

述评与讨论

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 14. 001

城乡涉水产业链结构性问题分析与高质量发展路径探索

刘晴靓^{1,2}, 陈梅³, 乔庆⁴, 朱永楠², 马军⁵

(1. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038; 2. 流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038; 3. 水利部节约用水促进中心, 北京 100053; 4. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 5. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 水资源是维护生态安全与促进经济繁荣的关键基础资源。受水资源禀赋与气候变化叠加制约,我国供需失衡问题逐渐凸显。地下水超采、污染跨区域转移和低效用水交织,水环境与生态风险在流域与城乡尺度上存在安全隐患。现行的城乡水系统在减污降碳、资源循环利用、节水、再生水绿色低碳利用方面有很大的挖潜空间。本文主要探讨水生态与水环境治理链、节水与非常规水利用链、水务基础产业链和智慧化数字化协同链的四链并进框架,以源头控污、废物与污水资源化利用、生态修复、节水增源、技术升级和数字调度协同发力,提出城乡涉水产业链系统化解决方案,为城乡涉水产业链的高质量发展提供路径与参考。

关键词: 城乡涉水产业链; 高质量发展; 水资源; 水处理技术; 系统治理

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)14-0001-10

Structural Bottlenecks and Pathways to High-quality Development in the Urban-Rural Water-related Industry Chains

Liu Qingliang^{1,2}, Chen Mei³, Qiao Qing⁴, Zhu Yongnan², Ma Jun⁵

(1. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, Beijing 100038, China; 3. Water Conservation Promotion Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Water resources are fundamental to maintaining ecological security and supporting economic prosperity. Under the combined constraints of water resources endowment and climate change, the supply-demand imbalance problem is becoming increasingly evident. Issues such as groundwater over-exploitation, cross-regional pollution transfer, and inefficient multi-sectoral water usage are becoming intertwined, amplifying water environment risks at both watershed and urban-rural scales. There is high innovation potential in the existing urban and rural water systems in terms of source

基金项目: 京津冀环境综合治理国家科技重大专项(2026ZD1216900); 面向2040的从源头到龙头的城市饮用水水质安全保障技术发展战略研究项目(L2324217); 城乡水资源与水环境全国重点实验室(哈尔滨工业大学)自主课题(2025DX02); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(WR110145B0082025)

通信作者: 马军 E-mail: majun@hit.edu.cn

separation and nutrient recovery, waste materials recycling, water consumption reduction, and wastewater reclamation. This study proposes a four-chain integrated framework, encompassing the water ecology and environmental governance chain, the water-saving and unconventional water utilization chain, the water sector basic industry chain, and the intelligent digital coordination chain. By advancing coordinated efforts in source pollution control, resource utilization of waste and sewage, ecological restoration, water conservation and source expansion, technology upgrading, and digital scheduling, the paper presents a systematic solution for the integrated development of urban-rural water-related industries. The framework aims to provide strategic guidance and practical reference for promoting high-quality development across the water sector.

Keywords: urban-rural water-related industry chains; high-quality development; water resources; water treatment technology; systematic management

我国面临水资源短缺与过度开发并存的严峻局面,气候变化又进一步加剧了水资源短缺的压力。一方面,降水在时间和空间上的分布不均趋势进一步凸显,叠加高温带来的蒸发量增加,显著地限制了可用水资源总量。现有城乡调蓄体系对雨水的缓冲容量不足,难以应对水资源的时空动态变化。另一方面,经济发展快速地区在农业、工业与城市用水等方面呈现刚性增长趋势,需求量持续上升。未来我国不仅将面临水量不足的问题,还将承受水质恶化和水生态退化的叠加风险。来自工业生产、农业种植以及水产畜牧养殖的多源污染物排入水体,污染路径日益复杂,复合型污染问题逐渐加剧。同时,受径流减少、异地生物入侵、湿地面积缩减与生物多样性下降等因素影响,自然水体的自净能力不断减弱。水量、水质与水生态问题相互交织,形成复杂的风险体系,成为制约我国水安全与城乡高质量发展的核心难题。尽管我国在水资源配置、污染防治、非常规水源利用及智慧水务等方面取得了诸多研究进展,但缺乏从整体规划上考虑城乡水资源可持续开发利用,缺乏对城乡涉水产业链的系统梳理与整体统筹,难以实现整体优化,存在工程投资效益不高、运行管理费用高、设施可靠性不足、水质安全难以保障等问题。

本文聚焦水资源分布不均、水污染空间迁移、用水效率偏低、技术装备智能化水平不高、区域发展不平衡、数智协同不足以及高端技术滞后等问题,提出以水生态与水环境治理链、节水与非常规水利用链、水务基础支撑链和数智化协同产业链为核心的产业协同路径,打通从源头减污、废物与污

