

水利工程建设对区域地下水环境的长期影响机制

张啸川

重庆市水利电力建筑勘测设计研究院有限公司, 中国·重庆 401120

摘要: 水利工程建设作为水资源调控与社会经济发展的重要支撑, 在优化地表水配置的同时, 深刻改变了区域水文循环过程, 对地下水环境产生了复杂而深远的影响。论文聚焦于水利工程对区域地下水环境的长期作用机制, 系统剖析其在水文连通性、水动力场及水化学演化等方面的作用路径。通过构建多尺度影响分析框架, 揭示水利工程引发的地下水补给、径流与排泄格局的演变规律, 并探讨由此衍生的水质响应与生态效应。研究强调时间维度下影响的累积性、滞后性与非线性特征, 提出基于过程模拟与阈值判据的评估方法, 为地下水资源可持续管理提供理论依据。

关键词: 水利工程; 地下水环境; 长期影响机制

The Long term Impact Mechanism of Water Conservancy Engineering Construction on Regional Groundwater Environment

Zhang Xiaochuan

Chongqing Municipal Hydraulic and Electric Engineering & Architectural Survey & Design Institute Co., Ltd., China
Chongqing 401120

Abstract: As an important support for water resource regulation and socio-economic development, water conservancy engineering construction not only optimizes surface water allocation, but also profoundly changes the regional hydrological cycle process, resulting in complex and far-reaching impacts on groundwater environment. The paper focuses on the long-term mechanism of water conservancy engineering on regional groundwater environment, systematically analyzing its pathways in hydrological connectivity, hydrodynamic field, and hydrochemical evolution. By constructing a multi-scale impact analysis framework, the evolution patterns of groundwater recharge, runoff, and discharge caused by hydraulic engineering are revealed, and the water quality response and ecological effects derived from this are explored. The study emphasizes the cumulative, lagged, and nonlinear characteristics of the impact in the time dimension, and proposes an evaluation method based on process simulation and threshold criteria to provide a theoretical basis for sustainable management of groundwater resources.

Keywords: Water conservancy engineering; Groundwater environment; Long term impact mechanism

0 引言

水资源是维系生态系统稳定与人类社会发展的基础性要素。随着人口增长与经济活动的持续扩张, 水资源供需矛盾日益突出, 促使大规模水利工程建设在全球范围内广泛推进。水库、灌区、调水工程等设施在提升水资源利用效率、保障供水安全方面发挥了不可替代的作用。然而, 这些人工干预措施在重塑地表水系统的同时, 不可避免地扰动了天然地下水循环体系。地下水作为水资源的重要组成部分, 具有更新缓慢、调节能力强、生态功能显著等特点, 其环境状态的稳定性直接关系到区域水安全与生态健康。近年来, 诸多案例表明, 水利工程建设后若干年, 区

域地下水位出现持续下降或异常抬升, 水质发生渐进性恶化, 甚至诱发地面沉降、土壤盐渍化等地质环境问题。

1 水利工程对地下水补给过程的重构机制

1.1 地表水-地下水交换通量的时空变异

水利工程建设从根本上改变了流域内水体的空间分布与时间节律, 进而重塑了地表水与地下水之间的交换关系。水库蓄水导致河流天然流量过程发生显著改变, 丰水期洪峰削减、枯水期基流增强, 打破了原有的水位波动周期。这种水文情势的人为均化, 削弱了河道向邻近含水层的侧向补给强度, 尤其是在汛期原本强烈的渗漏补给过程被大幅抑制。与此同时, 水库蓄水抬高了库周地下水位,

形成以库盆为中心的局部地下水壅高区,改变了区域地下水流场的原始分水岭位置。在下游河段,由于来水量减少与取水活动增加,河道常处于低水位运行状态,部分河段甚至出现季节性断流,导致河流由天然的“补给型”转变为“排泄型”,即地下水反向补给河道,造成区域地下水储量的净流失。这种交换通量的逆转并非瞬时完成,而是随工程运行年限延长逐步显现,呈现出明显的时滞性。此外,跨流域调水工程引入外来水源,可能在受水区形成新的地表水体,人为制造出额外的地下水补给源,但其补给效率受控于渠系渗透性能与包气带岩性结构,存在空间上的高度不均匀性。

