水工环地质环境修复治理

刘　笛　王吉锐
山东省地质矿产勘查开发局第七地质大队（山东省第七地质矿产勘查院）　山东　临沂　276017

摘　要：各类工程建设与资源开发活动持续扰动地层结构，引发地下水系统紊乱、岩土体失稳、土地生态退化等复合型水工环地质问题，严重威胁区域地质生态安全。本文基于水文、工程、环境地质协同理论，系统剖析人为扰动下地质环境的损伤机理与差异化破坏特征，针对性构建水污染阻隔、岩土结构加固、土体基质改良、植被生态重构的一体化修复技术体系。通过多技术耦合协同治理，精准管控各类地质病害，助力受损水工环地质系统恢复结构稳定性与生态功能性，为区域地质环境综合治理提供技术参考。

关键词：水工环地质；地质损伤；环境扰动；综合治理；生态修复

引言：随着城镇化建设与矿产资源开发力度持续加大，自然地质演化规律被人为干预，导致地下水循环失衡、岩土应力破损、地表生态衰败等一系列地质环境问题频发。各类单一地质损伤相互耦合、叠加演化，加剧地质系统退化速率，极易诱发滑坡、地下水污染、土地沙化等次生灾害。水工环地质环境是区域生态稳定的核心基底，为有效遏制地质环境恶化态势，亟需厘清各类地质损伤的形成机制与发育特征。本文结合实际地质病害特点，整合多元修复治理技术，探索系统性、长效化的地质环境修复路径。

1 水工环地质与环境修复的基础概念

1.1 水工环地质的核心要素解析

水工环地质的核心要素包含水文地质工程地质与环境地质三类内容。水文地质结构承载地下水的储存运移交换过程，岩层孔隙裂隙组合状态决定地下水循环路径，介质渗透性能影响水体迁移速率，各类组分持续发生物质交换，维持区域地下水系统固有运行规律。工程地质条件受岩土矿物组成颗粒联结状态应力分布状态共同控制，岩土体自身力学属性会对外界扰动产生响应，外部荷载变化能够改变地层稳定状态，各类地质条件相互作用，对地质空间演化产生持续影响。环境地质特征记录地质体长期演化进程，地层物质组分迁移地表形态演变地下水化学组分变化存在内在关联，各类地质要素相互交织，共同构成区域环境地质系统。

1.2 地质环境破坏的形成机理

地质环境破坏依托多类作用机制逐步发展。水文环境变化伴随地下水动力条件改变，水体化学组分失衡，介质孔隙结构改变，多重因素叠加推动水文系统持续恶化。工程活动施加外部荷载，扰动原有地层应力场，改变岩土体内部联结关系，对地质构造产生持续扰动。生态环境演变和地质系统演化存在紧密联系，地质条件改变会削弱生态系统承载能力，生态退化反过来加速地表岩土侵蚀进程。

1.3 地质环境修复治理的核心理论

地质环境修复治理借助成熟理论体系开展工作。生态环境修复强调系统内部要素关联，统筹地质水体植被等多个组分，推动受损系统逐步恢复原有功能。地质环境治理遵循地质演化客观规律，借助岩土水文生态相关理论确立技术准则，依托地质体自身调节能力选取适配治理方法。

2 水工环地质环境的破坏特征分析

2.1 水文地质环境的破坏特征

水文地质环境遭受破坏后会呈现多重直观特征。地下含水层结构在外界干扰下发生改变，孔隙空间压缩连通性下降，地下水储存空间缩减，水位出现持续性抬升或者下降。含水层介质结构改变会降低水体储存能力，原有地下水均衡状态被打破，区域内不同点位水位出现差异化变化。水体污染源进入地下水系统之后，顺着地下水流动方向持续扩散，污染物在孔隙介质内发生吸附迁移转化。污染组分在不同层位含水层分布存在差异，地下水径流速度影响污染羽扩散范围，污染物质长期留存于地下介质之中，持续改变地下水原有化学属性。

2.2 工程地质环境的扰动特征

工程地质环境受到人为扰动之后，岩土体原有应力平衡状态被打破。岩土体内部应力重新分布，出现塑性变形，地表产生不同幅度形变，形变区域范围随扰动强度持续拓展。岩土颗粒之间联结强度下降，土体抗剪指标出现衰减，地层出现滑移变形趋势。地质构造受到外力作用发生损伤，岩层节理裂隙持续延展，岩体完整性下降。地层基础承载能力随之衰减，局部区段出现失稳

