

第7章 污水工程



污水工程是環境工程的重要分支，專注於收集、處理和處置生活污水、工業廢水和雨水等各類廢水。這一領域的主要目標是保護水環境、保障公共健康，並實現水資源的循環利用。污水工程涉及多學科知識，包括水力學、微生物學、化學、生態學等，同時也需要考慮經濟、社會和環境等多方面因素。

污水收集系統是污水工程的起點，主要包括管網和泵站。管網設計需要考慮地形、人口分布和未來發展等因素，確保污水能夠有效收集並輸送到處理設施。在設計中，需要特別注意管道坡度、流速和自清能力，以防止淤積和腐臭問題。合流制和分流制是兩種常見的排水體制，前者將雨水和污水混合收集，後者則分開處理。近年來，低影響開發 (Low Impact Development) 理念在雨水管理中得到廣泛應用，通過增加下滲、蒸發等自然過程來減少徑流量。

污水處理是污水工程的核心環節，通常包括預處理、初級處理、二級處理和深度處理等階段。預處理主要去除大顆粒固體和浮油，包括格柵、沉砂和隔油等單元。初級處理通過沉澱去除可沉降固體，二級處理則利用生物方法去除有機物和營養鹽。活性污泥法

(activated sludge process)是最常用的二級處理工藝，它利用微生物群落來降解污染物。除此之外，生物膜法、厭氧處理等工藝也在不同情況下得到應用。

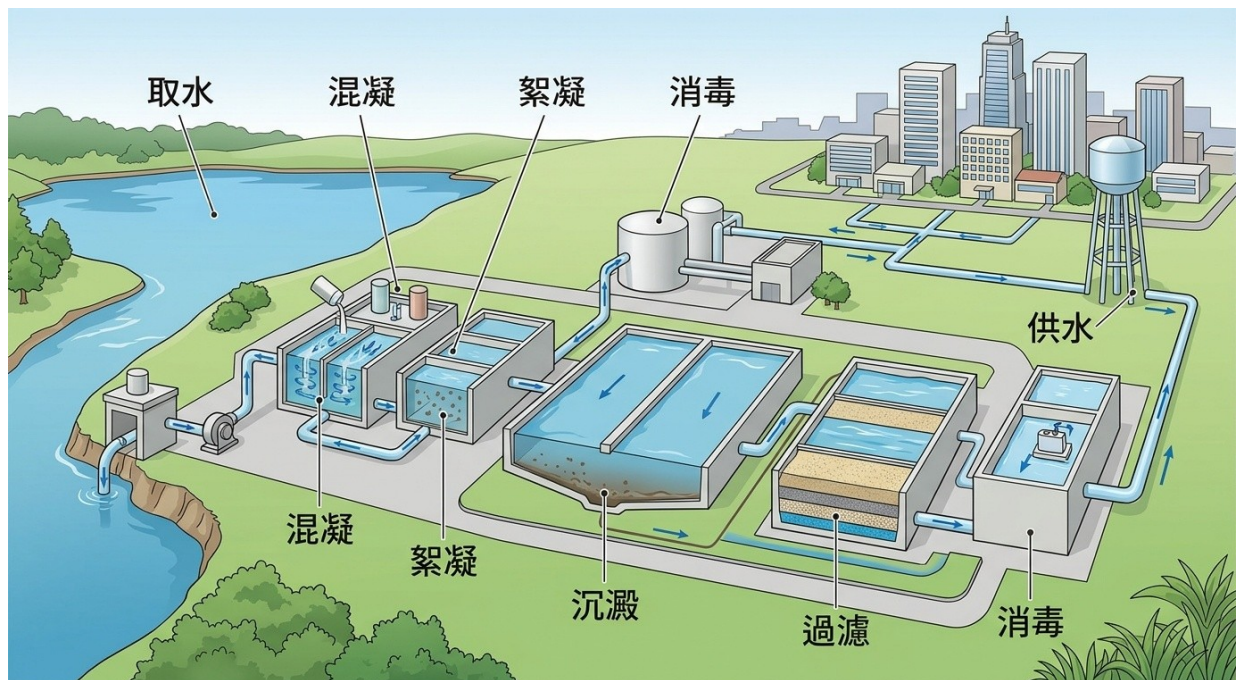
深度處理旨在進一步去除常規處理後殘留的污染物，如氮、磷等營養鹽，以及一些難降解有機物。常見的深度處理技術包括化學除磷、生物脫氮、高級氧化等。膜生物反應器(Membrane Bioreactor, MBR)技術結合了生物處理和膜分離，能夠產生高品質的出水，在污水回用領域得到廣泛應用。

污泥處理和處置是污水處理過程中不可或缺的環節。污泥經過濃縮、穩定、脫水等處理後，可以進行填埋、焚燒或土地利用。厭氧消化是一種常用的污泥穩定方法，不僅可以減少污泥體積，還能產生生物氣用於能源回收。污泥資源化利用，如製作建材、肥料等，是當前研究的熱點之一。

污水回用是污水工程的重要發展方向，旨在將處理後的污水用於工業冷卻、農業灌溉、景觀用水等非飲用目的。這不僅能夠節約水資源，還能減少污染物排放。污水回用需要考慮水質安全、經濟性和公眾接受度等多方面因素。

工業廢水處理是污水工程的一個特殊領域，由於不同行業廢水的特性差異很大，往往需要針對性的處理方案。預處理和源頭控制在工業廢水管理中尤為重要，可以大大減輕後續處理的負擔。高級氧化、電化學處理等新興技術在處理難降解有機物方面顯示出良好的效果。

污水處理廠的自動化和智能化是近年來的發展趨勢。通過採用線上監測儀器、過程控制系統和數據分析技術，可以實現處理過程的實時監控和優化，提高處理效率和穩定性。能源效率和碳排放也日益受到關注，污水處理廠正在從單純的污染治理設施向資源回收設施轉變。厭氧氨氧化(Anammox)等新型脫氮工藝的應用，可以顯著減少能耗和碳排放。污水工程面臨的挑戰包括新興污染物的處理、氣候變化的影響、資源能源回收等。微塑料、藥物殘留物等新型污染物的去除需要開發新的處理技術。氣候變化可能導致極端降雨增加，對合流制溢流(Combined Sewer Overflow)的控制提出了更高要求。此外，如何在污水處理過程中實現氮、磷、能源等資源的高效回收，也是當前研究的重點。



7.1 污水收集系統設計

污水收集系統是城市基礎設施的重要組成部分，其主要功能是收集並輸送生活污水和工業廢水至污水處理廠進行處理。一個設計良好的污水收集系統不僅能有效地收集污水，還能防止污水滲漏、減少環境污染，並確保公共衛生安全。

在進行污水收集系統設計時，首先需要考慮服務區域的地形特徵和人口分佈。設計人員需要仔細分析地形圖，確定污水流向和主要收集幹管的位置。同時，還需要預測未來的人口增長和工業發展趨勢，以確保系統具有足夠的容量來應對長期需求。

污水收集系統的核心組成部分是管網系統。管網設計需要考慮多個因素，包括管道材料、管徑、坡度和埋深等。常用的管道材料包括混凝土、塑料(如聚乙烯和聚氯乙烯)和鑄鐵等。選擇管道材料時需要考慮其耐腐蝕性、強度、使用壽命和成本等因素。管徑的選擇則取決於預計的污水流量和允許的充滿度。一般來說，污水管道的最小管徑不應小於 200 毫米，以防止堵塞。

管道坡度的設計至關重要，它直接影響污水的流速和自清能力。坡度過小會導致污水流速過慢，造成沉積物堆積；坡度過大則會增加施工難度和成本。設計時通常採用曼寧

公式(Manning's Formula)計算流速，確保污水在管道中的流速在 0.6 到 3 米/秒之間。管道埋深的確定需要考慮防凍、承載能力和與其他地下設施的協調等因素。

