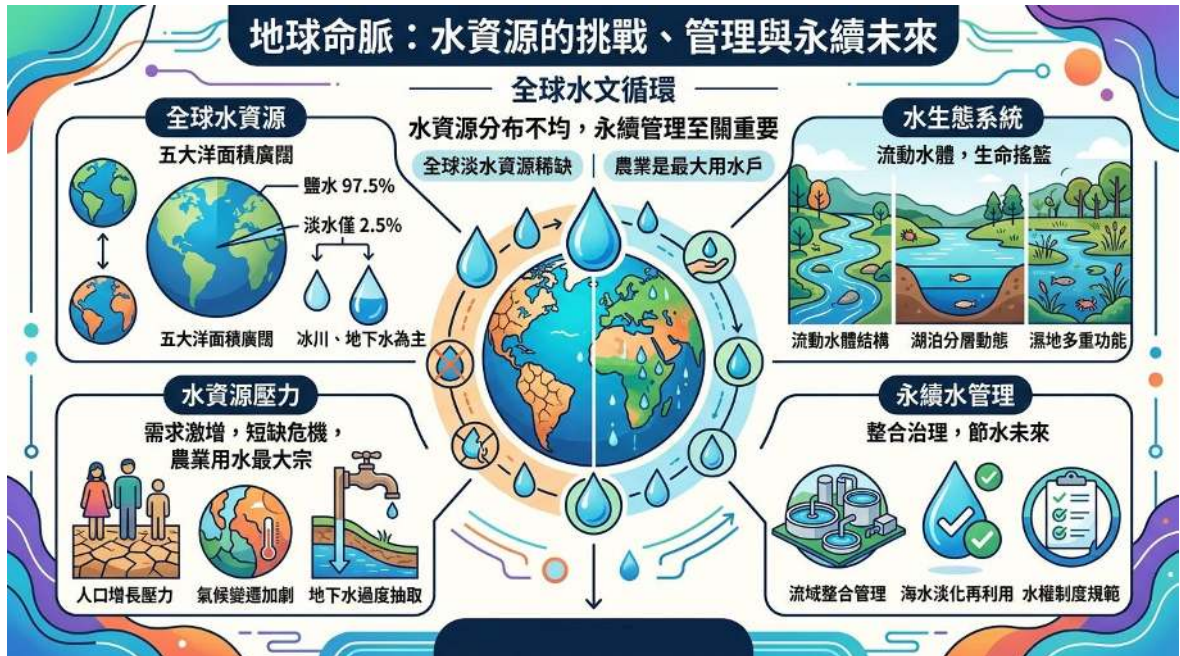


## 第7章 水資源



水資源是地球上所有生命形式賴以維存的基礎，其分布、循環與可利用性深刻影響著生態系統的運作與人類社會的發展。本章旨在系統性地探討全球水資源的現況，從其物理分布與儲量開始，進而分析支撐生物多樣性的河流、湖泊與濕地生態系統。我們將檢視人類社會對水資源日益增長的需求與利用模式，並剖析由此引發的短缺危機與社會經濟衝擊。最終，本章將聚焦於水資源的管理、保育策略與治理架構，探討如何在氣候變遷與人口增長的雙重壓力下，實現水資源的永續利用。

水並非均勻分布於地球表面或易於取得。儘管地球表面約有百分之七十一被水覆蓋，但其中絕大部分是無法直接供人類與多數陸生生物利用的海洋鹹水。淡水資源僅佔總水量的約百分之二點五，而這有限的淡水中，又有近百分之七十被封存於兩極冰蓋與高山冰川之中。其餘的淡水則以地下水、湖泊、河流、土壤水份及大氣水氣的形式存在。這種分布上的極端不均，決定了全球不同區域面臨截然不同的水資源條件，從雨量豐沛的熱帶地區到極度乾燥的沙漠地帶，水資源的可及性成為塑造當地生態與文明樣貌的關鍵因子。

淡水生態系統，包括河流、湖泊、沼澤、濕地等，是生物多樣性的重要堡壘，並提供無可替代的生態系服務。河流作為動態的廊道，連接山區與海洋，輸送養分、沉積物與生物個體。湖泊則扮演著區域性的水庫，其分層現象與季節性翻轉調節著水質與養分循環。濕地更被譽為「地球之腎」，具有強大的水質淨化、洪水調蓄、碳封存及棲地提供功能。這些水體不僅是無數水生與依水生物的家園，也直接

支撐著人類的農業灌溉、飲用水源、水力發電、交通運輸與文化休憩活動，其健康狀態直接關乎區域生態安全與社會經濟穩定。

然而，隨著全球人口增長、經濟發展與消費模式改變，人類對水資源的需求與干預已達到前所未有的規模。農業灌溉是全球最大的淡水消耗部門，工業製程與能源生產亦需大量用水，加上都會區家庭用水需求持續上升，導致許多地區的水資源提取量已逼近甚至超過自然補注速率。這種過度利用，結合氣候變遷引發的降雨模式不穩與極端乾旱事件頻傳，正使得水資源短缺從區域性問題擴展為全球性危機。水資源壓力不僅威脅糧食生產與經濟活動，更可能加劇社會不平等、引發跨境水權爭端，成為影響國家安全與區域穩定的潛在因素。

面對嚴峻挑戰，有效的水資源管理與保育策略至關重要。這需要從傳統的供給導向管理，轉向強調需求管理、效率提升與生態保護的整合性方法。技術層面上，節水灌溉、水資源回收再利用、海水淡化等科技提供部分解方；治理層面上，則需建立以流域為單元的整合管理架構，協調上下游、左右岸不同利益相關者的需求，並透過水權制度、經濟工具與公眾參與來促進公平與效率。此外，保護與復育淡水生態系統，維持其自然水文過程與服務功能，是保障水資源長期永續的基礎。國際社會也必須加強合作，共同應對跨境水資源治理與氣候變遷下的水安全議題。



## 7.1 全球水資源的分布與儲量

水資源是地球上所有生命形式賴以維存的基礎，其分布與儲量不僅決定了生態系統的格局，更深刻影響著人類文明的發展軌跡。從宏觀角度審視，地球雖被稱為「藍色星球」，但可供人類直接利用的淡水資源卻極為有限且分布不均。全球水資源的總儲量約為 13.86 億立方公里，其中絕大部分為海水，佔總量的約 96.5%。剩餘

的淡水資源中，又有約 68.7%以冰蓋和冰川的形式封存於兩極和高山地區，約 30.1% 儲存於地下含水層中，而地表淡水體，包括湖泊、河流、沼澤以及土壤水等，僅佔全球淡水總量的約 1.2%。這種金字塔式的儲量結構，凸顯了人類可直接取用的地表淡水資源的珍稀性，也預示了水資源管理面臨的根本挑戰：如何在有限的、分布不均的淡水供應下，滿足不斷增長的人口與經濟活動需求。

水資源的空間分布受到氣候、地形、地質與水文循環的綜合影響，呈現出極強的區域差異性。從全球尺度觀察，淡水資源豐富的地區往往與特定的氣候帶和地理特徵緊密相連。例如，赤道附近地區因對流雨旺盛，年降水量豐沛，亞馬遜盆地與剛果盆地因而成為全球重要的淡水儲備區。而受季風氣候影響的南亞與東南亞，雖然雨季集中，但河流徑流量巨大。相反地，副熱帶高壓控制下的地區，如撒哈拉沙漠、阿拉伯半島及澳洲內陸，則常年乾旱，淡水資源極度匱乏。這種分布不均不僅存在於大陸之間，在同一國家內部也往往十分顯著，例如中國的水資源分布便呈現南豐北缺的格局，而美國西部各州也長期面臨水資源短缺壓力。這種天然的不均衡性，是導致區域性水資源緊張乃至國際水權爭端的根本原因。

除了空間分布不均，水資源的時間變異性亦是其重要特徵。水文循環受太陽輻射驅動，具有明顯的季節性與年際波動。許多地區的降水集中在特定季節，例如季風區的夏季暴雨或地中海氣候區的冬季降雨，這導致河流流量呈現豐枯交替的現象。此外，氣候系統的自然振盪，如聖嬰-南方振盪現象，會引發跨年度的乾旱或洪澇事件，進一步加劇水資源供應的不穩定性。冰川與積雪作為重要的「固態水庫」，在高山地區扮演著調節河川流量的關鍵角色，其在濕季儲存水分，於乾季緩慢釋放，維繫著下游地區的常年供水。然而，氣候變遷正顯著改變這一緩衝機制，冰川退縮與積雪減少已對依賴融水補注的河流系統構成嚴重威脅。

評估全球水資源儲量需從多個「庫」的概念著手。最大的水庫當屬海洋，其龐大的體量主導著全球的水文與氣候系統。其次是冰蓋與冰川，主要分布於南極洲、格陵蘭以及喜馬拉雅、阿爾卑斯等高山地區，其儲水量雖大，但動態變化緩慢，且目前因全球暖化而處於淨損失狀態。地下水是全球淡水儲量的第二大組成部分，可分為淺層地下水與深層承壓水。淺層地下水與地表水聯繫密切，補注較快，是人類灌溉與飲用水的重要來源；深層地下水則形成於地質歷史時期，補注速率極慢，通常被視為不可再生資源。地表水體，包括湖泊、水庫、河流與濕地，雖然儲量相對最小，但因其可及性高、更新速度快，成為人類活動最直接依賴的水源。土壤水雖儲量有限，卻是陸地植物生長的命脈，在農業生產與自然生態系統中具有不可替代的作用。

理解全球水資源的分布與儲量現狀，是進行有效水資源管理與保育的前提。當前，人類社會通過修建水庫、開採地下水、跨流域調水等工程手段，試圖克服水資源的時空不均問題。然而，這些措施往往伴隨著巨大的生態與社會成本，例如河道斷流、濕地消失、地下水超抽導致地層下陷等。此外，水汙染問題進一步縮減了可用水資源的總量，許多地區面臨著水量與水質的雙重危機。面對人口增長、經濟發

展與氣候變遷的多重壓力，傳統以供給為導向的水資源管理思維已顯不足，必須轉向更為整合與永續的管理模式，強調需求管理、效率提升、生態保護與跨域合作。這需要我們在精確掌握全球與區域水資源本底資料的基礎上，科學評估水資源的承載力，並在社會經濟發展與生態環境保護之間尋求平衡。

### 7.1.1 鹽水與淡水的全球比例

地球上的水資源總量約為 13.86 億立方公里，然而其中絕大部分是無法直接供人類與陸地生態系統使用的鹽水。從全球比例來看，海洋中的鹽水約佔總水量的 97.5%，而淡水僅佔 2.5%。這看似微小的淡水比例，若以體積計算，仍高達約 3500 萬立方公里，但其中絕大部分又以難以直接利用的形態存在。淡水資源的分布極度不均，不僅體現在地理空間上，更體現在其存在的形態與可及性。這種先天性的分布格局，構成了全球水資源管理的根本挑戰，也深刻影響著人類文明的發展軌跡與生態系統的維繫。

進一步分析這 2.5% 的淡水，其儲存形式呈現出另一種層次的不均衡。約有 68.7% 的淡水以冰帽和冰川的形式被封存於極地和高山地區，主要分布在南極洲、格陵蘭以及喜馬拉雅等高山地帶。這些固態淡水雖然儲量巨大，但因其地理位置偏遠且開採利用技術門檻極高，在現階段幾乎無法作為常規水源。另有約 30.1% 的淡水存在於地下，包括淺層地下水與深層地下水。地表淡水，如湖泊、河流、沼澤以及土壤水份，總計僅佔全球淡水總量的約 1.2%，而這其中河流的水量更是微乎其微，僅佔全球淡水總量的 0.0002%。這意味著人類社會與大多數陸地生物所直接依賴的、易於取用的地表淡水，其實只佔地球總水量的極微小部分。