倾向，岩土体变形发展存在渐进特点，微小形变不断累积，逐步发展成规模更大的地质损伤。

2.3 生态环境的退化特征

生态环境退化伴随土地资源属性持续劣化。表层土体有机质含量下降，土壤颗粒组成发生改变，土体保水保肥能力持续减弱。土体侵蚀作用不断推进，表层肥沃土层流失，土地结构持续受损，土地生产能力逐步降低。土地退化过程伴随土体理化指标持续变化，表层土体颗粒流失，土体孔隙结构破坏[1]。植被生存依托的地质水文条件持续变差，土体水分供给能力不足，养分供给水平下降。植被根系生长空间受到限制，植株存活难度提升，群落覆盖水平逐步降低。原有植被群落结构发生改变，优势物种逐步消失，群落物种丰富度持续下降，植被群落结构趋于简单化，地表植被防护能力持续减弱。

3 水工环地质环境的修复治理方法

3.1 水文地质环境的修复方法

水文地质环境修复围绕地下水污染管控与水体系统恢复开展实施。地下水污染扩散阻断借助物理阻隔手段构建防渗屏障，阻隔层切断污染物向下游迁移的通道，限制污染羽继续拓展。阻隔材料适配地层介质条件，贴合含水层空间形态，阻断污染物在孔隙介质内部的迁移路径。水体净化依托介质吸附氧化还原反应去除地下水中有害组分，待处理水体流经反应介质，污染组分发生转化，水体各项指标逐步回归正常区间。净化单元布设位置匹配地下水径流方向，提升污染组分接触反应效率，持续削减地下水体内部污染物存量。区域水资源涵养依托地表入渗设施补充地下水储存量，调节区域地下水收支平衡。入渗设施引导降水回补地下含水层，提升地下水位，恢复含水层原有储水空间[2]。水体连通通道修复重构地下水自然运移网络，打通地层内水体交换路径，恢复不同区段水体交换能力。地下水系统修复兼顾介质属性恢复与水体组分调控，调整地下水动力条件，推动水文地质系统朝着稳定状态演化。

含水层内部滞留污染物去除可采用原位反应介质布设实现，反应介质填充于污染水体流经的地层孔隙，与溶解态污染物发生持续反应，降低水体中污染物浓度。反应介质填充区段依托钻孔布设，按照地下水流动走向设置连续反应带，缩减污染物在地下介质中的停留时间。地下水水力调控借助抽注井组改变区域水力梯度，引导污染水体定向汇集至处理单元，减少污染物在大范围地层内部弥散。抽注井布设密度参考含水层渗透参数，控制井内水流速率，避免高速水流搅动地层颗粒，造成孔隙堵塞。地层孔隙堵塞会削弱地下水流通能力，修复作业配套孔隙疏通措施，清理介质内部沉积细颗粒，保障地下水在岩层孔隙内正常流动。地下水中悬浮细颗粒会附着于岩层孔隙壁面，缩小过水断面，降低含水层渗透性能，持续影响水体循环进程。

3.2 工程地质环境的治理方法

工程地质环境治理聚焦受损岩土体结构加固与地质构造长效稳定维护。受损岩土体加固选用注浆锚固等技术手段提升岩土体力学性能。注浆材料进入岩土体裂隙孔隙，固化之后填充内部空隙，提升颗粒之间联结强度，改善岩土体整体完整性。锚固构件深入稳定地层，传递岩土体内部应力，约束岩土体变形发展，降低滑移风险。加固施工结合岩土体变形特征确定施工点位，控制材料注入速率与用量，避免施工操作对原有地层造成二次扰动。岩土体加固完成之后，地层抗剪强度得到提升，土体抵抗形变能力增强。地质构造长效维护持续监测地层应力与形变发展态势，识别构造损伤发展动向。针对裂隙持续延展区段，采取填充固结手段封闭裂隙，阻止裂隙继续扩张。调整地层应力分布状态，降低应力集中带来的失稳风险，维持地质构造长期稳定[3]。地质治理操作尊重地层演化规律，控制外部干预强度，依托岩土体自身承载能力，维持地层长期稳定属性。治理方案匹配地层岩土类型构造发育特点，区分浅层土体与深层岩体差异，选用适配技术手段，控制治理作业影响范围。

浅层松散土体可配合换填压实处理，剔除力学性能衰减严重的土体，替换稳定性更强的填料，分层压实提升土体密实度。填料颗粒级配经过筛选，颗粒之间相互嵌合，提升土体整体抗变形能力。压实作业控制分层厚度，逐段检测土体密实状态，规避局部压实不足引发的不均匀形变。岩体表层风化剥落区段开展坡面防护，抑制风化作用持续侵蚀岩体表层矿物，减缓岩体裂隙发育速度。坡面防护材料贴合岩体表面，阻隔大气降水渗入岩体内部，减少水岩作用带来的岩体强度衰减。降水渗入岩体裂隙会弱化裂隙壁面摩擦性能，促使裂隙持续扩张，逐步降低岩体整体完整性。