在污水收集系統中，除了管道外，還需要設計多種輔助設施。檢查井(人孔)是最常見的輔助設施之一，它們通常設置在管道連接處、轉彎處和直線段上，間距一般不超過 60 至 80 米。檢查井不僅便於管道的檢查和清理，還能為通風提供出口，防止管道內產生有害氣體。

對於地形較為平坦的地區，可能需要設計提升泵站來將污水提升到更高的位置，以確保污水能夠順利流向處理廠。提升泵站的設計需要考慮進水方式、泵的類型和數量、泵房的佈局等因素。常用的泵類型包括離心泵和螺旋泵等。

在設計污水收集系統時，還需要考慮雨水的處理方式。有些城市採用合流制系統，將污水和雨水一同收集；而其他城市則採用分流制系統，將污水和雨水分開收集。分流制系統雖然初期投資較大，但能減輕污水處理廠的負擔，提高處理效率。對於採用合流制的城市，需要設計溢流井來應對暴雨情況，防止系統過載。

污水收集系統的設計還需要考慮未來的擴展和維護需求。設計時應預留足夠的空間和接口，以便日後系統的擴建和升級。同時，還要考慮系統的可維護性，設計便於檢修的結構和設施。

隨著城市化進程的加快和環保要求的提高，污水收集系統的設計正在不斷創新。一些新技術，如真空收集系統(Vacuum Sewerage System)和壓力收集系統(Pressure Sewerage System)，在特定情況下顯示出優勢。這些創新技術能夠減少開挖深度，降低施工成本，並提高系統的靈活性。

此外，智能化管理也逐漸應用於污水收集系統。通過安裝各種感測器和監測設備，可以實時監控管網的運行狀況，包括流量、水質、管道堵塞等情況，從而實現預防性維護，提高系統的運行效率和可靠性。

污水泵站是污水收集系統中的關鍵組成部分，其主要功能是將低處的污水提升到較高位置，以便污水能夠繼續通過重力流向下游管網或污水處理廠。在地形起伏較大或管網埋深較深的地區，污水泵站的設計和建設尤為重要，它們能夠克服地形障礙，確保污水系統的正常運行。

污水泵站的設計首先需要考慮其位置的選擇。理想的泵站位置應該靠近主要污水來源，同時還要考慮到周邊環境、土地利用、地質條件等因素。泵站的選址還需要評估其對周邊居民的潛在影響，如噪音和氣味等，並採取相應的緩解措施。

泵站的容量設計是整個設計過程中最為關鍵的環節之一。設計人員需要根據服務區域的人口、工業分佈和未來發展規劃，準確預測污水量的變化趨勢。通常，泵站的設計需要考慮日均流量、最大日流量和高峰小時流量等參數。除了常規污水量，還需要考慮雨季時可能的額外流量，特別是在合流制排水系統中。泵站的容量通常會預留一定的餘量，以應對未來可能的需求增長和系統擴張。

污水泵的選擇是泵站設計的核心環節。常用的污水泵類型包括潛水式離心泵、立式離心泵和螺旋離心泵等。潛水式離心泵因其安裝靈活、占地小、維護方便等優點，在現代污水泵站中應用廣泛。泵的選型需要考慮揚程、流量、效率、抗堵塞能力等因素。為了提高系統的可靠性和靈活性，通常會安裝多台泵並採用並聯運行方式，以應對不同的流量情況。同時，還需要配備備用泵，以確保在主泵維修或故障時系統能夠正常運行。

泵站的進水結構設計也極為重要。典型的進水結構包括格柵、沉砂池和集水池。格柵用於攔截大型固體物，防止其進入泵體造成損壞。沉砂池則用於去除水中的砂礫，減少對泵和管道的磨損。集水池的設計需要考慮水力特性，確保水流均勻分配到各個泵 inlet，同時還要防止產生渦流和氣穴現象。集水池的容積設計需要平衡泵的啟停頻率和污水的滯留時間，通常採用時間積分法或體積法進行計算。

泵站的控制系統是確保其高效運行的關鍵。現代污水泵站普遍採用自動化控制系統，通過水位感測器、流量計等設備實時監測系統運行狀態，並根據預設的邏輯自動控制泵的啟停。變頻控制技術的應用使得泵站能夠根據實際流量需求調整泵的轉速，大大提高了系統的能源效率。此外，遠程監控和操作系統的應用使得管理人員能夠實時掌握泵站的運行狀況，並在必要時進行遠程干預。

污水泵站的設計還需要特別注意臭氣控制。由於污水中含有大量有機物，在厭氧條件下容易產生硫化氫等惡臭氣體。這不僅會對周邊環境造成影響，還可能危及工作人員的健康和安全。常見的臭氣控制措施包括密閉設計、負壓抽氣和生物除臭等。在泵站設計中，需要考慮通風系統的佈置，確保新鮮空氣的充分供應和有害氣體的有效排除。

安全性是污水泵站設計中不可忽視的重要方面。除了常規的電氣安全和機械安全措施外，還需要特別注意有毒有害氣體的防護。泵站內部應安裝氣體檢測報警裝置，並配備必要的個人防護設備。此外，泵站的設計還需要考慮防洪措施，特別是對於位於低窪地區的泵站，需要採取相應的防護設計，確保在極端天氣條件下能夠正常運行。

能源效率是現代污水泵站設計中越來越受重視的一個方面。除了選用高效泵和採用變頻控制外，還可以考慮採用節能照明、熱回收等技術。在條件允許的情況下，可以考慮利用可再生能源，如太陽能或風能，為泵站提供部分電力，減少對傳統能源的依賴。

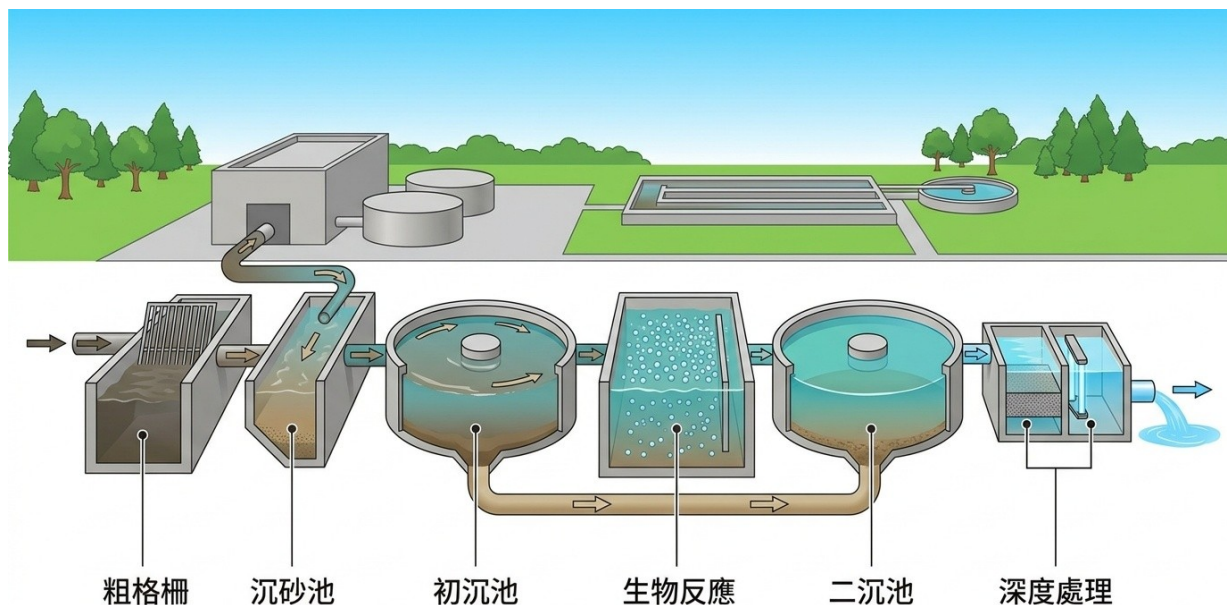
污水泵站的維護管理也是設計階段需要考慮的重要因素。良好的泵站設計應該便於日常檢查和維護，包括預留足夠的操作空間、設置適當的吊裝設備、配備必要的備用零件等。此外，泵站的設計還應考慮未來可能的擴建需求，預留適當的空間和接口。

