

煤矿地质环境保护与治理研究

——以谢家集矿区为例

刘志诚, 左伟超

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年12月12日; 录用日期: 2026年1月6日; 发布日期: 2026年1月16日

摘要

我国“富煤、贫油、少气”的能源结构决定了煤炭资源对经济发展的重要性,但煤矿开采易引发滑坡、地面塌陷等地质灾害,还会造成地下水污染、土壤污染等多方面环境问题,严重制约可持续发展。本文分析了煤炭资源状况、水文地质、地质构造等影响因素,采用层次分析法、综合指数法两种常用的评价方法,以谢家集矿区为例进行评价,划分出严重区、较重区、一般区三个等级,并给出了相关治理措施建议,包括地质灾害防控、水资源保护、土地复垦、煤矸石综合利用等针对性措施,研究结果能够为相似地区提供可复制的技术路径与治理模式参考,提升矿区生态功能恢复效率与地质灾害防控能力,对推动矿区生态修复与可持续发展具有一定价值和潜力。

关键词

煤矿环境, 层次分析法, 综合指数法, 治理措施

Study on the Protection and Treatment of Coal Mine Geological Environment

—Taking Xiejiaji Mining Area as an Example

Zhicheng Liu, Weichao Zuo

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: December 12, 2025; accepted: January 6, 2026; published: January 16, 2026

Abstract

China's energy structure characterized by “abundant coal, scarce oil, and limited natural gas”

文章引用: 刘志诚, 左伟超. 煤矿地质环境保护与治理研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(1): 125-135.
DOI: 10.12677/me.2026.141013

underscores the critical role of coal resources in economic development. However, coal mining activities frequently trigger geological hazards like landslides and ground subsidence, while also causing environmental issues including groundwater contamination and soil degradation, severely hindering sustainable development. This study examines coal resource conditions, hydrogeological factors, and geological structures through two established evaluation methods: the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Comprehensive Index Method. Using the Xiejiaji mining area as a case study, the research classifies regions into three categories: severely affected, moderately affected, and generally unaffected. It proposes targeted measures covering geological hazard prevention, water resource conservation, land reclamation, and comprehensive utilization of coal gangue. The findings provide replicable technical pathways and governance models for similar regions, enhancing ecological restoration efficiency and geological disaster prevention capabilities in mining areas. These insights hold significant value and potential for advancing ecological rehabilitation and sustainable development in mining regions.

Keywords

Coal Mine Environment, Analytic Hierarchy Process, Composite Index Method, Control Measures

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

煤炭作为我国的主体能源，在国民经济发展中占据重要地位，图 1 是国家统计局在 2024 年《中国统计年鉴》中公布的 2023 年能源消费数据[1]。然而，长期高强度的煤炭开采活动对矿区地质环境造成了严重破坏，包括地表沉陷、地裂缝、滑坡崩塌等地质灾害，以及土壤污染、水体污染等环境问题。近年来，随着国家生态文明建设战略的深入推进和“双碳”目标的提出，煤矿地质环境保护与治理工作面临着新的机遇和挑战。传统的“先破坏、后治理”模式已无法满足新时代绿色发展的要求，在此背景下，煤矿地质环境治理的理论研究也如雨后春笋般涌现，监测和治理技术也在不断革新[2] [3]。

2023年中国能源消费结构

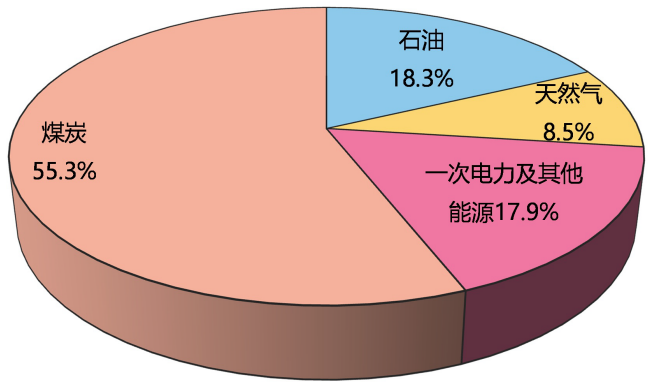


Figure 1. China’s energy consumption structure chart in 2023 (China statistical yearbook 2024)
图 1. 2023 年中国能源消费结构图(中国统计年鉴 2024)

