

矿山排水对区域水文地质环境的影响

李永宽, 卢涵, 熊志平

云南德成规划设计有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ADA.2026010062

摘 要 : 矿山持续抽排会削弱地下水补给条件, 打破原有水动力平衡, 造成区域含水层水位下降、水力梯度重构, 降落漏斗引导周边地下水向排水中心汇聚, 引发水量减少、径流路径改变, 还可能带来地表沉降风险, 水动力条件变化会推动水质演化, 加快溶质运移与离子交换, 造成矿区周边水环境质量下降。地表与地下水的相互作用被改变, 部分区域湿度降低、植被长势减弱, 长期排水对区域水文地质环境的影响具备累积与扩散特点, 具体受含水层结构、排水强度及水力联系状况控制。

关 键 词 : 矿山排水; 水动力平衡; 含水层扰动; 降深漏斗; 区域水文地质环境

The Impact of Mine Drainage on Regional Hydrogeological Environment

Li Yongkuan, Lu Han, Xiong Zhiping

Yunnan Decheng Planning and Designing Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

Abstract : Continuous drainage from mines will weaken the groundwater recharge conditions, disrupt the original hydrodynamic balance, causing the water level of the regional aquifer to drop, the hydraulic gradient to be restructured, the subsidence funnel to guide the surrounding groundwater to converge towards the drainage center, resulting in reduced water volume, changed runoff paths, and possibly bringing surface subsidence risks. Changes in hydrodynamic conditions will promote water quality evolution, accelerate solute migration and ion exchange, and cause the water environment quality around the mining area to deteriorate. The interaction between the surface and groundwater is changed, and the humidity in some areas decreases, and the vegetation growth weakens. The long-term drainage has cumulative and diffusive characteristics on the regional hydrogeological environment, and is specifically controlled by the structure of the aquifer, the drainage intensity, and the hydraulic connection status.

Keywords : mine drainage; hydrodynamic balance; aquifer disturbance; drop-in funnel; regional hydrogeological environment

引言

矿山区域地下水系统在长期排水作用下表现出明显的水动力响应特征, 排水会削弱自然补给, 使含水层内部压力场持续改变, 引发水量、水质与地表环境的连锁反应, 扰动不断加剧时, 区域水文地质格局易出现不可逆变化, 地下水流向偏移、溶质迁移路径延伸、生态湿度条件下降^[1]。排水范围扩大后, 水文地质单元间联系被重新构建, 局部改变可逐步形成区域性效应, 波及矿区外部环境, 变化具备累积性、隐蔽性与时滞性, 矿山排水对区域水文地质环境的影响是值得重点关注的重要议题^[2]。

一、排水引发的水动力失衡问题

(一) 地下水补给削弱现象

矿山排水持续运转改变区域地下水自然补给节律, 原先依靠降水入渗、地表水渗漏及侧向补给形成的补给结构受到明显削弱, 排水量长期处于高位时, 含水层内部水量难以在自然条件下完成恢复, 补给速度逐步落后于抽排强度, 地下水补给系统进入长期亏损状态, 含水层上部渗透路径在压力调整过程中产生阻滞, 入渗能力有所下降, 深部含水层与浅部含水层之间的水力联

系逐步弱化^[3]。原本维系区域水动力稳定的补给格局被迫收缩, 局部补给源出现断续甚至中断, 地下水更新周期被明显拉长, 补给量持续下降影响矿区内部水量平衡, 改变区域水文单元之间的水力交换, 邻近区域的补给结构发生隐蔽且深远的变化^[4]。

(二) 水位下降与压力场重塑

持续排水推动区域地下水位向低洼中心集中下移, 含水层内部压力分布形成全新的梯度格局, 水位持续下降过程中, 含水层孔隙内有效压力不断提升, 水体在重力与抽排作用下向排水中心汇聚, 形成清晰的下降曲面, 压力场改变同时体现在垂向与水平

方向,原有稳定压力体系在新动力条件下完成重组。含水层结构在压力调节过程中出现压缩、孔隙率降低等物理改变,进一步影响地下水赋存状态,压力场波动调整不同含水层间水力关系,隔水层出现泄漏现象并引发跨层补给,推动区域压力场快速再分配^[5]。