在污水泵站的建設過程中，還需要注意施工對周邊環境的影響。對於市區內的泵站建設，可能需要採用特殊的施工方法，如沉井法或頂管法，以減少對周邊交通和居民生活的干擾。施工過程中還需要做好水土保持和生態保護工作，最大限度地減少對環境的影響。

隨著城市化進程的加快和環保要求的提高，污水泵站的設計正在朝著更加智能化、節能化和環保化的方向發展。例如，一些先進的污水泵站開始採用人工智能技術優化運行

策略，或者利用大數據分析預測設備故障。同時，一些創新的泵站設計正在探索如何將泵站與周邊環境更好地融合，甚至將其打造成為城市景觀的一部分。

總的來說，污水泵站的設計是一項綜合性的工程，需要平衡技術、經濟、環境和社會等多方面的因素。一個優秀的污水泵站不僅能夠高效可靠地完成污水提升的任務，還應該能夠適應城市的長遠發展需求，為建設可持續發展的城市污水系統做出貢獻。



7.2 污水泵站設計

污水泵站是城市污水處理系統中不可或缺的組成部分，負責將低處或高處的污水輸送至污水處理廠。有效的污水泵站設計不僅確保污水的順利排送，還能提升整個污水處理系統的運行效率和可靠性。本文將從污水泵站的功能與類型、設計原則、主要組成部分、選擇泵型及其選擇標準、電氣控制系統設計、維護與管理等方面進行詳細探討。

首先，污水泵站的主要功能是克服地形和重力帶來的排水障礙，確保污水能夠穩定、高效地流向處理設施。根據地形特點和排水需求，污水泵站可分為地面泵站和地下泵站。地面泵站通常適用於地勢較為平坦的地區，便於設備的安裝和維護；地下泵站則適用於地形複雜或空間有限的區域，具有較好的隱蔽性和防護性。

在設計污水泵站時，需遵循若干設計原則。首先，應確保泵站的設計容量能夠滿足未來的污水排送需求，考慮城市規模的擴展和人口增長的影響。其次，設計應注重系統的可靠性和冗餘性，防止單點故障導致整個系統的癱瘓。此外，應重視能源的高效利用，選擇節能型泵及智能控制系統，降低運行成本和環境影響。

污水泵站的主要組成部分包括污水進水管道、泵房、泵組、電氣控制系統和排放管道。進水管道負責將污水引入泵房，通常配備有進水篩網以防止大塊固體物質進入泵組。泵房是整個泵站的核心，需具備良好的防水、防腐和通風設施，確保設備的安全運行。泵組由多台泵組成，根據排水需求選擇單泵或多泵併行運行，以實現不同的流量和揚程。

選擇合適的泵型是污水泵站設計中的關鍵步驟。常見的污水泵型包括多級離心泵、螺桿泵和隔膜泵等。多級離心泵因其結構簡單、運行穩定和維護方便，被廣泛應用於大多數污水泵站。螺桿泵適用於含有較多固體物質的污水，具有較好的自吸能力和抗堵性能；隔膜泵則適合於需要高揚程和高壓力的排水系統，並能有效防止污水回流。

電氣控制系統的設計需確保泵組的自動化運行和故障檢測。現代污水泵站多採用 PLC（可編程邏輯控制器）和 SCADA（監控與數據採集）系統，實現對泵站運行狀態的實時監控和遠程控制。控制系統應具備自動啟停、故障報警和數據記錄功能，保障泵站的穩定運行和及時維護。

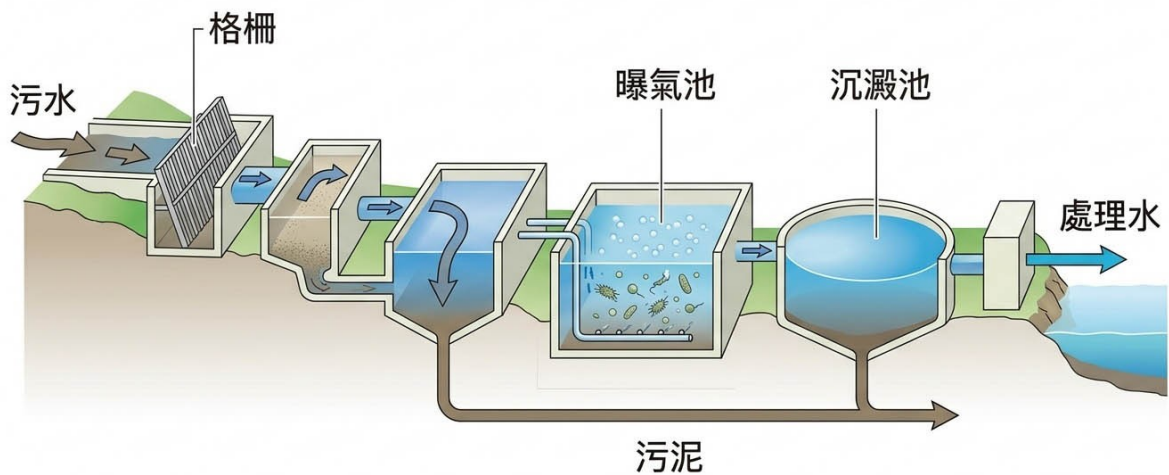
維護與管理是確保污水泵站長期穩定運行的重要環節。定期的設備檢查和維護能夠及時發現和處理潛在問題，防止設備故障和停機事故。維護工作包括泵組的清潔、潤滑油的更換、電氣元件的檢測以及防腐措施的檢查等。此外，應建立完善的運行記錄和維護檔案，為未來的運營和管理提供依據。

在設計和建設污水泵站時，還需考慮環境保護和社會影響。泵站的位置應選擇在不影響周邊居民生活和生態環境的區域，並設置必要的隔音和防塵設施，減少對周圍環境的干擾。此外，應制定應急預案，應對自然災害和突發事件，保障泵站的安全運行。

7.3 污水初級處理

污水初級處理是整個污水處理流程中的重要環節，主要目的是去除污水中的懸浮固體和部分有機物，為後續的生物處理奠定基礎。初級處理主要依靠物理過程來實現污染物的去除，通過重力沉降、篩分等方法，能夠顯著減輕後續處理單元的負荷，提高整個處理系統的效率。

初級處理的第一步通常是粗格柵和細格柵。粗格柵主要用於攔截污水中的大型漂浮物，如塑料袋、木塊等，防止這些物質進入後續處理單元造成設備損壞。粗格柵的柵距通常在 50-100 毫米之間。細格柵則用於去除較小的懸浮物，柵距一般在 10-25 毫米之間。現代污水處理廠常採用機械清掃式格柵，可以自動清除攔截的固體物質，提高操作效率。



永續社epa

在格柵之後，污水通常會進入沉砂池。沉砂池的主要功能是去除污水中的砂礫、泥土等無機顆粒。這些顆粒如果不及時去除，會對後續的處理設備造成磨損，並在生物反應池中堆積，減少有效容積。沉砂池的設計基於斯托克斯定律(Stokes' Law)，通過控制水流速度和停留時間，使比重大於水的顆粒在重力作用下沉降。常見的沉砂池類型包括平流式、曝氣式和渦流式等。其中，曝氣式沉砂池因其能同時去除砂粒和部分有機物而被廣泛採用。

