

水工环领域中的地下水回灌技术研究与实践

马艳荣

山西金地源地质科技有限公司 山西 晋中 030600

摘要：地下水回灌作为水工环领域（水资源保护、工程干预、生态修复）的核心技术，对地下水水量平衡维持、水质改善及生态功能修复具有关键作用。本文聚焦地下水回灌技术的“水源—工程—生态”协同逻辑，剖析不同回灌场景（矿山疏干水、再生水、雨水）的技术适配性，构建“水质预处理—工程布局—生态响应”全流程技术体系。通过典型案例论证技术应用效果，结合实践挑战提出优化路径，为地下水可持续管理提供理论支撑与实践指引。

关键词：水工环；地下水回灌；水量平衡；水质修复；生态协同

1 引言

地下水是维持区域水文循环与生态安全的核心要素，然而过度开采、污染渗漏等问题导致全球超50%的地下水含水层面临退化风险。“地下水回灌”通过人工手段将符合要求的水源（如矿山疏干水、再生水、雨水）注入含水层，实现“水量补充、水质改善、生态修复”多重目标，是水工环领域（Water-Engineering-Environment）解决地下水危机的关键技术。本文围绕回灌技术的核心原理、技术体系及实践应用展开研究，旨在为地下水保护与可持续利用提供兼具创新性与实用性的解决方案。

2 地下水回灌技术的核心内涵与水工环协同逻辑

2.1 技术内涵与功能定位

地下水回灌是指通过工程设施将外源水（地表水、再生水、矿坑水等）有控制地注入地下水含水层，以恢复地下水水位、改善水质或提升生态功能的技术手段。其在水工环领域的核心价值体现在水资源维度（Water），缓解地下水超采引发的水位下降，实现水资源循环利用（如矿山疏干水回用率提升至80%以上）；工程维度（Engineering）：通过回灌井、渗滤场等工程设施设计，解决水源输送、地层适配等技术难题；生态维度（Environment）：修复地下水—土壤—生物生态链，改善湿地、农田等依赖地下水的生态系统。

2.2 “水-工-环”协同逻辑

地下水回灌并非单一的“补水”行为，而是“水源水质控制（水）—回灌工程优化（工）—生态效应评估（环）”的协同过程。

水源端：需对回灌水进行预处理（去除悬浮物、重金属、有机物），确保回灌后不引发二次污染（水质标准契合《地下水质量标准》Ⅲ类及以上）；

工程端：根据地层结构（如松散孔隙层、裂隙岩

层）选择回灌方式（深井回灌、地表渗滤），设计回灌井间距、渗滤场渗透率等工程参数；

生态端：回灌后需聚焦地下水水位变化的生态影响监测，核心在于规避水位异常波动对非生态系统的负面效应。需重点关注两方面：一是防范水位骤升引发土壤盐渍化，尤其在干旱半干旱区域，地下水埋深过浅（低于临界深度）会导致地表蒸发加剧，盐分随水分上升并累积于土壤表层，破坏土壤理化结构；二是避免水位剧烈波动对湿地等生态系统的干扰，如湿地水位短时间大幅上升可能淹没底栖生物栖息地，打乱水体与沉积物的物质交换平衡，影响湿地净化功能及水生生物群落稳定性。此外，还需监测水位变化对地层稳定性的间接影响，如浅层水位骤升可能增加岩土体含水率，诱发边坡失稳或地表沉降，威胁周边工程设施安全。通过构建“水位监测—趋势预测—阈值预警”机制，设定合理水位调控区间，可有效降低回灌对土壤、湿地及地质环境的潜在风险，保障生态系统结构与功能的稳定性。

3 地下水回灌技术体系构建与关键技术解析

3.1 回灌水源分类与预处理技术

地下水回灌的水源类型多样，其适配场景需结合水源水质、区域水文特征及回灌目标综合判定

矿山疏干水：源自矿井开采排水，含悬浮物、铁锰等矿物质，适合回灌至矿区周边含水层，以补充疏干漏斗、修复超采区域，常见于矿山开采区及地下水超采区。

再生水：以城市污水处理厂尾水为主，含氮磷、有机物，经深度处理后可回灌至城市周边非饮用水含水层，缓解用水压力，适用于城镇化区域及缺水城市。

雨水：地表径流或屋面雨水携带初期面源污染物，经简单预处理后，适合通过地表渗滤回灌浅层地下水，提升生态补水能力，匹配海绵城市建设区或农村地区。

地表水：如河流、水库水，含泥沙及微量污染物，

可通过傍河渗滤回灌，优化地下水与地表水交互关系，适用于湿地保护区或傍河区域。不同水源需针对性预处理（如矿山疏干水除铁锰、再生水脱氮磷），并结合地层渗透性选择回灌方式（地表渗滤/深井回灌），以实现“水源—工程—生态”的协同适配，避免二次污染并提升回灌效能。