水资源回用、过程节水、技术设施提升到智能调度的闭环流程,旨在为城乡涉水产业链的高质量发展提供理论支撑与实践路径。

1 城乡涉水产业链结构性瓶颈

1.1 水资源禀赋不均

我国水资源总量有限,年均可利用量仅约25 782.5亿 m^3 ,约占全球可用淡水资源的6%,却需支撑全球近1/5人口的生活和生产用水。在气候变化的影响下,这一天然紧约束态势正日益加剧。近年来,全国降水年际变化和季节性波动增强,尽管总量略有回升,但年平均值依然呈下降趋势,同时蒸发量持续攀升。极端暴雨与干旱事件发生概率提高,地表水的调蓄能力承受明显压力。在空间分布上,“南丰北缺、东多西少”格局突出,尽管气候变化导致降雨量北移,但出现明显极端降雨趋势,以及洪水和干旱并存问题。为缓解区域供需失衡,我国实施了一系列跨流域调水工程,这些工程在有效缓解城市用水短缺方面发挥了重要作用。然而,这些工程输送距离长、高扬程运行能耗大、运维成本高,还可能引发生物异地迁徙或失控繁殖等潜在生态风险^[1]。此外,复杂的调度体系对管网设备状态、突发事件应对能力的依赖性强,整体输水效率与系统可靠性亟待提升^[2]。为进一步解决城乡用水问题,需要从系统治理角度探寻实现城乡水资源可持续发展的对策。

在我国水资源体系中,地下水具有不可替代的战略地位。它不仅是城乡居民的重要饮用水来源,还是维系生态系统稳定的关键因素,更是应对气候变化、保障粮食安全的重要储备资源。然而,当前

我国地下水开发与保护正面临严峻挑战。根据新一轮全国地下水超采区划定工作结果,全国平原区共划定地下水超采区面积达到26.76万 km^2 。农业灌溉过量开采地下水是地下水位下降的主要因素,地下水超采会引发多种生态与地质问题,包括地面沉降、地裂缝与地面塌陷、湿地萎缩乃至消亡,以及沿海地区的海水入侵等,对基础设施安全和生态系统稳定造成深远影响。此外,深层地下水的过度抽取还可能诱发浅层咸水和地表污染物下渗,造成淡水层污染,进而威胁城乡生活用水安全和农业生产质量。地下水是很多农村地区经济、安全、稳定、可靠的饮用水源,特别是用水量小、分布广、地势变化大的乡村,地下水是重要的饮用水源。因此,应高度重视地下水资源的保护,从农村产业布局、雨水调蓄利用、农业种植优化、地下水补充等多方面入手,实现地下水资源的可持续开发利用。同时,针对不同类型的地下水水质问题,因地制宜地采用不同组合的集成化技术与装备,通过城乡一体化智慧管理与运行,或者基于地形和水源条件采用分布式供水模式,经济高效、稳定可靠地保障饮水安全。

1.2 水污染空间转移与外溢

在我国经济结构调整和区域协调发展进程中,产业格局逐渐呈现“沿海高端集聚、内陆承接低端”的特点。沿海地区凭借便捷的交通、优越的市场条件、人才集聚与政策扶持,成为高端制造和高附加值产业的聚集地。而内陆地区则依托较低的土地与劳动力成本及丰富的资源禀赋,承担了低端、高耗能、高污染产业的承接角色。随之而来的水污染问题也从经济发达的沿海地区向环境承载力较弱的内陆地带扩散。这种污染负担的跨区域转移不仅打破了“谁受益、谁负责”的传统治理逻辑,还加剧了内陆流域的环境压力和治理成本,为流域综合管理和区域均衡发展带来新的挑战。

产业与污染的地理转移,在流域尺度上更为明显。上游内陆工业排放的污染物不再受行政区划限制,沿河输移过程中跨界扩散,对下游城市饮用水源构成直接威胁。而下游用水城市的高消费需求,又通过复杂的商品链条反向驱动上游生产。例如,北京、上海等发达城市的居民消费通过商品链条驱动中西部生产地的发展,造成潜在的污染排放。研究^[3]发现,我国地表水中约50%的化学需氧

量和46%的氨氮排放可归因于为满足外地消费需求而进行的高污染生产。污染发生地与利益消费地的空间错位,加剧了流域综合治理的制度挑战,迫切需要跨区域协同监管与流域一体化治理机制,以打破单一行政管辖和分散治理的桎梏。

与此同时,城市化发展过程中产生的污染也对农村水源安全构成风险。缺乏足够距离的生态缓冲带会使污染物直接进入水体,导致水源水质超标^[4]。一项针对某市郊区10个农村地区的研究发现,城市化进程通过建筑开发引发的面源污染、工业生产导致的地下水污染和基础设施建设带来的水系结构改变,使得农村饮水水质逐步劣化^[5]。城市扩张引发的跨界污染加剧了城乡环境权益的不均衡分配,而且污染物在农村小流域的累积与生物富集,将逐步侵蚀农村社区的公共卫生安全和生态韧性,暴露了城乡环境治理在空间与职能上的割裂。

1.3 用水效率不高

农业是我国用水的主要领域,其用水量占全国总用水量的60%以上。然而,农业用水长期存在效率偏低的问题。受限于粗放式灌溉,农业种植结构与水资源条件匹配度不高,以及节水灌溉技术推广不足,农业用水的精细化管理水平仍有较大提升空间。我国许多地区仍沿用“大水漫灌”等传统灌溉方式,造成大量渗漏与蒸发损失,降低了水资源利用效率。目前,约有40%的灌溉用水未被作物有效吸收利用,导致大量水资源浪费。同时,农村地区雨水资源利用仍处于初级阶段,不仅缺乏系统性的雨水调蓄与利用基础设施,还忽视了农田本身的蓄水与调节功能建设。农田生态系统设计缺乏生态功能与水资源利用统筹兼顾的系统化规划与工程设计,雨水收集、滞蓄与利用能力建设严重不足。这一系列问题导致农业种植区域在丰水期极易出现高强度径流,雨水大面积径流导致的水土流失不仅剥蚀农田表层肥力,降低土壤的持水保墒能力,还会加剧下游河道的泥沙淤积,提升洪峰强度并增加洪涝风险。而在枯水期,种植区域又因缺乏可持续水源支撑,不得不依赖地下水超采来满足农业灌溉需求,这不仅造成地下水位下降与地面沉降,还会导致地下水的盐分在土壤中富集,破坏土壤及耕地结构,并对基础设施安全构成威胁。长期而言,土壤和水资源的双重退化削弱了农业生产的可持

