

# 地热开发对区域水环境影响评估

李朝飞

云南地质工程第二勘察院有限公司 云南腾冲 679100

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17682

**[摘要]** 地热开发对区域水环境的影响评估需以本底调查为基础,先明确地下水(水位埋深、水质指标 pH/TDS、补给路径)、地表水(丰枯流量、生态基流)及地热资源(热储层温度、流体类型)特征,同时梳理单井出水量、回灌方案等工程参数。评估核心聚焦三大维度:地下水易受开采影响出现水位降深、含水层越流(岩溶区风险突出),且存在高浓度离子泄漏、钻井泥浆污染等问题;地表水可能面临热污染(温差超 5℃)、TDS 升高,进而导致水生植被死亡;水生态系统则需警惕泉眼干涸、洞穴鱼类栖息地破坏等风险。评估采用数值模拟(MODFLOW、QUAL2K 模型)、现场监测(月度采样)等技术,结合风险分级划定敏感区。防控需从源头入手(回灌量≥80%、尾水降温 ±2℃),辅以过程管控与生态修复(渗透性反应墙 PRB),最终判定影响程度,明确项目可行、限条件可行或不可行,保障区域水环境安全。

**[关键词]** 地下水;水质达标率;现场监测法;风险分级评估;生态修复

## 引言

随着全球能源结构向清洁低碳转型,地热资源作为可再生、污染少的新型能源,其开发利用规模与范围持续扩大,在供暖、发电、医疗康养等领域发挥着重要作用,为区域经济发展注入新动能。然而,地热开发过程中,钻井施工、地热流体开采与回灌、尾水排放等环节,不可避免地与区域水环境产生交互作用,可能打破原有的水文生态平衡。部分地区已出现因地热开采导致地下水位持续下降、含水层污染,或尾水未经妥善处理引发地表水体热污染、水生生物生存环境破坏等问题,尤其在岩溶等水文地质条件复杂区域,风险更具隐蔽性与滞后性。若忽视此类影响,不仅会制约地热资源的可持续开发,还将威胁区域水安全与生态安全。因此,科学开展地热开发对区域水环境的影响评估,明确影响范围与程度,制定针对性防控策略,成为平衡地热资源利用与水环境保护的关键前提。

### 1. 评估基础:前期调查与数据准备

前期调查需全面掌握区域水环境本底与开发工程参数,为后续影响评估提供数据支撑。水环境本底调查中,地下水层面要测定水位埋深、流向及含水层岩性,岩溶区需重点标注溶洞、裂隙分布;分析水质指标,包括 pH 值、TDS、硬度及氟、砷等特征离子含量,厘清补给与排泄路径。地表水层

面需明确流域范围,监测丰枯水期流量差异,核算水质达标率与生态用水占比,尤其关注河流生态基流保障情况。同时,查清地热资源特征,确定热储层深度、温度、地热流体化学类型及开采潜力。开发工程参数梳理方面,需统计单井出水量与年开采总量,明确钻井位置与水源地、生态敏感区的距离,制定回灌方案,确定回灌量与回灌层位;此外,标注尾水排放口位置,了解换热后尾水的降温、净化处理工艺,确保数据完整覆盖评估所需关键信息。

## 2. 核心影响维度评估

### 2.1 对地下水环境的影响

地热开发对地下水环境的影响集中体现在水量平衡、水质安全及水文地质条件三方面。水量层面,地热流体开采若未配套科学回灌,易打破地下水补给-排泄平衡,引发地下水位持续降深,部分区域降深可达数十米,不仅导致热储层资源枯竭,还可能促使相邻含水层通过裂隙(尤其岩溶区发育的溶洞、裂隙网络)发生越流,改变原有地下水径流路径,影响周边水井供水稳定性。水质层面,风险源于多环节:钻井过程中泥浆渗漏可能携带污染物进入含水层;地热流体中高浓度的  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  及氟、砷等特征离子,若因井管破损或回灌水质不达标泄漏,会导致地下水 TDS 升高、有毒物质超标;不当回灌还可能引发热储层孔隙堵塞,降低含水层渗透系数,

进一步恶化地下水循环条件。此外, 长期大规模开采易诱发水文地质灾害, 如岩溶区溶洞顶板因水位下降失去支撑, 可能出现地面塌陷, 破坏地下水储存空间, 形成不可逆的环境损害。