3.2 针对性预处理技术

矿山疏干水：采用“沉淀（去除悬浮物）—曝气氧化（去除 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} ）—过滤（石英砂滤池）”工艺，处理后浊度 $< 5\text{NTU}$ ， $\text{Fe}^{2+} < 0.3\text{mg/L}$ （满足《地下水质量标准》Ⅲ类）。

再生水：增加“膜处理（反渗透去除盐分）+紫外消毒（灭活病原微生物）”环节，确保回灌水氨氮 $< 0.5\text{mg/L}$ 、总大肠菌群 $< 3\text{MPN}/100\text{mL}$ ，避免地下水富营养化与病原污染。

雨水：通过“初期弃流（截留前10min径流）—生物缓冲带过滤（去除悬浮物）—蓄水池沉淀”，预处理后 $\text{SS} < 20\text{mg/L}$ ，可直接用于地表渗滤回灌。

3.3 回灌工程技术分类与适配性

3.3.1 地表渗滤回灌（适合浅层地下水补给）

技术原理：利用天然或人工改造的地表设施（渗滤池、渗滤沟、透水铺装），通过重力作用使水源渗入地层。

工程设计关键：渗滤介质选择：砂土、砾石层渗透率高（ $> 10^{-3}\text{cm/s}$ ），适合快速回灌；黏土需人工改良（添加30%砾石）提升渗透率^[1]。

防堵塞措施：定期清理渗滤表面沉积物，回灌水预处理浊度 $< 10\text{NTU}$ ，避免细颗粒堵塞孔隙。

典型应用：海绵城市建设中，将透水铺装（渗透率 $\geq 0.1\text{mm/s}$ ）与地下渗滤沟结合，年均回灌雨水量占降雨量的15%-20%，浅层地下水水位年均回升0.5-1m。

3.3.2 深井回灌（适合深层地下水补源与污染防控）

技术原理：通过回灌井将处理后的水源直接注入深层含水层，适用于地层渗透性差或需精准补源的场景。

工程设计关键如井结构设计：采用“多层筛管+止水封隔”，避免不同含水层串层污染（如浅层污水渗入深层饮用水含水层）。

回灌压力控制：压力需高于含水层初始水头5-10m，但低于地层破裂压力（防止地层抬升或裂隙扩张）。

典型应用：某沿海城市为防治海水倒灌，建设深井回灌系统（单井流量 $500\text{m}^3/\text{d}$ ），将处理后的再生水注入咸淡水界面上游，3年后海水入侵距离缩短3km，深层地下水氯离子浓度下降40%。

3.3.3 诱导回灌（利用天然水力梯度补源）

技术原理：通过抽取地下水降低局部水头，形成“人工漏斗”，利用天然水力梯度引导周边清洁水源（如河流、湿地水）自然渗入含水层。

适用条件：需存在稳定的地表水源与良好的地下水径流条件，适合傍河区域生态补水。

工程优势：无需高能耗抽水，成本较深井回灌低30%-50%，但需严格控制抽水量（避免过度诱导导致地表沉降）。

3.4 生态协同修复技术

3.4.1 地下水—生态链修复

水位调控与生态作物的选型：针对干旱区，将回灌后地下水水位控制在地表以下2-5m（生态作物根系有效吸收层），优先种植耐旱物种（如胡杨、沙枣），其根系可深入含水层获取水分，同时通过蒸腾作用改善区域小气候。

案例：西北某矿区回灌修复后，地下水水位从8m回升至4m，周边梭梭林存活率从30%提升至75%，土壤含水率增加2.3%，生态系统向“草本+灌木”稳定群落演替。

3.4.2 湿地生态功能重建

回灌补水与水质净化协同：在湿地周边建设渗滤回灌场，回灌水经湿地植物（芦苇、香蒲）根系过滤后渗入地下水，形成“回灌—湿地净化—地下水补源”循环。某湖滨湿地回灌工程显示，回灌水经湿地处理后，氨氮去除率达60%，总磷去除率45%，同时湿地土壤有机质含量增加1.2%，底栖生物种类增加15种。

4 典型实践：水工环协同下的地下水回灌应用案例

4.1 案例背景：某煤矿疏干水回灌工程

4.1.1 矿区概况

某煤矿位于华北平原，年疏干排水量 200万m^3 ，导致周边地下水水位年均下降1.2m，形成面积 5km^2 的地下水漏斗，地表出现多处裂缝（宽度2-5cm），农田生物枯萎率达40%。疏干水水质特征：浊度50-100NTU， Fe^{2+} 2-5mg/L， Mn^{2+} 0.5-1mg/L，其余指标达《地下水质量标准》Ⅲ类。

4.2 水工环协同实施方案

4.2.1 水资源端：疏干水深度处理

工艺路线：“调节池—曝气氧化池（停留时间2h，曝气量 $0.5\text{m}^3/\text{m}^3\text{水}$ ）—沉淀池（斜管沉淀，表面负荷 $1.5\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ）—石英砂滤池（滤速 8m/h ）—回灌蓄水池”。