這種鹽水與淡水的懸殊比例，以及淡水內部儲存形態的巨大差異，決定了水資源的本質是一種有限且分布不均的關鍵自然資源。海洋作為最大的水體，雖然鹹度使其不適用於直接飲用或灌溉，卻在全球氣候調節、碳循環、航運與漁業資源供給上扮演無可替代的角色。而有限的淡水資源則支撐著陸地生命、農業生產、工業活動與都市運作。隨著全球人口持續增長、經濟發展與消費模式改變，對淡水資源的需求壓力日益加劇，使得這原本就稀缺的資源更顯珍貴。理解鹽水與淡水的全球比例，不僅是認識水資源分布的起點，更是思考如何在水文循環的框架下，透過科技、管理與政策創新，實現水資源永續利用的基礎。

### 7.1.2 五大洋的面積分布與海洋資源

地球表面約有百分之七十一被海洋所覆蓋，這片廣袤的鹹水體並非均質單一，而是依據地理位置、海底地形與洋流系統，被劃分為五大主要海洋：太平洋、大西洋、印度洋、南冰洋與北冰洋。其中，太平洋面積最為遼闊，約佔全球海洋總面積的百分之四十六，其範圍從西部的亞洲與澳洲海岸延伸至東部的美洲大陸，平均深

度亦居五大洋之首。大西洋面積次之，約佔百分之二十三，其形狀略呈「S」型，是連接美洲、歐洲與非洲的重要航道。印度洋面積約佔百分之二十，主要位於南亞、非洲與澳洲之間，其北部受季風系統影響顯著。南冰洋是環繞南極洲的海洋，其邊界定義曾存在爭議，但現今普遍認為其以北緯六十度附近的南極輻合帶為界，是連接太平洋、大西洋與印度洋南部水域的關鍵區域。北冰洋面積最小，約佔百分之四，大部分區域終年被海冰覆蓋，其生態系統對氣候變遷極為敏感。這五大洋的面積分布不僅決定了全球熱量與鹽分的輸送格局，更深刻影響著區域乃至全球的氣候模式。

海洋資源的範疇遠超過傳統認知中的漁業捕撈，其蘊含的資源種類繁多，可概分為生物資源、礦產資源、能源資源與空間資源四大類。生物資源方面，海洋提供了全球約百分之十五的動物蛋白質來源，漁業活動支撐著數億人口的生計。然而，過度捕撈已使許多傳統漁場的資源量臨近甚至低於其最大可持續產量，海洋生物多樣性面臨嚴重威脅。除了魚類，海洋中的浮游植物透過光合作用生產了地球上約一半的氧氣，並在碳循環中扮演關鍵的碳匯角色，此類生態系統服務的價值難以估量。

在礦產與能源資源方面，大陸棚及深海海底蘊藏著豐富的石油與天然氣，目前全球約有百分之三十的石油與百分之二十七的天然氣產自海上油田。此外，深海底部的多金屬結核、富鈷結殼與海底熱液硫化物礦床，含有高濃度的錳、銅、鎳、鈷及稀土元素，被視為未來重要的戰略金屬來源。海洋能則包括潮汐能、波浪能、海流能、海洋溫差能及鹽差能等，雖然目前技術與經濟可行性仍在發展階段，但其潛在的再生能源供應量極為龐大。空間資源則指港口、航運、海底電纜鋪設、海上風場及填海造陸等利用形式，這些活動在促進全球貿易與經濟發展的同時，也對沿海及海洋生態系統造成不同程度的干擾與破壞。

### 7.1.3 喜馬拉雅冰川：亞洲的第三極

喜馬拉雅山脈擁有地球上除極地以外最大規模的冰川群，其冰儲量約佔全球山岳冰川總量的四分之一，因此被譽為「亞洲的第三極」。這片廣袤的冰川與冰凍圈不僅是壯麗的自然景觀，更是亞洲大陸生態系統與人類社會的生命線。喜馬拉雅冰川的融水是亞洲十大主要河流系統的源頭，包括印度河、恆河、雅魯藏布江、湄公河等，這些河流流域養育著超過十億人口，支撐著區域內的農業灌溉、飲用水供應、水力發電以及各類經濟活動。因此，喜馬拉雅冰川的狀態直接關乎亞洲的水資源安全、糧食生產與社會經濟穩定。

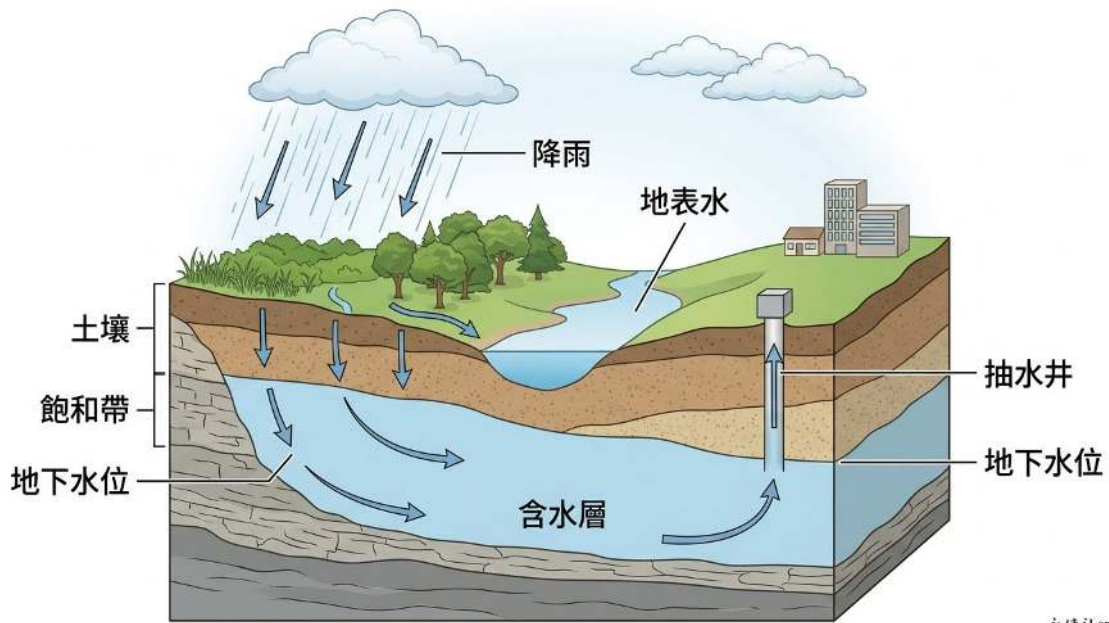
從地質與氣候角度來看，喜馬拉雅冰川的形成與演化受到複雜地形與季風氣候的雙重影響。高聳的山脈攔截了來自印度洋的西南季風，形成大量降雪，經過長年累積與壓實，逐漸發育成巨大的冰川。這些冰川可大致分為兩種類型：一是位於高海拔地區的「大陸型」冰川，溫度低、移動緩慢；二是受季風影響強烈的「海洋

型」冰川，降水豐沛、對氣候變化更為敏感。冰川本身是一個動態系統，其物質平衡取決於冬季積累與夏季消融的對比。在自然氣候波動下，冰川會呈現進退循環，但近數十年來的觀測證據顯示，全球暖化已顯著打破了這種自然平衡。

當前，喜馬拉雅冰川正經歷著前所未有的快速退縮。科學研究透過衛星遙測、地面觀測與模型模擬均一致指出，大多數冰川的退縮速率在二十世紀下半葉後明顯加快。冰川退縮的直接表現是冰舌末端後退、冰厚度減薄以及冰川面積縮小。導致這一趨勢的主要驅動力是人為活動引起的大氣溫度上升，高山地區的增溫幅度往往高於全球平均值，加劇了冰川的夏季消融。此外，黑碳（煤煙）等大氣污染物沉降在冰川表面，降低了冰面的反照率，使其吸收更多太陽輻射，從而進一步加速融化。冰川的快速退縮已引發了一系列連鎖環境效應。

冰川退縮對區域水文與生態系統產生了深遠影響。在短期至中期內，融水增加可能導致河流流量暫時性上升，甚至加劇春季融雪性洪水的風險。然而，從長期來看，當冰川冰儲量消耗到一定程度後，河流的基流量將顯著減少，特別是依賴冰川補給的河流在乾季的流量將大幅下降，引發嚴重的季節性水資源短缺。這將威脅下游地區的農業灌溉系統，尤其是在印度、巴基斯坦、中國等國的廣大灌溉農業區。同時，冰川湖泊因融水注入而擴張，冰磧壩的不穩定性增加，提高了冰川湖潰決洪水發生的風險，對下游社區與基礎設施構成直接威脅。生態方面，依賴冷涼水環境的水生生物棲地可能萎縮，高山生態系統的物種組成與分布也將隨之改變。

面對喜馬拉雅冰川退縮帶來的挑戰，國際社會與區域國家已意識到加強科學研究、監測與跨國合作的重要性。建立更密集的冰川監測網絡，提升對冰川動態與水文過程的理解，是預測未來水資源變化的基礎。同時，下游地區需積極發展水資源適應策略，包括改善灌溉效率、發展節水農業、調整作物結構、加強水資源綜合管理以及投資替代水源。在政策層面，減緩全球暖化的根本措施至關重要，這需要全球共同努力減少溫室氣體排放。保護喜馬拉雅冰川這「亞洲水塔」，不僅是生態保育議題，更是關乎區域永續發展與數億人生計的關鍵課題。



永續社epa

#### 7.1.4 地下水的分布、儲量與補注條件

地下水是儲存於地表以下飽和層中的淡水資源，其分布、儲量與補注條件深刻影響全球水資源的永續性。相對於地表水體，地下水具有分布廣泛、儲量龐大且水質相對穩定的特點，是全球許多地區飲用水、農業灌溉與工業用水的重要來源。從水文地質的角度來看，地下水主要儲存於含水層中，這些含水層由具有孔隙或裂隙的岩石或沉積物構成，能夠儲存並傳導水流。全球地下水儲量的估算因調查方法與定義範圍而異，但普遍認為其總量遠超過地表淡水體（如湖泊與河流）的總和，約佔全球淡水資源的30%以上，然而其中絕大部分屬於更新緩慢的深層古地下水，人類目前經濟技術條件下可開採利用的部分僅佔其中一小部分。

地下水的分布極不均勻，受到地質構造、氣候條件與地形特徵的綜合影響。大型沉積盆地，如北非的努比亞砂岩含水層系統、澳洲的大自流盆地以及美國的高原含水層，儲存了巨量的地下水資源。這些含水層的規模可達數十萬平方公里，水齡從數千年到百萬年不等。在氣候濕潤地區，淺層含水層通常透過降水直接入滲獲得補注，水資源更新速率較快；而在乾旱與半乾旱地區，地下水多為地質歷史時期濕潤氣候下蓄積的「化石水」，補注率極低，基本上屬於不可再生資源。此外，地質構造如斷層與褶皺會控制含水層的邊界與水力特性，火成岩與變質岩地區的地下水則主要儲存於風化裂隙與構造裂隙中，儲水能力與空間異質性均較高。