## 2.2 对地表水环境的影响

地热开发通过尾水排放、冷却用水抽取、工程扰动, 对地表水环境的水量平衡、水质安全及水生态系统造成多维度影响, 风险随开发规模扩大呈累积效应。水量层面呈“双向干扰”: 一方面, 地热发电、供暖抽取地表水作冷却用水, 枯水期过量取水易致河湖水位骤降、挤占生态基流, 如某地热电站日均抽 5000m<sup>3</sup> 河水, 引发下游 10km 河道断流, 威胁沿岸植被与鱼类; 另一方面, 换热后尾水直排虽能补径流, 但丰水期在排水管网不完善的山区, 易加剧局部洪涝与短时积水。水质层面核心风险为热污染与化学污染: 热污染最典型, 地热尾水比地表水高 5-15℃, 大量排放打破水生生物适温平衡, 如某温泉度假区尾水直排致河道水温升 8℃, 底栖藻类异常繁殖, 溶解氧从 9mg/L 降至 5mg/L, 引发鱼类大面积死亡; 化学污染源于地热流体特征污染物, 尾水未处理则高浓度 Cl<sup>-</sup> (超 1000mg/L)、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 及汞、铅等微量重金属入水体, 致水质 TDS 超标, 破坏饮用水源地安全, 部分区域还污染农田灌溉用水、影响作物生长。水生态层面, 除水温、水质变化直接危害生物, 工程建设还破坏栖息地, 如钻井泥浆、废渣入河道覆盖河床淤泥, 堵塞鱼类产卵场, 致生物多样性下降, 且生态修复周期达 5-10 年, 恢复成本高于开发收益。

## 2.3 对水生态系统的综合影响

地热开发通过干扰水文循环、改变水体环境, 对水生态系统造成多链条、系统性破坏, 且影响兼具即时性与滞后性, 易引发生态链连锁反应。从地下水依赖型生态系统来看, 地热开采导致的地下水位下降是核心威胁。在岩溶区, 地下河水位骤降会使泉眼、溶洞水涌出量减少甚至干涸, 直接导致依赖泉水补给的耐旱灌木(如柏木、花椒)枯萎, 土壤含水量下降引发植被退化, 进而破坏昆虫、小型哺乳动物的栖息地, 导致食物链断裂。此外, 地下河是洞穴鱼类(如云南金

线鲃)、盲虾等特有生物的唯一生存空间, 热储层污染或水位下降会压缩其活动范围, 部分珍稀物种种群数量已出现 10%-30% 的降幅, 面临濒危风险。地表水生态系统的破坏更为直观。尾水热污染使水体温度升高 5-15℃, 超出多数水生生物的适温阈值——如河流中鲫鱼的适宜水温为 15-28℃, 水温持续超 30℃会导致其代谢紊乱、繁殖能力下降; 同时, 水温升高加速水体溶解氧消耗, 当溶解氧从 9mg/L 降至 5mg/L 以下时, 底栖生物(如螺类、蚌类)会大量死亡, 而藻类因高温快速繁殖形成水华, 进一步恶化水质, 形成“热污染 - 缺氧 - 水华”的恶性循环。此外, 工程施工中泥浆、废渣进入河道, 会覆盖河床产卵场, 导致鱼类繁殖成功率降低, 如某地热项目周边河段, 鲤鱼产卵量较开发前减少 40%, 幼鱼存活率下降 25%。更值得关注的是, 地下水与地表水生态系统的关联性使影响进一步扩散。地下水位下降导致地表水补给减少, 河流径流量缩减, 加剧河道萎缩; 而地表水污染通过渗透作用反哺地下水, 污染热储层, 形成“双向污染”, 最终导致区域生物多样性整体下降, 生态系统自我修复能力减弱, 恢复周期需 5-10 年, 部分损害甚至不可逆。

## 3. 评估技术方法

### 3.1 数值模拟法: 动态预测影响趋势

依托专业模型构建水生态系统响应模拟体系, 是评估的核心技术支撑。地下水层面采用 MODFLOW 模型, 输入热储层参数(渗透系数、孔隙度)、开采 / 回灌量等数据, 模拟不同开发情景下地下水位变化, 预测泉眼干涸范围、地下河流量衰减程度, 尤其针对岩溶区, 可耦合 SEEP3D 模型模拟裂隙水流场, 精准判断洞穴鱼类栖息地的水位保障情况。地表水与水生态耦合模拟则采用 QUAL2K 与 AQUATOX 模型, 前者模拟尾水排放引发的水温扩散(如 5-15℃高温尾水在河流中的影响半径)、TDS 及污染物浓度变化, 后者通过输入鱼类(如鲫鱼)、底栖生物(如螺类)的生态参数, 预测种群数量变化——例如某模拟显示, 当尾水使河道水温升高 8℃时, 鲫鱼年繁殖量将下降 35%, 与实地观测数据误差 < 10%。

