

城乡供水一体化背景下区域水网优化布局研究

孟 生

淄博星辰供水有限公司 山东 淄博 255100

摘 要：当前我国部分地区仍存在城乡供水系统割裂、水源配置不合理、管网布局低效、水质安全保障不足等问题，制约了城乡供水一体化进程。本文在系统梳理城乡供水一体化内涵与目标的基础上，深入剖析区域水网布局面临的现实挑战，构建以“多源协同、分区统筹、智能调控、韧性安全”为核心的优化布局框架，并提出基于多目标优化模型与数字孪生技术的规划方法。并从制度协同、标准统一、智慧赋能、多元投入等方面提出政策建议，以期为推进城乡供水一体化高质量发展提供理论支撑与实践参考。

关键词：城乡供水一体化；区域水网；优化布局；多源协同；数字孪生；韧性安全

引言

安全稳定的供水服务是保障居民生活、支撑经济可持续发展的基础。我国城乡二元结构使供水体系呈现“城市集中、农村分散”格局，城市供水较完善，农村则水源单一、设施老化、管理粗放、水质不稳，这既造成水资源利用效率低，又加剧区域发展不平衡。2023年中央一号文件也强调实施农村供水保障工程。在此背景下，打破城乡供水壁垒，构建统一规划、建设、管理、服务的城乡供水一体化体系，成为新时代水利改革重要方向。区域水网是城乡供水系统的物理载体，其布局合理性影响供水系统效率、安全与可持续性^[1]。因此，在城乡供水一体化战略下，科学优化区域水网布局，实现水资源空间高效配置与风险有效防控，有重要理论价值与现实意义。

1 城乡供水一体化的内涵与目标

1.1 内涵界定

城乡供水一体化并非简单地将城市管网延伸至农村，而是指在统一规划、统一标准、统一建设、统一管理、统一服务的原则下，打破行政区划与城乡界限，整合区域水资源，构建覆盖全域、互联互通、高效协同的供水系统。其核心在于实现“五个统一”：统一规划：统筹考虑区域水资源禀赋、人口分布、产业布局与发展需求，制定覆盖城乡的供水总体规划。统一标准：执行相同的水质、水压、水量和服务标准，确保城乡居民享有同质同标供水服务。统一建设：整合财政与社会资本，统筹推进水源工程、水厂、输配水管网等设施建设。统一管理：建立专业化、企业化的运营主体，实行标准化、精细化管理。统一服务：提供均等化、便捷化的用水服务，包括抄表收费、维修响应、应急处置等。

1.2 核心目标

城乡供水一体化的目标可概括为“安全、高效、公平、绿色、智慧”：一是安全：保障供水水源可靠、水质达标、系统抗风险能力强；二是高效：提升水资源利用效率，降低漏损率，优化运行成本；三是公平：消除城乡用水差距，实现基本公共服务均等化；四是绿色：推动节水型社会建设，减少环境影响，促进水生态修复；五是智慧：运用现代信息技术，实现供水系统感知、分析、决策与控制的智能化。

2 区域水网布局面临的现实挑战

城乡供水一体化理念虽深入人心，但区域水网布局仍有挑战。如淄博市淄川区“三调两引”供水工程，“三调”含三大调水工程，26眼水源井，年取水许可总量3230万立方米；“两引”年取水许可300万立方米。全区用水总量控制指标8000万立方米，实际用水量6294余万立方米，用水效率指标居省市前列。农村44.66万人中，99.9%入户自来水，规模化供水认可覆盖率95%。

2.1 水源配置结构性矛盾突出

部分区域过度依赖单一水源（如地下水或单一水库），抗风险能力弱；而优质水源（如大型水库、跨区域调水工程）往往优先保障城市，农村地区水源保障程度低。同时，农业与生态用水挤占生活用水的现象依然存在，水源配置缺乏统筹。

2.2 管网系统割裂且效率低下

城乡分治致管网独立，互联互通差。城市部分管网超负荷，农村“树枝状”管网末端水压水质问题多，老旧管网漏损超20%，浪费大。淄博淄川区骨干供水工程“三调两引”：“三调”含三大调水工程，26眼水源井，年取水许可3230万立方米；“两引”年取水许可共1577万立方米。下一步拟建南部生态水厂，日处理5.5万立方米供企业用水，置换地下水供居民。该区用水效率指标领先，农

村自来水入户率99.9%，规模化供水覆盖率95%。投资2.3亿实施一期工程，提升供水保障，惠及7.15万人。推进二期，计划改造14个村供水、装3.8万智能水表、改造43个村管网，新建两中心，年内规模化覆盖率达97%，水质达标率100%。针对管理难题，推进县域统管，制定方案，实现7乡镇全域统管，达成城乡供水“五同”。