1.2 降水入渗补给路径的间接干扰

水利工程不仅直接影响地表水体与地下水的交互,还通过改变土地利用格局与地表覆盖条件,间接调控大气降水向地下水的转化过程。大型灌区的建设通常伴随耕地面积扩张与灌溉制度调整,农田成为区域主要的下垫面类型。灌溉水的大规模输入显著增加了包气带的水分含量,增强了重力水向下运移的势能,在非作物生长季或灌溉过量的情况下,易产生深层渗漏,形成对潜水含水层的额外人工补给。然而,这种补给具有高度的非均质性与时间依赖性,其通量大小取决于灌溉定额、土壤质地与地下水埋深。在干旱半干旱地区,灌溉引发的潜水位上升可能加剧次生盐渍化风险。另一方面,水库淹没区植被被清除,地表硬化程度提高,降雨截留与蒸发损失减少,理论上有利于增加有效降水入渗量。但库周因地下水位上升导致的土壤饱和带扩大,反而可能降低单位面积的人渗能力,使得降水更多地以地表径流形式汇入库区,减少了对周边浅层地下水的自然补给。此外,水利枢纽附属设施建设(如道路、厂房)造成的地表不透水层扩展,进一步压缩了天然降水入渗的空间。这些间接效应与直接的水体调控相互叠加,使得降水入渗补给的时空分布趋于复杂化,其长期累积效应可能超过直接补给变化的影响量级。

2 地下水动力场的演化响应与空间分异

2.1 区域地下水流场的非均衡重构与多尺度耦合

水利工程建设打破了天然水文循环的动态平衡,使地下水动力场进入长期的非均衡调整阶段。这种重构并非简单的水位升降叠加,而是表现为多尺度流系统之间的相互干扰与能量再分配。在局部尺度上,水库蓄水形成集中补给源,导致库周浅层地下水位显著抬升,等水头线由天然状态下的流域控制型转变为工程主导型,形成以库盆为中心的辐散状流场结构。该影响范围不仅取决于库容与渗透

强度,更受控于含水层的导水系数与越流能力。在均质各向同性含水层中,壅高效应随距离呈指数衰减;而在层状非均质介质中,高渗透性含水层成为压力传播的主要通道,导致影响范围沿特定地层延伸,甚至跨越地形分水岭,引发跨流域渗漏。更为复杂的是,在流域尺度上,梯级水库群的联合调度造成河道流量的人为节律化,削弱了洪水脉冲对河岸带地下水的周期性“泵吸”作用,使得原本依赖洪泛补给的侧向潜流带逐渐萎缩。与此同时,灌区渠系网络构成人工补给廊道,其渗漏通量虽单点微弱,但因空间密度高、运行时间长,累积效应可重塑区域流场格局。在干旱区内陆河流域,上游建库截流与中游扩灌并行,导致下游天然绿洲区地下水补给源枯竭,区域性地下水流向发生 180 度反转,由向心汇流转为离散疏干,最终引发生态退化。此类大尺度流场重组往往滞后于工程建成数十年至十余年,体现出系统惯性与响应延迟。此外,城市化进程中深层地下水开采形成的降落漏斗,与水库引起的浅层水位抬升在垂向上形成反向梯度,加剧了不同含水层间的越流交换,可能激活封闭层中的劣质水或诱发地质灾害。