### 3.2 现场监测法: 实时捕捉实际影响

构建“空 - 地 - 水”立体监测网络, 获取动态数据以

验证模拟结果。空中借助遥感技术（如 Sentinel-2 卫星），通过归一化植被指数（NDVI）监测地下水依赖型植被（如柏木）的生长状况，当 NDVI 值从 0.6 降至 0.3 以下时，判定植被出现退化。地面布设地下水监测井（每 5km<sup>2</sup> 至少 1 口），实时记录水位埋深（精度 ±0.01m）与水质指标（pH、TDS、特征离子，每周采样 1 次）；地表水监测设置 3-5 个断面（上游对照、排放口附近、下游扩散区），监测水温（精度 ±0.1℃）、溶解氧（每 2 小时 1 次）及生物指标（季度采集浮游生物、底栖生物样本，分析群落结构）。例如云南某地热项目监测显示，开发后地下河出口处盲虾种群密度从 15 只 /m<sup>2</sup> 降至 5 只 /m<sup>2</sup>，印证了生态影响的真实性。

### 3.3 类比分析法：借鉴同类项目经验

选取水文地质条件、开发规模相似的已运营项目作为类比对象，预判潜在风险。类比指标包括热储类型（如碳酸盐岩热储）、开采强度（如单井日开采量 500m<sup>3</sup>）、生态敏感程度（如是否临近自然保护区），通过分析类比项目的历史影响数据（如运营 5 年后地下水依赖植被退化率、鱼类种群降幅），推算目标项目的可能影响。例如类比某岩溶区地热项目，发现当回灌量低于开采量的 70% 时，5 年内泉眼干涸率达 40%，据此建议目标项目回灌量需 ≥80%。

### 3.4 风险分级评估法：明确影响严重程度

结合模拟与监测结果，按“影响范围 - 程度 - 可逆性”构建三级风险体系。高风险区（如水源区周边 3km、珍稀生物栖息地）：若预测地下水位降深超 5m 或生物种群降幅 > 30%，判定为高风险，需暂停开发并优化方案；中风险区（如一般农田区）：若植被 NDVI 下降 10%-20%，需采取回灌增强、尾水净化等措施；低风险区（如远离生态敏感区的区域）：若影响仅局限于局部且 1 年内可恢复，判定为低风险，需加强监测。该方法可快速明确管控重点，提升评估的实操性。

## 4. 防控与修复策略

针对地热开发引发的水位下降、水质污染、生态退化，需构建“源头防控 - 过程管控 - 生态修复”全链条体系，实现开发与保护协同。源头防控前置规避风险：优化工程设计，钻井用钢质防腐防漏套管减少泥浆渗漏；热储层开采配

套回灌系统，确保回灌量 ≥ 开采量 80%，避免水位骤降；尾水排放前降温至地表水温度 ±2℃，经生物滤池净化去除高浓度离子，TDS 超标尾水严禁直排，可用于农田灌溉或工业循环水，实现资源化利用。过程管控强化动态监管：搭建物联网监测平台，实时传输地下水水位（精度 ±0.01m）、地表水水温（精度 ±0.1℃）及生物指标；水位降深超 3m 或溶解氧低于 5mg/L 时自动预警，暂停开采并调整方案；每季度开展生态巡查，核查地下水依赖植被 NDVI 值与鱼类种群密度，及时发现退化迹象。生态修复聚焦受损系统恢复：污染含水层用渗透性反应墙（PRB）填充活性炭、沸石吸附重金属与特征离子；地表水体热污染区种苦草、狐尾藻调节水温，投放土著鱼类幼苗；干涸泉眼周边建小型蓄水池，人工补水恢复植被，重建生态链，推动水生态系统稳定。

## 总结

地热开发对区域水环境影响评估需先调查水环境本底与工程参数。其影响涉及地下水（水位降深、水质污染、地质灾害）、地表水（水量干扰、热与化学污染）及水生态（生物栖息地破坏、多样性下降）。评估采用数值模拟（如 MODFLOW 模型）、现场监测、类比分析与风险分级法。防控修复需构建“源头 - 过程 - 修复”体系：源头优化工程与回灌（回灌量 ≥80%）、尾水处理；过程靠物联网监测预警；修复用 PRB 技术、植物种植等，以平衡地热开发与水环境安全。

## [参考文献]

- [1] 刘石, 贺冰. 磨溪气田开发对区域水环境影响的评估[J]. 天然气工业, 1996, (06): 71-75+101-102.
- [2] 孙焕泉, 高楠安, 吴陈冰洁, 等. 中深层地热资源勘探开发技术与典型应用[J]. 地学前缘, 2025, 32(2): 230-241.
- [3] 刘慧, 张小红, 乌仁格日乐. 水利工程对区域水环境影响的评估方法研究[J]. 建筑与施工, 2024, 3(20): 81-82.
- [4] 龙岩, 刘珂璇, 张子怡, 等. 低影响开发设施的水文与水环境效应评估[J]. 水电能源科学, 2024, 42(6): 54-58.
- [5] 周游. 水环境影响评估的生态敏感地区城市控制性单元规划编制应用研究——以昆山高新区青淞区为例[J]. 城市周刊, 2025(34): 48-50.