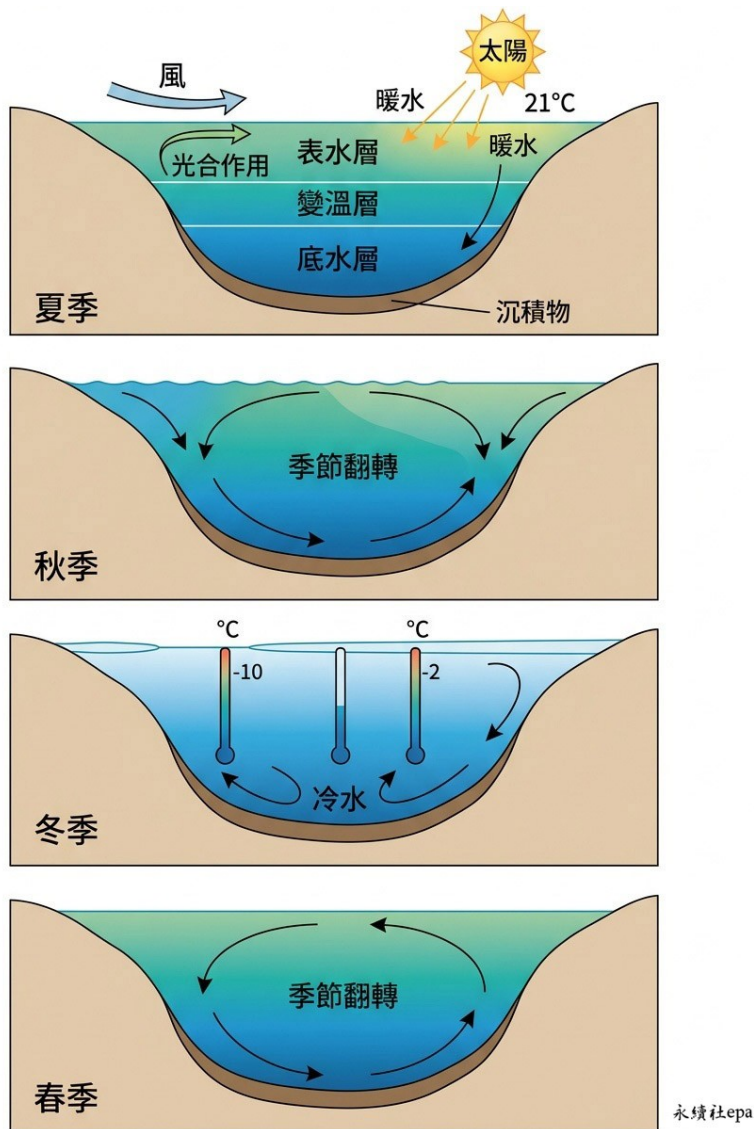
地下水的補注過程是指水從地表進入地下含水層的機制，其速率與條件決定了水資源的可再生性。主要補注來源包括降水入滲、地表水體（如河流、湖泊）的滲漏以及農業灌溉的回歸水。補注速率受多種因子控制：地表土壤的滲透性、降水強度與時空分布、植被覆蓋、地形坡度以及人類土地利用方式。在自然條件下，森林與草原等植被覆蓋良好的地區有利於降水下滲，而都市化導致的大面積不透水面則會嚴重阻礙補注，並增加地表逕流。人工補注，即透過工程措施將地表水引導至滲

透池或注入井，已成為許多地下水超抽地區的重要管理策略，用以主動補充含水層儲量並防止地層下陷。

然而，全球許多重要含水層正面臨補注率遠低於抽取率的不可持續狀態，導致儲量持續下降。過度抽取不僅耗竭水資源，更會引發一系列環境地質問題，包括地下水水位大幅下降、抽水成本增加、泉水枯竭、依賴地下水的生態系統退化，以及在沖積層地區引發嚴重的地層下陷。例如，印度恆河平原、美國加州中央谷地以及中國華北平原，均因農業灌溉大量抽取地下水，導致水位以每年數公尺的速度下降。此外，補注過程也關乎水質保護，污染物可能隨補注水進入含水層，而補注水在通過包氣帶土壤時所發生的物理、化學與生物作用，則是地下水自然淨化的關鍵環節。因此，理解並管理地下水的補注條件，是實現水資源永續利用與維護相關生態系統健康的基礎。

## 7.2 河流與湖泊生態系統

河流與湖泊生態系統是地球淡水資源的核心載體，不僅是水資源儲存與流動的物理空間，更是支撐豐富生物多樣性、執行關鍵生態功能，並提供人類社會多重服務的複雜動態系統。這兩類生態系統在形態、水文動力與生物群落結構上存在顯著差異，但其生態過程均深刻影響區域乃至全球的物質循環與能量流動。從高山溪流匯聚成大河，從冰川湖到低地湖泊，這些水體構成了景觀中的藍色脈絡，維繫著陸域與水域生命。理解其生態特徵、功能與面臨的壓力，是水資源永續管理的科學基礎。



流水生態系統，即河流與溪流，其最顯著的特徵是水體的單向流動性。這種流動性塑造了獨特的物理結構，從上游的源頭溪流，經過中游的過渡河段，至下游的平原河流，形成連續的河流連續體概念。水流持續輸送溶解物質、懸浮顆粒與有機碎屑，同時也創造了多樣的棲地環境，如急流區、緩流區、深潭與淺灘。水流速度、底質組成、水溫與溶氧量等因子，共同決定了水生生物的分布與適應策略。許多生物發展出特殊的形態與行為以適應流動環境，例如附著在石頭上的藻類與無脊椎動物，以及魚類的流線型身體結構。河流的連通性至關重要，縱向連通確保了營養鹽輸送、魚類洄游與基因交流，而橫向連通（如洪泛平原）則在洪水期提供繁殖場域與養分交換空間。

相對於河流的動態，湖泊生態系統屬於靜水水體，其水體交換時間較長，內部過程更為突出。湖泊的形態，包括深度、面積、岸線發展係數等，深刻影響其物理化學特性與生物群落。一個關鍵的物理現象是水溫分層，尤其在溫帶地區的深水湖泊中，夏季會形成上層較暖的變溫層、溫度急劇變化的斜溫層，以及下層低溫的均溫層。這種分層阻礙了上下水層的垂直混合，導致底層水體溶氧耗竭，影響底棲生物生存與沉積物中的化學反應。春秋兩季的湖水翻轉則能打破分層，使養分重新分

布至表層，驅動浮游植物的生長。湖泊的生物生產力受營養鹽，特別是氮與磷的供應量所控制，從貧養到優養的光譜，反映了其營養狀態與生態系統健康度。

這些生態系統的社會經濟效益極為廣泛且不可或缺。河流自古以來就是人類文明的搖籃，提供飲用水、農業灌溉、水力發電、交通運輸、廢水承載與漁業資源。大型河流如尼羅河、亞馬遜河、長江等，滋養了廣袤的流域農業，支持數億人口的生計。水力發電作為重要的可再生能源，依賴河流的流量與落差。湖泊同樣提供飲水、灌溉、漁業與休閒旅遊等功能，大型湖泊如北美五大湖、非洲維多利亞湖，是區域經濟的重要支柱。然而，水壩建設、河道渠化、水資源抽取等工程，在創造效益的同時，也往往割裂了河流連續體，改變自然水文節律，對生態系統造成深遠影響。

濕地生態系統，包括沼澤、泥炭地、洪泛平原與河口潮間帶等，是介於陸地與開放水體之間的過渡地帶，具有獨特且多重生態功能。濕地被譽為「地球之腎」，因其強大的淨化能力，能透過物理沉積、化學吸附與生物吸收，有效去除水體中的營養鹽、重金屬與有機污染物。濕地也是生物多樣性的熱點，為眾多水生植物、鳥類、兩棲類及魚類提供棲息、覓食與繁殖場所。此外，濕地在調節水文方面扮演關鍵角色，能夠滯留洪水、削減洪峰，並在乾季緩慢釋放水分，有助於穩定區域水資源。更重要的是，濕地，特別是沿海紅樹林、鹽沼及海草床，是重要的「藍碳」生態系統，其沉積物能夠以極高效率封存大氣中的二氧化碳，對於緩解氣候變遷具有全球性意義。然而，濕地也因排水造田、都市擴張與污染而面臨嚴重的喪失與退化。

### 7.2.1 流水生態系統的結構與功能

流水生態系統泛指所有具備持續或間歇性流動水體的生態系統，其核心特徵在於水體的流動性，這股動能不僅塑造了物理棲地，更驅動著能量流動、物質輸送與生物群集的組成。從源頭的高山溪澗、中下游的寬闊河流，到最終匯入海洋的河口，流水生態系統形成一個連續的廊道，生態學家稱之為「河流連續體概念」。此概念強調從上游到下游，物理環境、能量來源與生物群集會呈現系統性的梯度變化。上游河段通常流速快、水溫低、溶氧高，底質以巨石和礫石為主，生物多為適應高流速與低溫的附著性藻類、水生昆蟲如石蠅、蜉蝣的幼蟲，以及需要高溶氧的魚類如鱒魚。能量來源主要依賴陸域輸入的有機碎屑，例如落葉與枯枝，這些外源性有機物經由流水攜帶與分解者處理，成為系統重要的能量基礎。

隨著河流向下游移動，河床坡度減緩，流速下降，底質逐漸轉為細沙與淤泥，河道寬度增加，水溫也因日照增強而上升。此時，能量來源從依賴外源性碎屑，逐漸轉向依賴系統內初級生產者（如浮游藻類與水生維管束植物）的光合作用。生物群集也隨之改變，出現更多適應靜水或緩流環境的物種，例如鯉科魚類、貝類以及各種底棲生物。河流中游的棲地異質性高，可能包含深潭、淺灘、急流等多樣微棲

地，支持著較高的生物多樣性。此外，河流與其洪氾平原的交互作用至關重要，季節性洪水將養分與有機物擴散至洪氾平原，滋養陸域生態系統，同時也為許多水生生物提供繁殖與育幼的場所，形成了河岸生態交錯帶獨特的生態功能。

流水生態系統的功能遠超越其作為水體通道的角色。它是一個高效的物質輸送者，將上游侵蝕的沉積物、養分與有機物不斷向下游及海洋輸送，參與全球的生物地球化學循環。同時，河流也是一個強大的棲地工程師，透過侵蝕、搬運與沉積作用，持續塑造著地表景觀。在生態功能上，流水系統扮演著關鍵的「新陳代謝」角色：分解者群落（主要是細菌與真菌）將輸入的有機碎屑礦化，釋出養分供生產者利用；生產者透過光合作用固定太陽能；消費者則在各營養層間傳遞能量與物質。水體的流動確保了溶氧的補充與廢物的稀散，維持了系統的代謝活力。然而，這種動態平衡極易受人為活動干擾，例如水壩建設會中斷河流連續體，改變沉積物與養分輸送，阻斷魚類洄游路徑；河道渠化與水泥化則會破壞棲地異質性，導致生物多樣性喪失。因此，理解流水生態系統的結構與功能，是進行水資源永續管理與河川生態復育不可或缺的科學基礎。