续能力,增加了灌溉成本与能源消耗,使农村地区的生态韧性与经济韧性同步下降。尽管长距离区域性调水能够在短期内解决农村灌溉问题,但长期的硬度和盐分积累有可能产生土壤板结问题,需高度重视本地雨水调蓄与资源化利用。雨水中的盐分和硬度均较低,有利于保持本地土壤水分,控制土壤盐碱化,防止土壤板结,因此应加强农田对雨水调蓄和缓冲能力的规划建设,充分利用农田本地的雨水资源。此外,应通过不同类型农作物的种植规划调整,控制地下水位持续降低,雨水也可以通过不同途径补充地下水,实现农村水资源的可持续开发利用。

工业用水量约占全国用水总量的16%~18%,尽管工业用水效率整体呈上升趋势,但仍存在诸多提升空间。当前工业用水主要集中于若干高耗水行业,根据相关研究统计,钢铁、化工、火力发电、食品、造纸、纺织和制革等行业的用水总量占工业总用水量的70%以上^[6]。在政策推动和技术进步的共同作用下,近年来我国工业节水工作取得积极成效。然而,不同行业之间用水效率差异显著,部分行业仍存在用水强度高、重复利用率低等问题。特别是在一些中小企业和技术工艺相对落后的领域,单位产值耗水量偏高,用水重复利用率不足的现象较为突出,制约了整体工业水资源利用效率的提升。工业节水的核心不仅在于控制用水总量,更在于通过提升用水效率与循环利用水平,实现对接纳水体污染物排放的实质性削减,从而兼顾资源节约与环境保护双重目标。通过构建高效、清洁、可持续发展的工业用水体系,可以有效释放工业领域的节水潜力,实现水资源的高效利用与环境友好型工业转型。

当前城市用水效率仍存在显著提升空间,其中供水管网漏损是影响节水成效的突出短板。根据统计,全国600多座城市的公共供水管网平均漏损率>15%。部分小城市,尤其是间歇性供水地区的漏损率更高,个别城市甚至超过70%。对比发达国家6%~9%的供水管网漏损率控制水平,我国城市供水系统在效率与管理上仍存在显著短板。我国管网漏损普遍且严重,主要原因包括供水管网老化、管材质量不达标、日常维护滞后以及供水系统管理水平较低。上述问题造成大量水资源在输配过程中无效流失,影响城市供水的总体利用效率,是当

前城市节水工作亟待解决的难点。此外,管网布局也非常重要,大型互联互通的管网在提高供水安全可靠性的同时,也存在不同情况下水头损失大、能耗高、爆管风险高、漏失风险大等问题。因此需要建立强韧性、低能耗、高适应性、低漏损率、高水质保障率的三维管网体系。特别是在地形高差大、人口密度低及居住分散的地区,不一定采用城乡一体化管网,可以加强城乡一体化管理,采用多水源协同调配、因地制宜的管网布局方案,并通过智慧化手段和高韧性的先进净水工艺实现高效、低碳、安全、韧性的城乡供水目标。

除了需要完善城市供水管网的建设与维护外,公共用水领域同样亟待加强管理和技术改造,以形成城乡用水效率提升的整体合力。公共用水主要涵盖政府和行政机关办公楼、各类学校及公寓、医疗卫生和社会福利机构、文化体育场馆、科研院所用房以及交通枢纽公共空间等公共机构,占全国生活用水总量的10%~12%。这部分用水虽然占比相对较小,但公共机构具有较强的示范效应和社会影响力,其节水潜力不容忽视。目前,公共用水管理存在用水计量体系不完善、节水意识薄弱、用水设施老化等问题。例如,部分公共建筑仍在高耗水型卫生洁具,绿化灌溉采用传统漫灌方式,造成水资源浪费。根据《公共机构节水管理办法》(国管节能〔2024〕274号),国家机关事务管理局近年来持续推动公共机构节水型单位建设,通过安装智能水表、推广节水器具、实施雨水收集利用等措施,取得了明显的节水成效。但整体来看,公共用水效率仍有提升空间,有待进一步加强标准化管理、智能化监测和节水设施技术改造。

此外,城市非常规水源(如再生水、雨水、苦咸水、海水等)开发利用程度普遍不高。水源保护责任分散,未设专门管理机构,相关职能分布在水利、生态环境、住房城乡建设、农业农村、工业和信息化、自然资源等多个管理部门,各自关注点不同、职责交叉,缺乏有效协调,削弱了非常规水源的统一管理与推广应用。近年来非常规水使用量虽然有所增长,但多数城市在政策引导、技术支持和设施配套方面仍显不足,存在较大提升潜力。推动非常规水源的规模化利用,将为城市节水体系建设提供重要补充。

1.4 缺乏全链条饮用水安全保障技术与管理体系

当前我国饮用水源面临多路径、多污染源叠加的复合性风险威胁。城市地表径流、农村面源污染、工业废水、垃圾渗滤液、医疗污水、矿产残渣、尾矿库废物、未经妥善处置的危险废物,以及固废燃烧、塑料焚烧等随大气沉降进入水体的污染物持续对水源造成系统性冲击。这些污染源类型多样、难以动态监控、分布广泛,具有隐蔽性强、长期潜伏和跨界扩散特征,显著增加了水质安全保障的复杂性与挑战性。