初級處理的核心單元是初沉池，也稱為一次沉澱池。初沉池主要依靠重力沉降原理去除污水中的可沉降固體。在此過程中，污水中的懸浮物在重力作用下緩慢沉降至池底，形成初級污泥。同時，一些輕於水的物質如油脂會浮至水面，可通過刮除裝置去除。初沉池的設計需要考慮表面負荷率、水力停留時間等參數。常見的初沉池形式包括長方形和圓形兩種，其中圓形初沉池因結構緊湊、佔地面積小而受到青睞。

初沉池的效率直接影響後續生物處理的負荷。一般情況下，初沉池可以去除 50-70% 的懸浮固體和 25-40% 的生化需氧量(BOD)。為了提高初沉池的處理效率，一些污水處理廠會採用化學強化初級處理(CEPT, Chemically Enhanced Primary Treatment)技術。這種技術通過添加化學藥劑如鋁鹽或鐵鹽，促進懸浮顆粒的凝聚和沉降，可以將懸浮固體的去除率提高到 80-90%，BOD 的去除率提高到 50-80%。

除了傳統的重力沉降，一些新型的初級處理技術也在不斷發展。例如，微篩技術(Microscreening)利用極細的篩網（孔徑通常小於 100 微米）過濾污水，可以有效去除細小懸浮物。旋流分離技術(Vortex Separation)則利用離心力原理分離污水中的固體顆粒，這種技術特別適用於處理合流制排水系統中的初期雨水。

浮選法(Flotation)是另一種值得關注的初級處理技術，特別適用於去除油脂和輕質懸浮物。溶氣浮選(Dissolved Air Flotation, DAF)是最常見的浮選方法，它通過向污水中注入細小氣泡，使污染物附著在氣泡表面並上浮到水面，從而實現分離。這種技術在處理含油廢水和一些工業廢水中表現出色。

在初級處理過程中產生的污泥稱為初級污泥，其處理和處置是初級處理不可分割的一部分。初級污泥含水率高，有機物含量豐富，易腐爛，因此需要及時處理。常見的初級污泥處理方法包括濃縮、消化和脫水等。濃縮可以減少污泥體積，降低後續處理的能耗。消化過程則可以穩定污泥，減少臭味，同時產生沼氣，這是一種可再生能源。脫水處理可以進一步減少污泥體積，便於最終處置或利用。

初級處理單元的自動化控制和監測也是現代污水處理廠的重要組成部分。通過安裝各種感測器和監測設備，可以實時監控進水水質、處理效率、設備運行狀態等參數。這些數據不僅可以用於優化處理過程，還可以為後續的生物處理單元提供重要的運行依據。

除臭系統在初級處理中也扮演著重要角色。由於初級處理主要涉及未經處理的原污水，臭氣問題尤為突出。常見的除臭方法包括活性炭吸附、生物除臭和化學洗滌等。良好的除臭設計不僅可以改善工作環境，還能減少對周邊居民的影響。

初級處理單元的維護管理同樣重要。定期檢查和清理格柵、及時排除沉砂池和初沉池中的沉積物、保持刮泥機等機械設備的正常運轉，都是確保初級處理效率的關鍵。同時，還需要定期進行水質監測，評估處理效果，及時發現並解決問題。

值得注意的是，隨著污水處理技術的發展和排放標準的日益嚴格，一些小型污水處理廠開始探索跳過初級處理直接進行生物處理的可能性。這種做法雖然可以節省初期投資和運行成本，但對後續生物處理單元提出了更高的要求，需要更精細的設計和更嚴格的運行管理。

初級處理雖然技術相對簡單，但其在整個污水處理流程中的重要性不容忽視。良好的初級處理不僅能夠顯著減輕後續處理單元的負荷，還能提高整個系統的穩定性和可靠性。隨著城市化進程的加快和環保要求的提高，初級處理技術也在不斷創新和改進，朝著更高效、更節能、更環保的方向發展。例如，一些研究正在探索如何在初級處理階段回收有價值的資源，如磷酸鹽等。這些創新不僅有助於提高污水處理的效率，還能為實現循環經濟做出貢獻。

7.4 污水二級生物處理

污水二級生物處理是污水處理過程中的核心環節，主要利用微生物的代謝活動來去除水中的溶解性有機物和懸浮物。這一階段通常能夠去除 80-90% 的生化需氧量(BOD)和懸

浮固體(SS)，大大改善出水水質。二級生物處理的原理是模擬自然水體的自淨過程，但通過控制環境條件和優化工藝參數，大大加速了這一過程。

二級生物處理系統主要由生物反應器和固液分離單元組成。生物反應器提供了微生物生長和代謝的環境，而固液分離單元則用於將處理後的水與微生物分離。根據微生物的生長方式，二級生物處理系統可以分為懸浮生長系統和附著生長系統兩大類。

懸浮生長系統中，微生物以懸浮狀態存在於水中，形成活性污泥。活性污泥法是最為常見和廣泛應用的二級生物處理工藝。在傳統的活性污泥系統中，污水首先進入曝氣池，在這裡，通過曝氣設備向水中輸入氧氣，為微生物的生長和代謝提供必要的氧氣。微生物在代謝過程中不斷增殖，形成活性污泥。活性污泥中包含了各種細菌、原生動物和後生動物，它們共同組成了一個複雜的生態系統。

在曝氣池中，有機物被微生物氧化分解，部分轉化為二氧化碳和水，部分則用於微生物的生長和繁殖。同時，氮氮等營養物質也在硝化細菌的作用下被氧化。曝氣池的設計需要考慮多個因素，包括有機負荷、水力停留時間、混合液懸浮固體濃度(MLSS)、溶解氧濃度等。曝氣系統的選擇和設計也至關重要，常見的曝氣方式包括表面曝氣、鼓風曝氣和射流曝氣等。

經過生物氧化後的混合液進入二沉池進行固液分離。在二沉池中，活性污泥在重力作用下沉降，形成污泥層，而上清液則作為處理後的出水排出。二沉池的設計需要考慮表面負荷率、固體負荷率等參數。為了維持系統中適當的微生物濃度，部分沉降的污泥會被回流到曝氣池，這個過程稱為污泥回流。剩餘的污泥則作為剩餘污泥排出系統，進行進一步處理。

除了傳統的活性污泥法，還有多種改進和衍生的工藝。氧化溝(Oxidation Ditch)是一種改進的活性污泥工藝，它採用環形反應池，通過機械攪拌裝置保持水流循環，同時實現充氧和混合。氧化溝具有抗衝擊負荷能力強、運行穩定等優點，特別適用於中小型污水處理廠。

序批式活性污泥法(SBR, Sequencing Batch Reactor)是另一種常用的活性污泥變體。SBR在同一個反應器中完成進水、反應、沉澱和出水的全過程，通過時間來分隔不同的處理階段。這種工藝具有操作靈活、佔地面積小的優點，適用於處理水量變化較大的情況。

為了提高處理效率和降低能耗，許多新型的活性污泥工藝被開發出來。例如，厭氧-缺氧-好氧工藝(A2O)和改良的巴登堡工藝(Modified Bardenpho Process)等多級生物脫氮除磷工藝，能夠在去除有機物的同時實現生物脫氮除磷。這些工藝通過創造不同的環境條件（厭氧、缺氧、好氧），促進特定微生物的生長，從而達到更好的處理效果。

膜生物反應器(MBR, Membrane Bioreactor)是近年來發展迅速的一種新型二級處理技術。MBR將活性污泥法與膜分離技術相結合，用膜組件代替傳統的二沉池進行固液分

