

水网建设驱动地下水开发与保护关键技术

侯 凯^{1,2}, 李超群^{1,2}, 严登明^{1,2}, 刘明君^{1,2}, 杨立彬^{1,2}, 杨 靖^{1,2}, 樊新颖^{1,2}, 谭培影^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司; 2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹))

摘要:本文聚焦水网工程对地下水系统的影响及驱动机制,系统解析其对区域水循环过程重塑、开发利用模式转变及依赖型生态系统影响的深层机理。水网建设将原本离散分布的水系统整合为互联的复杂网络系统,驱动地下水管理实现管理范围由单一含水层拓展至流域、区域乃至跨流域尺度以及管理目标由单一保障水量供给拓展为统筹保障水资源经济利用效益、生态安全与地质环境稳定的多维协同安全目标。本文构建了水网建设驱动地下水可持续发展的关键技术体系,包括高精度勘查技术、协同调度的开采调控技术、地表水-地下水联合调配技术及多尺度动态监测预警技术;针对环境风险提出了地下水资源系统性保护路径,包括污染源-通道-靶区防控、生态-地质安全协同保障及含水层结构完整性保护。

关键词:水网建设;地下水;地下水资源开发;地下水生态保护;驱动机制

Key technologies for groundwater development and protection driven by water network construction//Hou Kai^{1,2}, Li Chaoqun^{1,2}, Yan Dengming^{1,2}, Liu Mingjun^{1,2}, Yang Libin^{1,2}, Yang Jing^{1,2}, Fan Xinying^{1,2}, Tan Peiying^{1,2}(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd.; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources (under construction))

Abstract: This article focuses on the impact and driving mechanism of water network engineering on groundwater systems, systematically analyzing deep mechanisms of its influence on reshaping regional water cycle processes, transforming development and utilization modes, and dependent ecosystems. The water network construction integrates originally dispersed water systems into interconnected complex network systems, driving the expansion of groundwater management from a single aquifer to watershed, regional, and even cross basin scales, and the expansion of management objectives from a single guarantee of water supply to a multidimensional collaborative security goal that comprehensively guarantees the economic utilization benefits of water resources, ecological security, and geological environment stability. This article constructs a key technical system for sustainable development of groundwater under the drive of water network construction, including high-precision exploration technology, collaborative scheduling of mining and control technology, joint allocation technology of surface water-groundwater, and multi-scale dynamic monitoring and early warning technology. Systematic protection paths for groundwater resources has been proposed in response to environmental risks, including pollution source channel target area prevention and control, ecological geological security coordination guarantee, and protection of aquifer structural integrity.

Key words: water network construction; groundwater; groundwater resources development; groundwater ecological protection; driving mechanisms

地下水是全球水循环的核心组成部分和规模最大的可利用淡水资源,不仅供应着全球约 50% 人口的饮用水,更支撑着 25% 的农业灌溉,具有不可替代的生态与服务价值^[1]。面对日益频发的极端气候事件,地下水的缓冲调节作用愈发关键。《联合国世界水发展报告(2022)》指出,亚太地区作为全球最大的地下水开采区,其社会经济系统高度依赖地下水,尤其在应对干旱冲击时至关重要。同时,地

下水通过补给河道基流,对维系河流和湿地生态系统健康具有基础性作用^[2-4]。2021 年,华北地区实施的近 80 亿 m³ 河湖生态补水工程显著驱动了京津冀地区浅层地下水水位回升,并恢复了永定河、潮白河等 22 条河流的生态功能,印证了地下水系统在地表-地下水文联动过程及生态修复中的核心地位。此外,深层承压含水层凭借其巨大的储水空间,成为重要的战略性储备资源,在应对极端气候事件中发

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202403)

作者简介:侯凯(1991—),男,工程师,博士,主要从事区域水资源优化配置研究。E-mail:hokai0725@163.com

通信作者:刘明君(1996—),女,工程师,博士,主要从事水资源配置与管理研究。E-mail:mjliu1128@163.com

挥关键作用^[5]。相较于地表水库,地下水库具有蒸发损失小、抗污染能力强、物理稳定性高等显著优势。然而,地下水系统在自然状态下虽然具有维持动态平衡的能力,但其本质具有生态脆弱性。长期超采已引发全球多个主要含水层(如美国奥加拉拉含水层、我国华北平原深层含水层等)出现持续性的水位下降。据预测,2050 年全球地下水年开采量将达到 $(1\,250\pm118)\text{ km}^3$,由此引发的年储量亏损 $(300\pm50)\text{ km}^3$,地下水资源的可持续利用面临严峻挑战^[6]。

国家水网建设是针对水资源时空分布不均、供需矛盾加剧等问题的重大战略部署,旨在构建支撑国家高质量发展需求的水安全保障体系。该体系的核心在于依托“四横三纵”骨干水网工程架构,实现跨流域、跨区域水资源的系统性优化配置,标志着我国水资源管理正经历从单一工程向系统化、网络化的根本性转型^[7]。这一战略转型深刻改变了区域地下水系统的补给-径流-排泄特征,驱动了地下水管理理念与方法的范式性转变,同时也为地下水资源可持续开发与系统保护提供了顶层设计框架^[8]。国家水网遵循系统性、联动性和生态优先原则,对地下水的开发利用与保护的协调性、精准性提出了更高要求^[9-11]:①强化地下水调蓄功能需求,水网工程通过跨区域调水将丰水区水资源输送至缺水地区,要求地下水系统须具备在特定水文条件下高效发挥地下水水库调蓄功能的能力,以有效缓解季节性缺水压力峰值;②多水源联合调度复杂性提升,水网建设与运行应实现地表水、地下水、非常规水及外调水等多水源的系统性协同调度,要求在地下水开采与回灌中须完善污染风险防控技术链,并建立处理多水源间竞争性利用冲突的水权交易与优化分配机制;③生态约束刚性化与开发模式转型,水网建设目标从“以需定供”转向“量水而行”,将保障河湖生态基流置于核心管控目标,要求地下水开采必须严格受控于生态保护红线等刚性约束条件,进而反向驱动地下水开发向生态友好型技术与管理模式转型。同时,全球变暖进一步加剧了地下水资源可持续利用的挑战性。塔里木河流域冰川储量预计到 2100 年可能减少 50%,导致山区含水层补给减少,削弱了水网水源涵养能力^[12]。而海平面上升也加剧了沿海含水层的海水入侵与城市内涝风险,迫使上海、天津等沿海水网枢纽城市必须重新评估和提升排水防涝标准^[13]。