(三) 流向偏移产生的连锁反应

排水形成的压力梯度变化带动地下水流向发生偏移,地形与水位高差控制的自然径流路径受排水中心强制吸引,区域地下水流场完成重构,流向偏移推动地下水在更大范围向排水区域汇聚,部分侧向补给区转为排泄区,区域水分循环内在节律发生改变,流线重新分布带动含水层内溶质运移路径同步调整,部分区域污染物迁移速度加快,水质变化影响范围进一步扩大。流向调整改变地表水与地下水之间的交换关系,原本向地下渗漏的河段转为补给受水区,地表水体水量状况随之改变,偏移效应持续强化后,区域水文地质单元间联系形成新的格局,潜在风险由局部向外围扩散,催生一系列相互关联且逐步累积的连锁反应^[6]。

二、含水层结构扰动的形成路径

(一) 降深漏斗的持续扩展特征

矿山排水在高频高强度运行状态下,排水中心周边地下水位形成显著下凹形态,且随时间不断向外延伸,含水层在持续失水过程中呈现动态变化,漏斗边界受排水量、含水层渗透性与补给强度影响,表现出不同推进速率,外缘区域水位在压力传导下逐步降低,原有稳定水力格局被迫调整,漏斗形态由局部向区域不断扩张。漏斗范围扩大后,含水层间水力联系更为密切,部分弱隔水层在长期压力差作用下易出现渗漏,多层含水系统共同参与漏斗扩展进程,漏斗加深与扩展改变区域水位分布格局,大范围水动力场受到扰动,成为驱动区域水文地质环境变化的关键因素^[7]。

(二) 径流体系重新组织的驱动因素

排水活动改变水动力条件后,区域径流体系随之重新分布,压力梯度重塑、含水层渗透性不均、补给通道受阻等条件叠加,共同驱动径流格局调整,压力中心向排水区域集中,原有控制地下水运动的水力坡度与水位差被削弱,地下水沿新形成的梯度方向运移,出现流线偏转、汇聚范围扩大等现象。含水层非均质结构在此过程中产生放大作用,局部高渗透区域形成新的快速径流通道,低渗透区域逐渐转为水分滞缓地带,补给区与排泄区空间位置在水动力重建中发生转变,径流路径向排水中心方向进一步收束,最终形成的径流格局带有明显人为干预特征,且在持续排水作用下不断动态演化^[8]。

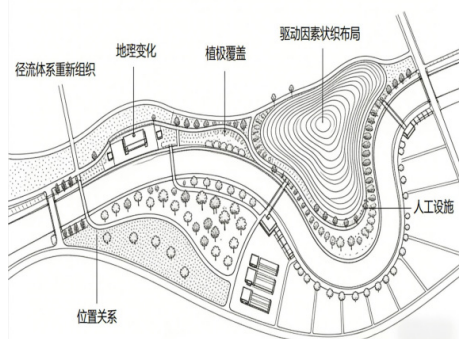


图1: 径流再组织驱动示意图

(三) 溶质迁移方式变化的内在原因

含水层水动力体系扰动后,溶质迁移方式出现明显改变,流速差异、流向调整与水化学环境重构共同构成内在动因,排水形成的水力梯度提升使部分区域地下水流速加快,溶质沿流线向排水中心快速运移,另一部分区域因补给不足流动放缓,溶质局部滞留时间增加。流向重构使溶质原有迁移路径发生转变,部分沉积区域转为溶质输出区域,水化学组分空间分布格局随之重构,含水层内部氧化还原条件与离子交换过程在压力场变化下持续调整,溶质迁移过程中产生新的反应途径,弱隔水层在长期压力差作用下形成渗漏通道,不同含水层间溶质发生交换,区域水质变化进程进一步加快^[9]。

三、区域环境响应的扩散过程

(一) 地下水量衰减带来的空间影响

矿山排水长期保持高强度运行,区域地下水量持续衰减,含水层储水能力在大范围空间内不断减弱,水量亏损沿压力变化方向向外围逐层扩散,不局限于排水中心区域,地下水埋深加大、水体可利用性降低的状况逐步波及更远范围,部分区域因补给与消耗失衡形成新的低值区,地下水分布格局呈现非对称性拉伸。衰减范围持续扩大,地表水与地下水的联动关系被改写,部分河段受地下水位下移影响存在断流可能,湿地与季节性补给型水体逐步萎缩,区域水文单元间水力联系随之弱化,跨区域补给链条出现中断或延迟,空间影响范围进一步扩大,地下水量衰减最终呈现分布不均、恢复难度大、扩散特征明显的综合状态。