離。這種工藝可以維持更高的活性污泥濃度，提高處理效率，同時產水水質優良，可直接用於回用。然而，MBR 的能耗較高，膜污染問題也是需要解決的技術難題。

附著生長系統是另一大類二級生物處理工藝，其特點是微生物以生物膜的形式附著在固體載體表面。生物接觸氧化法(Biological Contact Oxidation)是一種典型的附著生長工藝，它使用塑料、陶瓷等材料作為填料，在填料表面形成生物膜。當污水流過填料時，溶解性有機物被生物膜吸附和降解。這種工藝具有耐衝擊負荷、不易產生污泥膨脹等優點。

生物濾池(Trickling Filter)是另一種常見的附著生長工藝。它利用碎石、塑料等材料作為填料，污水從上方均勻分布並滴濾而下，在填料表面形成生物膜。生物濾池的優點是能耗低、操作簡單，但處理效率相對較低，且易受溫度影響。

旋轉生物接觸器(RBC, Rotating Biological Contactor)也屬於附著生長系統。它由一系列圓盤組成，這些圓盤部分浸沒在污水中並緩慢旋轉。微生物在盤面上形成生物膜，通過盤體的旋轉實現與空氣和污水的交替接觸，從而達到降解有機物的目的。RBC 適用於小型污水處理設施，具有能耗低、抗衝擊負荷能力強等優點。

在二級生物處理過程中，除了碳的去除，氮和磷的去除也越來越受到重視。生物脫氮主要通過硝化-反硝化過程實現。在好氧條件下，氨氮被硝化細菌氧化為硝酸鹽；在缺氧條件下，硝酸鹽被反硝化細菌還原為氮氣。生物除磷則主要依靠聚磷菌的代謝特性，通過創造厭氧-好氧交替的環境條件，促使聚磷菌過量攝取磷。

二級生物處理系統的運行控制是一個複雜的過程，需要根據進水水質、水量變化等因素不斷調整操作參數。常見的控制參數包括溶解氧濃度、污泥回流比、剩餘污泥排放量等。現代污水處理廠越來越多地採用自動化控制系統，通過在線監測設備實時監控水質參數，並根據預設的控制策略自動調整工藝參數，以達到最佳的處理效果和能源效率。

二級生物處理過程中產生的剩餘污泥是污水處理廠需要面對的一大挑戰。剩餘污泥中含有大量的有機物和病原體，需要經過適當的處理才能安全處置或利用。常見的污泥處理方法包括濃縮、穩定、調理、脫水等。近年來，污泥的資源化利用也越來越受到重視，如將污泥用於製作建材、生產生物燃料等。

隨著環保要求的不斷提高，二級生物處理技術也在不斷創新和發展。例如，顆粒污泥技術(Granular Sludge Technology)通過培養高密度、沉降性能好的污泥顆粒，可以大幅提高處理效率和出水水質。厭氧氨氧化(Anammox)技術則為氨氮的去除提供了一條新的途徑，特別適用於處理高氨氮濃度的廢水。此外，基因工程技術的應用也為改造和優化處理微生物提供了新的可能性。

二級生物處理作為污水處理的核心環節，在改善水環境、保護生態系統方面發揮著關鍵作用。隨著城市化進程的加快和工業的發展，污水處理面臨著越來越大的挑戰。如何在保證處理效果的同時，提高能源效率、減少碳排放，成為當前研究的重點方向。同時，

如何更好地將污水處理與資源回收相結合，實現污水處理廠向資源回收中心的轉變，也是未來發展的重要趨勢。

7.5 水質高級處理技術

隨著環境保護要求的不斷提高和水資源短缺問題的日益突出，高級處理技術在污水處理中扮演著越來越重要的角色。這些技術不僅能夠進一步去除傳統二級處理難以去除的污染物，還能為水的回用和再生提供可能。高級處理技術通常應用於二級處理之後，目的是去除殘留的懸浮物、溶解性有機物、營養鹽（如氮和磷）以及微量有機污染物等。

深度過濾是一種常用的高級處理技術，主要用於去除水中的懸浮物和膠體顆粒。常見的深度過濾介質包括石英砂、無煙煤、石榴石等。多介質過濾器通過組合不同密度和粒徑的過濾材料，可以在整個濾層深度上實現更有效的固體去除。反沖洗是維持過濾效率的關鍵操作，通過定期的反向水流沖洗，可以去除濾層中積累的污染物。深度過濾不僅可以提高出水的透明度，還能為後續的消毒過程提供更好的條件。

活性炭吸附是去除水中溶解性有機物和微量有機污染物的有效方法。活性炭具有巨大的比表面積和複雜的孔隙結構，能夠有效吸附各種有機物。顆粒活性炭(GAC)和粉末活性炭(PAC)是兩種常用的形式。GAC通常用於固定床反應器中，水流通過炭層實現吸附。當吸附達到飽和時，需要進行再生或更換。PAC則直接加入水中，與水充分接觸後通過沉澱或過濾去除。活性炭吸附對於去除水中的色度、臭味物質以及一些難降解的有機污染物（如農藥、藥物殘留）特別有效。

離子交換技術是去除水中離子形式污染物的有力工具。這種技術利用離子交換樹脂選擇性地吸附水中的特定離子，同時釋放出無害的離子。離子交換廣泛應用於軟化水（去除鈣、鎂離子）和脫鹽處理。在污水高級處理中，離子交換特別適用於去除氨氮和重金屬離子。當交換能力耗盡時，可以通過再生液（如鹽水）恢復樹脂的交換能力。離子交換技術操作靈活，可以根據水質要求選擇不同類型的樹脂。

高級氧化技術(AOPs)是一類能夠產生高活性氧化物種（如羥基自由基）的處理方法，可以氧化分解各種難降解有機污染物。常見的AOPs包括臭氧氧化、芬頓氧化、光催化氧化等。臭氧氧化不僅能夠直接氧化有機物，還能在某些條件下產生羥基自由基，進一步提高氧化能力。紫外光與過氧化氫或二氧化鈦的組合可以產生高效的光催化氧化系統。這些技術對於去除農藥、內分泌干擾物、藥物殘留等微量有機污染物特別有效。然而，高級氧化技術的能耗較高，且可能產生有毒的中間產物，需要謹慎使用。

膜技術在高級水處理中的應用日益廣泛。根據膜孔徑的大小，可以分為微濾(MF)、超濾(UF)、納濾(NF)和反滲透(RO)。微濾和超濾主要用於去除懸浮物和大分子有機物，可以作為傳統沉澱和過濾的替代。納濾能夠去除二價離子和部分有機物，特別適用於軟

化水和去除色度。反滲透則可以去除幾乎所有的溶解性物質，廣泛應用於海水淡化和高純度水的製備。膜技術的優點是出水品質穩定、占地面積小，但面臨著膜污染和能耗高的挑戰。

生物活性炭(BAC)技術結合了生物降解和活性炭吸附的優點。在BAC系統中，活性炭不僅作為吸附介質，還為微生物提供了生長載體。隨著時間的推移，活性炭表面形成生物膜，可以降解部分被吸附的有機物，延長炭床的使用壽命。BAC對於去除生物可降解有機物(BDOC)和同化有機碳(AOC)特別有效，有助於控制水中的微生物再生長潛力。

電化學處理技術在高級水處理中也顯示出巨大潛力。電解氧化可以直接或間接氧化水中的污染物，特別適用於處理難降解有機物和氨氮。電解還原則可用於去除硝酸鹽等氧化性污染物。電凝聚技術通過電極溶解產生凝聚劑，可以有效去除懸浮物和膠體。這些技術的優點是操作靈活、自動化程度高，但能耗相對較高。