鉴于国家水网建设与气候变化复合效应下地下水系统演变的高度复杂性,本文聚焦水网建设驱动下地下水资源开发与保护所面临的核心新需求、关

键新挑战及潜在突破口,旨在揭示水网建设对地下水系统的影响机制与驱动过程,探索并构建适应水网空间布局与调度规则的地下水资源可持续利用关键技术体系,为推动地下水管理从局部治理向系统性协同调控转型提供科学支撑,为国家水网的科学高效运行、地下水资源的长期可持续利用以及区域水资源的整体优化配置奠定理论基础。

1 水网建设驱动下地下水资源开发与保护现状

图 1 为国家骨干水网工程、区域水网工程及地下水监测站分布(基于审图号为 GS(2016)1600 号的标准地图)。国家骨干与区域水网工程的建设运行推动地下水资源开采总量持续下降,并显著优化了其利用结构。2024 年全国地下水开采量已降至 784.0 亿 m^3 ,较 2023 年减少 35.5 亿 m^3 ,较 2012 年峰值(1134 亿 m^3)累计下降 21%,其中农业领域仍为主要消耗源,占比大于 60%。2025 年初全国地下水超采区面积降至 26.76 万 km^2 ,超采量削减了 31.9%,区域水网工程建设有力推进了地下水超采治理。相较于 2018 年,2024 年京津冀地区深层承压水位回升了 8.46 m,浅层水位回升了 3.19 m;北京平原区地下水储量增加了 70 亿 m^3 ,严重超采区全面清零;华北平原区累积生态补水超 170 亿 m^3 ,实现了 22 条河流复苏及 80 亿 m^3 地下水回补,重点区域水位回升突出,区域水生态持续改善。

受限于地表水资源匮乏与经济社会的刚性需水增长,北方地区地下水开发强度长期超出其生态承载阈值,已引发一系列系统性水安全危机。水网工程通过节、控、调、管的综合治理模式为地下水修复奠定了基础,但深层次的结构矛盾仍未根本解决^[14-15]:①超采态势持续加剧,2023 年新疆天山北坡、河西走廊超采区面积年际扩张率达 1.2%~2.5%,地下水水位年均降幅达 0.5~1.5 m;②生态用水挤占显著,西北地区生态用水占比仅为 4.7%,水网工程在水资源配置中仍优先保障农业灌溉与工业用水需求;③水质性缺水问题恶化,灌区浅层地下水普遍面临硝酸盐污染,其中大同盆地部分地区检出质量浓度最高达 34.26 mg/L 。在极端气候事件频发与高强度人类活动的叠加影响下,北方地区水资源短缺形势严峻,由超采导致的生态退化过程仍在持续。