### 7.2.2 湖泊的分層現象與季節動態

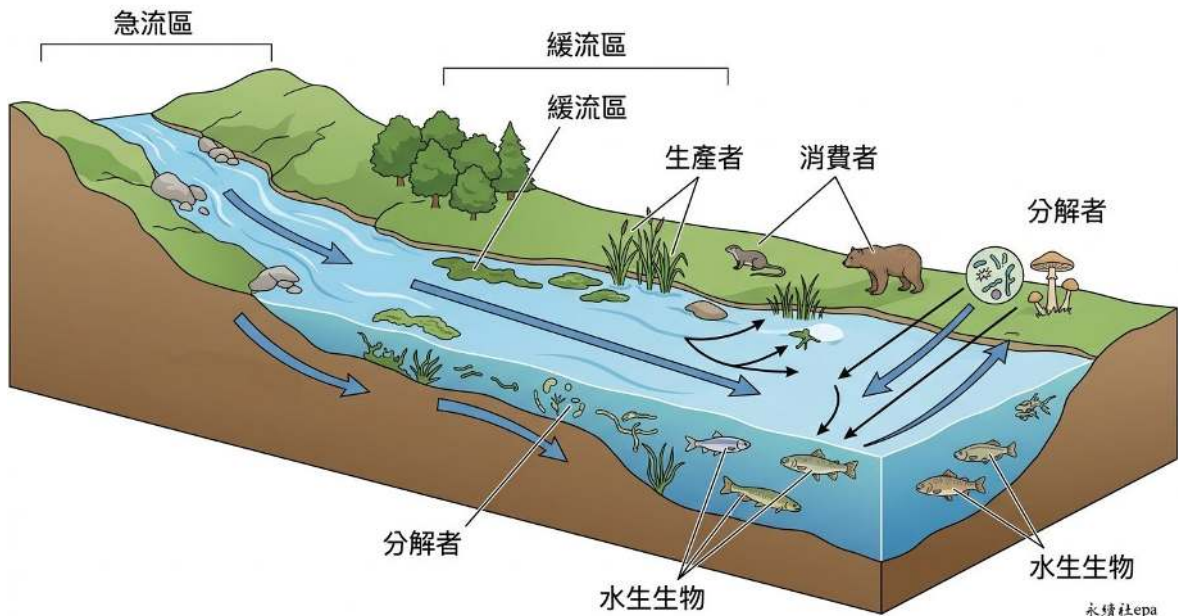
湖泊作為靜止或緩慢流動的水體，其物理結構與動態過程深刻影響著內部生態系統的運作。其中，水體的熱分層現象是湖泊物理環境最顯著的特徵之一，主要由水溫變化導致密度差異所形成。由於水在攝氏四度時密度最大，當湖泊表層水受太陽輻射增溫或大氣冷卻降溫時，會與下層水體產生溫度與密度的梯度，從而形成垂直方向上的分層結構。這種分層並非靜止不變，而是隨著季節更迭呈現規律性的循環動態，驅動著湖泊內部的化學物質分布、溶解氧濃度以及生物活動的空間格局。

典型的溫帶深水湖泊在一年中會經歷三個主要的分層階段：夏季分層期、秋季翻轉期、冬季逆分層期以及春季翻轉期。夏季時，強烈的日照使表層水溫升高，形成溫暖而密度較小的表水層，稱為湖面溫水層。其下方溫度急遽下降的過渡帶稱為溫躍層，此層水溫梯度最大，猶如一道物理屏障，阻礙上下水層的混合。最下層則是低溫、高密度的深水層。這種穩定的分層導致表水層富含氧氣，適合好氧生物活動；而深水層則因有機物分解消耗氧氣，容易形成缺氧狀態，影響底棲生物的生存。

進入秋季，氣溫下降使表層水冷卻，密度增加而下沉，破壞了夏季的穩定分層，引發上下水層的垂直混合，此過程稱為秋季翻轉。翻轉作用將表層富含的氧氣輸送至深水層，同時也將底層累積的營養鹽帶至表層，為浮游植物生長提供養分。冬季來臨時，若氣候嚴寒使湖面結冰，則會形成逆分層：表層冰下水溫接近零度，其下為攝氏四度左右密度最大的水層。這種結構相對穩定，混合微弱。待到春季冰融，表層水受熱增溫，密度再度小於下層水體，引發春季翻轉，再次完成水體與物質的全面混合。

湖泊的季節動態不僅是物理過程，更連動著整個生態系統的機能。分層期溫躍層的存在，限制了營養鹽從底層向上補充，可能抑制表水層的初級生產力；而翻轉期則能重新活化營養鹽循環，刺激藻類生長，但也可能因將缺氧水體帶至表層而引發魚類死亡。此外，分層的強度與持續時間受氣候、湖泊形態、風力等多重因子影響。在氣候變遷的背景下，許多湖泊觀測到分層期延長、水溫上升以及缺氧體積擴大的趨勢，這些變化將進一步改變湖泊的生物群落結構、物質循環路徑以及整體生態系統服務功能。

### 7.2.3 河川的社會經濟效益：飲水、灌溉與水力發電



河川作為地表水資源最為活躍的載體，其社會經濟效益深遠且多元，自古以來便是人類文明發展的基石。從飲水供應、農業灌溉到水力發電，河川系統不僅維繫著基礎生存需求，更驅動著經濟活動與能源生產，成為支撐社會運作不可或缺的自然資本。這些效益的實現，建立在河川穩定的水文循環與生態功能之上，然而人類對其的依賴與開發，亦須在利用與保育之間取得平衡，方能確保效益的永續性。

飲水供應是河川最直接且關鍵的社會效益。全球許多大城市與聚落均依傍河川而建，仰賴其作為主要的淡水來源。河川水經由取水、淨化處理後，成為家庭、商業及公共衛生的用水基礎。穩定的飲水供應關乎公共健康與社會穩定，缺乏潔淨水源將直接導致水媒疾病傳播與生活品質下降。然而，隨著人口增長與污染加劇，許多河川的水質與水量面臨壓力，使得飲用水安全成為當代水資源管理的核心挑戰。因此，保護集水區、控制污染源並實施流域綜合管理，是確保河川能持續提供安全飲用水的必要措施。

在農業生產方面，河川灌溉更是全球糧食安全的支柱。灌溉農業佔全球耕地面積約兩成，卻生產了全球四成以上的糧食。從古埃及的尼羅河泛濫平原到亞洲的季風區水稻田，河川透過渠道系統將水源引至農田，克服了降雨時空分布不均的限制，大幅提升了作物產量與耕作穩定性。大型灌溉工程雖能帶來顯著經濟收益，但過度引水也可能導致下游生態流量不足、土壤鹽鹼化以及流域水權衝突等問題。現代灌溉管理強調效率提升，例如推廣滴灌、微灌等節水技術，並納入生態需水考量，旨在兼顧農業生產與河川生態健康。

水力發電則是河川重要的能源效益體現，屬於清潔的可再生能源。利用河川的落差與流量，透過水壩與渦輪機將水的勢能轉換為電能，為工業化與都市化提供了重要的電力基礎。大型水力發電廠具有發電量穩定、運轉成本低且幾乎不直接排放溫室氣體的優點，在全球能源轉型中扮演一定角色。然而，水壩建設往往伴隨顯著的生態與社會代價，包括阻斷魚類洄游通道、淹沒原始棲地、改變下游水文情勢，以及導致社區遷徙與文化遺產喪失。當前水力發電的發展趨勢，愈發重視環境影響評估、採用對生態更友善的工程設計，並探索小型與微水力發電的潛力，以在能源需求與河川保育間尋求更細緻的平衡。

#### 7.2.4 濕地生態系統的多重功能

濕地生態系統是介於陸域與水域之間的過渡性地帶，其特徵在於土壤長期或季節性飽和水分，形成獨特的厭氧環境，並孕育出適應此條件的特殊動植物群落。這類生態系統包括沼澤、泥炭地、紅樹林、河口三角洲以及人為的水稻田等，它們在全球生態網絡中扮演著不可或缺的角色，其功能遠超越單純的地理景觀，而是一系列複雜生態過程與服務的整合樞紐。

從水文調節的角度來看，濕地如同大自然的海綿，具有強大的蓄洪與滯洪能力。在豐水期，濕地能夠吸收並儲存過量的降水或河川溢流，有效減緩下游地區的洪水峰值與流速，降低洪患風險。而在乾旱季節，儲存於濕地中的水份則能緩慢釋放，維持河川基流，為周邊地區提供穩定的水源補給。此外，濕地的人文過程也與地下水補注密切相關，透過土壤的滲透作用，濕地能補充地下含水層，維繫區域水資源的平衡。這種調節功能不僅保護了人類聚落與農田，也為許多水生與兩棲生物提供了穩定的棲息環境。

在淨化水質方面，濕地生態系統展現了卓越的自然處理能力。當含有營養鹽、沉積物或各類污染物的水流經濕地時，其物理、化學及生物過程會協同作用，進行過濾與分解。懸浮固體被植被減速攔截而沉澱；植物根系吸收水中的氮、磷等營養鹽，轉化為生物質；土壤中的微生物則能降解有機污染物，甚至轉化或固定某些重金屬。這種天然的淨化機制，使濕地成為成本效益極高的「地球之腎」，減輕了後端人工污水處理設施的負擔，並提升了進入湖泊、河川乃至海洋的水體品質。

濕地作為生物多樣性的關鍵庇護所，其生態價值尤為突出。其獨特的水陸交錯環境創造了高度的棲地異質性，從開闊水域、挺水植物帶到濕生林帶，形成了複雜的空間結構，能支持從浮游生物、無脊椎動物、魚類、兩棲類、鳥類到哺乳類等各類物種的生存與繁衍。許多候鳥更將濕地視為遷徙途中不可或缺的「加油站」與繁殖地。例如，紅樹林濕地的根系網絡為魚蝦幼苗提供了理想的育幼場，其凋落物更是沿岸食物網的能量基礎。濕地的生物多樣性不僅具有內在的保育價值，也直接關聯到漁業資源的永續性。

此外，濕地還具備重要的碳匯功能與氣候調節潛力。特別是在泥炭地等有機質濕地中，厭氧環境抑制了植物殘體的分解速率，使得碳得以長期累積並封存於土壤中，成為全球重要的碳庫。保護這類濕地可避免儲存的有機碳因排水或開發而氧化釋放，加劇大氣中的二氧化碳濃度。同時，濕地透過蒸散作用影響局部微氣候，並能緩衝海岸線免受風暴潮侵蝕，紅樹林與鹽沼在這方面的防護功能已廣受認可。從社會經濟層面觀之，濕地也提供了休閒遊憩、環境教育、文化傳承以及非木材林產品（如藥用植物、薪材）等多元效益，與人類福祉緊密相連。

### 7.3 水資源的需求與利用

水資源的需求與利用是人類社會發展與生態系統維繫的核心議題，其動態變化深刻反映了人口增長、經濟活動、技術進步與生活方式轉變等多重因素的交互作用。全球淡水資源的總量雖然相對固定，但其時空分布極不均勻，加上人類對水資源的利用方式與效率差異，導致了區域性的水資源壓力與供需失衡。從宏觀角度來看，水資源的利用可大致分為取水與耗水兩類，取水是指從水源地抽取的水量，其中一部分在使用後會返回水體，而耗水則是指在使用過程中因蒸發、產品帶走或污染而無法直接回歸原水體的水量。理解這種區別對於評估水資源的真實壓力至關重要，因為高取水率若伴隨低耗水率，對水系統的長期衝擊可能較小，反之則可能導致水資源的實質枯竭。

農業用水長期以來佔據全球淡水消費的最大份額，其用水特性與糧食安全、農村生計及生態系統健康緊密相連。灌溉農業是主要的用水部門，其用水效率受到氣候條件、灌溉技術、作物類型與土壤特性的綜合影響。傳統的漫灌方式不僅耗水量大，且容易導致土壤鹽鹼化與養分流失，而現代化的滴灌、噴灌等節水灌溉技術則能顯著提升用水效率，減少無效蒸發與逕流損失。然而，節水技術的推廣往往受到初始投資成本、農民知識水平與政策支持力度的制約，特別是在發展中國家的小農經濟體系中，轉型面臨諸多挑戰。此外，農業用水還需考慮虛擬水貿易的概念，即透過農產品貿易所隱含的水資源轉移，這使得水資源短缺地區可以透過進口高耗水作物來緩解本地水壓力，但也可能將環境成本轉嫁給出口地區。

