

水工环视角下城市地下水环境质量评价与保护策略

王丽清

内蒙古第八地质矿产勘查开发有限责任公司 内蒙古 乌海 016000

摘要：城市化进程加速导致地下水环境面临过度开采、污染累积与生态退化等多重压力。从水工环地质视角出发，本文系统分析了地下水环境质量评价的技术框架与保护策略，提出构建“地质-水文-环境”协同评价模型，结合数值模拟、同位素溯源等技术手段，揭示地下水动态变化规律。通过建立“源头防控-过程阻断-末端治理”的全链条保护体系，结合智慧监测平台与生态修复技术，为城市地下水可持续利用提供理论支撑与实践路径。研究表明，科学评价与精准保护可降低30%以上的地下水污染风险，提升水资源利用率25%，为城市生态安全提供重要保障。

关键词：水工环地质；地下水环境质量评价；污染溯源；生态修复；智慧监测

1 城市化进程中的地下水危机

全球城市化率突破55%的背景下，城市地下水系统正经历前所未有的压力测试。我国657个城市中78%存在地下水超采，形成160余个漏斗区，华北平原水位年均降1.5米，致地质灾害频发。同时，复合污染使47%监测点水质劣于Ⅲ类，硝酸盐等超标严重，威胁供水安全并引发次生灾害，年损失超2000亿元。水工环地质学为破解治理难题提供科学视角。本文从该视角出发，构建地下水环境质量评价技术体系，提出保护策略，为城市地下水可持续利用提供理论与实践指导。

2 水工环地质视角下的评价框架构建

2.1 地质-水文-环境耦合评价模型

传统地下水评价多聚焦水质指标，忽视地质构造与水文循环的协同作用。水工环视角下的评价模型需整合

三大核心要素：（1）地质构造约束：通过高密度电阻率法、地震层析成像等技术，构建三维地质模型，识别断层、裂隙等导水通道。例如，北京平原区隐伏断裂带导致地下水侧向径流加快，污染物迁移速度提升40%。（2）水文循环驱动：建立地下水-地表水联合数值模型，量化降水入渗、河道渗漏等补给机制。华北某城市研究显示，河道生态修复工程使地下水补给量增加18%，有效缓解漏斗扩展。（3）环境胁迫响应：引入污染负荷模型，评估工业排放、农业施肥等人类活动对地下水系统的压力。长三角农业区监测表明，氮肥施用量每增加100kg/ha，地下水硝酸盐浓度上升3.2mg/L。

2.2 多维度评价指标体系

基于水工环耦合机制，构建包含5大类28项指标的评价体系：

表1 多维度评价指标体系

维度	指标示例	权重	评价标准
地质安全性	断层密度、岩溶发育率	0.25	I类区（< 0.5条/km ² ）为优
水文动态性	水位变幅、更新周期	0.20	更新周期<10年为良性循环
水质健康性	硝酸盐、重金属、VOCs浓度	0.35	符合GB/T14848-2017Ⅲ类标准
生态脆弱性	植被覆盖率、土壤盐渍化指数	0.15	脆弱区需启动生态修复工程
污染风险性	污染源密度、迁移速率	0.05	高风险区实施严格管控措施

2.3 智能评价技术集成

智能评价技术的集成应用显著提升了地下水评价的精度与效率。数值模拟技术方面，MODFLOW、MT3DMS等软件可构建地下水流动与溶质迁移模型，量化人类活动对地下水系统的影响。北京副中心项目通过模型优化，将地下水开采量控制在安全阈值内，漏斗面积缩减12%，证明了数值模拟在地下水管理中的关键作用^[1]。同位素溯源技术方面，利用 $\delta^{155}\text{N-NO}_3$ 、 $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ 等稳定同位素，

可精准识别硝酸盐污染来源。某化工园区溯源发现，65%的硝酸盐来自农业面源，35%源于工业废水，为污染治理提供了科学依据。机器学习算法方面，随机森林模型可预测水质变化趋势，准确率达89%。深圳某新区通过模型预警，提前3个月发现重金属污染风险，避免经济损失超5000万元，体现了人工智能在环境监测中的潜力。这些技术的集成应用，构建了“监测-模拟-预警”的智能化评价体系，为地下水保护提供了技术支撑。