2 水网建设对地下水系统的影响与驱动机制

2.1 水网工程对区域水循环的改造

图 2 为水网建设对地下水系统的影响与驱动机制,可见大规模跨流域调水工程改变了地表径流的

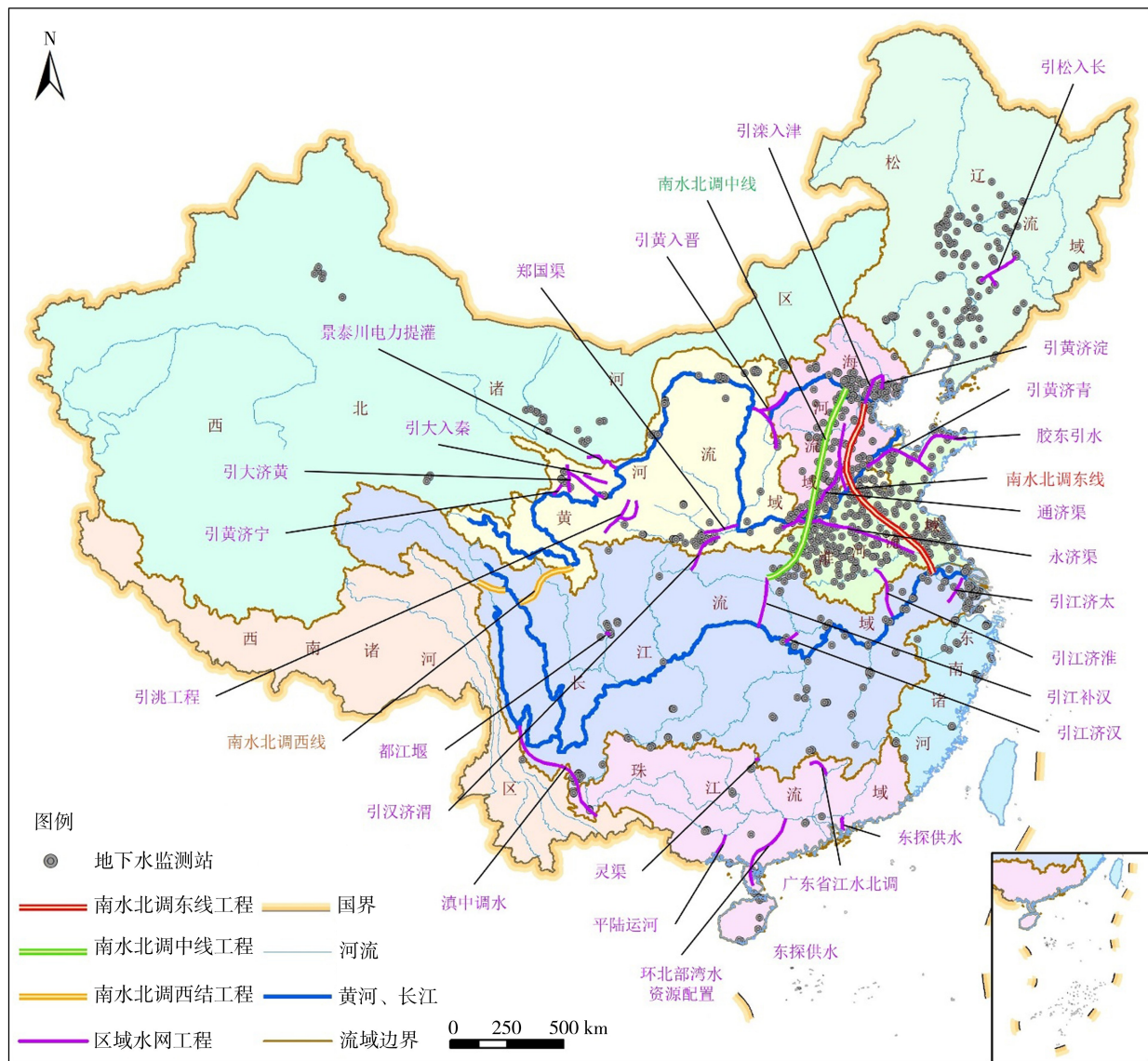


图 1 国家骨干水网工程、区域水网工程及地下水监测站分布

Fig. 1 Distribution of national backbone water network projects, regional water network projects, and groundwater monitoring sites

空间分布,重塑了区域地下水补给格局。在自然条件下,地下水补给主要源于降水入参与河湖渗漏,其空间异质性受气候、地形、地质等多因素控制^[16-17]。调水工程引入的外源水构建了高水位人工河道与补水湖泊,在受水区形成高强度补给源,重塑了地下水系统的补给强度与空间分布格局。这不仅显著提升了补给总量,更驱动了补给模式由降水主导转向降水入参与河湖渗漏并重。此外,人工季节性输水改变了地下水补给模式,使其由天然降水的脉冲式特征,转变为人工-自然耦合调控下的相对稳态特征。因此,水网建设驱动的人工引调水过程重塑了地下水补给格局,其本质是由传统的、以面状补给为主导的模式转变为面状、线状、点状等多种空间形态并存的复合模式。

水网工程的渗漏效应是驱动浅层地下水动态变

化的重要机制。未采取防渗措施的输水渠段持续输水作用形成稳定的水力梯度驱动地表水向浅层含水层渗漏,成为干旱半干旱区地下水补给的关键来源^[18]。通常这种补给效应在空间上呈现条带状分布特征,沿人工河渠形成高水位脊线,并向两侧逐渐降低。尽管人工河渠渗漏在局部尺度上增加了干旱区地下水储量,但持续性高强度渗漏可能导致土壤盐渍化、污染物迁移加速等次生灾害^[19]。水库、湖泊等调蓄工程在周期性蓄放水过程中对邻近地下水系统产生显著的脉冲式驱动效应,导致地下水位呈现与天然状态迥异的阶段性波动特征。具体而言,蓄水期库区水位抬升增大水力梯度,驱动地表水向地下水系统补给增强;稳水期水位相对稳定,库岸地下水系统趋向于建立新的动态平衡状态;放水期水位快速下降则可能引发地下水向库区的反向排



图 2 水网建设对地下水系统的影响与驱动机制

Fig. 2 Impact of water network construction on groundwater systems and its driving mechanisms

泄^[20]。同时,调蓄工程的水位波动也将影响地下水化学组分,如蓄水期地表水体的稀释作用可有效降低近岸浅层地下水的矿化度。从系统耦合的角度,调蓄工程与地下水系统之间存在复杂的相互作用与反馈机制:一方面地下水向库区的排泄(或渗漏)是水库水量平衡的重要组成分量;另一方面水库调度通过改变下游河道基流,间接影响水库下游河流附近地下水的补给。

2.2 水网运行对地下水开发利用模式的驱动

调水工程为长期依赖地下水的区域提供了重要的替代水源,显著降低了地下水开采强度(图 2)。然而,这种替代效应的强度与表现形式存在显著的区域异质性^[21]:在长期超采、水资源短缺区域,外调水能够迅速替代市政供水及工业用水中的地下水份

额;在农业主导区域,受相对较高的灌溉成本、输配水设施覆盖不足以及既有用水行为偏好等因素制约,农户通常倾向于维持原有的地下水开采模式或继续利用本地地表水资源。此外,若区域地下水水质优良或面临地表水源污染、供水保障不足等风险时,用水户基于对水质安全和供水稳定性的综合评估,仍倾向于优先开采地下水作为水源。因此,替代效应的实际效果受到区域用水结构、水价机制、基础设施、水源水质等多重因素的共同制约。同时,水网工程在提供基础供水保障的同时,其固有局限性(如季节性水量波动、工程运维风险、长距离输水水质不确定性)反而凸显了地下水系统的独特优势,包括储水稳定性高、抗扰动力及水质保障能力强^[22]。这推动地下水功能定位从主力水源向战略

性资源转变,并催生关键的互补效应:通过实施“丰储枯用”的含水层人工补给模式,地下水库可显著增强区域水资源时空调配能力与供水韧性;地下水系统固有的抗扰动特性与稳定性为保障核心城市功能与生存需求构筑了重要屏障;赋存于特定水文地质单元的优质地下水在饮用水供给、特定工业应用以及医疗康养等领域具有显著提升的资源价值。