工業用水是另一重要的水資源需求部門，其特點在於用水集中、水質要求多樣且常伴隨污染物排放。從傳統的製造業到高科技產業，生產過程中的冷卻、清洗、

加工與鍋爐用水均不可或缺。工業用水的管理重點在於提升循環利用率與降低單位產值耗水量，透過製程改良、廢水回收與再生利用，許多先進企業已能大幅減少對新鮮水源的依賴。然而，工業廢水若未經妥善處理即行排放，將對承受水體造成嚴重的污染，影響水生生態與下游用水安全。因此，工業水資源管理必須整合潔淨生產與末端處理的思維，同時考量區域水資源的承载力，進行合理的產業布局與水權分配。

都市與家庭用水隨著全球都市化進程加速而持續增長，反映了人口集中與生活水平提升的雙重效應。家庭用水主要包括飲用、烹飪、清潔、衛生與園藝等用途，其人均用水量在不同國家與地區間存在巨大差異，這與水價政策、供水設施普及率、節水意識與文化習慣密切相關。都市供水系統的建設與維護是保障公共衛生與社會穩定的基礎，但老舊管線的漏損問題在許多城市中造成了大量的無收益水，成為水資源管理的一大漏洞。此外，都市化導致的不透水面積增加，改變了自然水文循環，減少了地下水補注並加劇了洪澇風險，因此整合性的都市水資源管理需納入雨水貯留、透水鋪面與生態滯洪等海綿城市概念，以提升水資源的韌性。

面對日益增長的水資源需求，單純依靠開發新水源已難以永續，必須從需求端管理與提升用水效率著手。需求端管理旨在透過經濟、技術與行政手段，引導用水行為的改變，例如實施階梯式水價以抑制浪費，推廣節水器具與智慧水表，以及加強公眾教育提升節水文化。同時，水資源的跨部門競爭與衝突也日趨明顯，農業、工業、都市與生態基流量之間常需進行艱難的權衡。確保河流湖泊維持一定的生態基流量，以支持水生生物與生態系統服務，已成為現代水資源管理不可或缺的一環。這要求我們超越傳統以人類需求為中心的思維，將生態系統的健康視為水資源永續利用的根本前提。

### 7.3.1 農業用水：全球最大宗的淡水消費

農業用水在全球淡水消費中佔據主導地位，其消耗量遠超過工業與民生用水之總和。根據聯合國糧農組織的統計，全球約有百分之七十的淡水抽取量用於農業灌溉，而在部分乾旱或半乾旱地區，此比例甚至高達百分之九十以上。這種高度集中的用水模式，根源於人類對糧食生產的基本需求。農業灌溉不僅是為了補充自然降雨的不足，更是為了在特定季節或氣候條件下，確保作物能夠獲得穩定且充足的水分供應，以達到預期的產量與品質。從歷史角度觀察，農業文明的興起往往與灌溉技術的發展緊密相連，例如古代美索不達米亞、埃及尼羅河流域以及中國黃河流域的灌溉系統，都是支撐大規模農業生產與人口增長的重要基礎。時至今日，儘管灌溉技術已有長足進步，但農業部門對水資源的巨大需求本質並未改變，反而隨著全球人口增長與飲食結構改變而持續加壓。

農業用水的效率與管理方式，直接影響全球水資源的永續性。傳統的漫灌或溝渠灌溉方式，雖然建設成本較低，但水分利用效率往往不佳，有大量水資源在輸送

過程中因蒸發、滲漏或逕流而損失。相較之下，滴灌、噴灌等現代化節水灌溉技術，能夠將水直接輸送至作物根部區域，大幅減少無效蒸發與深層滲漏，提升用水效率。然而，這些高效灌溉系統的初期投資與維護成本較高，並非所有地區的農民都能負擔，導致全球範圍內灌溉效率存在顯著差異。在許多發展中國家，農業用水管理仍面臨基礎設施老舊、水權制度不明、補貼政策扭曲市場訊號等挑戰，使得水資源浪費情形依然嚴重。此外，農業用水的定價機制也是一大關鍵，若水價過低，無法反映水資源的稀缺價值，便難以激勵農民投資節水技術或改變耗水作物的種植結構。

作物種類的選擇與種植模式，是決定農業用水需求的另一核心因素。不同作物對水分的需求差異極大，例如生產一公斤稻米所需的水量，遠高於生產一公斤小麥或玉米。隨著全球肉類與乳製品消費量上升，用以生產飼料作物（如玉米、大豆）的灌溉用水也隨之增加，因為畜牧業的「虛擬水」含量極高。這種飲食結構的轉變，無形中加劇了農業用水的壓力。此外，在氣候變遷的背景下，降雨模式變得更不穩定，乾旱發生頻率與強度增加，使得許多原本依賴雨水的農業區，不得不轉向依賴灌溉，進一步推升農業取水量。同時，為了追求更高的經濟收益，農民可能傾向種植高價值但需水量大的經濟作物，例如在某些水資源緊迫地區仍大量種植甘蔗、棉花或堅果，這類選擇雖能帶來短期經濟利益，卻可能危及區域水資源的長期平衡。

面對農業用水帶來的巨大壓力，推動永續的農業水管理已成為國際社會的共識。這不僅涉及技術層面的革新，更需整合政策、經濟與社會層面的綜合策略。在政策上，需要建立清晰的水權制度與合理的定價機制，並輔以對節水技術的補貼或融資支持。在農業實踐上，推廣氣候智慧型農業，包括採用耐旱作物品種、實施保護性耕作以增加土壤保水能力、以及利用精準農業技術監測土壤溼度以優化灌溉時機。此外，改善灌溉基礎設施，例如修復漏水渠道、建設高效輸水系統，也是減少無謂損失的重要方向。從更宏觀的系統角度，則需思考糧食貿易與虛擬水流動，透過國際貿易調節水資源在區域間的分配，讓水資源稀缺地區可以進口水密集型產品，從而減輕本地水資源壓力。總體而言，農業用水的永續管理，必須在確保全球糧食安全與保護脆弱水資源之間，尋求一個動態且公平的平衡點。

### 7.3.2 工業用水的特性與管理

工業用水在全球淡水消耗中佔據顯著比例，其特性與農業用水或生活用水有本質上的差異。工業用水的核心特徵在於其用途的多樣性與水質要求的特定性。水在工業製程中扮演多重角色，包括作為原料、溶劑、冷卻劑、清洗劑、輸送媒介以及廢棄物載體。不同產業對水質的要求差異極大，例如電子半導體產業需要超高純度的去離子水，而鋼鐵業的冷卻用水則可能對鹽度有較高容忍度，但對懸浮固體物含量有嚴格限制。這種多樣性使得工業用水管理無法採用單一標準，必須依據製程特性進行客製化的水資源規劃。此外，工業用水的消耗強度——即單位產值或單位產

品所消耗的水量——是衡量產業用水效率的關鍵指標，它受到技術水平、生產規模、回收再利用程度以及當地水資源政策等多重因素影響。

工業用水的管理策略已從傳統的線性「取用-排放」模式，逐漸轉向循環與整合性水資源管理。水足跡評估成為重要的管理工具，它不僅計算直接取水量，更涵蓋整個供應鏈中的虛擬水消耗，促使企業審視其整體水資源影響。在廠區層級，水管理的最佳實踐包括實施水平衡分析，以識別製程中各單元的水流與水質變化，從而找出節水與回收潛力點。製程優化，例如採用逆流清洗、密閉循環冷卻系統、以及乾式製程技術，能大幅減少新鮮水的取用量。同時，廢水分流與分類處理的概念日益受到重視，將不同污染特性的廢水分流，可提高處理效率並降低處理成本，例如將高有機負荷的廢水與含重金屬廢水分開處理，有助於後續資源回收與安全處置。

水回收與再利用是工業用水管理的核心環節，其技術發展與經濟可行性密切相關。常見的回收技術包括過濾、膜處理（如微濾、超濾、逆滲透）、離子交換以及高級氧化程序等。這些技術的組合應用能將處理後的水回用於對水質要求較低的製程單元，甚至經過深度處理後回用於高品質要求的環節，形成廠內的水循環系統。除了水資源的節約，工業廢水中的資源回收也成為新興趨勢，例如從廢水中回收貴重金屬、營養鹽或有機物，不僅減少環境負荷，更能創造經濟價值。然而，推動水回收與再利用面臨諸多挑戰，包括高昂的初始投資與運營成本、技術複雜性、以及可能存在的健康與安全風險（如微生物再生或化學物質累積），需要透過健全的風險評估與管理架構來克服。

有效的工業用水管理必須鑲嵌在更廣泛的政策與治理框架之中。政府通常透過用水許可證制度、階梯式水價、排放標準以及節水獎勵措施等政策工具，引導產業改善用水效率。水風險評估，包括實體水風險（如缺水、洪水）、監管風險（如法規趨嚴）以及聲譽風險，已成為企業永續經營的重要課題。許多跨國企業開始承諾「水中性」或「水正效益」目標，意即透過節水、社區投資與流域復育等措施，使其對當地水資源的淨影響為零或正面。此外，產業共生園區的概念將不同工廠的水流與物料流進行整合，讓一家工廠的廢水或副產品成為另一家工廠的資源，從而提升整體資源效率。這種系統性思維標誌著工業用水管理已從單點技術改善，邁向跨廠區、跨部門的整合性資源管理新典範。

### 7.3.3 都市與家庭用水的趨勢

隨著全球都市化進程加速，都市與家庭用水已成為水資源需求中增長最為顯著的領域之一。都市人口集中，生活型態轉變，使得人均用水量遠高於鄉村地區，這不僅反映了經濟發展與生活品質的提升，也對水資源供應系統帶來前所未有的壓力。都市用水主要涵蓋家庭日常消耗、商業活動、公共設施維護以及景觀灌溉等多個面向，其中家庭用水佔據最大比例，其使用模式深受社會文化、經濟水平、氣候條件與基礎設施完備程度的影響。近年來，全球多數都市面臨水資源短缺的挑戰，

促使各國政府與水務管理單位重新審視都市用水效率，並推動一系列節水政策與技術革新。

都市家庭用水的趨勢呈現出明顯的區域差異與時代特徵。在已開發國家，由於供水系統普及且水價機制相對完善，家庭用水量在經歷高速增長後，逐漸趨於穩定甚至出現下降趨勢，這主要歸功於節水器具的廣泛應用、民眾環保意識的提升以及水資源教育的推廣。例如，低流量蓮蓬頭、雙段式沖水馬桶、高效能洗衣機與洗碗機等設備的普及，有效降低了人均每日用水量。然而，在許多快速發展中的都市，隨著收入增加與生活現代化，家庭用水需求正急遽上升，特別是沖洗、沐浴、洗衣等活動的用水強度顯著提高，加上管線漏損率居高不下，導致整體用水效率偏低。

氣候變遷進一步加劇了都市用水的脆弱性。乾旱頻率與強度增加，直接影響都市水源的穩定性，迫使許多城市必須發展多元供水策略，包括海水淡化、再生水利用與雨水收集等。此外，都市熱島效應導致夏季用水高峰更加尖銳，空調冷卻與戶外用水需求激增，對供水系統的調度能力構成嚴峻考驗。因此，智慧水管理系統的建置成為重要趨勢，透過感測器監測管網流量與壓力，即時偵測漏損並優化配水，同時結合智慧水錶提供用戶用水資訊，促進需求端的管理與行為改變。

未來都市與家庭用水的管理必須朝向整合性與適應性發展。除了技術層面的革新，政策工具如階梯式水價、用水標章認證、新建築的節水設計規範等，皆能引導社會走向永續用水。更重要的是，培養市民的節水文化與社群參與，將水資源保育內化為都市治理的核心價值，從而減輕人口集中對水資源系統的壓力，確保都市發展與水資源永續利用之間的平衡。

