

地下水治理中生态补偿的效益量化研究

侯 阔

河北省水利工程局集团有限公司 河北 石家庄 050000

摘 要：地下水治理生态补偿效益量化是生态损害赔偿与治理机制落地的关键技术。本文从技术实施层面，构建“基线确定-实物量核算-价值量转换-综合效益评估”的量化体系，结合污染治理案例，运用资源等值法、恢复成本法、替代成本法及条件价值法开展实操分析，明确各环节技术要点与数据要求。通过多维度指标和实证测算，梳理量化难点并提出解决路径，为地下水治理生态补偿标准化量化提供技术参考。

关键词：地下水治理；生态补偿；效益量化；资源等值法；条件价值法

引言：地下水是重要水资源与生态系统载体，其污染治理与生态修复是生态环境保护重点，生态补偿是推动治理责任落实的关键。然而，地下水隐蔽性强、修复周期长，其治理生态补偿效益量化缺乏统一技术路径，现有实践常因方法模糊、数据不足导致补偿标准偏差。当前研究多侧重理论，缺乏技术实操分析。本文聚焦量化技术方法与实施步骤，通过案例验证可行性，旨在解决技术瓶颈，提升补偿科学性与落地性。

1 地下水治理生态补偿效益量化的技术框架与原则

1.1 核心量化原则

结合地下水特征与生态补偿实操要求，效益量化需遵循四大原则。水文地质一致性原则，量化范围需与污染治理的水文地质单元匹配，保证核算范围与污染迁移、治理影响范围一致，避免偏差。效益可量化原则，量化指标应能核定实物量并转换为价值量。技术实操性原则，量化方法应依托现有设备和技术，降低基层实施成本。时空匹配性原则，核算时间需与治理、恢复周期契合，空间范围应覆盖污染影响区及周边关联区域。

1.2 三级量化技术体系

构建“基线确定层—实物量核算层—价值量转换与综合评估层”的三级体系，各层级衔接、数据互通。基线确定层是基础，采用对照区域法确定基准指标，为损害判定和效益核算提供参照。实物量核算层是核心，通过监测和勘察获取实物指标，是价值转换的前提。价值量转换与综合评估层是输出端，将实物量转换为货币价值，从多维度评估综合效益，为制定补偿标准提供依据^[1]。

1.3 适配性量化技术方法

结合地下水治理效益类型，选取资源等值法、恢复成本法、替代成本法及条件价值法为核心量化方法，避免单一方法的局限性。资源等值法用于量化地下水水资源功能恢复效益，结合恢复资源量和区域生态价值进行

核算。恢复成本法适用于周边生态系统修复效益，以实际工程成本为核算依据。替代成本法用于核算替代性生态效益，以其他工程实现同等功能的成本为参考值。条件价值法用于量化非市场化的社会效益，通过问卷调查获取公众支付意愿。四种方法互补，全面量化多维度效益。

2 地下水治理生态补偿效益量化的技术实施步骤

2.1 基础数据采集与基线确定

基础数据采集是效益量化的前提，需开展三类核心工作。污染源调查通过现场勘探与采样检测，明确污染物类型、范围、迁移路径，采集特征污染物浓度、污染源分布等数据。水文地质监测布设监测井，获取地下水位等参数，结合ArcGIS构建空间模型。生态环境现状调查采集周边植被覆盖率等数据，明确生态受损与社会影响范围。基线确定采用对照区域法，选取同水文地质单元、未受污染且生态相似的区域为对照区，以其水质与生态指标为基线。依据技术指南，治理区指标恢复至基线指标±20%范围内判定为生态恢复，无历史数据区域优先采用此法，确保基线客观可比。

2.2 生态损害与恢复实物量核算

实物量核算以基线数据为参照，反向核算治理后的生态恢复实物量，核心分为地下水水资源与生态系统修复两类实物量。水资源实物量核算借助ArcGIS空间分析模块，对治理前后污染物浓度进行空间插值，确定污染削减面积，结合含水层平均厚度计算恢复的地下水资源量，对特征污染物超标区域扣除未达标部分，仅核算达标有效水资源量。生态系统修复实物量核算通过对比治理前后周边生态关键指标完成，涵盖植被修复面积、土壤改良体积、地下水依赖型生物栖息地恢复范围等。核算全程以现场监测数据与勘察记录为依据，确保数据真实可追溯^[2]。