水网体系中的物理水网与调度系统共同构成区域水资源调配网络,协同促进地下水开采布局的优化(图2)。首先,核心调蓄节点(水库、湖泊)与受水区依托水文地质条件及基础设施支撑规模化集中式地下水库建设,实现资源与工程效能整合;其次,主干输水廊道为沿线区域提供了稳定的替代水源,驱动超采区、限采区内分散布局的机井逐步关停,并通过集中式供水管网替代原有分散开采模式,有效缓解了局部含水层压力^[23];最后,依托水网配套的监测体系与综合管理平台,可支撑以水文地质单元为基础的分区管控、开采总量控制及地下水位阈值监管,并基于实时水情、需水预测和地下水动态监测等多源信息,动态优化水源的时空配置、调控开采强度及其空间分布,实现水资源协同增效^[24]。

2.3 水网建设与运行对地下水生态保护的影响

在水网工程运行过程中,输水渠道与调蓄水库通过其沿线存在的渗透性界面或地质构造薄弱带与邻近地下水系统形成水力联系(图2)。当引调水工程发生污染事件时,污染物可随渗漏水体在水力梯度的驱动下通过包气带或直接进入含水层,并随地下水流动在含水层中迁移扩散^[25]。例如,灌区输水渠系因衬砌老化引发渗漏,导致农药、重金属等面源污染物持续输入含水层;或受水区因外调水源补给引起地下水位上升,从而增强污染物扩散能力。特别是重质非水相液体(如四氯乙烯),高密度、难降解特性导致其向含水层深部迁移并在隔水层顶板富集,形成长期性、隐蔽性污染源^[26]。然而,当前水网工程的环境评价多聚焦于地表生态影响评估,普遍忽视对地下水水质脆弱性及污染通道的精细刻画与防控体系构建。大规模外调水源替代地下水开采可有效缓解区域地下水超采,但这一举措显著改变了区域水循环格局,开采量减少使得浅层地下水位回升,进而增强向地表水体的侧向排泄(基流),可能导致局部河流径流动态改变。对依赖地下水基流维持生态需水的湿地与河口生态系统,排泄通量变化可能引发复杂的生态水文响应^[27]。需特别指出,有些生态系统对基流稳定性、最低流量阈值或季节性流量分配存在特定阈值要求,即使总排泄量增加,若其季节分配与生态需求失配仍可能产生负面生态效应。

水网建设驱动的开采空间重构也可能导致局部采补失衡(图2)。尽管区域总开采量下降,但受水区地下水超采形成的“开采亏空”已改变了地层应力场。城市与工业园区地下水开采强度攀升,导致区域性地下水位降落漏斗的形成;深层承压含水层的集中开采诱发差异性地表沉降,而浅层地下水位回升区则因含水层有效应力降低引发弹性回弹^[28]。这种沉降-回弹耦合作用在空间上形成显著的形变梯度带,进而触发地质灾害。特别地,深层承压含水层的固结压缩变形具有显著的时间滞后效应,局部开采布局的空间失衡仍可导致含水层系统发生不可逆的塑性压实变形。同样地,滨海地区水网工程的运行显著改变了地下水开采强度与区域水动力场,潜在地扰动了咸淡水界面的动态平衡,增加了海水入侵的易发性^[29]。当水网提供替代水源导致滨海含水层开采量减少时,地下水位上升可形成指向海洋的正水力梯度,理论上具有抑制海水入侵的潜力;然而,若开采活动重新向海岸带集中,将显著破坏咸淡水界面的水动力平衡。更复杂的是,水网调蓄水库周期性蓄水/放水过程,通过库岸侧向渗流作用于邻近滨海含水层,其产生的水头波动与天然潮汐波动叠加,可显著放大咸淡水界面的周期性迁移幅度。因此,滨海地区水网相关工程若在设计、运行阶段未能充分考虑咸淡水界面的复杂动力学响应机制,可能适得其反。

水网建设将原本离散分布的水系统整合为互联的复杂网络系统,驱动地下水管理实现双重转变:管理范围由单一含水层拓展至流域、区域乃至跨流域尺度;管理目标由单一保障水量供给拓展为统筹保障水资源经济利用效益、生态安全与地质环境稳定的多维协同安全目标(图2)。这种转变催生出协同管理的复杂性^[30]:在空间维度,调水工程改变水源区与受水区之间的地表水-地下水通量交换关系;在时间维度,地表水库的调度周期与地下水系统的响应周期存在显著失配,极易诱发短期超采;在目标维度,追求工业供水效益最大化、严格控制地面沉降、充分保障湿地生态需水等多元目标之间常存在显著冲突。然而,当前管理实践仍受限于水网调度、地下水监测与生态需水保障等不同行业部门的管理壁垒,较难支撑协同决策。

3 水网建设驱动下地下水资源开发关键技术

3.1 精细化勘查技术

水网工程建设与运行显著改变了区域水循环路径及水资源配置格局,传统基于静态水文地质条件及单一系统分析的评价方法难以准确刻画水网影响

下地下水系统的复杂响应行为与机制:水网工程影响区含水层结构与水文地质参数刻画精度不足,难以预测渗漏、回灌等关键界面的动态影响;传统依赖天然补给过程或经验补给系数的方法无法有效表征水网调度活动驱动下的地表水-地下水交换通量动态及补给机制的重构;地下水补给机制的根本性重塑使依赖降水入渗系数的传统预测方法失效。针对上述问题,亟须发展以下关键技术(图3):①高分辨率含水层刻画与动态参数识别技术。融合多源地球物理勘探与钻孔岩性数据,构建高精度三维含水层数字模型,精细表征水网工程-地下水系统相互作用的关键水力联系界面;通过布设监测网络捕捉人工调水事件引起的水位动态变化,动态反演含水层渗透系数、储水率等关键参数,降低模型关键参数的不确定性。②地下水可开采量动态评估技术。构建耦合水网工程多要素与水文地质结构的数值模型,集成地下水流、溶质运移及生态响应模块,实现渗漏通量、补给过程及水位动态响应的精细化过程模拟;构建开采量-水位-风险协同响应模型,嵌入多目标优化算法,在供水保证率、生态红线、沉降控制等约束下,动态优化推求区域地下水可开采量及其时空分布。③复合补给过程模拟预测技术。采用深度学习算法反演地表水-地下水交换界面入渗通量的时空动态,耦合水文模型精细模拟包气带优先流路径与基质流的相对贡献及其对补给通量的调控;集成降水