### 7.3.4 人口增長與糧食需求對水資源的壓力

人口增長與糧食需求的擴張，是全球水資源壓力的兩大核心驅動因子。隨著全球人口持續攀升，預計在未來數十年內將突破九十億大關，對淡水資源的總需求量呈現指數型增長。這種增長並非線性，而是與經濟發展、飲食結構轉變緊密耦合，導致人均水足跡不斷上升。糧食生產作為最大的淡水消耗部門，其用水需求直接受到人口規模和消費模式的雙重影響。當更多人口脫離貧困，飲食習慣從以植物性為主的簡單膳食，轉向包含更多肉類、乳製品的動物性蛋白質時，水資源的隱含消耗將急遽增加，因為畜牧業的單位卡路里或蛋白質生產所需的水量遠高於穀物作物。這種由人口動態與膳食升級共同構成的壓力，使得水資源供需平衡面臨前所未有的挑戰。

糧食系統對水資源的壓力，主要體現在農業灌溉用水的高需求上。全球約有百分之七十的淡水抽取量用於農業灌溉，以維持作物產量。人口增長意味著需要生產更多的糧食，而在耕地擴張有限且往往伴隨生態代價的情況下，提高現有農地的單位面積產量成為主要途徑，而這通常依賴於更集約的灌溉。然而，許多高產農業區已面臨水資源過度開發的問題，地下水位的持續下降與河流的季節性斷流，正是這

種壓力的具體表徵。此外，氣候變遷加劇了水文不確定性，降雨模式的改變與乾旱頻率的增加，迫使農業更加依賴穩定的灌溉水源，進一步加劇了水資源的競爭。這種競爭不僅發生在農業部門內部，也擴及工業與民生用水，形成跨部門的資源爭奪。

從系統性角度分析，人口與糧食需求對水資源的壓力，實質上是對整個水文循環與生態系統服務的壓力。大規模的灌溉改變了區域水文狀況，可能導致河流基流量減少、濕地萎縮，並影響下游生態系統的健康與社區的用水權利。地下水超抽則可能引起地層下陷、海水入侵等不可逆的地質與水質問題。這種壓力在許多水資源本就緊缺的地區，如中東、北非、南亞部分地區以及中國北方，已演變為深刻的危機，直接威脅到當地的糧食安全與社會穩定。水資源的稀缺性開始反饋影響糧食生產的穩定性，形成「水-糧食-人口」的緊張紐帶，若無適當的管理與技術介入，可能引發惡性循環。

面對此一壓力，單純增加供水已非永續解方，必須從需求管理、效率提升與系統轉型多管齊下。在農業方面，推動節水灌溉技術、培育抗旱作物品種、調整耕作制度以適應水資源稟賦，是降低單位糧食產出耗水量的關鍵。在消費端，倡導減少食物浪費與推動永續飲食，亦有助於緩解整體水資源壓力。政策上則需整合水資源管理與糧食安全策略，透過水權制度、定價機制與流域綜合管理，確保水資源在競爭性用途間的公平與效率分配。最終，緩解人口與糧食需求對水資源的壓力，需要認識到水、土地與生態系統的相互依存關係，並在發展規劃中內化水資源的承載力限制，朝向更具韌性與永續性的糧食與水系統轉型。

## 7.4 水資源短缺與水危機

水資源短缺與水危機已成為二十一世紀全球面臨的最嚴峻挑戰之一，其影響範圍從生態系統健康、糧食安全、經濟發展到社會穩定，無所不包。水資源短缺不僅指物理性的淡水供應不足，更涵蓋了因水質惡化、基礎設施落後或管理不善所導致的經濟性缺水。當水資源的供需失衡達到臨界點，便可能引發區域性或全國性的水危機，進而觸發社會動盪、經濟衰退甚至國際衝突。本章將深入探討水資源短缺的全球現況與熱點地區，分析氣候變遷如何加劇水文不穩定性，評估水危機帶來的社會經濟衝擊，並檢視地下水過度抽取的長期後果，以全面理解這一複雜且迫切的環境議題。

全球水資源短缺的現況呈現出顯著的空間異質性，某些地區面臨著絕對的物理性缺水，而另一些地區則因水質污染或管理失當而陷入經濟性缺水。物理性缺水主要發生在年降雨量稀少或蒸發量極高的乾旱與半乾旱地區，例如中東、北非、中亞部分地區以及美國西南部。這些地區的淡水資源總量本就有限，難以滿足不斷增長的人口與經濟活動需求。另一方面，經濟性缺水則常見於水資源總量相對豐富，但由於水質污染嚴重、供水基礎設施老舊、水資源管理效率低下或分配不公，導致大

量人口無法獲得安全、穩定的用水。南亞與撒哈拉以南非洲的許多國家便是此類型的典型，其水危機的根源往往在於治理能力不足與社會經濟不平等，而非絕對的水資源匱乏。

氣候變遷正以前所未有的方式重塑全球水文循環，加劇了水資源的時空不穩定性，使得水危機的風險急遽升高。氣候模型與觀測數據均顯示，全球暖化導致大氣持水能力增加，進而改變了降雨的強度、頻率與空間分布。許多地區正經歷著更為極端的降水事件，強降雨導致洪災頻發，但降雨的集中化卻可能縮短雨季，延長乾旱期，使得水資源的季節性調配更加困難。同時，氣溫上升加速了冰川與積雪的融化，短期內可能增加河川流量，但長期而言將導致依賴冰川融水的地區（如中亞與安第斯山脈周邊）面臨水源枯竭的威脅。海洋溫度上升亦影響著季風系統的穩定性，對亞洲與非洲數十億人口的農業與生活用水構成直接風險。這種水文不確定性的增加，使得傳統的水資源規劃與管理方法面臨失效的困境。

水危機所引發的社會經濟衝擊是多層面且深遠的，其影響往往超越水資源部門本身，波及糧食安全、公共衛生、經濟成長與社會穩定。在農業層面，灌溉用水短缺直接導致作物減產，威脅糧食供應，推高糧食價格，加劇貧困與營養不良問題。在工業層面，許多製造業與能源生產（特別是火力與水力發電）高度依賴水資源，缺水可能導致生產中斷、成本上升與失業增加。在都市層面，供水不穩定或水質不良會引發公共衛生危機，增加水媒疾病的傳播風險，同時加重家庭獲取安全飲用水的經濟與時間負擔。更為嚴重的是，水資源爭奪可能激化社群衝突，在跨境河流流域甚至可能升級為國家間的地緣政治緊張關係，水資源因而被視為一種戰略性資產，其管理與分配充滿政治複雜性。

地下水過度抽取是加劇水資源短缺與引發長期生態危機的一個關鍵驅動因素，其後果往往具有隱蔽性與滯後性，但一旦顯現便難以逆轉。為了滿足農業灌溉、工業與都市用水的不斷增長的需求，全球許多地區，特別是印度、中國華北平原、美國中西部高平原以及中東地區，長期以來以遠超過自然補注率的速度抽取地下水。這種不可持續的開採行為導致地下水位持續下降，抽水成本急遽上升，甚至使水井乾涸。長期而言，過度抽取地下水會引發一系列嚴重的環境地質問題，其中最顯著的是地層下陷。在沿海地區，地下水位下降還會導致海水入侵，汙染珍貴的淡水含水層，使其在數百年內都難以恢復。此外，地下水系統的耗竭會切斷與地表水體（如河流、湖泊、濕地）的水力聯繫，導致這些生態系統退化，生物多樣性喪失。因此，地下水管理已從單純的資源供給問題，轉變為關乎長期生態安全與世代公平的核心議題。

#### 7.4.1 全球水資源短缺的現況與熱點地區

全球水資源短缺已成為二十一世紀最嚴峻的環境挑戰之一，其影響範圍從生態系統健康延伸至人類社會的經濟穩定與糧食安全。水資源短缺的定義不僅指物理性

缺水，即淡水資源的總量不足以滿足區域需求，更包含經濟性缺水，即因基礎設施不足或管理不善導致水資源無法有效分配至使用者手中。根據聯合國水機制（UN-Water）的評估，全球約有四十億人口每年至少有一個月面臨嚴重水資源短缺，其中約十七億人生活在高度水資源壓力的流域。這種短缺現象並非均勻分布，而是高度集中在特定地理區域，形成所謂的「熱點地區」，這些地區的水資源供需失衡已達到臨界點，對當地社會經濟發展構成直接威脅。

水資源短缺的熱點地區主要受到自然氣候條件與人為活動的雙重影響。從自然條件來看，乾旱與半乾旱地區由於降水稀少且蒸發旺盛，本就屬於物理性缺水區域，例如非洲的薩赫勒地區、中東與北非地區，以及中亞部分內陸國家。這些地區的年降雨量遠低於全球平均值，且氣候變遷導致降雨模式更加不穩定，乾旱頻率與強度增加，進一步惡化水資源的可得性。然而，水資源短缺不僅發生在乾旱地區，許多降水相對豐富的區域也因人口密集、經濟活動強度大而面臨嚴重水壓力，例如印度北部恆河平原、中國華北平原以及美國加州中央谷地。這些地區的共同特徵是農業灌溉用水需求龐大，地下水超抽現象嚴重，導致含水層水位持續下降，形成大範圍的地下水漏斗區。

若以流域尺度進行分析，全球多條主要河流流域的水資源開發率已超過其環境承載閾值。例如，中東的約旦河流域，其水資源提取量已超過可再生水資源總量的百分之百，依賴不可再生的地下水與非常規水源來彌補缺口。南亞的印度河-恆河流域則因上游冰川融水變化、中下游灌溉需求激增以及水污染問題，面臨水量與水質的雙重危機。此外，跨國河流的水資源分配爭議往往加劇區域性水短缺的政治敏感性，如尼羅河、湄公河與幼發拉底河-底格里斯河流域，水權爭端成為影響區域穩定的潛在因素。這些熱點地區的水危機不僅是資源問題，更交織著貧困、治理能力薄弱與氣候脆弱性等複雜社會經濟議題。

衡量水資源短缺的指標通常包括「水資源壓力指數」，即年度總取水量佔可再生淡水資源總量的比例。當此比例超過百分之二十五，即被視為高水資源壓力；超過百分之七十五則為極高壓力。目前全球有超過三分之一的流域處於高或極高水資源壓力狀態，這些流域養育了全球近半數人口。值得注意的是，經濟發展模式與水資源管理政策顯著影響短缺的嚴重程度。許多熱點地區的農業部門消耗了總用水量的百分之七十至九十，且灌溉效率低下，大量水資源在輸送與田間應用過程中損失。都市化進程則加速了需求集中與水污染，使得可用水資源的品質與數量同步下降。因此，全球水資源短缺的現況實為自然水文條件與人類用水行為相互作用的結果，其解決方案必須同時考量氣候適應與用水效率的全面提升。

#### 7.4.2 氣候變遷加劇水文不穩定性

氣候變遷正深刻重塑全球水文循環的基本模式，加劇水文系統的不穩定性，使得水資源的時空分布更趨極端與難以預測。這種不穩定性主要體現在降水模式的改

變、蒸發散量的增加、冰雪儲量的消融，以及極端水文事件頻率與強度的提升。科學觀測數據明確顯示，全球暖化導致大氣持水能力增強，這使得許多地區的降水強度增加，但降水日數可能減少，導致降雨更趨集中於短時強降雨事件，而乾早期則可能延長。這種「旱澇並存」或「旱澇急轉」的現象，打破了傳統水文情勢相對穩定的假設，對現有水資源基礎設施的設計標準、供水系統的調度能力，以及農業灌溉的穩定性構成嚴峻挑戰。