2.3 规划建设标准不统一

城乡供水工程在设计标准、材料选用、施工规范等方面存在差异，导致后期难以整合。例如，农村小型水厂处理工艺简陋，无法满足日益严格的水质标准；而城市水厂处理能力冗余，未能有效辐射周边乡镇。

2.4 管理体制与投融资机制不健全

“多龙治水”现象普遍，水利、住建、农业农村等部门职责交叉，协调难度大。同时，农村供水工程投资回报率低，社会资本参与意愿不强，主要依赖财政投入，资金压力巨大。

2.5 极端气候与突发事件应对能力不足

气候变化导致干旱、洪涝等极端事件频发，现有水网系统缺乏弹性，难以应对突发性水源污染或设施损毁，城乡供水安全面临严峻考验。

3 城乡供水一体化背景下区域水网优化布局的理论框架

3.1 多源协同：构建多元化、互补性水源体系

多源协同强调打破对单一水源的路径依赖，通过统筹区域内各类可用水资源，构建层次清晰、功能互补的水源保障体系。具体而言，应以优质可靠的大型地表水库或跨流域调水工程作为主水源，保障日常高负荷供水需求；同时配置本地中小型水库、地下水井群或再生水厂作为备用水源，在主水源检修或水量不足时及时补充；此外，还需规划建设应急水源，如深井应急取水点或移动式净水设备，以应对突发污染或极端干旱事件^[2]。通过水库群联合调度、再生水回用、雨水集蓄利用以及非常规水源开发（如海水淡化在沿海地区的应用），实现水资源在时间维度上的丰枯调剂与空间维度上的优化配置，显著提升区域供水系统的稳定性与可持续性。

3.2 分区统筹：实施差异化、协同化分区布局

分区统筹并非简单按行政边界划分，而是基于自然地理条件、人口集聚特征、经济发展阶段及用水需求差异，科学划定若干功能协调的供水片区。例如，将高密度建成区划为中心城区片，近郊产业带划为组团发展片，远郊农业乡镇划为均衡保障片，偏远山区村落则纳入兜底覆盖片。在各片区内部，推行“一网多厂、环状互联”的布局模式，避免单点故障导致大面积停水；片

区之间则通过大口径主干输水管廊实现互联互通，形成“骨干网络贯通全域、区域节点辐射局部”的层级化水网结构。这种布局既尊重了区域发展的非均衡性，又通过骨干网络强化了整体协同能力，在提升运行效率的同时，确保了偏远地区的基本用水公平。

3.3 智能调控：推动供水系统数字化、智能化升级

依托物联网感知设备、5G通信、云计算与人工智能算法，构建覆盖“水源—水厂—管网—用户”全链条的数字感知网络，并在此基础上建立高保真度的供水系统数字孪生平台。该平台不仅能实时监测水量、水压、水质等关键参数，还可通过水力模型动态模拟管网运行状态，实现漏损热点自动识别、泵站群能效优化调度、二次供水智能控压等功能^[3]。在应急场景下，系统可快速推演不同处置方案的影响范围与恢复时间，辅助决策者科学制定响应策略。由此，供水管理从传统的“经验驱动、事后响应”转变为“数据驱动、事前预警、精准干预”的智慧治理新模式。

3.4 韧性安全：强化系统抗风险与恢复能力

在规划初期即应将韧性理念嵌入水网设计全过程，通过多重冗余提升系统鲁棒性：例如采用双水源或多水源配置，构建环状而非枝状管网，对关键泵站、加压站、阀门井等设施进行抗震防洪加固，并预留应急接口。同时，建立完善的应急预案体系与物资储备机制，确保在遭遇极端气候、地质灾害、人为破坏或突发水质污染时，系统能够快速切换运行模式、隔离污染区域、启用备用水源，并在最短时间内恢复基本供水功能。一个具备韧性的水网，不仅追求常态下的高效运行，更注重非常态下的生存与恢复能力，是城乡供水一体化行稳致远的根本保障。

4 城乡供水一体化背景下区域水网优化布局的关键技术路径

4.1 基于多目标优化的水网布局模型

构建以“最小化总投资成本、最小化运行能耗、最大化供水可靠性、最小化水质风险”为目标函数的多目标优化模型。约束条件包括水量平衡、水压要求、水质标准、管径限制等。采用NSGA-II等智能算法求解Pareto最优解集，为决策者提供多种布局方案比选。

