

# 水工环地质调查在生态修复中的运用

张文君

云南地矿地质工程有限公司 云南 昆明 650200

**摘要:**生态修复是应对环境退化、实现可持续发展的关键,依赖对区域地质环境本底条件的深刻理解。水工环地质作为地球系统科学分支,为生态修复提供基础支撑。本文阐述了水工环地质调查的核心内涵,及其在生态修复全生命周期中的关键作用,包括前期评估、方案设计、工程实施、后期监测与成效评估。通过矿山修复的典型场景分析,表明水工环地质调查能揭示地下水循环、评估岩土体稳定性、识别污染源与迁移路径、刻画地质环境承载力,为生态修复提供精准“地质处方”。此外,文章探讨了当前挑战,并展望了多学科融合、高精度探测技术、大数据与人工智能赋能等发展方向,强调了水工环地质在构建人与自然和谐共生格局中的战略地位。

**关键词:**水工环地质调查;生态修复;地下水;岩土工程;环境地质;地质环境承载力

## 引言

21世纪以来,人类活动对地球生态系统的扰动加剧,资源开发、工业化与城市化引发水土流失、土地荒漠化、生物多样性减少及水体土壤污染等严峻问题。面对挑战,“山水林田湖草沙”生命共同体理念推动生态保护与修复从单一要素治理转向系统性、整体性修复新阶段。生态修复旨在重建健康、自我维持的生态系统,但成功需基于科学基础。若忽视区域地质环境本底条件,修复易陷入局部治理困境,甚至因误判地下水资源、忽视地质灾害风险或无知污染物迁移规律而失败,造成资金浪费和次生环境问题<sup>[1]</sup>。在此背景下,水工环地质调查凸显重要性,其作为水文、工程与环境地质学的交叉集成,为区域地质环境提供系统性认知。将此认知融入生态修复,能确保策略尊重自然规律,实现长效稳定修复。因此,探讨其具体运用,对理论和实践均具迫切性。

## 1 水工环地质调查的核心内涵与技术体系

(1) 水文地质调查:聚焦于“水”。重点查明含水层(如砂砾石层、基岩裂隙、岩溶管道)的空间分布、厚度、富水性、渗透性、水质状况以及地下水与地表水的补排关系。这对于评估区域水资源禀赋、预测生态需水保障能力、防止修复过程中对地下水造成二次污染至关重要。(2) 工程地质调查:聚焦于“土”与“岩”。旨在查明场地的地形地貌、地层岩性、地质构造、岩土体物理力学性质(如抗剪强度、压缩模量、承载力)、不良地质现象(如滑坡、崩塌、泥石流、地面沉降)的分布与稳定性。这直接关系到修复工程的地基稳定性、边坡安全以及适宜采取的工程技术措施。(3) 环境地质调查:聚焦于“人-地”关系。主要识别和评估由人类活动(如采矿、工业排放、农业面源污染)引发的环境地质问题,包括

土壤与地下水污染的范围、程度、污染物种类及迁移转化规律,地质灾害的诱发因素与风险等级,以及区域地质环境的整体承载力与脆弱性。

## 2 水工环地质调查在生态修复各阶段的关键作用

生态修复是一个复杂的系统工程,通常包括前期调查评估、方案规划设计、工程实施、后期管护与成效评估四个阶段。水工环地质调查贯穿始终,扮演着“导航仪”和“预警器”的角色。

### 2.1 前期调查评估阶段:精准“把脉”,明确“病因”

这一阶段的工作远非简单的数据收集,而是通过系统性的调查,识别出制约生态系统恢复的关键限制性因子。例如,在干旱半干旱地区,水文地质调查可能会揭示出地下水埋深过大或水质严重咸化,这才是植被难以自然恢复的根本原因,而非表面上的土壤贫瘠;而在废弃矿区,工程地质调查所发现的松散堆积物极不稳定,叠加环境地质调查确认的广泛重金属污染,共同构成了该区域生态退化的双重枷锁。基于这种对“病因”的深刻理解,调查工作能够科学地划定修复单元与优先区。通过分析地质环境条件的相似性,如共享同一含水层系统、具有相似的岩土工程地质分区或一致的污染特征,可以将广阔区域划分为若干个便于管理的修复单元,从而实现分区分类、精准施策<sup>[2]</sup>。同时,通过对地质灾害风险、污染物扩散风险等的综合评估,能够有效识别出那些亟需优先干预的高风险区域,确保有限的修复资源得到最高效的配置。尤为重要的是,这一阶段所建立的详尽水工环地质数据库,构成了修复前无可替代的“本底值”,它不仅是未来评估修复成效的客观标尺,也是判断修复过程中是否引发新的环境扰动的唯一参照基准。