具體而言，氣候變遷對水文不穩定性的加劇作用，可從幾個關鍵過程進行分析。首先，溫度上升直接加速地表水體與土壤水分的蒸發，並提高植物的蒸散作用，導致在相同降水條件下，陸域水資源的有效供給量可能減少。其次，高山冰川與積雪的加速消融，正在改變許多依賴融雪補注的河流水文情勢。這些河流的春季洪峰可能提前且量值增大，而夏季枯水期的流量則可能顯著減少，影響下游數億人口的農業灌溉與生活用水。例如，發源於青藏高原的亞洲主要河流，其上游冰川退縮已對中下游的水資源永續性構成長期威脅。

此外，氣候變遷透過改變大氣環流模式，影響季風系統的強度、時序與空間範圍。一些地區可能經歷季風降雨的延遲、減弱或異常增強，直接衝擊雨養農業與水庫蓄水時程。同時，海洋溫度升高也加劇了颱風、颶風等熱帶氣旋的強度，帶來更極端的暴雨與沿海風暴潮，不僅造成瞬間洪患，也可能導致淡水水體鹽化，破壞水資源品質。這種水文極端事件的增加，使得水資源管理從過去側重於「平均狀態」的規劃，必須轉向更能應對「變異性」與「不確定性」的韌性管理思維。

面對氣候變遷加劇的水文不穩定性，傳統的水資源工程與管理策略顯現出其局限性。過去依據歷史水文資料推估的「百年洪水」或「十年乾旱」頻率已發生變化，基礎設施的設計標準可能需要重新評估。更根本的是，水資源系統需要增強其適應性與彈性，例如發展多元供水來源、建設分散式蓄水設施、推廣耐旱作物、建立更靈活的水權交易與分配機制，並整合氣候預報資訊進行風險預警與動態調度。這意味著水資源治理必須從被動應對轉向主動適應，將氣候變遷的不確定性納入長期規劃的核心考量，以維繫社會經濟系統在水文劇烈波動下的穩定性與安全性。

### 7.4.3 水危機的社會經濟衝擊

水資源短缺不僅是自然資源的匱乏，更會引發一系列深遠且複雜的社會經濟衝擊，這些衝擊往往相互交織，形成難以解開的惡性循環。當水資源供應無法滿足基本需求時，首當其衝的是農業生產。農業是全球最大的淡水消耗部門，水危機直接導致灌溉用水不足，農作物產量下降，品質惡化。這不僅威脅農民的生計，更會推高糧食價格，加劇糧食不安全問題，特別是在高度依賴農業的發展中地區。糧價上漲會進一步侵蝕貧困家庭的購買力，導致營養不良與健康問題，形成從水危機到糧食危機再到健康危機的連鎖反應。

在工業與經濟層面，水危機會嚴重制約經濟發展。許多工業製程，如製造業、能源生產（特別是火力與核能發電的冷卻需求）以及礦業，都需要大量且穩定的水源。水資源短缺會迫使工廠減產甚至停工，直接衝擊工業產出與就業。同時，水資源不確定性會增加企業的營運成本與投資風險，可能導致資本外流，影響國家或區域的經濟競爭力。旅遊業，尤其是依賴自然景觀或水上活動的地區，也會因水資源枯竭或水質惡化而遭受重創，影響地方收入與就業機會。

水危機對社會結構與公共衛生構成嚴峻挑戰。當社區缺乏安全、充足的飲用水與基本衛生設施時，水媒疾病如霍亂、痢疾、傷寒等便極易爆發。公共衛生系統將承受巨大壓力，醫療成本攀升，社會生產力因人口健康受損而下降。此外，水資源的爭奪可能加劇社會緊張與衝突，無論是在社區內部、不同用水部門之間（如農業與工業爭水），或是跨越行政區乃至國界的流域範圍。歷史與當代案例顯示，水資源爭議常是引發社會動盪甚至武力衝突的潛在因子，威脅社會穩定與安全。

從更宏觀的視角看，水危機會加劇社會不平等與城鄉差距。弱勢群體、貧困社區以及農村地區通常更缺乏應對水短缺的資源與韌性，他們獲取安全用水的能力更弱，承受的負面健康與經濟影響也更大。而為了應對水危機，政府與家庭可能必須將原本用於教育、基礎建設或其他發展項目的有限資源，轉投於尋找替代水源或建設昂貴的供水設施上，這將排擠長期發展投資，阻礙社會進步。因此，水危機不僅是環境與資源問題，更是關乎經濟穩定、社會公平與人類福祉的核心發展議題。

#### 7.4.4 地下水過度抽取的長期後果

地下水過度抽取所引發的長期後果，不僅限於水資源量的減少，更會對地質結構、生態系統以及人類社會的永續性產生深遠且複雜的影響。其中最直接的物理效應是地下水位的持續下降，這導致水井必須鑽得更深才能取得水源，大幅增加了抽水的能源成本與經濟負擔。在許多依賴地下水進行大規模灌溉的農業區，例如印度旁遮普邦、美國加州中央谷地或中國華北平原，地下水位以每年數公尺的速度下降已成為常態。這種「採礦式」的水資源利用，實質上是耗竭了需要數百年甚至數千年才能自然補注的古老地下水儲量，是一種典型的不可持續行為。

長期超抽地下水所導致的另一項嚴重後果是地層下陷。當含水層中的水被大量抽出，原本由水壓支撐的土壤顆粒間孔隙會因壓力減小而逐漸壓實，這種壓實過程是不可逆的。全球許多沿海城市與農業區，如墨西哥市、曼谷、雅加達以及台灣的雲林、彰化地區，均面臨顯著的地層下陷問題。下陷不僅會損壞建築物、道路、橋樑與地下管線等基礎設施，更會使區域防洪能力下降，增加淹水風險與鹽水入侵的脆弱性。在沿海地區，地層下陷與海平面上升的效應相互疊加，對國土安全構成雙重威脅。

地下水過度抽取亦會破壞與地下水相關聯的地表生態系統。許多河流、湖泊、濕地與泉水的維生，依賴地下水的側向補注或湧出。當區域地下水位因超抽而大幅

降低時，這些地表水體會失去水源補給而逐漸乾涸，導致依賴其生存的動植物群落衰亡，生物多樣性喪失。例如，美國佛羅里達州部分濕地因地下水超抽而退化，影響了當地獨特的生態系。此外，地下水位的下降也會改變土壤的含水量與養分分布，進而影響陸域植被的生長，尤其是在半乾旱地區，可能加劇土地荒漠化的進程。

從水質角度來看，長期超抽可能引發或加劇地下水污染問題。地下水位下降可能改變地下水流的流向與速率，將污染物帶入更深、原本潔淨的含水層。在沿海地區，超抽導致淡水水壓降低，使得海水得以向內陸的含水層入侵，造成地下水鹽化，使其不再適用於灌溉或飲用。治理海水入侵極為困難且成本高昂，往往需要實施嚴格的地下水抽取管制與進行人工補注，但恢復過程極為緩慢。此外，在一些地質條件下，超抽可能使含水層中的砷、氟等天然有害物質濃度升高，對公共衛生構成長期風險。

這些長期後果凸顯了地下水資源管理的複雜性與緊迫性。地下水雖是隱藏於地下的資源，但其過度開發的影響卻是全面且顯而易見的，涉及地質安全、生態平衡與社會經濟永續。要扭轉此一趨勢，必須從觀念上將地下水視為需要謹慎管理的戰略儲備，而非取之不盡的日用資源，並透過科學監測、法制規範與替代水源開發等綜合性策略，才能避免無可挽回的後果，確保水資源的世代公平與永續利用。

## 7.5 水資源管理與保育

面對全球水資源短缺與水危機的嚴峻挑戰，有效的水資源管理與保育策略已成為維繫生態系統健康與人類社會永續發展的關鍵。水資源管理不僅涉及技術層面的創新與應用，更涵蓋了從流域尺度到跨國層級的制度設計、社會經濟調適以及生態倫理考量。傳統的水資源管理模式往往側重於供給面的擴張，例如興建水庫、開鑿深井或進行跨流域調水，然而這種以工程為導向的思維，在面對氣候變遷加劇的水文不確定性、生態系統服務退化以及日益複雜的用水競爭時，已顯露出其局限性。因此，當代的水資源管理與保育必須轉向更為整合、彈性與參與式的途徑，強調需求端管理、生態系統保護以及社會公平，以實現水資源的永續利用。

整合性流域管理是當今水資源治理的核心框架，其核心理念在於將流域視為一個完整的生態與社會經濟系統，統籌管理水、土、生物等自然資源，並協調上下游、左右岸以及不同用水部門之間的利益。這種管理方式超越了行政區劃的界線，要求政府部門、社區居民、產業界以及非政府組織等多元利害關係人的共同參與。透過建立流域管理委員會或類似機制，可以促進資訊共享、衝突協商與聯合行動，例如制定流域水資源分配計畫、推動點源與非點源污染控制、以及實施棲地復育工程。成功的整合性流域管理能夠在滿足人類用水需求的同時，維護河流的基本生態流量，保障水生生物棲地，並增強流域整體面對乾旱與洪澇的韌性。

在需求端管理方面，節水技術的研發與推廣扮演著至關重要的角色。農業作為全球最大的淡水消耗部門，其節水潛力尤為巨大。傳統的漫灌或溝渠灌溉效率低下，大量水資源在輸送與田間過程中因蒸發、滲漏而損失。滴灌、微噴灌等精準灌溉技術，能夠將水與養分直接輸送至作物根部，大幅提升用水效率，同時減少因逕流所導致的肥料與農藥流失。此外，透過調整耕作制度，例如選用耐旱作物品種或推行旱作農業，也能有效降低農業對灌溉水的依賴。在工業部門，推動製程用水循環再利用、採用冷卻水回收系統、以及實施清潔生產，不僅能減少取水量，也能降低廢水排放的污染負荷。都市與家庭節水則可透過推廣省水器具、建立階梯式水價制度、以及加強公眾教育來達成。

面對傳統淡水資源的極限，開發非傳統水源已成為許多缺水地區的重要選項。海水淡化技術，特別是逆滲透法，已日趨成熟並在全球許多沿海地區大規模應用，能夠將海水或半鹹水轉化為可供飲用或灌溉的淡水。然而，海水淡化過程能耗高昂，且濃鹽水的排放可能對海洋生態造成影響，因此必須搭配再生能源的使用與環境影響的謹慎評估。水資源再利用，或稱再生水利用，則是將處理後的生活污水或工業廢水，用於非飲用的目的，如景觀灌溉、工業冷卻、地下水補注甚至間接的飲用水補充。這種「從廢水到資源」的觀念，有助於實現水資源的循環利用，減輕對天然水體的取水壓力。先進的處理技術，如薄膜過濾、紫外線消毒等，能確保再生水的水質安全。

水權制度與跨境水資源治理是水資源管理中涉及社會公平與國際合作的核心議題。清晰、公平且具彈性的水權制度，是避免用水衝突、促進水資源有效配置的基礎。水權的界定需考量歷史用水慣習、生態需求以及社會正義，並建立透明的水權登記與交易市場，使水資源能流向更高價值的用途。在跨境河流、湖泊或地下含水層的治理上，由於水資源共享國家之間可能存在政治、經濟與安全利益的競爭，合作往往面臨挑戰。國際水法原則，如公平合理利用、不造成重大損害、以及事先通知與協商等，為跨境水合作提供了基本框架。透過建立聯合管理機構、共享水文數據、共同制定開發計畫與危機應變機制，各國能夠將潛在的水衝突轉化為合作契機，共同維護流域的永續發展。