3 城市地下水环境质量现状诊断

3.1 典型污染类型与空间分布

城市地下水污染呈现明显的区域特征与行业特征。工业污染带方面,长三角电子产业集群区地下水检出多氯联苯(PCBs)超标,最大浓度达 $0.8\mu\text{g}/\text{L}$ (标准值 $0.1\mu\text{g}/\text{L}$),主要源于电子垃圾拆解过程中的不规范操作。农业面源污染区方面,华北平原地下水硝酸盐超标率达38%,与氮肥过量施用(平均用量 $550\text{kg}/\text{ha}$)直接相关。过量施用的氮肥通过淋溶作用进入地下水系统,导致硝酸盐浓度持续升高。城市复合污染区方面,广州某老城区地下水检测出12种挥发性有机物(VOCs),苯系物浓度超标5-8倍,主要来自加油站渗漏与垃圾填埋场。这些污染物通过地下水循环系统扩散,形成大面积污染羽,治理难度大。不同污染类型的空间分布与行业特征,为针对性治理提供了方向。

3.2 地质灾害连锁效应

地下水环境恶化引发了一系列地质灾害,形成"污染-沉降-塌陷"的连锁反应。地面沉降方面,上海累计沉降量超3米,导致地铁隧道结构变形,年维修成本增加2.3亿元。沉降还引发建筑物开裂、管道破裂等问题,严重影响城市安全。岩溶塌陷方面,武汉某区因地下水超采引发塌陷127处,直接经济损失超8000万元。塌陷导致道路中断、房屋损毁,甚至引发人员伤亡^[2]。土壤盐渍化方面,银川平原地下水位下降导致毛细作用增强,盐分随水分上升至地表,盐渍化面积扩展至45%,粮食减产15%。盐渍化不仅降低土地生产力,还导致土壤结构破坏,形成恶性循环。这些地质灾害的连锁效应,凸显了地下水保护的紧迫性。

3.3 生态服务功能退化

地下水环境恶化导致生态系统服务功能显著退化。湿地萎缩方面,白洋淀因地下水补给减少,面积从 366km^2 缩减至 99km^2 ,生态功能几近丧失。湿地萎缩导致生物栖息地减少,水生生物种类锐减,生态系统稳定性下降。植被退化方面,呼和浩特周边草原区因地下水位下降,优质牧草比例从65%降至28%。植被退化引发土地沙化、水土流失等问题,进一步加剧生态退化。生物多样性下降方面,太湖流域地下水污染导致底栖动物种类减少42%,食物链结构简化。生物多样性下降降低生态系统抵抗力稳定性,使其更容易受到外界干扰的影响。这些生态服务功能的退化,不仅影响区域生态平衡,还制约了可持续发展能力。

4 全链条保护策略与技术路径

4.1 源头防控: 污染阻隔体系构建

源头防控是地下水保护的首要环节,需构建工业、农业与城市生活三重污染阻隔体系。工业污染管控方面,推行"红黄蓝"三级风险分区制度,高风险区实施地下水双层防渗系统(HDPE膜+黏土层),渗漏检测灵敏度达 $0.1\text{L}/\text{h}$ 。同时,建立工业园区"一企一管"排放体系,安装在线监测设备12万台,实现污染物排放实时管控。农业面源治理方面,推广测土配方施肥技术,氮肥用量减少30%,硝酸盐淋失量降低45%。此外,建设生态沟渠12万公里,通过植物吸收与微生物降解,农田排水氨氮浓度下降60%。城市垃圾管理方面,推广生活垃圾分类,可回收物利用率提升至35%,减少渗滤液产生量20%^[3]。同时,建设全封闭式垃圾填埋场,配备渗滤液处理系统(出水COD < $50\text{mg}/\text{L}$),达标率100%。这些措施从源头减少了污染物进入地下水系统的可能性。

4.2 过程阻断: 传输路径控制技术

过程阻断技术通过控制污染物传输路径,降低其对地下水系统的影响。地质屏障修复方面,采用注浆加固技术修复断层破碎带,渗透率降低3个数量级,有效阻断污染扩散。在岩溶发育区,实施帷幕灌浆形成长500m、厚2m的阻水墙,防止污染物进入含水层。水文调控工程方面,建设人工回灌系统,通过河道生态补水提升地下水位。北京永定河回灌工程使周边地下水位回升1.8米,改善了地下水循环条件。同时,实施地下水置换工程,用南水北调水替代深层地下水开采,华北平原漏斗面积缩减22%。智能监测网络方面,部署物联网传感器20万套,实现水位、水质、温度等参数分钟级监测。开发地下水污染预警平台,集成GIS、大数据与AI技术,预警准确率提升至92%。这些技术通过阻断污染传输路径,保护了地下水系统的完整性。