我国在水源保护方面仍存在明显短板,水质安全潜在风险逐渐凸显,尤其在流域尺度和城市群层面,尚未形成系统化、协同化的综合防控机制。当前以达标排放为核心导向的废物与污水管理体系,在应对日益复杂的多源复合污染和突发性环境风险方面表现出反应滞后、治理割裂等局限性,尚未建立覆盖全过程、具备前瞻性的系统化管控机制。现行以宏观综合指标为控制目标的管理模式虽便于执行与监管,但难以反映具体污染物种类多样、行为特性复杂的实际情形,应加强污染源头控制,切实保障饮用水源安全。

由于气候变化的影响,作为水源的湖泊和水库普遍存在水中溶解氧浓度降低、藻类过度繁殖及藻毒素生成、臭味物质浓度升高与底层水体锰元素释放等问题。在藻华高发期,传统混凝-气浮工艺除藻效果有限,对藻细胞释放的藻毒素(如微囊藻毒素)及臭味物质均难以实现稳定且充分的去除。锰进入水源后容易使水体发黑、发浑,产生金属味,严重影响水的色、味和浊度,降低感官质量。并且,可溶性锰难以通过常规处理手段去除,需额外添加氧化剂,增加水厂处理难度和运行成本。如果未完全去除,微量锰还可能在供水管网中沉积并在一定条件下逐渐释放,形成二次污染,引发“黄水、红水”现象。此外,长期饮用含锰超标的水可能对人体造成危害。锰还会促进锰氧化细菌生长和生物膜形成,进一步恶化水质并干扰消毒效果。

在传统水源安全风险叠加的背景下,饮用水中新污染物的频繁检出是更为复杂的挑战^[7-8]。这些污染物涵盖药品、个人护理品、内分泌干扰物、微塑料和纳米材料、农用化学残留及抗性基因等,常以纳克至皮克级浓度存在,难以被混凝、沉淀、砂滤、消毒等常规工艺去除。此外,一些污染物在处理过

程中可能生成毒性更强的转化产物,如含氯消毒副产物和药物代谢物,进一步增加水质安全风险^[9-10]。即使采用高级氧化、活性炭吸附、纳滤等技术,处理效果仍存在显著差异,特别是对极性、分子质量较小的中性有机物(如短链全氟化合物、咖啡因、塑化剂)处理难度较大^[11]。以全氟和多氟烷基物质(PFAS)为代表的持久性有机污染物,因具有高度稳定性与显著生物富集性,难以通过传统综合指标实现有效监控,一旦进入水环境极难通过常规水处理工艺去除,对饮用水安全构成潜在风险。环境中多种污染物的共存可能导致协同或累积毒性效应,进一步增加处理难度和健康风险^[12]。

在终端层面,城市社区已经解决了水压保障问题。对于管网输配过程中产生的二次污染(主要是铁、铝、锰等悬浮物),有些用户在终端安装了净水设备^[12],但管理需要专业人员,有些设备不具备实时水质监测能力,运行过程中难以应对亚硝酸盐、细菌、病毒等污染物浓度的动态波动。另一方面,某些设备在去除有害物质的同时,也会过度截留钙、镁等对人体有益的矿物质,长期饮用可能影响人体健康。此外,部分用户对设备的使用和维护往往缺乏认知,滤芯更换不及时可能导致污染物穿透,甚至滋生细菌,造成二次污染。滤芯废弃物若处置不当,也可能引发新的环境风险。有些净水装置水回收率很低,伴随大量浓缩水直接排放,导致自来水严重浪费。因此,末端处理仍属补丁式手段,有可能带来新的资源浪费与健康隐患。

应急处理能力不足亦是目前水安全保障中的突出短板。常规工艺难以快速应对地震、洪水等突发事件中出现的高浊度、高有机负荷或未知污染物,滤池失效、出水超标等问题在应急状态下频发。一些高级处理工艺虽有效,但操作复杂、人员要求高,难以快速部署^[13]。传统水质检测手段耗时较长,难以满足快速响应需求^[14]。当前应急设备多为临时拼装,缺乏模块化、集成化、便携化的设计,无法实现即插即用式快速部署。此外,当前监测体系不健全,缺乏覆盖广、响应快的大尺度动态水源监测与风险预警机制,导致污染物识别滞后、水源风险难以及时感知和应对,制约了应急安全响应能力的整体提升。

1.5 区域发展不均衡

城乡供水基础设施在水源保护、管网质量与调

度能力等方面存在显著差距,区域发展不均衡是推进城乡供水一体化进程中的核心矛盾,也是制约城乡涉水产业链整体运行效率与区域供水安全的重要因素。

城市地区供水体系普遍具备较高的标准化水平,建立了完善的水源保护区划定制度,配套有水源监测与污染预警机制,能够有效降低源头污染风险。在输配环节,城市供水系统广泛采用高质量材料的管网,辅以压力调控和智能调度技术,保障供水稳定性与水质安全。相较之下,农村地区及小城镇受限于技术能力、财政投入与管理水平,普遍存在水源保护机制薄弱、缺乏基础监测设施的问题。部分农村地区水源甚至未设立基本的保护与隔离措施^[14],易受农业面源污染或生活污水影响。在供水输配环节,农村地区及小城镇的供水水质和水量安全难以得到保障^[15]。某些山区供水系统呈现规模小、布局散、运行不稳定等特征,如甘肃、云南等地受地形复杂、水源分散、管网延伸成本高等因素制约,供水成本高,运行能耗与维护难度显著提高^[16],亟待通过经济高效、稳定可靠的先进技术与科学的管理方法来确保这些地区的供水水质与水量安全。