处理效果：浊度 $< 3\text{NTU}$ ， $\text{Fe}^{2+} < 0.2\text{mg/L}$ ， $\text{Mn}^{2+} < 0.05\text{mg/L}$ ，完全满足回灌水质要求。

4.2.2 工程端：复合回灌系统构建

地表渗滤场：在矿区地势低洼处建设5处渗滤池（单池面积2000m²，填充砾石层（厚度50cm，粒径5-10mm）+砂层（厚度30cm，粒径0.5-1mm）），渗透率1.2×10⁻³cm/s，年均回灌量120万m³（占疏干水量60%）。

深井回灌井：在地下水漏斗中心区域布设2眼回灌井（井深80m，筛管段位于第四系含水层，单井流量200m³/d），年均回灌量30万m³，补充深层地下水。

4.2.3 生态端：地下水—农田生态修复

回灌后地下水水位年均回升0.8m，地表裂缝自愈合率达70%；农田采用“滴灌+耐旱作物（玉米、棉花）”种植模式，配合回灌补水，作物产量较修复前提升25%，土壤含水率从8%增至12%，蚯蚓等土壤生物密度增加1.5倍。

4.3 实施效果

水量平衡：3年后地下水漏斗面积缩小至2km²，水位恢复至开采前的80%。

水质改善：回灌区域地下水Fe²⁺、Mn²⁺浓度分别从1.5mg/L、0.3mg/L降至0.3mg/L、0.08mg/L，达《地下水质量标准》Ⅲ类。

生态效益：矿区周边生态作物覆盖率从25%提升至60%，形成“渗滤场—农田—林地”生态缓冲带，区域生态系统稳定性显著增强。

5 地下水回灌技术的实践挑战与优化路径

5.1 水质适配性难题

再生水、矿坑水等复杂水源的预处理成本高（如反渗透膜处理再生水成本达2-3元/m³），中小企业难以负担；部分水源（如高盐矿井水）处理后仍无法满足回灌水质要求，制约技术应用。

工程长期运维风险：地表渗滤场易受泥沙、藻类堵塞（渗透率年均下降10%-15%），需定期清淤（成本占工程总投资的15%-20%）；深井回灌可能引发地层堵塞（筛管结垢）或串层污染，监测与维护技术要求高。

生态负效应防控不足：回灌水量过大可能导致地表土壤盐碱化（如干旱区地下水位超过临界深度2m）、湿地生物涝死；回灌水源与原地下水化学性质差异大（如硬度、pH值），可能破坏含水层原生微生物生态^[2]。

5.2 优化路径

5.2.1 技术创新：低成本、高适配性技术研发

简易预处理工艺：针对矿山疏干水，推广“曝气+生

物滤池”组合技术（利用微生物氧化Fe²⁺、Mn²⁺），替代传统化学处理，成本降低40%，处理效率提升30%。

防堵塞回灌材料：研发可降解多孔介质（如秸秆基生物炭）用于地表渗滤场，兼具吸附污染物与抗堵塞能力（渗透率稳定期延长至5年以上）。

5.2.2 工程优化：智能监测与动态调控

智慧回灌系统：集成水位传感器、水质检测仪、流量控制器，实时监控回灌量与水质（如当回灌水浊度>5NTU时，自动启动反冲洗程序），实现“监测—预警—调控”闭环。

分层回灌技术：根据含水层水质差异，将清洁水源（如雨水）回灌至浅层含水层，再生水回灌至深层非饮用水含水层，避免优质水资源浪费。

5.3 生态协同：全周期效应评估与调控

回灌前生态风险评估：建立“水质-水量-生态”耦合模型，预测回灌后地下水化学组分变化、水位波动对生物的影响（如通过根系吸水模型计算适宜水位阈值）。

生态补偿措施：在回灌区域周边布设生态缓冲带（宽度50-100m，种植耐盐植物如碱蓬、盐角草），防控土壤盐碱化；定期监测含水层微生物群落，若多样性下降超20%，及时调整回灌水源或添加原生微生物菌剂。

6 结论

地下水回灌技术是水工环领域解决地下水危机的核心手段，其本质是通过“水源净化—工程优化—生态协同”的系统整合，实现地下水“量-质-生态”的多维修复。本文构建的“预处理—工程布局—生态响应”技术体系，在矿山疏干水、再生水等场景的实践中已验证其有效性，但仍需针对水质适配、工程运维、生态风险等挑战，加强技术创新与智能管理。未来，随着“双碳”目标推进与水资源短缺加剧，地下水回灌技术需进一步与海绵城市、循环经济模式深度融合，为地下水可持续利用提供更具韧性的解决方案，助力人水和谐的生态文明建设。

参考文献

- [1] 刘青勇,马承新,张保祥,等. 地下水回灌补源模式研究与示范[J]. 水利水电技术,2004,35(2):57-59. DOI:10.3969/j.issn.1000-0860.2004.02.018.
- [2] 周蕾. 基于承载力调度模型的生态系统水质修复研究[J]. 地下水,2021,43(1):197-199. DOI:10.19807/j.cnki.DXS.2021-01-070.