### 7.5.1 整合性流域管理

整合性流域管理是一種以自然水文單元為基礎，將水資源、土地資源及相關生物資源進行整體規劃與管理的策略。其核心理念在於認識到流域內所有生態過程與人類活動的相互關聯性，水體的健康狀況不僅取決於水體本身的管理，更受到整個集水區內土地利用、植被覆蓋、土壤狀況以及各種人為排放的綜合影響。傳統的水資源管理往往將水體視為孤立的單元，或僅專注於單一問題如防洪或供水，導致治理措施相互矛盾甚至抵消。整合性流域管理則強調跨部門、跨領域的協作，將上游、中游與下游視為一個生命共同體，透過系統性的分析與規劃，協調經濟發展、社會需求與生態保護之間的平衡，以實現流域的永續利用。

在實踐層面上，整合性流域管理首先需要進行詳盡的流域診斷，這包括水文地質調查、水質監測、污染源盤點、生態棲地評估以及社會經濟活動分析。透過地理資訊系統等工具，管理者能夠繪製出流域的環境敏感地圖，識別出關鍵的污染熱區、水土流失高風險區以及重要的生態廊道。例如，對於一條受農業非點源污染影響的河川，管理策略可能不僅限於河岸的工程整治，更需向上游延伸，推動友善環境的農業耕作方式，建立緩衝綠帶以攔截逕流中的營養鹽，並同時考量當地農民的生計轉型，提供技術輔導或生態補貼，以減少管理措施的社會阻力。

這種管理方式也高度重視利益相關者的參與及跨行政區的合作。由於一個流域往往跨越數個縣市甚至國界，水資源的利用與污染問題常涉及複雜的權責歸屬與利益衝突。整合性流域管理因此致力於建立有效的協調機制，例如成立流域管理委員會，匯集中央政府、地方政府、社區居民、產業界、學術界及環保團體的代表，共同商議管理目標與行動方案。透過公開透明的資訊分享與決策過程，培養各方的流域認同感與共同責任，使管理政策更能反映在地需求並獲得廣泛支持。國際上如萊茵河、湄公河等跨境河流的合作治理經驗，都顯示了建立互信與共同管理架構的重要性。

最終，整合性流域管理的成功與否，取決於是否能夠發展並執行一套整合了工程、生態與社會經濟手段的適應性管理計畫。這可能包括興建或改善污水處理設施、實施水土保持工程、進行河川廊道的自然復育、訂定總量管制與排放許可制度、以及推動水權交易等經濟誘因工具。更重要的是，必須建立長期的監測與評估系統，定期檢視管理措施的成效，並根據氣候變遷、社會經濟發展等新興挑戰，動態調整管理策略。這種彈性且全面的管理思維，是應對當前複雜水資源危機，確保水質與水量安全，並維護流域生態系統健康與服務功能的根本途徑。

### 7.5.2 節水技術與需求端管理

節水技術與需求端管理是水資源保育策略中，直接針對用水效率提升與消費行為調整的關鍵手段。相較於供給端的開發與調度，需求端管理著重於透過技術創新、經濟誘因、法規規範與公眾教育等多元途徑，引導各用水部門減少不必要的水資源消耗，並提升每一單位水量的產出價值。此一管理思維的興起，反映了全球水資源管理典範的轉移：從過去以工程手段不斷擴大供給，轉向更為細緻地管理用水需求，以因應日益嚴峻的水資源短缺與生態壓力。需求端管理不僅能延緩或避免成本高昂的新水源開發計畫，更能減少能源消耗與環境衝擊，實現水資源利用的永續性。

在農業部門，節水技術的應用是提升灌溉效率的核心。傳統的漫灌或溝灌方式水分損失極大，透過改為滴灌或微噴灌等精準灌溉系統，可將水直接輸送至作物根部，大幅減少蒸發與逕流損失。這些系統常結合土壤溼度感測器與自動化控制，依據作物實際需水狀況進行智慧化灌溉排程。此外，選擇耐旱作物品種、調整耕作制

度以配合自然降雨節奏、以及利用覆蓋作物減少土壤水分蒸發，皆為重要的農業節水策略。這些技術與管理措施的整合，能在維持甚至提升農業產量的同時，顯著降低農業用水量，對於全球耗水量最大的農業部門而言，其節水潛力極為可觀。

工業部門的節水則著重於製程優化與循環利用。許多工業製程需要大量冷卻水或清洗用水，透過製程重新設計、採用乾式或半乾式生產技術，可從源頭減少用水需求。更為普遍的做法是建立廠內水循環系統，將使用過的水經適當處理後，回用於對水質要求較低的環節，例如將最終冷卻水回收作為初步清洗用水。此外，進行水平衡分析以偵測並修復管線漏損、採用高效能的水冷卻塔、以及回收冷凝水等，都是工業節水的常見措施。這些技術不僅減少淡水取用量，也降低了廢水排放量與處理成本，符合清潔生產與循環經濟的原則。

在都市與家庭用水方面，需求端管理結合了技術推廣與行為改變。技術層面包括推廣低流量水龍頭、省水馬桶、節水型洗衣機與洗碗機等高效用水器具，這些器具透過空氣混合、壓力調節或設計改良，能在不影響使用功能的前提下減少用水量。公共供水系統的漏損控制亦是都市節水的重點，透過壓力管理、管線更新與即時監測系統，可有效降低無收益水比例。行為改變則需透過公眾教育、水價結構設計與標章制度來推動，例如實施階梯式水價以反映水資源稀缺性，鼓勵民眾節約用水；或透過水效標章引導消費者選擇省水產品。這些措施需要政府、水務單位與民眾的協力合作，方能塑造節水型社會文化。

### 7.5.3 海水淡化與水資源再利用技術

面對全球水資源短缺日益嚴峻的挑戰，傳統的淡水來源已不足以滿足持續增長的需求，因此開發非傳統水源成為水資源管理的重要策略。海水淡化與水資源再利用技術，正是將原本無法直接利用或已使用過的水，轉化為符合特定標準之可用水源的關鍵工程手段。這兩類技術的發展，不僅能有效增加供水總量，更能降低對自然淡水體的依賴，提升水資源系統的韌性，特別是在乾旱地區、沿海都市以及水資源壓力巨大的島嶼國家，其戰略地位尤為突出。

海水淡化技術的核心在於將海水或高鹽度鹹水中的鹽分與雜質去除，以生產淡水。目前主流技術可分為兩大類：熱法與膜法。熱法主要包含多級閃蒸和多效蒸餾，其原理是透過加熱海水使其蒸發，再將蒸汽冷凝得到淡水，此類技術能耗較高，但產水純度極佳，且對進水水質要求相對寬鬆，常見於中東等能源豐富地區。膜法則以逆滲透技術為代表，利用高壓迫使海水通過半透膜，從而攔截鹽分與其他溶質，其能耗通常低於傳統熱法，且模組化設計使其更具彈性，已成為全球新建海水淡化廠的主流選擇。然而，海水淡化仍面臨能耗成本、高濃度鹵水排放對海洋生態的潛在影響，以及設備腐蝕與結垢等操作維護挑戰。

相較於從海洋取水，水資源再利用則是將都市生活污水或工業廢水經過適當處理後，重新應用於非飲用或甚至飲用目的。根據處理程度與用途，可區分為非飲用

性再利用與飲用性再利用。非飲用性再利用通常將污水處理至二級或三級標準，用於農業灌溉、工業冷卻、景觀澆灌、沖廁或地下水補注，此舉能大幅節省優質淡水。飲用性再利用則涉及更先進的處理程序，例如微濾、逆滲透與高級氧化技術的組合，將污水淨化至符合飲用水標準，其技術門檻與公眾接受度是主要挑戰。水資源再利用不僅創造了穩定的替代水源，也減少了污水排放對環境的負荷，實現了水在社會系統中的循環。

這兩項技術的發展與應用，必須置於整合性水資源管理的框架下審視。海水淡化雖能「開源」，但其高能耗特性可能與減碳目標衝突，因此結合再生能源驅動淡化廠，發展「綠色淡化」是重要趨勢。而水資源再利用的成功，則高度依賴完善的污水收集系統、先進可靠的處理技術、嚴謹的水質監測標準，以及公眾溝通與教育。在實務上，許多地區採行混合策略，例如將海水淡化水作為基礎供水，同時推動再生水用於工業與市政雜用，以優化成本與效益。未來技術研發將持續聚焦於降低能耗、開發更耐用的膜材料、提升資源回收效率（如從濃鹽水中提取有價礦物質），並透過智慧水務系統實現更精準的供需管理與水質安全保障。

#### 7.5.4 水權制度與跨境水資源治理

水權制度是規範水資源所有權、使用權、管理權及收益權的法律與行政框架，其設計直接影響水資源的分配效率、使用公平性與永續性。傳統上，水權制度可分為河岸權制度、先佔權制度以及公共信託制度等主要類型。河岸權制度常見於水資源相對豐沛的地區，其核心在於將水資源的使用權賦予毗鄰水體的沿岸土地所有者，但通常限制其不得對水體流量造成重大損害。此制度強調水資源與土地的天然連結，但在水資源稀缺或需長距離調水時，可能缺乏彈性。先佔權制度則發展於水資源匱乏的乾旱與半乾旱地區，其原則是「先到先得」，即最早將水資源投入有益使用的使用者擁有優先權。此制度鼓勵水資源的開發利用，並允許水權與土地所有權分離，便於水權的轉讓與交易，形成水市場的基礎。然而，若缺乏完善的監管，可能導致過度取用與生態基流無法保障的問題。公共信託制度則將水資源視為全民共有的公共財，由政府作為受託人進行管理，以維護公共利益與生態永續為目標。現代水權制度多趨向混合型態，結合上述制度的優點，並納入用水許可、總量管制、生態保留水權等機制，以因應日益複雜的水資源挑戰。

跨境水資源治理則涉及共享河流、湖泊或地下水層的兩個或多個國家或行政區之間的水資源管理合作。全球約有三分之一的跨界河流缺乏合作管理框架，使得水資源爭端成為潛在的區域衝突來源。有效的跨境水資源治理需建立在國際水法原則之上，例如公平合理利用原則、不造成重大損害原則以及合作原則。公平合理利用原則要求沿岸國在考慮流域地理、水文、氣候、社會經濟需求及人口依賴度等因素下，共享水資源利益。不造成重大損害原則則限制任何國家在使用跨境水資源時，不得對其他沿岸國造成顯著危害。合作原則則體現在數據與資訊交換、聯合監測、共同規劃以及建立常設流域組織等方面。成功的案例，如萊茵河保護委員會或多瑙

河保護委員會，展示了透過締結國際條約、設立聯合機構並實施整合性流域管理計畫，能夠有效協調水資源開發、汙染防治與生態保護。

然而，跨境水資源治理面臨諸多挑戰，包括國家主權與流域整體利益之間的矛盾、上下游國家權力不對等、氣候變遷加劇的水文不確定性，以及流域內各國政治關係與發展優先序的差異。為克服這些挑戰，當代治理趨勢強調從單純的水量分配，轉向更全面的「水效益」共享，例如共同投資水利基礎設施、發展聯合預警系統以應對洪旱災害、以及透過水電合作或生態補償機制創造共同利益。此外，引入第三方調解、強化國際金融機構在融資中附加合作條件，以及提升公民社會與學術界在對話過程中的參與度，皆有助於建立互信並推動合作。水權制度與跨境治理實為一體兩面，健全的國內水權管理是負責任的國際流域行為的基礎，而穩定的跨境合作框架則能為流域內各國的永續水資源管理提供外部保障與激勵，共同邁向水安全與區域和平的目標。