

基于水工环地质特征的生态修复技术研究与应用探索

张文君

云南地矿地质工程有限公司 云南 昆明 650200

摘要: 人类活动加剧致生态系统退化、水土流失等问题频发,传统生态修复模式侧重单一要素,忽视水工环条件整体性与系统性,修复效果不稳定。本文系统阐述水工环地质特征在生态修复中的基础作用,剖析其核心内涵为水文循环、地质结构与环境介质间的耦合关系,并以此构建“以水定绿、依地施策、协同治理”的生态修复技术体系。文章详述了基于不同水工环背景的差异化修复策略与关键技术,如地下水-土壤-植被协同调控等。通过典型案例分析,验证了该技术体系在提升生态系统韧性、保障修复工程安全性及长期稳定性上的优势。最后,文章展望未来,强调需融合多学科知识、发展智能化监测预警平台,完善NbS政策与标准体系,为生态文明建设提供科学路径。

关键词: 水工环地质;生态修复;地下水-土壤-植被系统;地质灾害防治

引言

21世纪,全球生态环境问题成人类社会可持续发展核心瓶颈。中国在快速城镇化和工业化中付出巨大生态代价,森林砍伐、矿产无序开采等活动引发土地荒漠化、地面沉降等复合型生态-地质问题,威胁国土生态安全与经济社会高质量发展。生态修复成国家战略任务,但以往实践多依赖工程措施、追求短期效果,忽略生态系统内在规律及地质水文基础,如干旱地区盲目引种、不稳定边坡复绿等失败案例,凸显脱离水工环地质特征的生态修复难以为继。水工环地质学综合研究地下水、工程地质条件和环境地质问题,揭示水、土、岩三相介质相互作用机制,是健康生态系统根基。将水工环地质特征作为生态修复前置条件和设计依据,关乎修复工程长效性与经济性。本文探讨将其调查、评价与预测成果融入生态修复全生命周期,构建科学精准高效的修复范式。

1 水工环地质特征的内涵及其在生态修复中的基础作用

1.1 水工环地质特征的核心内涵

这是生态系统的“血脉”。它决定了区域内水资源的赋存状态(地表水与地下水)、补给-径流-排泄关系、水质状况以及水动力条件。具体指标包括含水层的类型(孔隙、裂隙、岩溶)、厚度、渗透系数、给水度、地下水位埋深与动态变化、水质化学组分等。这些因素直接控制着土壤水分的有效性,进而决定了植被的类型、分布和生长潜力。例如,在毛乌素沙地,浅层潜水是维系沙丘间草甸和灌木生存的关键;而在华北平原,深层承压水的超采已导致区域性地面沉降,严重威胁着农田和基础设施的安全。

1.2 工程地质特征

这是生态系统的“骨架”。它描述了构成地壳表层的岩土体的物理力学性质、结构构造及其在工程活动下的稳定性。关键要素包括岩土体的类型(砂土、黏土、基岩等)、强度参数(抗剪强度、压缩模量)、结构面(节理、断层、软弱夹层)的发育程度与组合关系、斜坡的形态与稳定性系数等^[1]。工程地质条件的好坏,直接关系到生态修复工程(如梯田、挡墙、植生槽)的承载能力和抗灾能力。在西南山区,顺向坡的工程地质结构是滑坡灾害的温床,任何修复措施都必须首先对其进行加固处理。

1.3 环境地质特征

这是生态系统的“健康状况”。它关注的是由于自然过程或人类活动引起的、对生态环境产生不利影响的地质问题。主要包括土壤与地下水污染(重金属、有机物)、土地退化(盐渍化、酸化、板结)、地质灾害(崩塌、滑坡、泥石流、地面沉降、地裂缝、岩溶塌陷)的易发性和危险性等。环境地质问题是生态修复需要直接面对和解决的核心障碍。例如,矿区废弃地通常伴随着重金属污染、酸性矿山排水(AMD)和地形地貌的剧烈破坏,修复工作必须同步进行污染治理与地貌重塑。

1.4 水工环地质特征在生态修复中的基础性作用

(1) 决定修复目标的可行性与合理性。修复目标不能脱离当地的水土资源禀赋。在年均降水量不足200mm的极端干旱区,试图恢复森林生态系统是违背自然规律的。水工环调查可以明确区域的生态承载力上限,帮助我们设定“近自然、低干预”的合理目标,如恢复以耐旱灌草为主的荒漠草原。(2) 指导修复技术的精准选择与优化配置。不同的水工环背景需要“量身定制”的修复方案。对于地下水位较浅且水质良好的区域,可优先