入渗、渠系渗漏、人工回灌等多元补给源,生成区域地下水补给资源时空分布图,定量评估水网工程对地下水补给的正向增量效应与潜在负向环境风险。

3.2 高效开采与工程优化

水网工程运行对地下水开采技术体系提出了更高效能、更高适应性及更强协同性的新要求:传统开采模式难以适应水网动态调蓄特性,极易引发局部地下水位骤降或地质环境风险;水网关键节点区集中开采面临效率与扰动双重约束;水网基础设施与地下水开采系统存在空间配置错位,影响资源互补效能。针对上述问题,亟须发展以下关键技术(图3):①调水-开采协同调控技术。将水网调水计划作为动态边界条件,耦合高精度地下水数值模型预测水位时空响应特征,制定地表水优先、地下水补位的开采策略与方案;构建开采量-地下水位动态响应量化模型,在保障水网供水前提下,生成满足地下水位阈值、沉降速率限制、水质安全边界等多重约束的协同开采方案。②高效低扰动井群开采模式。基于含水层结构,在富水层实施“一井多靶点”分层取水,最大化单井有效出水量,通过封闭隔水层与弱透水层,减少层间串流与井损干扰;针对具有多个含水层-弱透水层互层结构的区域,采用基于水动力场模拟优化的井群网络化布局,科学调控开采井间距与层位组合,减轻对邻近湿地、天然泉流等生态扰动。③水网-开采设施空间协同布局策略。基于水网工



图3 水网建设驱动下地下水资源开发关键技术体系

Fig.3 Key technological system for groundwater resource development driven by water network construction

程关键节点的水文地质影响范围与功能定位,划分三级功能协同区,核心层布设战略应急水源地(水库渗漏补给),协同层布局规模化开采井群(保障水网检修期供水),缓冲层设置分散式农用井(渠系引水置换超采量);同时建立融合水文地质适宜性、工程安全稳定性与生态敏感区避让的空间协同设计框架,实现水网工程与开采设施空间上的物理耦合及功能上的高效互补。

3.3 多水源配置与调度

水网工程通过联通地表水、地下水、非常规水及外调水构建了多源互补的水资源供给系统,面临三大问题:不同水源在水质标准、开发处理成本及时空可用性方面存在显著差异,传统单一水源管理难以协同高效;水网调度与地下水系统响应失耦,缺乏量化工程影响的决策工具;地下水战略储备功能的动态调控需求。针对上述问题,亟须发展以下关键技术(图3):①多水源协同优化决策技术。构建水量-水质-经济-生态多维优化框架,通过分级匹配机制实现多源水资源与差异化用水需求精细化动态配置;制定兼顾成本效益最优与生态保护目标的协同调度方案,并嵌入干旱情景、突发污染事件等风险响应的动态规则库,预设不同风险等级下水源组合与调度策略的智能切换逻辑。②水网-地下水耦合响应引擎。开发三层联动决策系统,底层决策耦合水网闸泵控制、渠道渗漏与地下水流模型,量化工程影响;中层决策嵌入生态红线与用水优先级规则;顶层决策部署区域水网工程与地下水开采动态组合。③地下水资源储备分级调控体系。建立风险-效益双阈值决策体系,量化关键风险指标与资源利用效益,建立分级动用地下水的决策依据;设计动态平衡调控策略,精准控制开采强度,并结合卫星遥感与物理监测网络,实时评估含水层恢复状态并动态优化开采方案。

3.4 智能化监测预警体系

水网工程运行对地下水系统产生多维度扰动,然而传统监测手段难以支撑精细化管控需求:感知维度单一,难以系统捕捉水网工程与地下水系统之间复杂的多维交互响应;数据解析滞后,缺乏基于实时数据的风险模拟与预测能力;风险处置被动,缺乏对关联灾害链的协同预警与响应预案。针对上述问题,亟须发展以下关键技术(图3):①“天-空-地-井”智能感知网络。集成卫星遥感、无人机航测、物联网地面传感与监测并光纤监测等技术,重点部署于水库近坝浸润区、渠系潜在渗漏带等关键渗漏风险敏感区;同步开发动态组网优化技术,依据水网调度工况与动态风险评估结果,自适应调整不同区域

的传感器部署密度与监测频次。②数据-事件协同认知引擎。构建多层级数据智能处理与分析框架,在数据层实时识别水位骤降、水质污染等风险,集成调度日志、工程检修等多元事件信息,构建动态演化的地下水系统状态知识图谱;同步利用水网调度事件作为试验情景,触发模型参数实时同化与校准过程,动态校准模型参数。③多风险耦合预警与响应系统。针对超采风险、污染风险、海水入侵等典型风险事件,建立超采-沉降链式响应、包气带污染物迁移转化和咸淡水界面运移等预测模型;同步设计“蓝、黄、橙、红”四级响应机制(调度优化、数据复核、水源置换、开采关停),明确各等级对应的风险阈值、核心响应措施及决策主体,实现地下水风险管理的科学决策闭环。

4 水网建设驱动地下水资源保护实施路径

4.1 污染源识别与防控

水网作为大型人工调控水系,其输配水廊道沿线及水文影响区的地下水污染源识别面临空间尺度大、污染来源类型复杂及迁移转化过程受人工调控影响显著等独特挑战。因此,构建快速响应、精准定位的污染源识别与动态溯源技术体系是实施污染靶向防控的科学技术前提,其关键技术方向(图4)在于:①多尺度融合的污染物精准识别技术。研发融合水文学、水化学、同位素理论与适应水网沿线复杂环境监测网络的综合评估技术,实现对常规污染物及新兴污染物的广谱筛查与早期预警;集成地表-地下协同的一体化观测技术,形成对潜在污染源区的大范围、非侵入式、空间精准快速定位能力。②多源异构数据驱动的污染源解析技术。构建水网廊道地下水污染特征指纹图谱库,开发基于机器学习与模式识别算法的污染源智能识别模型;利用大数据分析技术,解析污染排放强度、水网调度工况与地下水水质指标之间的时滞效应与非线性耦合关系,支撑污染来源的空间溯源初判。③耦合水网调度的污染迁移模拟与溯源技术。集成水网调度驱动的非天然水力联系、包气带-饱和带溶质迁移转化等关键水文过程,构建自然-人工二元驱动地下水溶质运移耦合模型;耦合污染迁移与反演算法,定量追溯污染源空间位置、释放通量及迁移路径,并提出融合水网调度优化的地下水污染分区分级靶向防控策略。