此外,城市供水一般由专业水务公司负责,具备较强的技术与管理能力。而农村供水多由村集体或乡镇政府主导,存在投入不足、专业化管理缺失等问题,缺乏规范的运行维护体系,资源配置效率较低,水质保障能力薄弱^[17]。多数农村供水系统也尚未实现自动化调度,缺乏水压、水量的动态调节能力,无法根据需求波动灵活运行。同时,现有设施缺乏适配农村管理条件的处理单元耦合控制技术,难以保障在高峰期或极端气候事件中的稳定供水,增加了系统运行的脆弱性。

总体来看,农村涉水体系呈现断点多、环节弱、水源不稳定等系统性缺陷。因地形复杂、财政薄弱、工程分散、标准不一、管理不到位等问题,城乡之间缺乏统一规划与资源共享机制,进一步削弱了涉水基础设施的整体协同性,也加大了运营调度和水质保障的复杂性。未来,农村供水应综合考虑地形、水源种类、水质情况、水量保证度等因素选择供水方案,综合考虑投资、运行、管理和水质保障等因素优化城乡供水方案,根据地形、人口密度、高差和工业布局等选择分布式供水或城乡统一供水方

案。未来农村供水可由城乡供水部门采用智慧化供水系统统一维护管理。

1.6 数字化智能化水平低

我国供水系统整体仍停留在感知分散、调度静态的传统运行范式,尚未形成覆盖水源-泵站-管网-水厂全过程的一体化智慧调度体系。虽然全国已有200余座城市上线智慧水务平台,但多数仍局限于抄表收费、数据汇总等初级功能,缺乏动态响应与智能协同能力。当前城乡供水数字化转型面临装备层小散弱、协议层不兼容、平台层孤岛化三重结构性障碍,形成了对智慧化建设的连锁阻碍。

在装备层,小微设备厂商与大型水务集团之间缺乏联合实验室和技术接口共研机制,难以实现标准化即插即用,进而造成远程运维不畅,现场调试时间普遍是国际先进水平的2~3倍。

在协议层,智能仪表与传感器系统接口缺乏统一标准,水务企业被迫进行大量定制化集成。这种通信协议和接口缺乏统一标准的问题,本质上是技术和标准的碎片化。它使得水务企业在系统集成、部署和运行过程中面临诸多困难,增加了成本和时间的投入,降低了系统的整体效率和可靠性。

在平台层,各地水务公司独自建设数据采集与监视控制系统(SCADA)、地理信息系统(GIS)等,数据无法实现跨区域、跨平台共享,形成信息孤岛。这一问题也延伸到了涉水产业链的上下游协同中,造成供水系统缺乏联动机制与统一的数据共享平台。

当前城乡涉水产业链的数智化发展受限于产业链协同、标准体系、技术整合与体制机制等多重短板,亟须在统一标准、跨界协同和智能调度体系建设方面实现突破,推动水务系统向全链条数字化与智能化协同转型。

1.7 高端技术依赖进口

随着技术的发展,我国城乡供水产业链在设备装备上取得了显著进步,但仍有一些关键装备和技术依赖进口。这不仅影响了产业链的自主可控性,也增加了供水成本和运行风险。

目前,我国已实现超滤膜和微滤膜的国产化,并形成较大的产业规模,相关企业的产业化能力逐步增强。然而,在高端膜材料方面,依然高度依赖进口原材料及关键组件,制约了整体产业链的自主可控性和高端产品的市场竞争力。在高端净水器

及其核心组件领域,外资品牌长期占据主导地位。这些品牌在高端膜组件、精密滤芯和智能控制系统方面具备明显的技术优势。在工业用水领域,特别是高纯水制备领域,膜系统对进口产品的依赖度较高。此外,对于部分高效、大流量的紫外线消毒设备,在灯管寿命、紫外线强度均匀性等指标方面,进口产品仍具优势。国内品牌虽然在中低端市场具备一定成本优势,但在高端市场仍缺乏具有国际竞争力的产品,尤其是在核心功能部件的自主研发和质量控制方面存在短板。

尽管我国在水质传感器、自动监测平台和数据分析技术方面已取得初步进展,但在高灵敏度传感器、复杂数据处理系统以及多参数集成平台等关键领域仍依赖进口产品,尤其在设备的稳定性与长期可靠性方面,国产设备与国外产品存在明显差距。随着智慧水务建设的加快,城乡供水系统对智能化技术的依赖程度不断提升,其中进口的高精度、多功能智能水表在计量精度与数据传输稳定性方面依然具备优势。这种技术依赖导致农村供水系统的投资与运维成本较高,设备维护周期长、难度大,进一步增加运行风险。虽然水务自动化控制系统正在逐步推进国产替代,但在大型或复杂供水工程中,进口系统因在稳定性和兼容性方面表现突出仍会被优先采纳,反映出当前智能装备国产化水平尚未完全满足高标准供水系统的需求。

