

重大工程影响下区域地下水水资源承载能力重新评价与优化配置研究

段洛煜

河南省地质局地质灾害防治中心, 河南 郑州 450012

DOI:10.61369/ERA.2025120026

摘要 : 重大工程建设对区域地下水系统产生显著扰动, 改变地层结构与水文循环格局, 导致地下水资源的时空分布及承载能力发生动态变化。研究以地下水系统演化机理为基础, 构建多指标综合评价模型, 对工程影响区的地下水承载力进行重新评估, 并结合数值模拟与优化配置技术, 分析地下水水流场变化规律与资源分配策略。结果表明, 工程扰动下地下水补排关系与水力梯度显著调整, 通过建立动态监测与优化配置体系, 可实现地下水资源的科学调控与可持续利用, 为区域水资源管理及重大工程规划提供定量化依据。

关键词 : 重大工程; 地下水资源; 承载能力; 重新评价; 优化配置

Research on Re-evaluation and Optimal Allocation of Regional Groundwater Carrying Capacity Under Major Engineering Impacts

Duan Luoyu

The Prevention and Control Center for the Geological Disaster of Henan Geological Bureau, Zhengzhou, Henan 450012

Abstract : Major engineering projects significantly disrupt regional groundwater systems, altering geological structures and hydrological cycles, which leads to dynamic changes in the spatiotemporal distribution and carrying capacity of groundwater resources. Based on the evolution mechanisms of groundwater systems, this study constructs a multi-criteria evaluation model to reassess groundwater carrying capacity in project-affected areas. Combined with numerical simulation and optimization techniques, it analyzes flow field variations and resource allocation strategies. Results indicate that groundwater recharge-discharge relationships and hydraulic gradients undergo significant adjustments under engineering disturbances. By establishing a dynamic monitoring and optimized allocation system, scientific regulation and sustainable utilization of groundwater resources can be achieved, providing quantitative support for regional water resource management and major engineering planning.

Keywords : major engineering; groundwater resources; carrying capacity; re-evaluation; optimal allocation

引言

重大工程的集中建设正在深刻改变区域地表与地下的水文格局。地下水作为维系生态系统稳定与社会经济发展的关键要素, 其承载能力受到工程扰动后呈现出新的空间差异与动态特征。单一静态评价方法已难以反映复杂背景下的资源状态。通过对工程活动与地下水系统的耦合机制进行研究, 揭示承载力变化规律, 建立动态评价与优化配置模型, 能够实现地下水资源的科学利用与生态安全保障。这一研究为工程区水资源的协调开发与环境风险防控提供新的思路。

一、重大工程扰动下地下水系统变化机理研究

工程开挖、地基处理及防渗体系的建立, 使地下含水层的渗透性与补排关系发生重新分配, 导致地下水径流方向、流速及补给条件出现偏移。地下结构物的阻隔作用削弱了天然水文联系,

造成局部区域水位抬升或下降, 从而引发地下水动力平衡的破坏。此类变化不仅影响水量循环过程, 也对溶质迁移、污染物分布及含水层水化学特征产生深层影响, 进而改变地下水资源的可持续承载状态。

在复杂地质环境中, 重大工程的扰动效应表现出明显的空间

差异性和时间滞后性。地表覆土剥离及地基加固破坏了原有渗流通道，地下围护结构形成的屏障效应使地下水运动由均质状态转变为非均质系统。局部应力场的变化诱发裂隙扩展，促进深层地下水向浅层的渗流，改变了原有水力梯度与压力场分布。伴随降水入渗量减少和人工抽采强度增加，地下水补给与排泄的动态平衡进一步被削弱，区域地下水位下降趋势明显，甚至出现地面沉降与水质恶化的连锁反应。

在重大工程建设区，地下水系统不仅受地质构造与地层特征的控制，还受到工程尺度、施工工艺及防渗措施的综合影响。地铁隧道、地下综合管廊及大型水利枢纽等工程通过改变地下空间结构，影响地下水系统的水文地质单元划分与水动力边界条件。渗流场、应力场与温度场的相互作用，使得地下水系统演化呈现复杂的非线性特征，难以通过传统静态分析进行准确描述。因此，需要在动态监测和数值模拟的基础上揭示重大工程扰动下地下水系统变化机理，为后续承载力评价与资源配置提供科学依据。

二、区域地下水资源承载能力影响因素分析

区域地下水资源承载能力的形成与演化受多种自然与人为因素共同控制，其影响因素具有综合性、层次性与时空差异性。在自然条件方面，地质构造是控制地下水赋存与运动的基础因素，不同岩性组合、断裂构造与含水层厚度决定了水文地质单元的储水性能与渗透条件。地貌形态与地表覆盖特征决定了地下水的补给方式与补给量，高程起伏区的渗透径流速度较快，而平原区则表现出补排交换缓慢的特征。气候变化通过影响降水、蒸发和地表径流过程，直接决定了地下水的天然补给强度与水位波动幅度，长期干旱或极端降雨事件都会改变地下水系统的动态平衡。