### 2.2 方案规划设计阶段:科学“开方”,优化“药方”

这一阶段, 调查成果直接转化为修复策略的核心输入。在水资源配置方面, 基于水文地质模型的模拟结果, 可以科学地预测不同植被配置方案下的耗水需求及其对地下水系统的响应, 从而精准确定适宜本地条件的植被类型(是选择耐旱物种还是喜湿物种)、合理的种植密度, 甚至可以为人工湿地设计最优的水力负荷与水位调控方案, 从根本上确保生态用水的长期可持续性。在工程措施的选择与设计上, 工程地质调查提供的岩土体物理力学参数是决定性因素。对于存在潜在滑坡风险的边坡, 这些参数是设计抗滑桩、挡土墙或格构梁等支护结构的关键依据; 对于需要大规模重塑地形的场地, 岩土体的压实性、渗透性等特性则直接决定了回填材料的选择和具体的施工工艺。在污染修复领域, 环境地质调查所描绘的污染物“源-汇”关系图和迁移路径, 更是制定针对性修复策略的基石。一旦明确了污染物的性质和行为, 便可有的放矢地选择修复技术: 对于吸附性强的重金属污染土壤, 客土法或稳定化/固化技术可能是更优选择; 而对于溶解性强、易迁移的有机污染物, 则可能需要设计抽出-处理系统(Pump-and-Treat)或采用原位化学氧化/还原技术, 并利用水文地质模型来优化井群的布局, 以达到最佳的修复效率。

### 2.3 工程实施阶段: 动态“监护”, 规避风险

修复方案一旦进入工程实施阶段, 水工环地质调查的角色便从静态规划转向动态“监护”, 其核心在于实时管控风险、保障施工安全。在涉及地下工程的修复项目中, 如隧道穿越或深基坑开挖, 利用物探等手段进行施工地质超前预报, 能够有效识别前方可能存在的含水层、断层破碎带或采空区, 从而提前采取防范措施, 规避突水、涌泥等地质灾害的发生。同时, 对地下水位、水质、边坡位移等关键指标进行实时或定期的监测, 构成了动态监护的核心内容。这种监测不仅是为了验证施工是否按计划进行, 更重要的是能够及时发现异常信号。例如, 若监测数据显示, 为修复植被进行的灌溉导致局部地下水位异常抬升, 就可能预示着未来发生土壤次生盐渍化的风险, 此时便可立即调整灌溉策略, 防患于未然<sup>[3]</sup>。此外, 施工过程中揭露的实际地质情况, 是对前期地质模型最直接、最有力的检验。通过将实际揭露的地层、构造与前期预测模型进行对比, 可以及时发现偏差, 并据此修正和完善数值模型, 使其能够更真实、更准确地反映地下世界的复杂性, 为后续的施工决策提供更可靠的依据。

### 2.4 后期管护与成效评估阶段: 长效“跟踪”, 验证“疗效”

生态修复工程的竣工绝非终点, 长期的管护和科学

的成效评估才是确保其长效性的关键。在此阶段, 水工环地质调查的作用体现为一种长效的“跟踪”机制, 用以客观验证修复的“疗效”。依托前期调查所布设的地下水监测井网、边坡位移观测点、土壤剖面监测点等, 可以建立起一套覆盖关键环境要素的长期监测网络。这套网络持续不断地收集着地下水水质水量、土壤理化性质、地质体稳定性等核心数据, 形成了修复后生态系统演变的连续记录。正是基于这些长期、系统的监测数据, 并将其与修复前建立的“本底值”进行严谨的对比分析, 才能对修复工程的成效做出客观、量化的科学评估。地下水中有毒有害物质浓度的显著下降、边坡位移速率的长期稳定归零、土壤污染物总量的有效削减, 这些都是衡量修复“疗效”的硬性指标。更为重要的是, 这种长效跟踪还能揭示一些缓慢发生、不易被即时察觉的潜在问题。例如, 长期监测数据可能反映出由于区域气候变化导致的地下水位呈现长期下降趋势, 这一趋势虽然短期内不影响修复植被, 但若持续下去, 未来可能对其生存构成威胁。这种前瞻性的预警, 为实施适应性管理、动态调整管护策略提供了宝贵的时间窗口, 从而真正实现生态修复的长效稳定。