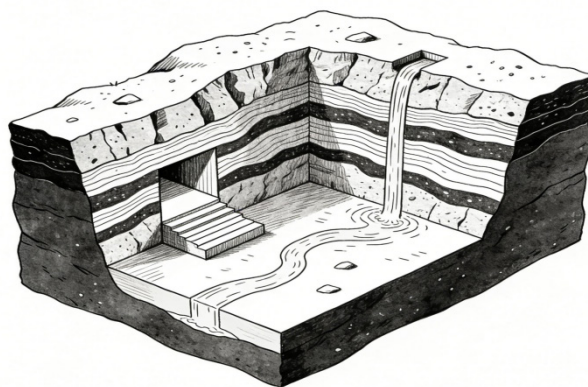


图2: 矿山排水与地下水衰减示意图

(二) 水质演化与敏感区变化趋势

水动力格局改变后,含水层内部水质演化路径形成新的走向,溶质迁移速率、反应环境与补给来源的不稳定性共同构成复杂的水化学变化过程,排水引发的流向调整改变污染物与天然溶质的运移方向,部分原本水质稳定的区域被纳入新的迁移通道范围,压力变化带动含水层内部氧化还原反应、矿物溶解与离子交换过程逐步增强,水质组成的区域差异不断放大。敏感区范围持续扩张,位置随流线分布与水动力扰动发生变动,呈现由点到面的扩散态势,部分浅层含水区补给量减少,更易受到人为或自然来源溶质的累积作用影响,质量退化进程随之加快^[10]。

（三）地表湿度与生态单元的退化表现

排水作用下地下水位持续下降，地表湿度条件逐步失衡，依赖地下水补给的生态单元进入持续干化状态，浅根系植被率先出现萎蔫、覆盖度降低等表现，深根系植物在长期水分亏缺下生长受到限制，区域植被结构发生退化性调整，湿地、草甸与河源型生态斑块因补给不足出现面积缩小甚至破碎化现象，景观连通性降低，区域生态稳定性受到影响。土壤含水量下降改变地表蒸散模式，局地气候湿润程度降低，植被所受水分胁迫进一步加剧，部分区域出现地表裂隙、土壤结构疏松等物理劣化现象，生态系统修复难度持续提升，各类变化不断累积，生态单元呈现链式退化响应，局部水分亏损逐步成为推动区域生态格局调整的重要因素^[11]。

四、水文地质格局的综合评述

（一）排水强度与影响范围的关联性分析

排水强度对区域水文地质格局演变具备主导作用，其变动直接决定影响范围的扩散速度与空间形态，排水量维持高位时，区域水动力梯度快速拉大，降深漏斗边界向外延伸，大范围含水层出现水位下移与压力再分布现象，排水强度长期保持稳定会推动含水层内部水量亏损不断积累，影响区域由核心向边缘持续外扩。地质条件差异会改变这种关联形式，高渗透性地层可在短时间内形成大范围响应，低渗区变化多以缓慢推进、多阶段发展为主要形式，长期排水条件下，区域补给能力与含水层弹性逐步降低，影响范围突破排水中心周边限制，向跨区域尺度延伸，甚至改变邻近流域地下水补给格局。

（二）水动力系统稳定性的关键制约因素

水动力系统稳定性受含水层结构、水量补给条件、压力场分布与渗透性差异等多重因素共同控制，排水活动改变原有条件后，系统快速进入非稳态过程，整体稳定性持续降低，含水层非

均质结构会放大外界扰动，压力传递速率与水量补给方式呈现复杂响应特征，弱隔水层在长期压差作用下可能产生渗漏，跨层联系增强会进一步降低系统平衡能力。补给区受地表条件变化或人为扰动影响出现补给不足时，区域水动力体系更易在排水作用下维持失衡状态，压力梯度增大将加快水流路径重构，稳定性恢复难度随之提升，系统内部水化学环境随压力与流向变动持续调整，水动力平衡需同时应对物理与化学双重扰动^[12]。