生物膜法除磷是一種新興的高效除磷技術。通過培養特定的除磷菌群，形成高磷積累能力的生物膜，可以實現磷的高效去除。這種技術與傳統的化學除磷相比，具有污泥產量低、運行成本低的優點。

高級氮去除技術也在不斷發展。短程硝化-反硝化(SND)技術通過控制溶解氧濃度，使硝化過程停留在亞硝酸鹽階段，然後直接進行反硝化，可以節省氧氣和碳源。厭氧氨氧化(Anammox)技術利用特殊的細菌將氨氮和亞硝酸鹽直接轉化為氮氣，特別適用於處理高氨氮、低碳氮比的廢水。

零價鐵技術在去除水中的硝酸鹽、重金屬和某些有機污染物方面顯示出良好的效果。納米零價鐵由於其巨大的比表面積和高反應活性，在環境修復和水處理領域受到廣泛關注。然而，納米材料的潛在環境風險仍需進一步評估。

光催化氧化技術不斷創新，新型光催化材料的開發為提高處理效率提供了可能。例如，摻雜金屬離子或非金屬元素的二氧化鈦光催化劑可以拓展光響應範圍，提高可見光利用率。石墨烯基複合光催化材料則表現出優異的電子傳輸性能和光催化活性。

超臨界水氧化(SCWO)技術是處理高濃度有機廢水的有效方法。在超臨界條件下（溫度和壓力均高於水的臨界點），水表現出獨特的溶劑性質，可以快速氧化分解各種有機物。這種技術特別適用於處理一些難降解的工業廢水。

電除鹽技術，如電滲析(ED)和電去離子(EDI)，在脫鹽和高純水製備方面有獨特優勢。這些技術通過電場驅動離子遷移，實現水中離子的選擇性去除。相比反滲透，電除鹽技術在處理某些特定廢水時能耗更低。

藻類處理系統作為一種生態友好的高級處理方法受到關注。藻類不僅能夠吸收水中的氮、磷等營養物質，還能通過光合作用產生氧氣，為好氧微生物提供氧源。此外，收穫的藻類可用於生產生物燃料或其他有價值的產品。

隨著微電子技術和人工智能的發展，智能化水處理系統正在成為現實。這些系統能夠實時監測水質參數，並根據水質變化自動調整處理工藝，優化能源和藥劑使用，提高處理效率。

高級處理技術的選擇需要綜合考慮水質要求、經濟性、能耗、運行維護等多方面因素。通常需要將多種技術組合使用，以達到最佳的處理效果。例如，臭氧-生物活性炭(O3-BAC)工藝結合了臭氧氧化和生物降解的優勢，能夠有效去除有機物和微量污染物。超濾-反滲透(UF-RO)組合則常用於製備高品質再生水。

高級處理技術不僅應用於市政污水處理，在工業廢水處理、地下水修復、飲用水深度處理等領域也發揮著重要作用。隨著水質標準的不斷提高和新型污染物的出現，高級處理技術將在保護水環境、保障水安全方面發揮越來越重要的作用。同時，如何降低這些技術的能耗和成本，提高其可持續性，也是未來研究的重要方向。

7.6 污泥處理與處置

污泥處理與處置是污水處理過程中不可或缺的環節，也是整個污水處理系統中最為複雜和具有挑戰性的部分之一。污泥主要來源於污水處理的各個階段，包括初沉池、生物反應池和二沉池等。這些污泥含有大量的有機物、病原體、重金屬和其他潛在有害物質，如果不經過適當處理就直接排放或利用，將會對環境和人類健康造成嚴重威脅。

污泥處理的首要目標是減少污泥體積、穩定有機物、去除病原體，使污泥便於運輸、處置或再利用。污泥處理通常包括濃縮、穩定、調理、脫水等幾個主要步驟。每個步驟都有其特定的目的和相應的技術選擇。

污泥濃縮是污泥處理的第一步，目的是減少污泥的含水量，從而減小體積。常用的濃縮方法包括重力濃縮、浮力濃縮和機械濃縮。重力濃縮利用污泥顆粒的沉降性能，在重力作用下使污泥沉積並濃縮。這種方法適用於初級污泥，但對於活性污泥效果較差。浮力濃縮則是通過向污泥中注入細小氣泡，使污泥顆粒附著在氣泡上浮至水面，從而實現濃縮。這種方法特別適用於活性污泥的濃縮。機械濃縮包括離心濃縮和重力帶式濃縮等，可以快速有效地濃縮各種類型的污泥，但能耗較高。

污泥穩定是為了減少污泥中易腐敗有機物的含量，控制臭味，並降低病原體數量。常用的穩定方法包括厭氧消化、好氧消化和化學穩定。厭氧消化是最常用的污泥穩定方法之一，它在無氧條件下通過微生物的作用將有機物分解為甲烷和二氧化碳。這個過程不僅可以顯著減少污泥量，還能產生沼氣，是一種重要的能源回收方式。傳統的厭氧消化包括中溫消化（35°C左右）和高溫消化（55°C左右），高溫消化雖然效率更高，但能耗也更大。近年來，溫相分離厭氧消化技術得到了廣泛應用，它通過將酸化階段和甲烷生成階段分開，可以提高整個系統的穩定性和效率。

好氧消化是在有氧條件下進行的，微生物將有機物氧化分解為二氧化碳和水。這種方法雖然效率較低，但操作簡單，適用於小型污水處理廠。化學穩定通常使用石灰等鹼性物質提高 pH 值，抑制微生物活動，從而達到穩定的目的。這種方法簡單快速，但會增加污泥的總量。

污泥調理是為了改善污泥的脫水性能。常用的調理方法包括化學調理和物理調理。化學調理通常使用無機凝聚劑（如鐵鹽、鋁鹽）或有機高分子絮凝劑。這些藥劑可以破壞污泥膠體結構，釋放出束縛水，從而提高脫水效果。物理調理方法包括熱處理、冷凍融化等，這些方法通過改變污泥的物理結構來提高其脫水性能。

污泥脫水是污泥處理中的關鍵步驟，目的是進一步減少污泥體積，便於後續的運輸和處置。常用的脫水設備包括帶式過濾機、離心脫水機、板框壓濾機等。帶式過濾機工作原理是將污泥夾在兩條多孔濾帶之間，通過重力、擠壓和剪切作用實現脫水。這種設備操作簡單，適用範圍廣，但脫水效果相對較差。離心脫水機利用離心力將水從污泥中分離出來，脫水效果好，但能耗較高。板框壓濾機通過高壓將水從污泥中擠出，可以達到很高的乾度，但操作較為複雜。

近年來，一些新型的脫水技術也在不斷發展。例如，電滲透脫水技術利用電場作用加速水分的遷移，可以顯著提高脫水效果。熱水解技術則通過高溫高壓處理破壞污泥結構，不僅可以提高後續的厭氧消化效率，還能大幅提高污泥的脫水性能。

經過處理的污泥最終需要進行處置或利用。傳統的污泥處置方法包括填埋、焚燒和農業利用等。填埋是最簡單的處置方法，但會佔用大量土地，且存在滲濾液污染地下水的風險。焚燒可以大幅減少污泥體積，並可以回收熱能，但投資和運行成本較高，且存在二噁英等有害物質排放的風險。農業利用是污泥資源化的重要途徑，污泥中含有豐富的有機質和營養元素，可以改善土壤結構，增加土壤肥力。然而，污泥中可能含有的重金屬和病原體是農業利用面臨的主要挑戰。

為了實現污泥的資源化利用，近年來出現了許多創新的處置方法。污泥堆肥是一種將污泥轉化為有機肥料的方法，通過控制溫度、濕度和通氣條件，促進有機物的分解和腐熟。堆肥產品可用於園林綠化、土壤改良等。污泥製磚是另一種資源化利用方式，通過將脫水污泥與黏土混合，經過成型、乾燥和焙燒，製成建築用磚。這種方法不僅可以消納大量污泥，還能節約原料資源。