采用乡土水生或湿生植物进行湿地修复；对于存在潜在滑坡风险的斜坡，则必须采用“工程固坡+根系加筋”的复合技术。水工环信息是技术选型的“导航图”^[2]。

(3) 保障修复工程的长期安全与稳定。许多生态修复工程的失败源于对潜在地质灾害的忽视。通过详细的水工环地质勘察，可以识别出隐伏的断裂带、软弱土层或岩溶管道，从而在工程设计阶段就规避风险或采取针对性的防护措施，确保修复成果能够经受住时间与自然灾害的考验。

2 基于水工环地质特征的生态修复技术体系构建

基于上述认识，我们提出构建一个“三位一体、协同增效”的生态修复技术体系，其核心逻辑是：以水文地质条件为约束，以工程地质条件为依托，以环境地质问题为导向。

2.1 “以水定绿”：水文地质约束下的植被配置与水资源管理

水是生命之源，也是生态修复成败的关键变量。该原则要求所有植被恢复活动必须严格遵循区域水资源的时空分布规律。在此框架下，修复工作首先应依托先进的地下水-土壤-植被(GSV)系统模拟技术，利用HYDRUS、MODFLOW等数值模型，定量刻画不同植被情景下土壤水分的运移过程、地下水的消耗速率以及植被蒸腾耗水之间的动态平衡关系，从而科学筛选出既能满足生态功能需求又不会超出区域水资源承载力上限的最优植被组合。在具体实践中，必须坚持乡土物种优先和适地适树的基本准则，优先选择那些根系发达、耐旱、耐贫瘠的本地物种，并依据地下水位的实际埋深进行分区配置，形成由深根性乔木、中根性灌木到浅根性草本构成的垂直生态梯度。针对降雨稀少但集中的干旱半干旱地区，微地形改造与集雨技术显得尤为重要，通过精心设计鱼鳞坑、水平沟或反坡梯田等工程，可以有效拦截地表径流，增加雨水入渗，减少水分蒸发损失，从而在局部范围内营造出适宜植被定居和生长的小生境^[3]。此外，在水资源极度匮乏的区域，还应积极探索非常规水源的科学利用途径，例如在严格评估环境风险的前提下，将处理达标的城市中水或矿井水用于修复初期的植被养护，以减轻对宝贵天然水资源的压力，实现水资源的优化配置与可持续利用。

2.2 “依地施策”：工程地质依托下的地形重塑与结构稳定

稳固的地基是生态修复得以立足并长期存续的物理前提。这一原则强调，任何修复工程的设计与实施都必须与区域的地质结构特征相协调，不仅要确保工程自身

的结构安全，更要使其具备抵御外部扰动（如强降雨、地震）的能力。为此，修复工作的起点是对目标区域进行全面的边坡稳定性分析与风险分级，运用极限平衡法或先进的数值模拟方法，精确评估各潜在不稳定斜坡的稳定性系数，并据此划分风险等级。对于被判定为高风险的边坡，必须果断采取抗滑桩、格构梁或预应力锚索等可靠的工程措施进行加固，从根本上消除安全隐患；而对于中低风险边坡，则可以更多地采用土工格栅加筋、生态袋护坡或植生混凝土等兼具工程效能与生态美学的柔性技术，实现安全与生态的统一。在采矿迹地或大型工程建设遗留的损毁区域，地貌重塑与土体重构是核心任务，通过科学的削高填低和汇水线再造，努力恢复近自然的地貌形态，同时对回填的客土进行系统的物理和化学改良，例如掺入有机质以提升其持水保肥能力，调节pH值以改善其理化性质，为后续植被的扎根生长奠定坚实的土壤基础。更进一步，修复策略还应充分利用植物根系与土体之间的相互作用，有意识地选择紫穗槐、胡枝子等具有强大根系网络的先锋植物，其密集根系不仅能有效固持表层土壤，防止水土流失，还能通过生物化学作用逐步改善深层土体的物理力学性能，形成一种天然的“生物加筋”效应，从而在工程措施之外，构筑起一道由生命织就的、具有自适应和自修复能力的长期防护屏障。