2.2 含水层变形的粘弹塑性响应与时序依赖性

地下水动力场的变化直接改变含水层骨架所承受的有效应力状态,进而引发土体压缩、膨胀或剪切变形。这一过程远非瞬时完成,而是表现出强烈的粘弹塑性特征与历史路径依赖性。当水库蓄水导致地下水位持续上升时,孔隙水压力同步增加,颗粒间有效应力减小,土体进入卸荷状态。在砂砾石为主的含水层中,此过程可能引起颗粒重排列与孔隙扩张,短期内表现为储水系数增大;但在富含黏性土夹层的半承压或承压含水系统中,超静孔隙水压力需通过缓慢排水固结才能消散,导致变形具有明显的时间滞后。反之,在地下水超采区,水位持续下降造成有效应力递增,土层发生压密固结。该过程初期以弹性压缩为主,恢复供水后可部分回弹;但当应力超过前期固结压力时,进入塑性变形阶段,产生不可逆压缩。尤其值得注意的是,第四纪松散沉积物中普遍存在的欠固结或超固结黏土层,其压缩指数(C_c)与回弹指数(C_r)差异显著, C_r 通常仅为 C_c 的十分之一至五分之一,意味着即使水位恢复至原始水平,地面高程亦难以完全复原。长期监测资料表明,某些平原区地面沉降速率与累计沉降量之间呈现 S 型曲线关系:初期沉降缓慢,中期加速发展,后期趋于平缓但仍持续不断,反映出土体从主固结向次固结转变的过程。此外,水位波动频率也深刻影响变形机制。高频小幅波动可能激发土体的疲劳效应,降低其长期强度;而低频

大幅波动则更易触发结构性破坏。在岩溶地区, 地下水位大幅下降可使洞穴顶板失去浮托力, 增加塌陷风险; 而快速回升又可能因排水不畅产生扬压力, 诱发突水事故。这些力学响应不仅关乎地质安全, 还反过来改变含水层的储容能力与导水性能, 形成“水力-力学”正反馈循环, 进一步加剧系统的不可逆演变。因此, 评估水利工程的长期影响必须纳入含水层本构关系的时变特性, 构建考虑应力历史与流变行为的耦合模型, 方能准确预测动力场演化的终极状态。

3 地下水化学环境的渐变式演化路径

3.1 水化学组分迁移的多过程耦合机制

水利工程建设不仅改变地下水的流动状态, 更深刻扰动了溶解性物质在含水层中的迁移与转化路径。传统对流-弥散理论在解释长期水质演变时存在局限, 因其往往忽略水动力条件变化引发的反应动力学调整与相间交换过程的时间依赖性。事实上, 水利工程驱动下的地下水化学演化是物理输运、地球化学反应与生物代谢三者高度耦联的结果。当水库蓄水或灌溉回渗导致外来低矿化度水体进入原生高矿化度含水层时, 初始阶段以机械混合为主, 表现为离子浓度的空间梯度平滑过渡。然而, 随着新水持续输入, 水岩相互作用逐步激活。特别是在碳酸盐岩或蒸发岩分布区, 渗漏水中的 CO_2 分压差异可诱发方解石、白云石或石膏的溶解-沉淀平衡移动, 进而调控 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等主要离子的活度。这一过程受控于局部水力停留时间: 在流速缓慢区域, 反应趋于接近热力学平衡; 而在快速渗流带, 则呈现非平衡态特征, 导致相同地质单元内出现显著的水化学空间异质性。更为复杂的是, 氧化还原界面的迁移对变价元素的行为具有决定性影响。例如, 水库渗漏使原本处于氧化环境的包气带饱和和淹没, 形成由上至下的氧化-弱还原-厌氧分层结构。在此背景下, NO_3^- 、 MnO_2 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 依次作为电子受体参与有机质降解, 推动氧化还原电位 (E_h) 沿流程递减。当系统进入硫酸盐还原阶段时, H_2S 生成不仅降低 pH 值, 还可能与重金属离子形成硫化物沉淀, 暂时抑制其迁移。但若后期水动力条件逆转 (如水位下降重曝气), 硫化物重新氧化产酸, 将引发二次污染释放。此类“潜伏-爆发”型响应模式揭示了化学演化的非单调性与路径依赖性, 凸显长期追踪的必要性。