污泥熱解是一種新興的處理技術，在無氧或低氧條件下，通過高溫（通常在 400-800°C）使污泥中的有機物發生熱化學反應。這個過程可以產生生物炭、生物油和可燃氣體。生物炭可用作土壤改良劑或活性炭原料，生物油和可燃氣體則可作為能源利用。熱解技術具有能源回收效率高、減量效果好的優點，但技術較為複雜，投資成本高。

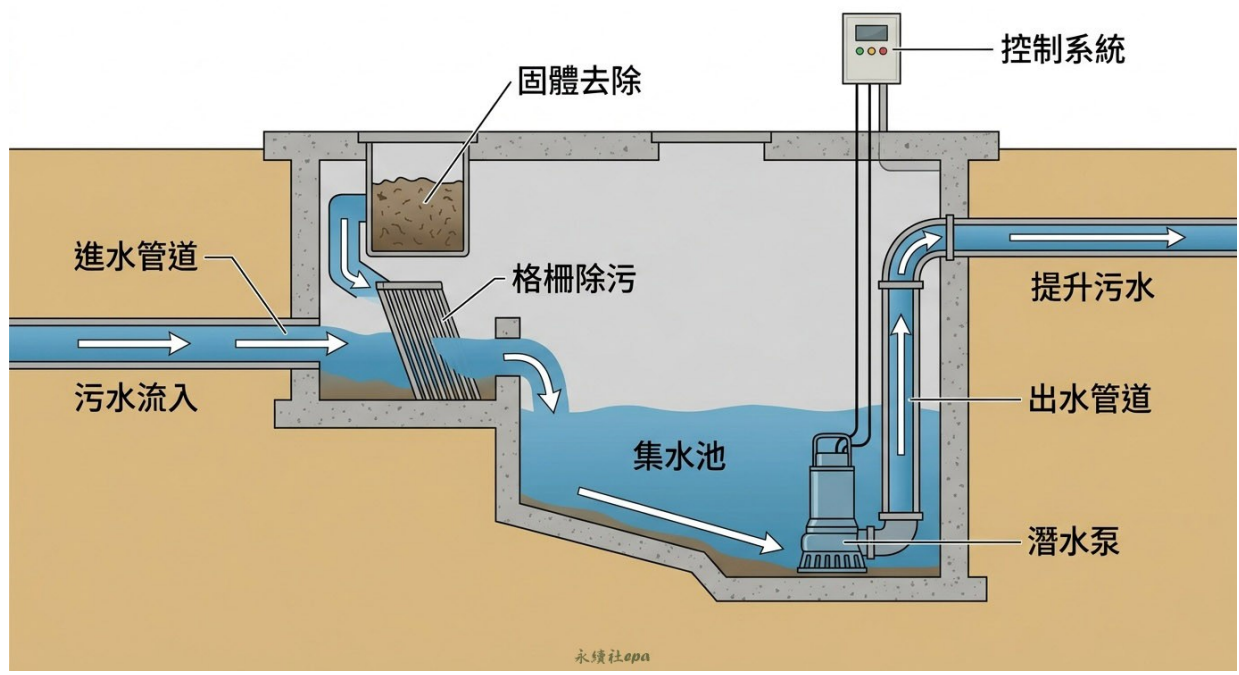
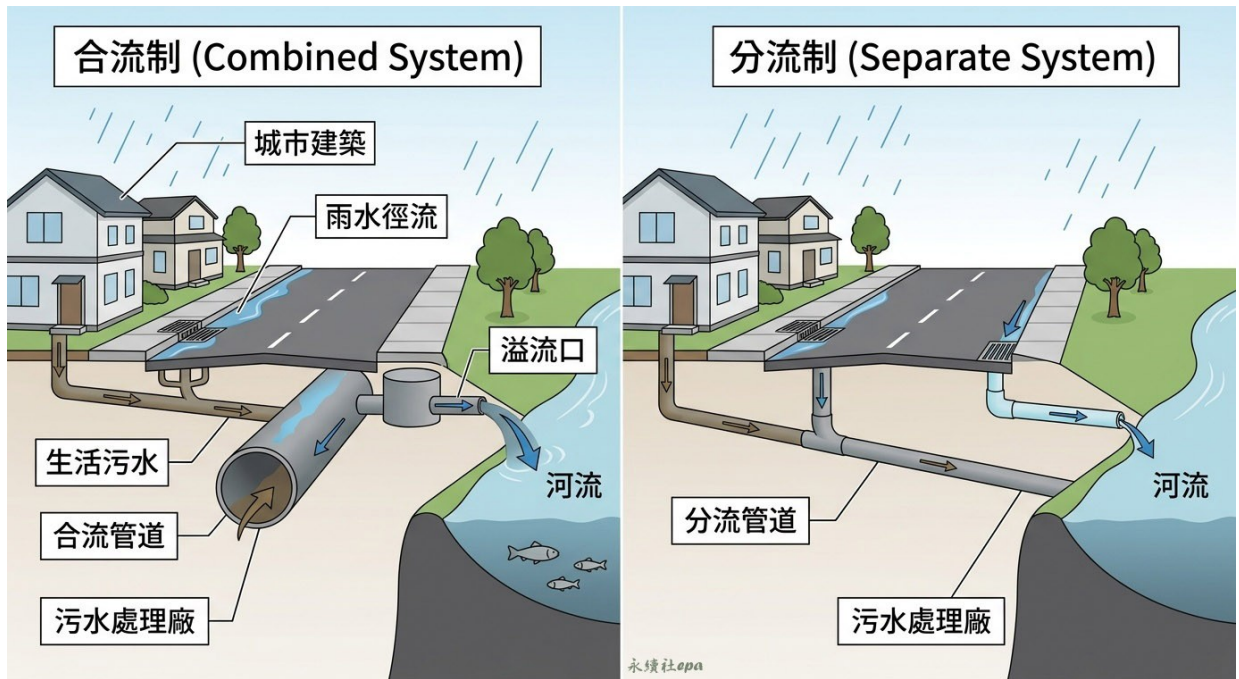
濕式氧化技術是處理高含水率污泥的有效方法。在高溫高壓條件下，利用氧氣或空氣氧化分解污泥中的有機物。這種技術可以大幅減少污泥量，且處理後的液相可以回流到污水處理系統，固相則可以作為建材原料利用。

污泥氣化技術將污泥在高溫（通常超過800°C）和控制氧氣條件下轉化為合成氣（主要由一氧化碳和氫氣組成）。合成氣可以直接燃燒發電，也可以作為化工原料使用。這種技術具有能源回收效率高、環境友好的特點，但對污泥含水率要求較高，通常需要先進行乾燥處理。

隨著環保要求的提高和資源意識的增強，污泥處理與處置正朝著減量化、穩定化、無害化和資源化的方向發展。新型的處理技術不斷湧現，如超臨界水氧化、電漿處理等，這些技術雖然目前成本較高，但在特定領域顯示出巨大潛力。同時，污泥中有價值物質的回收也受到越來越多的關注。例如，從污泥中回收磷酸鹽，不僅可以減少水體的富營養化風險，還能為磷資源的可持續利用做出貢獻。

此外，污泥處理與處置的全生命週期評估越來越受重視。這種評估方法考慮了從污泥產生到最終處置的全過程，包括能源消耗、溫室氣體排放、資源利用效率等多個方面，有助於選擇最優的處理處置方案。