3.3 生态环境的综合治理方法

生态环境综合治理开展受损土地基质改良与退化植被群落重构。受损土地基质改良调整土体理化性质，补充土体有机质，优化土体颗粒级配，改善土体孔隙结构。改良材料均匀混入表层土体，提升土体保水保肥性能，修复土体养分供给能力。土体盐分重金属等有害组分通过淋洗固定手段实现管控，降低有害物质对土地生态系统产生的负面影响。基质改良作业控制作业深度，保护下层土体结构，不破坏地下含水层原有状态。土地

基质完成改良之后，土体可以为植被生长提供稳定生存介质，支撑后续植被群落构建工作。

退化植被重构筛选适配区域地质水文条件的本土物种，按照物种生长特性搭配构建复合植被群落。物种搭配兼顾地上植株与地下根系发育特点，根系分布于不同土层，稳固表层土体，降低土体侵蚀强度。植被种植依托土地基质状态确定种植密度，循序渐进完成群落构建，优先定植抗逆能力较强的本土植物。植被群落成型之后，地表覆盖水平持续提升，植被根系网络加固表层土体，减少降水冲刷带来的土体流失[4]。植被生长过程调整地表水分循环状态，促进降水入渗补给地下水体，推动地质环境与生态系统协同演化。生态治理持续维护植被群落生长状态，调控土壤水分养分供给，保障植被群落持续发育。

水工环地质环境修复治理需要兼顾水文工程生态三类地质要素之间的内在联系。单一类型治理手段难以实现系统恢复，治理方案统筹含水层保护岩土体稳定生态群落重建。治理实施阶段梳理不同地质要素之间相互作用关系，避免单项治理措施对其余地质组分造成负面扰动。治理技术选取结合场地地质条件差异，区分含水层埋深岩土体类型土地退化程度，灵活组合各类技术手段。治理作业管控施工扰动强度，规避施工活动造成地下水污染岩土体开裂土地表层破坏。场地治理完成之后，维持地质系统自然演化节奏，依托地质体自我调节能力巩固治理成效。水工环地质修复治理持续关注地质系统演化动态，根据地质条件变化调整治理实施细节，保障地质环境系统持续维持稳定运行状态。各类治理技术相互配合，处理地下水污染岩土失稳土地退化多类问题，推动受损水工环地质环境逐步恢复。

土体微生物群落培育纳入基质改良流程，外源功能微生物接入表层土体，推动土体有机组分分解，加速养分循环。微生物代谢产物促进土体团粒结构形成，提升土体孔隙稳定性，削弱降水冲击对表层土体的破坏作用。地表径流疏导设施配合植被布设，引导地表径流平缓流动，削减径流冲刷动能，减轻坡面土体剥蚀程度。径流疏导设施顺着地表微地形布置，分散汇集水流，防止水流集中冲刷形成侵蚀沟槽[5]。土体养分循环速率受水分条件制约，植被根系释放的有机酸改变土体微环境，活化土体内部封存矿质元素，持续供给植株生长所需物质。植被根系在土体内部交织形成网络，缩小土体裂隙扩张空间，减弱土体冻融干湿交替引发的表层剥落现象。

场地生态修复完成后，需布设土壤墒情、植被盖度长期监测点位，每季度采集土壤理化样本，跟踪基质养分、盐分动态变化。依据监测数据动态调整水肥补给方案，逐步降低人工干预强度，推动人工构建的复合植被群落自然演替，实现地质基底与生态系统长期协同稳定。

结束语：水工环地质环境修复是兼顾地质安全与生态保护的系统性工程，单一治理技术无法解决多源叠加的地质损伤问题。地质修复治理工作需严格遵循自然地质演化规律，统筹地下水、岩土体、地表生态三大核心要素，通过技术组合优化实现污染治理、地层加固、生态修复的协同推进。同时，施工过程需严控人为二次扰动，依托地质体自我修复能力巩固治理成果，并建立长期动态监测机制。通过全方位、常态化管控，持续优化治理方案，最终实现受损水工环地质环境的长效稳定与可持续发展。

参考文献

[1]陶晓慧.水工环地质技术在矿山环境修复治理中的应用[J].现代工程项目管理,2025,4(21).

[2]任宇.矿山水工环地质综合治理与生态修复路径研究[J].中国金属通报,2026(15)：97-99.

[3]任少鹏,张淯云.地质勘探在矿山水工环境治理中的应用研究[J].中国金属通报,2026(1)：213-215.

[4]李天珍.甘肃省某金矿矿山地质环境问题及生态修复治理[J].冶金与材料,2024,44(4)：172-174.

[5]张小雨.水工环地质在生态修复中的应用研究[J].水利技术监督,2026(8)：246-249.