2.3 “协同治理”：环境地质问题导向下的污染修复与灾害防控

生态修复绝非简单的“种树铺草”，它必须直面并系统性地解决区域内现存各类环境地质问题，以实现生态功能恢复与环境风险消减的双重目标。这意味着修复工作需要采取一种协同治理的综合视角。对于广泛存在的土壤与地下水污染问题，应根据污染物的种类、浓度和空间分布，灵活采用原位或异位修复技术。例如，针对重金属污染场地，可以通过向土壤中添加石灰、磷酸盐等钝化剂，将活性重金属转化为难溶、低毒的稳定形态；或者引入蜈蚣草等超富集植物，通过植物萃取的方式将重金属从土壤中逐步移除；对于有机物污染，则可考虑利用微生物的降解能力或通过注入化学氧化剂来分解污染物。在地质灾害频发区域，修复策略必须着眼于灾害链的全过程防控。在泥石流沟域，应构建一个由上游稳坡固源（通过生物措施固定松散物源）、中游拦挡停淤（修建谷坊、拦沙坝等工程拦截固体物质）到下游排导畅通（开挖排导槽引导洪流）组成的多层次、立体化的综合防治体系。在岩溶塌陷高风险区，则需通过地球物理勘探等手段探明地下空洞的位置与规模，并采

用高压注浆等工程技术对空洞进行填充加固,从源头上切断塌陷的诱发机制^[4]。最终,最高级的协同治理体现在水-土-生一体化修复模式上,尤其是在河湖湿地的修复中,不仅要通过人工湿地、生态浮岛等手段净化水质,还要同步关注底泥这一关键环境介质,通过科学的疏浚或原位覆盖技术重建健康的底泥微环境,并在此基础上恢复由沉水、浮叶、挺水植物构成的多样化水生植被群落,从而激活整个湿地生态系统的自净能力和生物多样性,形成一个结构完整、功能健全、能够自我维持的良好循环系统。

3 典型应用场景与案例分析:河北唐山开滦煤矿塌陷区

唐山开滦煤矿塌陷区的水工环背景极为复杂,长期的地下煤炭开采导致了大范围的地表沉陷,形成了众多积水洼地。部分区域还堆积着大量的煤矸石,不仅破坏了原始地貌,还潜藏着重金属污染和酸性矿山排水(AMD)的环境风险。同时,由于地下采空区的存在,工程地质条件极不稳定,存在发生二次沉降的可能。针对这一集生态破坏、环境污染与地质灾害于一体的复合型难题,修复工作采取了“协同治理”的综合性策略。对于大面积的积水区,没有简单地进行填埋,而是将其生态化改造为多级人工湿地系统,通过精心配置芦苇、香蒲等水生植物,构建起强大的水质净化能力,同时营造出优美的滨水景观和鸟类栖息地,最终蜕变为著名的南湖公园。对于煤矸石山,则实施了系统性的综合治理,先对其进行削坡减载以降低风险,再覆盖客土,并喷播耐重金属、耐贫瘠的先锋植物进行绿化,同时在山脚设置专门的渗滤液收集与处理系统,严防污染物向周边环境扩散。为确保公园内游客和设施的绝对安全,项

目还布设了由GPS和InSAR技术组成的地面形变监测网络,对区域稳定性进行实时、精准的监控。如今,这片曾经满目疮痍的“工业伤疤”已华丽转身为国家5A级旅游景区和城市的生态绿肺,其成功经验充分证明了基于水工环地质特征进行协同治理的巨大潜力。

4 结语

本文系统论证了水工环地质特征对生态修复的关键作用,并构建“以水定绿、依地施策、协同治理”技术体系,指出唯有尊重区域水-土-岩系统规律,生态修复方能实现从“治标”到“治本”、从“短期美化”到“长效健康”的转变。展望未来,基于水工环地质特征的生态修复研究与应用需聚焦多学科深度交叉融合,发展高精度生态系统模型以实现精准预测与智能决策;构建智能化监测预警平台,对多要素全天候监测,动态评估修复过程并预警风险;深化推广基于自然解决方案(NbS),以低成本、高效率、强韧性应对挑战;完善政策与标准体系,将水工环地质适宜性评价纳入生态修复前期工作,制定技术规范与验收标准,保障修复科学有效。

参考文献

- [1]杨冬莲.金属矿区水工环条件对矿区生态环境的影响与修复[J].世界有色金属,2025,(21):136-138.
- [2]戴天飞.生态修复技术在水工环地质灾害治理中的应用[C]//江西省汽车工程学会,江西省工程师联合会.工程技术与新能源经济学术研讨会论文集(三).江苏省地质局大数据中心,2025:151-154.
- [3]郜会东.矿山生态修复中水工环地质技术的应用探究[J].生态与资源,2025,(03):43-45.
- [4]郭根柱.矿山生态修复难点及水工环地质调查工作思路[J].中国金属通报,2022,(10):180-182.