污泥處理與處置是一個複雜的系統工程，需要根據當地的具體情況，如污泥特性、處理規模、環境要求、經濟條件等，選擇合適的技術路線。同時，還需要考慮與主體污水處理工藝的協調性，以及對整個污水處理廠運行的影響。只有通過科學的規劃和設計，合理的運行管理，才能實現污泥的安全、經濟、環保處理與處置，為水環境保護和資源循環利用做出貢獻。



7.7 水回用技術

水回用技術是現代水資源管理中不可或缺的一部分，它通過對處理後的污水進行深度處理，使其達到特定用途的水質標準，從而實現水資源的循環利用。隨著全球水資源壓力的增加和環境保護意識的提高，水回用技術在城市規劃、工業生產和農業灌溉等領域發揮著越來越重要的作用。

水回用的主要目的是減少對新鮮水資源的需求，同時減少污水排放對環境的影響。根據回用水的用途，可以將水回用分為城市雜用水回用、工業用水回用、農業灌溉用水回用和間接飲用水回用等類型。每種用途都有其特定的水質要求，因此需要採用不同的處理工藝。

城市雜用水回用主要包括景觀用水、道路清洗、車輛沖洗、消防用水等。這類回用水的處理工藝相對簡單，通常在二級處理的基礎上增加過濾和消毒步驟即可達到要求。常見的處理流程包括絮凝沉澱、砂濾和氯消毒。在一些要求較高的情況下，可能還需要增加活性炭吸附或膜過濾等深度處理單元。

工業用水回用是水回用技術應用最廣泛的領域之一。不同工業行業對用水質量的要求差異很大，從冷卻水到鍋爐補給水，水質標準跨度很大。對於冷卻水等要求較低的用途，簡單的處理如沉澱、過濾和軟化可能就足夠了。而對於電子工業等要求極高純度水的行業，則需要採用反滲透、離子交換等先進處理技術。工業水回用不僅可以節約水資源，還能減少工業廢水的排放，對環境保護具有重要意義。

農業灌溉用水回用是水資源匱乏地區常用的水回用方式。這種回用方式需要特別注意控制水中的鹽分、重金屬和病原體含量。常見的處理工藝包括生物處理、砂濾、消毒等。在一些情況下，可能還需要進行脫鹽處理，以防止土壤鹽鹼化。值得注意的是，回用水中的氮、磷等營養物質對農作物生長有益，可以減少化肥的使用。

間接飲用水回用是水回用技術中要求最高的一種形式。它通常包括將處理後的水注入地下水或地表水源，經過自然系統的進一步淨化後，再作為飲用水源使用。這種回用方式需要採用最先進的處理技術，如微濾-反滲透-高級氧化(MF-RO-AOP)組合工藝，以確保水質的安全性。同時，還需要建立嚴格的監測系統和應急預案。

膜技術在水回用中扮演著核心角色。微濾(MF)和超濾(UF)膜可以有效去除懸浮物和大分子有機物，常用作預處理單元。納濾(NF)膜能夠去除二價離子和部分有機物，適用於軟化和脫色。反滲透(RO)膜則可以去除幾乎所有的溶解性物質，是製備高品質回用水的關鍵技術。然而，膜技術也面臨著膜污染、能耗高等挑戰，需要不斷改進膜材料和優化運行策略。

生物活性炭(BAC)技術在水回用中的應用越來越廣泛。它結合了生物降解和活性炭吸附的優點，可以有效去除生物可降解有機物和微量有機污染物。BAC 不僅可以提高水質，還能降低後續處理單元的負荷，延長膜的使用壽命。在一些水回用系統中，臭氧-生物活性炭(O₃-BAC)組合工藝顯示出 excellent 的處理效果。

高級氧化技術在去除難降解有機物和微量污染物方面發揮著重要作用。紫外光-過氧化氫(UV-H₂O₂)、臭氧-過氧化氫(O₃-H₂O₂)等組合工藝可以產生大量的羥基自由基，有效氧化分解各種有機污染物。這些技術特別適用於處理含有農藥、藥物殘留、內分泌干擾物等難降解污染物的水。

離子交換技術在某些特定的水回用場景中具有獨特優勢。例如，在工業用水回用中，離子交換可以用於去除硬度、鹽分和特定的離子污染物。在一些情況下，選擇性離子交換樹脂可以用於回收水中的有價物質，如氮氮、重金屬等。

消毒是水回用處理的最後一道關鍵步驟，目的是確保水的微生物安全性。除了傳統的氯消毒外，紫外線消毒和臭氧消毒在水回用中得到了廣泛應用。這些新型消毒技術具有高效、無殘留的優點，但需要注意控制消毒副產物的生成。

在水回用系統的設計和運行中，水質穩定性是一個重要的考慮因素。由於回用水的水源通常是污水處理廠的出水，其水質可能存在較大波動。為了應對這一挑戰，水回用系統通常採用多重屏障的設計理念，即通過多個處理單元的組合來確保出水水質的穩定性。同時，在線監測和自動控制系統的應用也有助於及時調整處理參數，保證水質。

水回用系統的能源效率是另一個重要的研究方向。由於許多高級處理技術（如膜過濾、高級氧化）都具有較高的能耗，如何提高能源利用效率成為了一個關鍵問題。一些創新的解決方案包括使用太陽能驅動的膜蒸餾系統、能量回收裝置的應用、以及優化系統運行策略等。

隨著納米技術的發展，一些新型的水處理材料也在水回用中得到應用。例如，納米纖維膜具有更高的通量和更低的能耗；石墨烯基複合材料在吸附和膜分離中顯示出優異的性能；納米光催化材料則可以在溫和條件下實現污染物的降解。這些新材料的應用為提高水回用效率開闢了新的途徑。

水回用技術的發展還需要考慮新興污染物的問題。隨著分析技術的進步，越來越多的微量有機污染物被檢出，如藥物和個人護理品(PPCPs)、全氟化合物(PFCs)等。這些物質往往難以通過常規處理方法去除，需要開發針對性的處理技術。例如，高級氧化-生物處理組合工藝在去除這些新興污染物方面顯示出良好的效果。

水回用系統的智能化管理是提高系統效率和可靠性的重要手段。通過引入物聯網、大數據分析和人工智能等技術，可以實現水回用系統的實時監控、預測性維護和優化運行。例如，基於機器學習的水質預測模型可以幫助操作人員提前做出調整，避免水質波動；智能決策支持系統則可以根據實時數據自動調整處理參數，實現系統的最優化運行。

在水回用項目的實施過程中，公眾接受度是一個不容忽視的因素。許多研究表明，公眾對回用水，特別是用於直接或間接飲用的回用水，存在心理障礙。因此，除了技術層面的努力，還需要通過科普教育、示範工程等方式提高公眾對水回用的認識和接受度。同時，建立透明的水質監測和信息公開機制也有助於增強公眾信心。

水回用技術的發展不僅需要單一技術的突破，更需要系統集成和優化。例如，如何將水回用系統與城市水循環系統有機結合，實現水資源的梯級利用；如何將水回用與能源回收、資源回收相結合，實現水處理設施的多功能化；如何根據當地的水資源情況、經濟條件和技術水平選擇最適合的水回用方案等，都是需要深入研究的問題。

此外，水回用技術的發展還需要相應的政策支持和經濟激勵機制。例如，制定合理的回用水價格政策，建立水權交易制度，提供稅收優惠或補貼等措施，都可以促進水回用技術的推廣應用。同時，建立健全的水回用標準體系和監管機制也是確保水回用安全的重要保障。

水回用技術的發展為緩解水資源短缺、保護水環境提供了重要的技術支撐。隨著技術的不斷進步和應用經驗的積累，水回用將在建設節水型社會、實現水資源可持續利用中發揮越來越重要的作用。然而，水回用技術的應用也面臨著技術、經濟、社會等多方面的挑戰，需要各相關領域的專家和決策者共同努力，以實現水資源的高效利用和生態環境的持續改善。