总体来看,我国城乡供水设备在高端膜材料、核心部件、智能监测和控制系统等关键领域仍依赖进口,制约了产业链的自主可控性与系统运行的高效稳定,亟待核心技术突破与高端装备能力提升。

2 高质量发展路径探索

2.1 水生态与水环境治理链

水生态与水环境保障应构建“源头控污-过程治理-生态修复-制度保障”的系统化治理链条,形成减污降碳协同与综合治理融合的整体格局。

① 以源头控污为核心,统筹生活、工业与农业三大领域的污染减量与资源化利用。在城乡居民生活领域,强化垃圾精细化分类收集与资源化利用,完善前端垃圾处置、厨余资源化和末端污水处理厂智能化管理,协同推进生活污水与固废减排。在工业领域,推广零排放或近零排放的工艺流程,推动绿色电力、余热回收和碳捕集利用,建立全过

程排污许可与在线监管,实现污染物与碳排放的双重控制。在农业领域,加强源头减污降碳与资源回用,特别是畜禽粪便和农田废弃物制肥回用方面的研究与推广。此外,还应加强有机肥的使用,实现科学示范、精准施肥、缓控释肥,降低农药残留量。另外,需加强源头污染分离控制、建立生态沟渠与拦截带,实现有机废物的原位处置与利用,发展经济高效的生态塘体系,利用智能污水处理设备实现污水高效处理,加强畜禽粪污与营养物质的资源化利用,从源头上抑制氮磷等营养物质外流,防控水体富营养化。与此同时,应严格划定并动态调整饮用水水源保护区,实施分级分区与全生命周期管控,严禁高毒性、难降解物质进入饮用水源一级保护区等重点区域,并通过跨流域、跨行政区的协同调度机制,构筑上下游、左右岸与城乡联动的生态屏障网络。

② 在污染传输与削减阶段,强化物理、生化、生态相结合的过程治理策略,全面提升水体自净与生态恢复能力。城市区域根据不同地区的实际情况开展雨污分流、雨水调蓄与海绵城市建设,结合构建人工湿地、生态浮岛、氧化塘等措施,显著削减地表径流峰值与污染负荷。农村区域则需推广营养物源分离与资源化利用技术,进一步通过河湖生态驳岸、植被缓冲带与生态沉淀池等复合工程,与上游水源保护区联动,形成从污染拦截、削减到生态净化的无缝衔接。农村地区可以根据具体需求采用低成本生态塘和智能化分布式污水处理装备,实现畜禽废水和生活污水深度处理与高效回用。

③ 在生态修复环节,构建城市绿心、乡村湿地保护格局。加大退耕还湿和湿地进水预处理力度,科学实施水位动态调控与本土植被恢复,通过生物修复、植物修复和地下水回灌等技术手段,提升流域生物多样性与生态生产力。同时,注重生态廊道与山水林田湖草沙系统的统筹衔接,增强生态网络的连通性与缓冲功能,为水源地提供持久的生态服务。

④ 通过健全的制度保障体系确保治理成效持续稳定。一方面,完善法律法规与生态补偿机制,明确部门分工与生态责任。另一方面,通过公开信息平台提升公众参与度,强化全民水生态保护意识,推动绿色生活方式普及,激发社会监督与多元共治,构建长效运行的水生态保护机制。

2.2 节水与非常规水利用产业链

在“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水方针指引下,节水与非常规水利用产业链应同步推进减量与增源两大主线。创新节水模式,推动清污源分离、灰水分布式回用和污水再生利用,辅以先进节水技术改造与精细化用水管理。在提升用水效率的同时拓展非常规水源供给,构建高效、安全、可持续的城乡水资源支撑体系,系统破解水资源刚性约束。

① 在减量方面,农业是节水的重点领域。因地制宜,推广滴灌、微喷和土壤水分实时监测等节水灌溉技术,减少高耗水作物种植与大面积漫灌。在大中型灌区推行统一耕种、统一灌溉、统一管护的一体化管理模式,提升田间水分利用效率。对于主要依靠地下水井取水进行灌溉的区域,可探索委托经营、分区定额和水权交易机制,实现地下水与地表水的精准调度。同时结合渠道衬砌、构筑物降温涂层和泵站能效改造等工程手段,减少输水过程中的渗漏与蒸发损失。在工业和城镇区域,强化水效管理,引导高耗水企业开展工艺优化与循环水梯级利用等改造工程。城市供水系统可通过构建数字孪生模型,实现管网压力、流量与漏损的实时监控与精准闭环控制,倒逼高耗水环节提升供水效率。

② 在增源方面,应从顶层设计着手,系统布局雨水、再生水与苦咸水等非常规水源。农田基础设施建设宜兼具雨水收集和缓释能力,有效削减雨季径流峰值,增强农业灌溉的蓄水能力。城市可依托河网建设、景观水体、湖泊池塘和溪流管理等方式实现雨水的收集与调蓄,构建多层级的雨水利用体系。对于缺水城市,可依托“下凹绿地-雨水调蓄池-深度处理”链条,实现雨洪就地消纳与跨季节回补。在工业园区建立资源回收与分离系统,全面推广雨污分流、清污分流、废水分类收集、分质回用的闭环网络,提升园区用水的循环率。整体统筹再生水、雨水、海水及苦咸水等非常规水源,将其纳入统一的分质供水与多源调度体系,在沿海或苦咸水资源丰富地区优先开展海水与苦咸水淡化,并与再生水和雨水实现梯级回用。系统按水质与用途分级输送,优先在生态补水、工业冷却和生活杂用等非饮用场景实施分布式原位回用,践行再生水优先、自来水补充原则,构建多时段、多梯度的立体供水