（三）区域性变化的整体特征梳理

持续排水作用下，区域水文地质格局呈现多层次、连续性与累积性的整体变化特点，水位下降、水量衰减、流向偏移、水质演化与生态响应等过程相互叠加，变化形式由局部扰动逐步发展为区域结构重构，含水层在压力场重塑过程中形成动态分区，部分区域维持持续亏损状态，部分区域借助跨层补给或流向调整获得短暂缓冲，整体变化表现出不均衡特征。水动力系统调节过程持续改写溶质迁移路径，水化学组分在不同时间尺度下呈现阶段性跳跃与定向迁移，地表生态系统对地下水变动敏感度较高，区域景观格局随之出现破碎化、萎缩化与连通性降低等表现^[13]。

五、结语

长期排水作用下，区域水文地质格局逐步呈现多层面响应，水量衰减、水质变化及生态系统连锁反应构成延伸累积的变化链条，压力场重构使含水层结构呈现新的动态特征，区域流向与补给关系被重塑，水动力体系持续处于应激状态。影响范围不断扩大，局部扰动逐步发展为区域性格局调整，水文地质系统稳定性在不同尺度面临考验，矿山排水形成的压力梯度、水量亏损与生态湿度下降，共同驱动区域环境变化，推动水文地质体系呈现缓慢而深刻的演化。

参考文献

- [1]林卓彦. 汕头市中心城区水文地质环境特征与地质灾害防治研究[J]. 科技资讯, 2025, 23 (24): 209–211.
- [2]孟俊宝. 矿山水文地质环境勘查与治理方法研究——以太阳煤矿为例[J]. 华北自然资源, 2025, (06): 129–131.
- [3]Oyen T ,Ophori D . Exploiting Chloride Conservative Tendencies as Contaminant Surrogates in Groundwater Transport Modeling in a Typical Hydrogeological Environment of Northern New Jersey [J]. Hydrology, 2025, 12 (11): 293–293.
- [4]Sedghi Z ,Nadiri A A ,Tsai C T F , et al. Advanced Probabilistic Health Risk Assessment of Water Contamination: Evaluating PTE Exposure and Public Health Implications in Complex Hydrogeological Settings [J]. Earth Systems and Environment, 2025, (prepublish): 1–23.
- [5]Oyen T ,Ophori D . Regional Groundwater Flow and Advective Contaminant Transport Modeling in a Typical Hydrogeological Environment of Northern New Jersey [J]. Hydrology, 2025, 12 (7): 167–167.
- [6]李臻. 矿山开采对水文地质环境影响评估[J]. 中国金属通报, 2025, (06): 56–58.
- [7]丁艳, 常莎. 地下水开采诱发地质环境稳定性变化的机制与效应分析——以榆林市为例[J]. 地下水, 2025, 47 (03): 52–54+87.
- [8]景佳俊, 徐豪, 王炳凯. 石灰岩露采矿山凹陷式开采对周边环境影响和防治对策分析[J]. 矿业工程, 2025, 23 (01): 60–64.
- [9]杨曦, 罗伟, 杨琼柱, 等. 基于潜能分析的三维雷达地质缺陷超前预报[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2024, 42 (06): 569–576.
- [10]Barbosa M A ,Netto G L ,Guimarães C C , et al. Geoenvironmental and geophysical methods applied to identify natural attenuation process on a complex hydrogeological environment contaminated by hydrocarbons [J]. Discover Environment, 2024, 2 (1): 123–123.
- [11]Salman A S ,Anwar E A A E ,Aita K S , et al. Geo-environmental factors controlling groundwater hydrogeochemistry, salinization and quality in El Qaa plain coastal aquifer, Southwest Sinai, Egypt [J]. Environment, Development and Sustainability, 2023, 26 (11): 28591–28609.
- [12]王栋, 吴吉春, 吴剑锋, 等. 水文与水资源工程专业实践育人综合指导书[M]. 中国水利水电出版社: 202303: 138.
- [13]刘文达, 高峰. 岩土工程勘察中地下水问题的探究[C]// 上海筱虞文化传播有限公司. Proceedings of 2022 Engineering Technology Innovation and Management Seminar(ETIMS 2022). 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 2022: 323–325.