### 3 典型应用场景分析: 矿山生态修复

矿山开采活动对地质环境的破坏是系统而深远的, 水工环地质调查在此领域的应用尤为关键和深入。在水文地质层面, 调查工作首要任务是厘清矿坑涌水的来源——究竟是降雨入渗补给, 还是深层承压水的顶托? 同时, 必须详细分析涌水的水质特征, 特别是酸性矿山排水(AMD)的pH值及其中重金属的含量, 并评估其对周边含水层的潜在影响。这些信息直接决定了后续水处理策略的选择, 是采取源头封堵隔离、化学中和处理, 还是构建人工湿地进行生态净化。在工程地质方面, 调查的重点在于系统评估排土场、尾矿库以及露天采坑边坡的整体稳定性。通过钻探结合物探手段, 查明其内部结构、是否存在软弱夹层以及潜在的滑动面, 是设计削坡减载、分级放坡、设置拦挡工程以及实施植被护坡等一揽子综合稳定措施的先决条件。环境地质调查则致力于详细刻画重金属(如砷、镉、铅、汞)及残留选矿药剂的污染范围与深度, 为土壤修复技术(如土壤淋洗、化学钝化)的选择和防渗系统(如高密度聚乙烯HDPE膜)的设计提供精准的靶向依据。江西德兴铜矿的成功修复案例, 正是建立在如此详尽的水工环地质调查基础之上, 才得以构建起“源头控制-过程阻断-末端治理”的综合修复体系, 实现了从“矿竭地废”到“绿水青山”的转变。

### 4 面临的挑战与未来展望

#### 4.1 挑战

尽管水工环地质调查在生态修复中的作用日益受到重视,但仍面临诸多挑战。首先是多学科深度融合不足的问题,水工环地质专家与生态学家、景观设计师、土壤学家之间常常存在“语言壁垒”,各自为战,缺乏有效的数据共享和协同工作机制。其次是精细化与动态化调查的需求与现实能力之间的矛盾,传统的、静态的、点线式的调查方法,越来越难以满足复杂生态系统在气候变化背景下动态演变的精细刻画需求<sup>[4]</sup>。此外,在大型生态修复项目中,如何在高精度调查(如密集钻探、高分辨率物探)所带来的高昂成本与项目整体经济效益之间取得平衡,也是一个现实的难题。

#### 4.2 展望

面向未来,水工环地质调查在生态修复中的应用将呈现出清晰的发展趋势。推动多学科交叉融合将是首要方向,亟需建立“地质-生态-水文-社会”一体化的综合调查与评估框架,实现从被动提供“地质约束”到主动参与“生态引导”的角色转变。其次,高精度、智能化的探测技术将得到广泛应用,无人机搭载激光雷达(LiDAR)和高光谱相机,以及分布式光纤传感(DTS/DAS)等前沿技术,将实现对地质环境要素的厘米级、全天候、立体化感知,极大地提升调查的效率和精度。再次,大数据与人工智能(AI)的赋能将带来革命性变化,通过整合多源异构的水工环、遥感、气象、社会经济等海量数据,并利用机器学习算法,可以构建智能预测预警模型,实现对生态修复全过程的动态模拟、风险智能识别和修复方案的自适应优化。最后,全生命周期的理念将得到深化,水工环

地质监测将被深度嵌入生态修复项目的规划、设计、施工到运营维护的每一个环节,形成一个闭环的、基于数据驱动的智能决策支持系统,为生态修复的长效成功保驾护航。

#### 5 结语

水工环地质调查绝非生态修复工程的附属品,而是其科学性与有效性的基石。它通过对地下水循环机制、岩土体稳定性、污染迁移路径及地质环境承载力的系统性认知,为生态修复提供了不可替代的“底层逻辑”和“精准导航”。从矿山的疮痍到河湖的复苏,从荒漠的绿意到城市的新生,每一项成功的生态修复背后,都离不开扎实的水工环地质工作支撑。未来,随着技术的进步和理念的更新,水工环地质调查必将以更加智能、精细、融合的姿态,深度参与到“山水林田湖草沙”一体化保护和系统治理的伟大实践中,为筑牢国家生态安全屏障、建设美丽中国贡献坚实的地质力量。唯有真正读懂大地的语言,才能谱写出人与自然和谐共生的华美乐章。

#### 参考文献

- [1] 欧阳志盛.水工环地质调查在生态修复中的运用[J].中国资源综合利用,2025,43(07):165-167.
- [2] 李建金.水工环地质调查在生态修复中的运用[J].中国资源综合利用,2025,43(02):183-185.
- [3] 王志威.水工环地质调查在生态修复中运用[J].中国金属通报,2024,(06):204-206.
- [4] 马蕾.水工环地质调查在生态修复中运用策略[J].甘肃科技,2023,39(06):82-84.