4.2 生态水位维持与地质环境保护

大规模水网工程的建设在优化水资源时空配置的同时也显著改变了区域地下水流场及其动态平衡状态,对依赖地下水维持的河湖湿地生态系统稳定性及地质环境安全构成了新的挑战。因此,维系地



图 4 水网建设驱动下地下水资源保护关键技术体系

Fig. 4 Key technological system for groundwater resources protection driven by water network construction

下水系统的生态功能与地质环境稳定是保障水网工程可持续运行的关键支撑,其关键技术方向(图4)在于:①界定维系河湖湿地生态健康的地下水位阈值。构建河湖湿地典型植被对地下水位动态变化的定量响应关系模型,定量表征不同生态保护目标对应的地下水临界水位区间;构建耦合水网运行与地下水动力的生态水文模型,解析人工调控下水位变化对生态系统关键过程的驱动机制与影响路径;融合供给能力、生态保护、管理调控等约束,通过多目标优化算法确定具有时空异质性的河湖湿地生态水位阈值。②地下水生态补水与水位调控技术。依托水网工程的调蓄与输配能力发展多源协同生态补水技术,提升生态补水的水量转化效率与时空可控性;构建水网-开采井群协同调度体系与运行规则,基于生态水位阈值及其空间分区策略实施水位精准调控;研发针对巨厚包气带或深层承压含水层的地下水跨季节/年度人工调蓄技术,构建具有调蓄功能的地下含水层储水系统。③地面沉降-地裂缝监测预

警与综合防控。建立涵盖区域宏观趋势、重点区段密集监测与单体裂缝精细追踪的多尺度监测网络,实现地面沉降与地裂缝高精度监测与预警;研发耦合地下水渗流场、土体应力应变场及地质构造活动的多物理场耦合数值模型,提升复杂地质条件下沉降与地裂缝中长期预测精度,量化地下水动态开采对土体变形的滞后效应;通过优化开采、精准回灌等措施稳定关键层地下水水位,结合工程措施与水文地质环境修复手段,从沉降源头与灾害效应实现综合防控。④海水入侵综合防控技术体系。集成地球物理勘探-分布式传感网络-同位素示踪技术,动态追踪咸淡水界面位置、运移速率等;研发耦合变密度流体流动与溶质运移的数值模型,刻画水网运行与开采活动对盐分输移过程的扰动机制,预测海水入侵风险;设计水网-地下水抽补的联合调度体系,构建以淡水注入维持的水力屏障,协同地下水库、原位修复与开采布局优化,实现对海水入侵的主动干预与有效阻控。

4.3 含水层保护与管理

水网工程的战略推进深刻影响着区域地下水系统的补给-径流-排泄及其赋存条件,而保障含水层系统结构的完整性与功能的可持续性是实现区域水资源可持续开发利用的前提,其关键技术方向(图4)在于:①含水层保护与修复技术。构建含水层结构-水文过程-生态功能多维评估体系,解析水网运行叠加自然因素对含水层系统结构与功能的驱动机制;针对不同类型含水层的结构特征、退化模式及核心保护目标,研发适用于区域系统性生态修复技术,包括涵养林、水土保持、包气带恢复等;研发将含水层保护与修复目标深度融入水网工程全生命周期管理的生态化工程技术与调控策略。②基于约束-功能的含水层空间协调优化管理。构建融合脆弱性、储备价值、生态需水及地质风险等多维评价模型,明确含水层保护优先区域的空间范围与管理等级;研究水网工程的空间布局、水力连通性与运行规则同区域含水层系统结构特征、水动力场及生态功能空间格局之间的耦合互馈机制,发展融合水网工程空间布局优化、运行规则适应性调整与含水层特性空间适配的协同优化技术体系。③含水层可持续性保护技术。构建融合多指标体系的含水层开采潜力评价技术,研发从区域宏观潜力初筛到场地微观水文地质参数厘定的多级回补场地优选技术;针对不同人工回补模式(漫渗、深井、廊道等),研发水量平衡-水质安全-入渗速率为核心的精准调控技术;建立涵盖含水层修复与保护项目全生命周期长效管理体系,确保回补工程的长期生态安全与环境可持续性。

5 结 语

在全球气候变化、经济社会发展与大规模水利工程建设的驱动下,地下水系统面临开发与生态保护的双重挑战。本文从水循环扰动、开发模式转型及生态保护3方面系统解析了水网建设对地下水系统的多尺度影响及驱动机制。围绕勘查评价、开采优化、多水源调度、智能预警4方面关键技术构建了地下水可持续开发技术框架。同时,聚焦污染源识别与防控、生态水位保障与地质环境保护、含水层保护管理三大核心,提出了地下水资源系统性保护路径,包括污染源-通道-靶区防控、生态-地质安全协同保障及含水层结构完整性保护,为水网战略下地下水管理提供了开发-保护协同范式,从而实现水资源与生态安全统筹。

参考文献:

[1] Jasechko S,Perrone D. Global groundwater wells at risk of

running dry[J]. Science,2021,372(6540),418-421.

[2] Rohde M M,Albano C M,Huggins X,et al. Groundwater-dependent ecosystem map exposes global dryland protection needs[J]. Nature,2024,632(8023): 101-107.