结构。

为保障减量增源高效联动,还需在系统治理框架下完善工程与非工程配套机制。一方面,依托区域水资源统一调度平台与数字水权交易所,推动水资源在跨流域、跨行业间的时空均衡配置。另一方面,通过差别化水价、财政奖补和绿色金融等政策工具,引导社会资本积极参与非常规水利用项目,提升市场活力和资源配置效率。同时,依托智能感知、区块链溯源和全过程数据闭环管理等先进手段,实现用水计划、取水许可、回用水质与水量的动态精准匹配,将需求侧的刚性压减与供给侧的多元增源有机融合,为城乡涉水产业链的高质量发展奠定坚实的水资源基础。

2.3 水务基础产业链

水务基础产业链的高质量发展须以创新发展模式为引领,通过技术集成、设施升级、产业协同与服务提升,构建覆盖水源保护、取水、输配、处理至终端回用的全流程闭环,全面提升系统性与可持续性。

① 在技术端,加大对高级氧化、低压纳滤、无机膜(如多孔陶瓷膜)等新型材料与工艺的研发投入。通过规模化中试与示范工程加速成果转化,逐步建立具有自主知识产权的工艺包和设备标准。针对非点源与微量持久性污染物,加强源头污染控制;针对重点排污企业,从全生命周期角度管理污染物排放,加强源分离与资源化利用技术与装备的研发与应用,重点突破高级氧化与还原深度处理技术、高铁酸盐除污技术、高效能纳米材料吸附等工艺的应用,形成针对城乡不同区域基础条件与需求的分级技术体系。

② 在基础设施侧,以漏损控制和数字管网为切入点开展城市供水系统的提质增效。通过智能感知节点、分区计量与压力优化,动态追踪“跑、冒、滴、漏”问题,将漏损率控制在国际先进水平。同时实施老旧管网分期更新、泵站节能改造与智能水表全覆盖,提高输配效率和计量精度。农村及小城镇则以简洁可靠的高位调蓄、压力稳控和远程运维模块为主,有条件的地方可推广基于窄带物联网(NB-IoT)的农村水质监测网络,借助移动互联与自动化监测实现低成本运行维护,实现城乡输配网络的无缝衔接。

③ 在装备端,加快核心部件国产替代与产业

集群培育。探索设立“水处理关键装备国产化专项”,重点支持高校-企业联合攻关。在条件成熟的区域推动涉水芯片、传感器、在线监测模块和智能阀门的本地化量产。建立功能陶瓷膜、金属膜等无机膜材料的国家级制造创新基地和国际合作基地,以规模效应降低成本并提升供应链安全。同时完善水务装备检测认证体系和全生命周期标准,为国产装备在大型水务工程中的应用提供质量背书。

④ 在产业协同端,着力打通“农业-工业-城市”循环链。通过建立城乡一体化水务集团或区域运营平台,统筹水资源调度、再生水集中回用与污泥减量化资源化处置,实现取水、供水、污水、再生水及固废综合利用互相融合。例如,在工业园区采用统一的再生水管廊与中控平台,支撑循环冷却、清洗与消防等多级梯级利用。在农业灌区对接城市再生水、雨洪资源、河湖生态补水或氧化塘等,构建区域水循环经济圈。

通过上述4项协同举措,打通技术、设施、装备、运营四端联动,奠定水务基础产业链高质量发展的坚实基础。

2.4 智慧化数字化协同链

智慧化、数字化协同链是破解城乡涉水系统中数据孤岛、调度分散、资源错配等深层结构性难题的关键支撑,可以在统筹规划、技术体系、平台架构和治理机制4个层面实现整体跃升与协同集成。

① 在顶层设计层面,打通生活、农业、工业等领域的数据壁垒。建立“国家、区域或流域层级的智慧水务一张图”,通过云-边-端协同架构整合流域、区域及终端设施的实时运行数据,实现从取水口到用户端的全链路可视化管理。各地水务平台基于统一的数据模型和开放的应用程序编程接口(API),实现系统接口的兼容与标准融合,逐步打破格式壁垒。依托标准化的数字化规范,推动新建信息系统和智能终端统一编码与元数据上线,确保数据在跨区域、跨行业间的安全流通和可追溯。同时,推动垃圾分类与污染源系统互联互通,构建生活、农业、工业多源协同治理平台。

② 建设城乡一体化的水源保护与水资源优化配置平台。平台深度耦合数字孪生模型,对泵站、水厂、管网与终端用水的水量、水质与能耗进行实时仿真,联动水权调配、水质监管与能源管理,动态生成最优调度方案。地下水作为农村地区最普

遍、经济且稳定的饮用水来源,亟须加强保护。鉴于其污染隐蔽性强、扩散慢但治理难度高,应坚持“早识别、早治理、早控制”原则,构建智慧化地下水污染预警和应急响应系统。同时对雨水、再生水、苦咸水等非常规水源实施全生命周期跟踪、计量与效益评估,并按水质等级自动匹配至生态补水、工业冷却与市政杂用等场景。

③ 强化涉水资源的耦合利用与行业联动机制,将高耗水产业纳入区域取水许可总量控制体系。在园区内部署中水回用与余热回收的一体化系统,优先将再生水资源用于冷却、洗涤、电解等工业环节。高温尾水与余热通过换热装置回供城市供热管网或农业温室,实现水-能-热多介质的耦合循环。数字平台同步采集与记录企业的用水、排污数据,为差别化水价政策、水权交易与排污许可管理提供动态、可验证的决策基础,提升资源配置效率与环保管理的精准化水平。