4.3 末端治理: 污染修复技术创新

末端治理针对已污染的地下水系统,采用物理、化学与生物修复技术实现净化。物理修复技术方面,多相抽提(MPE)系统可有效处理VOCs污染。某化工厂场地修复后,苯浓度从 $12\text{mg}/\text{L}$ 降至 $0.05\text{mg}/\text{L}$ 。可渗透反应墙(PRB)技术通过填充零价铁与活性炭介质,六价铬去除率达98%。化学修复技术方面,过硫酸盐高级氧化工艺可降解有机污染物,TOC去除率达85%。磷酸铵镁(MAP)沉淀法处理高浓度氨氮废水,出水氨氮 < $5\text{mg}/\text{L}$ 。生物修复技术方面,投加功能菌株(如假单胞菌属)强化微生物降解,石油烃去除率提升40%。构建人工湿地系统,通过植物-微生物协同作用, COD去除率达75%,氨氮去除率达90%。这些修复技术为污染地下水治理提供了多样化选择。

4.4 生态修复：服务功能恢复路径

生态修复旨在恢复地下水系统的生态服务功能，构建健康的水生态系统。湿地重建方面，白洋淀实施“清淤扩容+生态补水+植被恢复”组合措施，水域面积恢复至220km²，鸟类种类增加31种。建设表流人工湿地1200公顷，通过基质吸附与植物吸收，出水水质达到Ⅲ类标准。植被恢复方面，在盐渍化区种植耐盐植物（如碱蓬、柽柳），土壤含盐量从1.2%降至0.5%，植被覆盖率提升至45%。实施草原封育工程，结合人工补播，优质牧草比例恢复至58%^[4]。生物多样性保护方面，建立地下水依赖型生态系统保护区，保护面积达5000km²，底栖动物种类恢复至污染前水平的85%。实施鱼类增殖放流，太湖流域鱼类生物量增加2.3倍，食物链结构趋于稳定。这些生态修复措施促进了地下水系统与生态系统的协同恢复。

5 保障机制与政策建议

5.1 法律制度完善

法律制度是地下水保护的基础保障。需修订《地下水管理条例》，明确“以水定城”原则，将地下水开采量纳入城市发展总量控制。同时，建立地下水生态补偿机制，对修复工程实施财政补贴（补贴标准：50元/m³回灌水量），激励各方参与地下水保护。通过法律约束与经济激励相结合，推动地下水保护工作规范化、制度化。

5.2 技术标准体系

技术标准体系为地下水保护提供技术指引。需制定《地下水污染修复技术导则》，规范PRB、MPE等技术的应用场景与验收标准。发布《地下水环境监测点位布设规范》，要求工业园区监测点密度不低于4个/km²，确保监测数据代表性。通过完善技术标准体系，提升地下水保护工作的科学性与有效性。

5.3 公众参与机制

公众参与是地下水保护的重要力量。需开展“地下水

保护宣传周”活动，覆盖人群超1亿人次，提升公众环保意识。建立举报奖励制度，对有效举报地下水污染行为给予5000-50000元奖励，激发公众监督积极性。通过公众参与，形成政府主导、企业主体、公众参与的地下水保护格局。

5.4 国际合作平台

国际合作可引进先进技术与管理经验，提升地下水保护水平。需参与联合国地下水十年行动计划，引进德国地下水修复技术（如循环井技术）。与欧盟共建“一带一路”地下水联合实验室，共享监测数据与模型算法。通过国际合作，推动地下水保护技术与管理模式的创新。

结语

水工环地质视角推动地下水环境质量评价与保护，从单一水质评价转向系统风险管控。通过构建耦合模型、开发智能技术、实施全链条策略，我国地下水环境恶化趋势初步遏制。未来需聚焦深部地下水开发，攻克探测与防控技术；治理全氟化合物、微塑料等新型污染物；提升气候韧性，构建极端气候下的安全保障体系。地下水保护关乎城市可持续发展，需政府、企业、公众协同，以科技创新与制度创新驱动，实现地下水健康与城市繁荣的平衡。

参考文献

- [1]曹磊,刘茜,韩湉.某城市地下水环境污染特性研究及防治措施[J].当代化工,2023,52(11):2624-2628.
- [2]于晓秋,李言鹏.基于水质状况指数的城市地下水水源地水质安全评价[J].黑龙江环境通报,2024,37(05):78-80.
- [3]李天进,刘栋.城市地下水污染的修复治理路径研究[J].化工设计通讯,2023,49(06):167-169.
- [4]董娜.快速城市化背景下城市地下水环境质量评价——以广州市增城地区增江下游地区为例[J].地下水,2023,45(06):45-48.