2.3 价值量转换与综合效益评估

价值量转换是实物量转为货币价值的关键环节，需按效益类型选取适配方法：水资源恢复效益采用资源等值法，结合区域单位地下水资源生态价值完成核算；生态系统修复效益采用恢复成本法，将植被种植、土壤改良等实际工程成本作为价值量；替代性治理效益采用替代成本法，以建设等效污水处理厂的投资与运行成本为核算依据；社会经济效益采用条件价值法，通过问卷调查获取公众对饮水安全和灌溉恢复的支付意愿。综合效益评估从生态、经济、社会三个维度展开：生态效益包含水资源恢复与生态系统修复效益；经济效益包含地下水生产灌溉直接收益与治理产业带动的区域经济收益；社会效益包含饮用水安全保障、人居环境改善等间接效益。通过构建多维度指标体系完成综合效益量化评估，为补偿标准核定提供全面依据。

2.4 补偿标准核定的技术要点

补偿标准核定以综合效益量化结果为核心，结合污染责任比例与实际治理成本调整。核定首步通过水质指纹分析、污染物迁移模型等污染溯源技术，精准判定各污染主体的污染贡献比例，明确责任划分；其次扣除污染主体已投入的实际治理成本，杜绝重复核算；最后结合地下水生态恢复的长期性特点，综合考量治理后生态效益的持续时间，区分短期与长期效益纳入核定范围。最终核定的补偿标准需与综合效益相匹配，实现生态补偿的科学落地。

3 实证分析：某地下水污染治理项目生态补偿效益量化

3.1 项目概况

项目位于我国东部低山丘陵区某村庄，属独立古河道水文地质单元。2021年地下水受氯化物（超标1.5–2.0倍）、氨氮（超标1.2–1.8倍）污染，污染源为周边稀土厂与盐酸厂的废水直排及储罐泄漏，影响范围1.65km²，导致5000余名村民饮用水及农田灌溉受限。2022年启动治理工程，2025年完成治理，采用“污染源封堵+抽提处理+生态修复”综合治理，水质恢复至《地下水质量标准》III类标准。项目治理周期3年，总治理成本1350万元，经溯源判定稀土厂承担70%污染责任，盐酸厂承担30%。

3.2 基础数据与基线确定

选取同水文地质单元未受污染区域为对照区，确定基线：氯化物 ≤ 250mg/L、氨氮 ≤ 0.2mg/L，含水层平均厚度10m。布设12口监测井，采集2022–2025年数据，结合ArcGIS分析确认：累计恢复地下水资源量68.5万m³，植被修复2.1km²，农田灌溉恢复0.8km²。社会经济效益采用条件价值法，问卷调查显示居民对饮水安全的平均支付意愿为90元/人·年。

3.3 效益量化结果

采用三级量化技术体系，结合资源等值法、恢复成本法、替代成本法及条件价值法对该项目的生态补偿效益进行量化，核心结果如表1所示。

表1 某地下水污染治理项目生态补偿效益量化结果

效益类型	量化方法	核心实物量指标	价值量（万元）	权重	加权效益值（万元）
水资源恢复效益	资源等值法	恢复地下水资源量68.5万m³	865.3	0.45	389.39
生态系统修复效益	恢复成本法	植被修复2.1km²、土壤改良1.8万m³	338.5	0.30	101.55
替代性治理效益	替代成本法	等效污水处理厂建设与运行	902.0	0.15	135.30
社会经济效益	条件价值法	保障5000人饮用水、恢复灌溉0.8km²	450.0	0.10	45.00
综合效益	—	—	2546.8	1.00	661.24

注：权重采用层次分析法（AHP）确定，邀请5位水文地质、环境经济领域专家对四类效益进行两两比较，构建判断矩阵。经计算，判断矩阵一致性比率CR = 0.06 < 0.1，满足一致性检验要求。权重向量为：水资源恢复0.45、生态系统修复0.30、替代性治理0.15、社会经济效益0.10。各效益类型的价值量合计为2546.8万元，经AHP权重加权后综合效益值为661.24万元。该加权值综合考虑了不同效益类型在地下水生态补偿中的相对重要性，作为最终补偿标准核定的依据。替代成本法在此作为下限估算，实际生态效益高于此值。

3.4 补偿标准核定结果

以综合加权效益值661.24万元为核心，结合污染责任比例，核定各污染主体的生态补偿费用。稀土厂承担70%污染责任，需支付补偿费用462.87万元；盐酸厂承担30%污染责任，需支付补偿费用198.37万元，项目生态补偿总金额为661.24万元。需要说明的是，核定的补偿金额用于对受影响村民的饮水安全补偿及区域生态恢复再投入，与项目治理成本1350万元分属不同资金渠道，互不抵扣。该补偿标准既覆盖了地下水治理的核心生态效益，又根据污染责任进行合理划分，符合生态补偿的公平性与科学