3.2 界面反应动力学的时变特性与累积效应

地下水环境中绝大多数地球化学反应发生在固-液界面, 其速率并非恒定, 而是随水力条件、溶液组成及表面

状态的演变而动态调整。水利工程引起的地下水位波动周期性地改变沉积物颗粒的润湿历史, 从而影响吸附/解吸、成核/溶解等界面过程的动力学行为。以砷 (As) 为例, 在铁氧化物丰富的含水层中, $\text{As}(\text{V})$ 主要通过专属性吸附固定于矿物表面。当水库渗漏导致地下水位上升并带来还原性有机质时, 微生物介导的铁还原作用将 $\text{Fe}(\text{III})$ 还原为 $\text{Fe}(\text{II})$, 致使铁氧化物晶格崩解, 吸附态 As 同步释放进入溶液。该过程初期速率较慢, 随还原性物质积累呈加速趋势, 表现出明显的自催化特征。监测数据显示, 某些案例中地下水中 As 浓度在工程运行 8-12 年后才突破饮用水标准, 印证了反应启动的延迟性。类似地, 氟 (F^-) 的富集常与碱性环境下羟基磷灰石或萤石的溶解有关。灌溉引水带来的钠离子富集可促进钠长石化反应, 释放 Na^+ 与 OH^- , 提升 pH 值, 进而打破原有矿物溶解平衡, 导致 F^- 缓慢释出。此类反应的速率受限于矿物比表面积与扩散路径长度, 在细粒沉积物中尤为迟缓, 但一旦启动便具不可逆倾向。此外, 黏土矿物的阳离子交换容量 (CEC) 亦参与长期离子置换过程。当高 Na^+ 含量的灌溉回归水持续入渗时, 蒙脱石层间 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 逐渐被 Na^+ 取代, 不仅影响土壤渗透性, 还通过反离子释放间接改变地下水离子组成。这些微观尺度上的界面反应虽单次增量微小, 但在数十年时间尺度上持续累积, 最终可能导致含水层本底水化学类型的转变, 如由 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型向 HCO_3-Na 型演化。因此, 必须将界面反应的时变动力学纳入长期预测模型, 否则将严重低估水质恶化的潜在风险与滞后周期。

4 结语

水利工程对区域地下水环境的影响是一个涉及水文、力学与化学多过程耦合的复杂系统演化问题, 其长期性体现在影响的累积性、滞后性与非线性响应特征。工程通过重构地表水-地下水交换格局与降水入渗路径, 驱动地下水补给来源与空间分布发生根本性转变, 进而引发区域地下水流场的梯度重组与含水层应力状态的渐进式调整, 最终在长时间尺度上推动地下水化学组分的迁移转化与微观界面反应的持续累积。这些过程相互反馈、层层递进, 使得地下水系统的状态偏离自然基准, 并可能越过生态水文阈值, 导致不可逆的环境退化。因此, 对水利工程建设的环境评估必须突破短期监测的局限, 建立涵盖多过程耦合机制的长周期预测模型, 重视系统响应的时间延迟与非线性特征, 方能实现地下水资源的可持续管理与生态环境的有效保护。

参考文献:

- [1] 许秋华. 农田水利工程建设对区域地下水环境影响的监测与评估[J]. 粮油与饲料科技, 2025,(09):189-191.
- [2] 侯昕悦. 变化环境下玛纳斯河流域地下水环境演化及调控机制研究[D]. 长安大学, 2023.
- [3] 力巷措. 大型水利工程建设环境质量综合评价——以拉西瓦灌溉工程为例[J]. 中国水运, 2023,23(04):70-72.
- [4] 陈舟, 王锦国等. 水利水电工程地下水环境影响评价关键问题及案例分析[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023,51(03):48-55.
- [5] 孙亚. 滨海地区地下水资源开发利用对生态环境的影响研究[D]. 大连理工大学, 2021.

作者简介: 张啸川 (1998-), 男, 汉族, 重庆市人, 助理工程师, 硕士, 水工, 研究方向: 水利工程。