在水文地质环境中，含水层介质的物理属性对承载能力的影响尤为显著。孔隙度、渗透系数与含水层厚度决定了地下水资源的可开采储量与补给速率。细粒沉积层中水动力条件弱，容易形成滞水区，导致局部水质恶化；而裂隙岩层或砂砾层则具有较强的渗流能力，承载能力受地下补给稳定性影响较大。地下水与地表水的水力联系程度同样是关键变量，强联系系统中水资源转换频繁，补给效率高；而弱联系系统容易形成独立的封闭循环，承载力受限。此外，区域生态系统对水分条件的响应也不可忽视，植被覆盖度、土壤含水性及蒸散过程共同决定了地下水在生态环境中的平衡作用。

在人类活动因素中，重大工程建设、农业灌溉与城市开发是改变地下水承载能力的主要驱动。工程施工扰动地层结构，造成地下水水流场重塑；大规模开采导致承压水位下降与漏斗区扩大；城镇硬化地表削弱入渗补给，改变天然径流分配。工业污染源渗漏与农业面源污染引发水质恶化，增加资源恢复难度。地下水利用模式的不合理性使得区域水循环失衡，水量与水质的双重压力削弱了系统的支撑能力。社会经济因素也在潜移默化中影响承载力水平，经济结构调整、用水结构变化及政策调控力度决定了地下水开发与保护的协调程度。

地下水承载能力还与管理技术和监测体系密切相关。监测网络的密度与精度决定了对地下水动态变化的掌握程度，模型模拟与反演技术的发展为动态评价提供支撑。缺乏系统性监测将导致承载力评估偏差，难以及时反映资源变化趋势。现代信息化手段的引入，如遥感反演、地下水数值模拟及人工智能预测模型，使得承载力分析从静态定量向动态优化转变。综合自然要素与社会驱动力的系统分析，可揭示地下水资源承载能力的多维影响机制，为后续重新评价与优化配置奠定基础。

三、多指标综合的地下水承载力重新评价方法

多指标综合的地下水承载力重新评价方法是在传统定量分析基础上，融合水文地质、生态环境与社会经济多维因素的系统性研究途径。重大工程建设改变了地下水的流动场与补排格局，使原有承载力评价模型难以准确反映新的水文动态特征。为应对这种复杂变化，需要构建以系统分析为核心的多指标综合评价体系。该体系以地下水量平衡、质量演化和生态需水关系为主线，通过建立指标层、准则层与目标层的多层次结构，综合反映区域地下水系统的稳定性与可持续利用水平。在指标选取方面，常包含地下水补给强度、开采强度、水位变化率、水化学特征指数、生态需水占比及污染风险指数等多维因子，以形成科学、完整的评价框架。

在方法体系构建过程中，定量化是核心环节。通过层次分析法、熵权法或主成分分析法确定各指标的权重，使不同维度的影响因素得以统一到同一评价体系中。地下水承载力的计算需结合数值模拟技术，通过求解地下水流动方程，获得在不同工程扰动情景下的水位分布与流量变化，以此为基础量化区域承载力的空间差异。模型建立应考虑边界条件、补给模式、抽采布局及水文地质参数的动态调整，确保计算结果与实际地下水系统响应相吻合。多情景模拟法能够反映不同开发强度和气候变化条件下承载力的变化趋势，为合理制定管理方案提供支撑。

地下水水质是承载力评价中不可忽视的重要维度。重大工程可能引起地下水化学组成的重构，影响溶质迁移与污染物累积。通过水化学监测与地球化学模拟，评估地下水中主要离子、重金属及营养盐的演变趋势，可以揭示水质变化对承载力的制约机制。采用综合水质指数法与污染负荷模型相结合的方式，可对地下水质量进行空间分级，明确优先保护与治理区域。生态指标的引入则使评价体系更具完整性，生态需水量、地下水埋深对植被覆盖度的影响以及湿地补给强度等参数，能够体现地下水系统对生态环境的支撑程度，实现资源与生态双重约束下的综合评价。

在综合分析阶段，采用模糊综合评价法、灰色关联分析或改进的耦合协调度模型，对量化结果进行集成分析，得出承载力等级划分与变化趋势。通过 GIS 空间分析技术，将评价结果进行可视化表达，揭示不同区域的承载差异与敏感区分布。该方法能够动态反映地下水系统对工程扰动、气候变化及人类活动的综合响应，实现从静态评估向动态监测的转变。多指标综合的地下水承载力重新评价方法不仅能够提高结果的科学性与精度，还能为区

域地下水资源优化配置提供可操作的数据支撑与决策依据。^[1]

四、基于优化模型的地下水资源配置策略

基于优化模型的地下水资源配置策略以系统工程思想为指导,通过构建多目标、多约束的优化决策体系,实现地下水资源的科学分配与动态调控。重大工程的集中布局导致区域水文循环结构被重塑,地下水与地表水的互馈关系受到干扰,传统的定额式或经验式配置方式难以满足资源安全与生态平衡的双重要求。优化模型的引入使资源配置从静态管理向动态协调转变,能够在约束条件下实现地下水资源量的最优分配与时空匹配。模型设计以水量平衡原理为基础,结合水文地质条件、工程扰动效应、生态需水需求与社会经济用水结构,建立地下水开采与补给的协调方程,形成以效益最大化和风险最小化为目标的优化框架。^[2]