[3] 何景媛,肖漫华,游建飞,等. 基于 GRACE 降尺度分析的江西省山丘区地下水储量变化时空演变规律[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(6):21-32. (He Jingyuan,Xiao Manhua,You Jianfei,et al. Spatiotemporal evolution patterns of groundwater storage variations in hilly area of Jiangxi Province based on downscaling analysis of GRACE data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(6):21-32. (in Chinese))

[4] 王坤,王宗志,白莹,等. 沿海中小河流域地表-地下水联合调控洪水资源利用研究: I. 方法与模型[J]. 水资源保护,2024,40(1): 79-85. (Wang Kun,Wang Zongzhi,Bai Ying,et al. Research on joint regulation and utilization of flood resources by surface-underground reservoirs in coastal small and medium-sized river basins: I. methods and models[J]. Water Resources Protection,2024,40(1): 79-85. (in Chinese))

[5] 曹先树,王浩,吴晨晨,等. 淮河流域及山东半岛地下水超采原因与管理对策[J]. 水利水电科技进展,2024,44(5):65-73. (Cao Xianshu,Wang Hao,Wu Chenchen,et al. Causes and management measures of groundwater overexploitation in Huaihe River Basin and Shandong Peninsula[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(5):65-73. (in Chinese))

[6] Kuang Xingxing,Liu Junguo,Scanlon B R,et al. The changing nature of groundwater in the global water cycle [J]. Science,2024,383(6686): eadf0630.

[7] 王梦晗,严登华,张鑫,等. 水网工程高质量发展若干关键问题的思考[J]. 水资源保护,2025,41(1):35-41. (Wang Menghan,Yan Denghua,Zhang Xin,et al. Thoughts on key issues for high-quality development of water network projects[J]. Water Resources Protection,2025,41(1): 35-41. (in Chinese))

[8] 郭旭宁,刘为锋,邢西刚,等. 国家水网的理论内涵与战略策略关系[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2023,21(6):1055-1063. (Guo Xuning,Liu Weifeng,Xing Xigang,et al. National water network theoretical connotation and its relationship between strategy and tactics[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science &Technology,2023,21(6): 1055-1063. (in Chinese))

[9] 薛联青,廖淑敏,刘远洪,等. 基于地下水动态模拟的生态输水累积效应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):322-328. (Xue Lianqing,Liao Shumin,Liu Yuanhong,et al. Cumulative effects of ecological water conveyance based on groundwater dynamic simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4): 322-328. (in Chinese))

- [10] 崔瑜,吴泰然,周磊,等. 基于数值模拟的再生水对地下水水质影响实例[J]. 地质通报,2018,37(7):1365-1373. (Cui Yu, Wu Tairan, Zhou Lei, et al. A case study on effect of reclaimed water on underground water quality based on numerical simulation[J]. Geological Bulletin of China,2018,37(7):1365-1373. (in Chinese))
- [11] 崔浩浩,张光辉,王茜,等. 石羊河流域下游天然绿洲地下水生态功能强弱周期性与机制[J]. 水利学报,2023,54(2):199-207. (Cui Haohao, Zhang Guanghui, Wang Qian, et al. Periodicity and mechanism of groundwater ecological function in natural oasis in the lower reaches of Shiyang River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(2):199-207. (in Chinese))
- [12] Bolch T, Duethmann D, Wortmann M, et al. Declining glaciers endanger sustainable development of the oases along the Aksu-Tarim River (Central Asia) [J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology,2022,29(3):209-218.
- [13] 王宗志,王宇,王坤,等. 滨海地下水库建设与利用方式对含水层水盐运移规律的影响[J]. 水资源保护,2023,39(4):69-78. (Wang Zongzhi, Wang Yu, Wang Kun, et al. Influences of coastal underground reservoir construction and utilization on saltwater and freshwater transport law in aquifers[J]. Water Resources Protection,2023,39(4):69-78. (in Chinese))
- [14] 宋子奕,鲁程鹏,吴成城,等. 2009—2019年河西走廊地下水位时空分布及演变趋势[J]. 水资源保护,2023,39(2):160-167. (Song Ziyi, Lu Chengpeng, Wu Chengcheng, et al. Spatiotemporal distribution and evolution trend of groundwater level in Hexi Corridor from 2009 to 2019[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):160-167. (in Chinese))
- [15] 栗晓玲,褚江东,张特,等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护,2022,38(1):34-42. (Su Xiaoling, Chu Jiangdong, Zhang Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection,2022,38(1):34-42. (in Chinese))
- [16] 张婧,马贵宏,高雅,等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):21-28. (Zhang Jing, Ma Guihong, Gao Ya, et al. Analysis on influencing factors of groundwater level change in typical well irrigation area in piedmont plain of North China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):21-28. (in Chinese))
- [17] 刘紫萱,周冰玉,李志威,等. 黄河源区典型泥炭湿地地下水水位时空变化及流量过程[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):27-33. (Liu Zixuan, Zhou Bingyu, Li Zhiwei, et al. Spatiotemporal change of groundwater level and discharge process in a typical peatland watershed in Source Region of Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(3):27-33. (in Chinese))
- [18] 冯志勇,李立群,吴永妍,等. 南水北调中线一期工程总干渠输水损失变化规律[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):600-609. (Feng Zhiyong, Li Liqun, Wu Yongyan, et al. Variation of water loss in the main canal of Middle Route of South-to-North Water Transfer First Stage Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(3):600-609. (in Chinese))
- [19] 陆帅帅,周念清,蔡奕,等. 洞庭湖湿地潜流带地下水中氮磷迁移转化过程及驱动机制分析[J]. 水资源保护,2024,40(5):122-130. (Lu Shuaishuai, Zhou Nianqing, Cai Yi, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus migration and transformation and driving mechanism in hyporheic zone groundwater of Dongting Lake wetland[J]. Water Resources Protection,2024,40(5):122-130. (in Chinese))
- [20] Wang Xiao, Zhang Manfei, Zhou Weibo, et al. Impact of an artificial lake on the regional groundwater environment in urban area of Northwest China[J]. Environmental Earth Sciences,2020,79(10):225.
- [21] 井森,张江江,刘瑾,等. 水位、水量、产量联控的华北平原地下水超采区节水灌溉多目标优化[J]. 水资源保护,2025,41(2):184-192. (Jing Miao, Zhang Jiangjiang, Liu Jin, et al. Multi-objective optimization of water-saving irrigation in groundwater over-exploitation area of the North China Plain under joint control of water level, water volume, and crop yield[J]. Water Resources Protection,2025,41(2):184-192. (in Chinese))
- [22] 凌敏华,陈万贺. 地下水资源对新疆经济社会支撑作用的定量评价[J]. 水资源保护,2021,37(2):49-54. (Ling Minhua, Chen Wanhe. Quantitative evaluation of groundwater resources supporting economy and society in Xinjiang[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):49-54. (in Chinese))
- [23] 彭安帮,牛凯杰,胡庆芳,等. 永定河流域多水源配置与水库群优化调度[J]. 水科学进展,2023,34(3):418-430. (Peng Anbang, Niu Kaijie, Hu Qingfang, et al. Allocation of multiple water sources and optimal operation of reservoir group in the Yongding River Basin [J]. Advances in Water Science,2023,34(3):418-430. (in Chinese))
- [24] 谢新民,李丽琴,周翔南,等. 基于地下水“双控”的水资源配置模型与实例应用[J]. 水资源保护,2019,35(5):6-12. (Xie Xinmin, Li Liqin, Zhou Xiangnan, et al. Water resources allocation model based on “double control” of groundwater and its application [J]. Water Resources Protection,2019,35(5):6-12. (in Chinese))