④ 在治理层面,构建覆盖流域与城市群的污染监测与协同治理网络。在主要干支流布设物联网传感器与遥感节点,通过区块链技术形成不可篡改的污染溯源链,以智能合约机制自动触发跨行政区的预警联动、责任溯源与执法协查响应机制。依托统一门户平台,向社会公开实时水质与调度信息,提升公众监督的可及性,激发各方力量参与水生态治理。通过整合水源管理、技术标准、平台互通、资源调度与治理机制的智慧化数字化协同链,推动城乡涉水产业链从各自为政向全域智慧化治理转变,促进水源保护更加系统、水资源配置更加高效、污染治理更加精准、产业协作更加深入、公共服务更加透明,为水安全保障和涉水产业链的高质量发展注入持续动能。

3 结论

当前我国城乡涉水产业链仍存在供需失衡、要素错配和链条分割等系统性障碍,需以全链条、跨尺度和数智化驱动的整体思维重塑运行模式。要实现城乡涉水产业链的高质量跃迁,须摆脱传统单一末端治理的路径依赖。在区域空间层面,通过水源分级保护、面源精准管控与流域协同,修复重塑生态安全底线。在资源配置层面,以节水硬约束与非常规水资源统筹形成供需平衡。在基础设施与装备层面,坚持安全、韧性、低碳、智能为导向,加快

核心技术国产化和产业链协同。强化装备集成化标准和规范制定,实现装备的系统化、规范化,为提高水效、降低能耗、控制碳排放等目标提供保障。在治理体系层面,借助全国智慧水务一张图和流域级数字孪生,打破数据孤岛,实现水源保护与水量、水质的动态最优调度。未来还需继续完善高端装备与产业生态的培育,推动以数据互联、平台共建和业务协同为基础的统筹治理模式。通过从法规、技术到资源配置的多维协同,将城乡涉水产业链从点状串联升级为生态闭环,支撑经济社会高质量发展与生态文明建设。

参考文献:

- [1] Yu M, Wang C R, Liu Y, et al. Sustainability of mega water diversion projects: experience and lessons from China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 721-731.
- [2] Wan H, Huang H Y, Zeng S D, et al. Impact on operation of the middle route project of south-to-north water diversion[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 246: 01040.
- [3] Sun S A, Konar M, Tang Q H, et al. Tracing surface water pollution in China's supply chain[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 624(19): 129960.
- [4] 代孟均, 张兵, 杜倩倩, 等. 不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例[J]. *环境科学*, 2024, 45(3):1512-1524.
- [5] Zhang L, Gao S H, Wei B G, et al. Effects of urbanization on rural drinking water quality in Beijing, China[J]. *Sustainability*, 2017, 9(4): 461.
- [6] 李海红, 袁令, 王丽珍, 等. 我国工业节水分析与推进建议[J]. *中国水利*, 2020 (19): 44-46.
- [7] Li X Y, Shen X J, Jiang W W, et al. Comprehensive review of emerging contaminants: detection technologies, environmental impact, and management strategies [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 278: 116420.
- [8] Azzahra H, Nisaa A F, Mardiyanto M A. Study on conventional drinking water treatment for removing emerging contaminants: a literature review [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, 1307(1): 012013.
- [9] Gilca A F, Teodosiu C, Fiore S, et al. Emerging disinfection byproducts: a review on their occurrence and control in drinking water treatment processes [J]. *Chemosphere*, 2020, 259: 127476.
- [10] Tak S, Tiwari A, Vellanki B P. Identification of emerging contaminants and their transformation products in a moving bed biofilm reactor (MBBR)-based drinking water treatment plant around River Yamuna in India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192 (6): 1-23.
- [11] Das S, Singh C K, Sodhi K K, et al. Circular economy approaches for water reuse and emerging contaminant mitigation: innovations in water treatment [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 27(3): 5753-5794.
- [12] Levin R, Villanueva C M, Beene D, et al. US drinking water quality: exposure risk profiles for seven legacy and emerging contaminants[J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2024, 34(1): 3-22.
- [13] Peng Y Z, Yang X W, Ren B Z, et al. Algae removal characteristics of the ultrasonic radiation enhanced drinking water treatment process [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 55: 104154.
- [14] Lancaster E, Lee J. Advanced preparedness for drinking water emergency: ensuring safe microbial quality with rapid microbial source tracking and *E. coli* methods[J]. *Environmental Advances*, 2023, 13: 100426.
- [15] 马杰, 蒋月, 张秀, 等. 重庆农村黑臭水体水质及底泥氮磷污染分析[J]. *中国农学通报*, 2022, 38 (10): 92-96.
- [16] Ma Z F, Li W G, Li Y, et al. Research on the current situation and sustainable development measures for urban-rural water supply integration in Yunnan Province, China[J]. *Water*, 2024, 16(22): 3232.
- [17] 周国华, 龙花楼, 林万龙, 等. 新时代“三农”问题和乡村振兴的理论思考与实践发展[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(8): 1919-1940.

作者简介:刘晴靓(1991—),女,黑龙江哈尔滨人,博士,助理研究员,主要研究方向为水质安全保障技术与理论。

E-mail:liuql@iwhr.com

收稿日期:2025-10-27

修回日期:2025-11-02

(编辑:丁彩娟)