性原则。

4 地下水治理生态补偿效益量化的技术难点与解决路径

4.1 主要技术难点

地下水治理生态补偿效益量化面临诸多技术难点。其一,水文地质参数动态变化,受季节、降水、人工开采等因素影响,地下水位、水流速度等参数不断改变,使实物量核算出现偏差。其二,非市场化效益量化困难,地下水的生态系统服务功能、公众健康保护等社会效益缺乏明确市场价格,传统核算方法主观性较强。其三,多污染源责任划分不明,多数地下水污染由多污染源共同造成,污染物迁移路径复杂,难以精准判定各污染源贡献比例^[3]。此外,地下水生态恢复具有长期性,短期核算难以反映长期价值,易导致补偿标准核定不全面。

4.2 针对性解决路径

针对上述难点,提出以下解决路径。构建动态水文地质监测体系,布设自动化监测井实时监测参数,结合数值模拟模型动态校准,及时调整实物量核算结果。融合多种方法量化非市场化效益,以条件价值法获取公众支付意愿,结合资源等值法结果,提高量化客观性。运用精准污染溯源技术划分责任比例,结合水质指纹分析等技术精准判定各污染源贡献。对于长期效益问题,分阶段核算效益,将短期直接效益与长期间接效益分别核算,综合纳入补偿标准,确保覆盖治理全生命周期。

5 地下水治理生态补偿效益量化的技术优化建议

5.1 完善量化指标体系

结合《生态环境损害鉴定评估技术指南》要求,完善地下水治理生态补偿效益量化指标体系,在现有水资源、生态系统指标基础上,增加地下水生态系统服务功能指标、治理技术能效指标、长期生态效益指标等新内容,包括地下水碳汇能力、生物多样性恢复率、治理后生态效益持续年限等,实现从单一资源效益量化向多维度、全流程效益量化的转变。

5.2 推动量化技术的智能化融合

将大数据技术、地理信息系统(GIS)、地下水数值模拟模型与效益量化技术深度融合,构建智能化的效益量化平台。通过大数据技术整合多源监测数据,实现数

据的实时更新与共享;利用GIS实现污染范围、治理范围的空间可视化,提高实物量核算的精准性;运用地下水数值模拟模型预测治理后的地下水恢复趋势,为长期生态效益量化提供技术支撑^[4]。

5.3 制定标准化的技术规范

加快制定《地下水治理生态补偿效益量化技术规范》,明确量化原则、方法、步骤、指标体系等核心内容,统一水文地质参数核定、基线确定、价值量转换等关键环节的技术标准。技术规范需结合不同水文地质区域、不同污染类型的特点,制定差异化的量化要求,提高规范的适用性与实操性。

5.4 加强技术验证与案例库建设

开展多区域、多类型的地下水治理生态补偿效益量化技术验证,选取不同水文地质条件、不同污染类型(如无机污染、有机污染)的治理项目进行实证分析,不断优化量化方法与模型。同时,建立全国地下水治理生态补偿效益量化案例库,收集整理典型案例的量化数据、技术方法、实施效果,为各地量化工作提供参考与借鉴,推动量化技术的不断完善。

结束语

地下水治理生态补偿效益量化兼具专业性与实操性,关键在于构建科学量化体系,实现实物量到价值量的精准转换。鉴于地下水条件复杂、生态效益具有长期性,未来应推动量化技术向智能化、标准化发展,融合多学科手段,完善指标与规范,注重技术实践结合,以案例库建设促进经验推广。提升量化水平,才能让生态补偿机制精准落地,改善地下水生态,实现生态与经济社会协同发展。

参考文献

- [1]李俊伟.浅层地下水有机污染分布与生态修复补偿研究[J].环境科学与管理,2024,49(12):153-157.
- [2]冯聪,杜雪明,张尹军.基于生态补偿的资源税税率调整系数设计[J].中国矿业,2022,31(9):42-47.
- [3]于丽敏.地下水超采对水环境的影响和地下水超采综合治理方案研究[J].环境科学与管理,2021,46(4):24-28.
- [4]王雪梅,闫鑫,梅传书,等.海河流域地下水治理与保护法律制度研究[J].海河水利,2025(3):18-23.