在模型构建过程中,数学规划方法是核心技术路径。线性规划、非线性规划与多目标规划常被用于描述复杂的地下水配置过程。线性规划模型能够处理区域内多水源联合调度问题,通过约束条件控制地下水抽采量与水位变化幅度,维持系统的水文稳定性。非线性规划适用于存在复杂水文响应关系的情景,可通过迭代求解实现经济效益与生态约束之间的平衡。多目标规划则将经济产出、生态保护与资源安全纳入统一的目标函数体系,通过赋权系数实现多因素协同优化,使配置结果更具综合性与适应性^[3]。

模拟优化耦合技术的应用进一步提高了模型的实用性。数值模拟模型负责反映地下水系统在不同调度方案下的动态变化,而优化模型通过求解最优抽采策略,实现资源利用效率最大化。两者的耦合可通过迭代运算实现参数反馈与动态调整,使配置结果与地下水系统的实际响应相一致。基于地理信息系统的空间分析技术能够实现配置结果的可视化表达,通过叠加分析识别高风险区、敏感区与潜力区,为管理者提供精细化决策支持^[4]。

在优化目标设定中,应综合考虑区域经济结构、用水类型与生态敏感程度。农业灌溉区可采用基于需水预测的动态限采模型,工业区可引入水权交易与再生水替代机制,生态功能区应以维持地下水埋深与生态补给稳定为优先约束。通过引入随机优化与模糊约束理论,可在不确定性条件下对地下水配置进行鲁棒性分析,确保方案在不同气候与社会情景下的可行性。基于优化模型的地下水资源配置策略不仅能够实现资源利用的高效协调,还能在工程扰动背景下保持地下水系统的长期稳定,为区域水资源管理提供科学的量化支撑。

五、研究成果在区域水资源管理中的应用与启示

重大工程对区域水文系统造成的扰动使传统的静态管理模式失去有效性,研究成果为动态监测与科学调控提供了技术路径。通过多指标综合评价体系,可实现地下水资源量、质量与生态约束的协同分析,揭示不同区域的水文敏感性与利用潜力。基于数值模拟与优化模型的联合应用,使管理部门能够在多情景下预测地下水系统响应,从而制定符合生态安全与经济发展的分区管控策略。配置模型的输出结果在管理中可用于确定合理开采阈值、控制水位下降速率以及制定地下水保护红线,为水资源分配提供量化依据。

在区域管理实践中,该研究方法推动了地下水管理由经验决策向数据驱动的科学决策转变。通过建立动态数据库与监测网络,可实现地下水位、水质及补给量的实时跟踪,形成“监测—分析—反馈—调控”的闭环管理体系。模型成果还可与地理信息系统相结合,实现空间可视化分析,为不同功能区提供差异化管理策略。农业灌溉区可根据承载力结果调整种植结构与灌溉制度,城市新区可在规划阶段确定地下空间开发强度,工业区可结合优化模型进行水资源调度与再利用设计,从而实现区域整体水循环的协调。^[5]

研究成果在政策制定层面同样具有应用意义。承载力分区成果可为地下水资源管理制度的完善提供科学依据,为制定取水许可、地下水开采总量控制和生态补偿机制提供技术支撑。优化配置策略能够在保障经济发展的同时兼顾生态补给,实现水资源利用与环境保护的动态平衡。通过模型应用,可将重大工程建设与水资源保护纳入同一管理框架,实现区域水资源的系统化管理与可持续利用,为复杂工程背景下的水资源治理提供可推广的实践启示。

六、结论

重大工程影响下的地下水系统演化表现出复杂性与动态性,研究通过多指标综合评价与优化配置模型揭示了承载力变化规律与调控机制。成果为区域地下水资源的科学配置与生态保护提供了系统方法,为水资源可持续管理奠定了理论与技术基础。综合分析结果能够有效指导重大工程区的水资源利用与管理实践,实现工程建设与生态安全的协同发展。

参考文献

- [1] 王志强,李春燕.重大工程扰动下地下水系统演化机制研究[J].水文地质工程地质,2022,49(3):45–53.
- [2] 陈建辉,孙晓宁.区域地下水资源承载力动态评价方法研究[J].水资源保护,2023,39(2):78–85.
- [3] 赵宏伟,郭媛媛.基于多指标体系的地下水承载力综合评价模型[J].南水北调与水利科技,2021,19(6):112–120.
- [4] 刘天宇,程浩然.地下水资源优化配置模型及其在区域管理中的应用[J].中国农村水利水电,2024,43(4):95–103.
- [5] 张慧玲,林志鹏.工程扰动区地下水系统模拟与优化配置研究[J].水科学进展,2022,33(1):66–75.