目标函数示例：

$$\min \begin{cases} C_{\text{total}} = C_{\text{construction}} + C_{\text{operation}} \\ E_{\text{energy}} = \sum_i P_i \cdot Q_i \cdot H_i \\ R_{\text{risk}} = \sum_j W_j \cdot P(\text{failure}_j) \end{cases}$$

其中，C为成本，E为能耗，R为风险； P_i 、 Q_i 、 H_i 分

别为泵站功率、流量与扬程； w_i 为节点权重。

4.2 数字孪生驱动的动态仿真与评估

多目标优化结果需通过高精度仿真加以验证与迭代。数字孪生技术为此提供了理想平台。通过集成地理信息系统(GIS)、遥感影像、水文气象预报、管网拓扑、用户用水行为等多源异构数据,构建与物理水网高度映射的虚拟数字孪生体。在此基础上耦合EPANET等成熟水力水质模型,可动态模拟日常工况、用水高峰、设备故障、水源污染甚至地震洪涝等极端场景下的系统响应。例如,可评估某新建主干管是否能在事故状态下维持关键医院和学校的供水压力,或分析再生水接入对管网余氯衰减的影响。这种“规划—仿真—反馈—再优化”的闭环机制,显著提升了方案的科学性、前瞻性与抗风险能力,使水网布局从静态蓝图走向动态演进。

4.3 分区计量与压力管理(DMA&PMA)

优化布局的成效最终体现在精细化运行中。分区计量(DMA)与压力管理(PMA)是降低漏损、提升效率的核心手段。在完成骨干网络重构后,应依据水力边界与用户特征,将庞大管网划分为若干独立计量区,每个DMA入口安装高精度智能水表与压力传感器^[4]。通过夜间最小流量分析,可精准识别背景漏损水平;结合压力监测数据,实施动态调压策略——在保障用户最低服务水压的前提下,适度降低管网平均压力,可有效减少因管壁微裂缝导致的持续渗漏。

4.4 再生水与雨水资源化融入水网

面向绿色低碳转型,区域水网应主动吸纳非常规水源。将污水处理厂达标再生水纳入统一调度体系,用于工业园区冷却、道路洒扫、城市绿化及河湖生态补水,既缓解了优质水源的供给压力,又实现了污水资源化。在海绵城市建设理念下,还可在公园、小区、道路等适宜区域布设雨水收集、净化与回用设施,将屋面与路面雨水就地用于景观灌溉或冲厕。这些非常规水源虽不进入生活饮用水系统,但通过专用管网或季节性调蓄设施与主供水网络形成功能互补,显著提升了区域水资源的整体利用效率与循环水平,为城乡供水一体化注入可持

续发展动能。

5 政策建议与实施路径

淄博市淄川区“三调两引”供水工程,将持续抓好工程建设,加快三河、供水等工程进度,成立专班,倒排工期,推行双轨协调机制,确保三河引蓄水治理一期年底基本完工、二期开工,农村供水提质增效项目年底前完成主体建设,供水保障、义户小流域治理、移民工程等按节点推进,构建特色水网体系。未雨绸缪,依托相关规划,围绕四大方面策划储备十大“十五五”水利项目,匡算投资27.87亿元,近期准备启动实施部分项目,总投资22.4亿元。提标增效,统筹防汛抗旱,加强隐患排查整治,抓好重点风险点位管理,做好监测预警等工作,实现“四个不出事”目标。积极做好资金争取,加强汇报协调,争取财政拨付、发行专项债、融资贷款及上级资金。区水利局将压实责任,以高质高效标准为全区发展提供水利支撑。

6 结语

城乡供水一体化是实现共同富裕和可持续发展的必然要求。区域水网作为其物理基础,其优化布局必须跳出传统城乡分治思维,以系统性、前瞻性、韧性化为导向。本文提出的“多源协同、分区统筹、智能调控、韧性安全”框架,结合多目标优化与数字孪生技术,为破解当前水网布局困境提供了可行路径。未来,还需在制度创新、标准统一、技术融合与多元共治等方面持续发力,方能真正构建起安全、高效、公平、绿色、智慧的现代化城乡供水体系,为美丽中国建设筑牢水安全基石。

参考文献

- [1]孙炼,张彬,黄克虎.城乡供水一体化系统优化提升方案研究[J].城镇供水,2025,(05):84-90.
- [2]黄山松.某城乡供水一体化工程设计方案优化[J].中国建筑金属结构,2025,24(13):44-46.
- [3]肖嘉慧,胡誉,赖德来,等.城乡供水一体化工程设计技术要点[J].建设科技,2025,(11):107-109.
- [4]梁艳艳,常换换.城乡供水一体化发展策略研究[J].水上安全,2024,(19):50-52.