- [25] 吴建强,王敏,黄沈发,等. 平原河网区地下水污染风险评估体系及其应用[J]. 水资源保护,2019,35(4):55-62. (Wu Jianqiang, Wang Min, Huang Shenfa, et al. Risk assessment system of groundwater pollution in plain river network area and its application [J]. Water Resources Protection,2019,35(4): 55-62. (in Chinese))
- [26] 谢文逸,姜登登,李旭伟,等. 污染地块巨厚含水层典型DNAPLs运移模拟及安全利用深度评估[J]. 环境工程学报,2022,16(7):2287-2295. (Xie Wenyi, Jiang Dengdeng, Li Xuwei, et al. Transport simulation of typical DNAPLs in deep aquifer and safe utilization depth evaluation of polluted plot [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2022,16(7): 2287-2295. (in Chinese))
- [27] 张璞,刘欢,胡鹏,等. 全国不同区域河流生态基流达标现状与不达标原因[J]. 水资源保护,2022,38(2):176-182. (Zhang Pu, Liu Huan, Hu Peng, et al. Current situation of compliance of river ecological base flow and noncompliance reasons in different regions of China [J]. Water Resources Protection,2022,38(2): 176-182. (in Chinese))
- [28] 卢毅,宋泽卓,刘瑾,等. 基于 DFOS 的通州湾地区地面沉降监测与变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):81-88. (Lu Yi, Song Zezhuo, Liu Jin, et al. Land subsidence monitoring and deformation analysis of Tongzhou Bay area based on DFOS [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2): 81-88. (in Chinese))
- [29] 陆玮,李兆,骆祖江. 南通市地下水压缩开采对水质咸化的控制效应[J]. 水资源保护,2020,36(2):85-91. (Lu Wei, Li Zhao, Luo Zujiang. Control effect of groundwater compression mining on water salinization in Nantong City [J]. Water Resources Protection,2020,36(2): 85-91. (in Chinese))
- [30] 徐腾,王以鹏,叶逾,等. 地下水超采管控体系及水量-水位双控体系研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(4):27-35. (Xu Teng, Wang Yipeng, Ye Yu, et al. Research progress on groundwater overexploitation control system and dual control system of water quantity and water level [J]. Water Resources Protection,2024,40(4): 27-35. (in Chinese))

(收稿日期:2025-07-07 编辑:王芳)

(上接第29页)

- [21] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations,1998.
- [22] Chen Dong, Gao Guocheng, Xu Chongyu, et al. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China [J]. Climate Research,2005,28(2):123-132.
- [23] Che Tao, Li Xin, Jin Rui, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China [J]. Annals of Glaciology,2008,49:145-154.
- [24] Che Tao, Dai Liyun, Li Xin. Long-term series of daily snow depth dataset in China (1979-2019) [EB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center. (2024-09-24). <https://www.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/df40346a-0202-4ed2-bb07-b65dfcda9368>.
- [25] Dai Liyun, Che Tao, Ding Yongjian. Inter-calibrating SMMR, SSM/I and SSML/S data to improve the consistency of snow-depth products in China [J]. Remote Sensing,2015,7(6):7212-7230.
- [26] Huang Xiaodong, Deng Jie, Ma Xiaofang, et al. Spatiotemporal dynamics of snow cover based on multi-source remote sensing data in China [J]. Cryosphere,2016,10(5):2453-2463.
- [27] Yan Dajiang, Ma Ning, Zhang Yinsheng. Development of a fine-resolution snow depth product based on the snow cover probability for the Tibetan Plateau: validation and spatial-temporal analyses [J]. Journal of Hydrology,2022,604:127027.
- [28] Pettitt A N. Anon-parametric approach to the change-point problem [J]. Journal of the Royal Statistical Society,1979,28(2):126-135.
- [29] Yao Tandong, Xue Yongkang, Chen Deliang, et al. Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2019,100(3):423-444.
- [30] 吴雪娇,鲁安新,王丽红,等. 基于 MODIS 的长江源近10年积雪反照率时空分布及动态变化[J]. 地理科学,2013,33(3):371-377. (Wu Xuejiao, Lu Anxin, Wang Lihong, et al. Spatial and temporal distribution and trend of snow albedo changes in the source region of the Yangtze River in last decade based on MODIS [J]. Geographical Science,2013,33(3):371-377. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-05 编辑:王芳)