InSAR 监测技术逐步应用于煤矿地质环境治理, 郑美楠等[4]利用永久散射体干涉法和小基线集技术获取数据, 通过时序形变分析, 将淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷规律归纳为下沉阶段 - 稳定阶段 - 上升阶段, 对治理矿区沉陷具有重要启示作用。此外, 迟凤妹等[5]提出了一种联合 SBAS-InSAR 技术与概率积分法的矿区地表沉降监测方法, 来反演盆地中心, 通过对郢城煤矿 49 景 Sentinel-1A 数据的处理, 与水准数据对比验证表明, SBAS-InSAR 与概率积分模型融合, 为复杂地质条件下矿区沉降监测、治理提供了可靠技术路径。遥感技术的快速发展, 也为煤矿地质环境的治理提供了强有力的技术支撑, 李全生等[6]开发了一种基于多时相遥感影像的生态参数定量反演方法, 利用先进的定量遥感技术精确反演与土壤、水、植被相关的生态参数, 开发了基于累积分布函数相似性的生态参数时间一致性校正的高精度插值技术, 使测量精度提高了约 20%, 为矿区生态修复提供了精准数据支撑。刘传泽[7]基于 GIS 利用无人机航拍获取的高分辨率影像, 结合数字高程模型(DEM)数据, 能够清晰识别矿区地表的微小裂缝和塌陷坑, 为地质灾害危险性评价提供了重要的基础数据, 可进一步构建了多因子耦合的环境危险性评价模型。同时, 智能传感器技术的快速发展为煤矿地质环境监测提供了新的技术手段, 特别是光纤传感技术的应用, 极大促进了矿山地质环境的监测和治理[8] [9]。

宋海彬等[10]采用层次分析法, 对其鸡西市鸡冠区煤矿沉陷区进行了生态修复效益评价, 其矿区生态系统改善良好, 对周边环境产生积极的正面影响。范静涛等[11]在矿山生态修复土壤重构技术研究中, 系统总结了从固体废物利用到生态恢复的技术路径。该研究为矿区废弃地生态功能重建提供了参考。刘峰等[12]在双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径研究中, 提出了矿区生态修复 + 碳汇的创新技术路径。范立民等[13]提出将地质灾害与人口安全与资产易损性相结合拓宽了煤矿地质灾害综合评估和治理的维度。赵洪宝等[14]采用模糊层次分析法(FAHP)和专家评分理论法建立了露天煤矿排土场土壤肥力综合评价模型。刘婧婧[15]对地裂缝、地面塌陷以及不稳定斜坡提出了混合治理修复模式, 取得较好成果。尽管目前矿区生态修复与地质灾害治理已取得显著进展, 仍缺乏统一的评价标准与治理规范, 导致不同矿区间修复效果差异显著。本研究结合矿区生态修复目标与地质灾害治理需求, 以淮南市谢家集矿区为例, 采用层次分析法、综合指数法构建多指标评价体系, 并给出了相关治理措施建议, 研究结果能够为相似地区提供可复制的技术路径与治理模式参考, 提升矿区生态功能恢复效率与地质灾害防控能力。

2. 煤矿地质环境的影响因素

煤矿地质环境的影响因素是指影响煤矿开采的地质要素、地球物理和地球化学条件等因素组合所形成的地质特征。这些因素既包括岩层结构、构造发育、水文地质条件等自然属性, 也包含采动应力、开采方式、排水强度等人为活动影响。

2.1. 煤炭资源状况

煤炭地质是煤矿地质环境的核心组成部分, 也是影响煤矿的生产成本和效益的重要因素。煤炭地质条件的不同, 决定了不同地区的煤炭储量和质量, 煤层地质结构的复杂程度和煤层埋深的深浅等, 这都直接影响到采矿工艺、矿井设计、安全生产等方面[16]。例如, 煤层埋深较浅的地区, 一般采用露天开采方式, 而煤层深埋的地区则需要通过井下采矿方式开采煤炭。煤炭地质的条件还会影响矿区的治理和环境保护措施的选择和实施。因此, 煤矿的规划和经营需要准确地掌握煤炭地质信息。

2.2. 水文地质

煤矿地下水是采矿过程中不能忽视的因素。它既是对煤炭开采安全的制约因素, 又是煤炭开采的必要条件[17]。一方面, 水文地质条件的不同, 会影响煤矿井下的水位、水质、水量、水压、温度等; 从而决定着矿井的开采方案、立井方式、抽水方式等; 另一方面, 水文地质条件不良的地区, 会对矿井生产

和安全生产产生重要影响,进一步对煤矿地质环境产生影响[18]。因此,对煤矿地质环境的保护和治理中,水文地质通常涉及煤矿开采过程中的排水和防水问题,需要综合考虑地层、孔隙介质、水流动力学以及人工措施等多个方面,所以水文地质方面也是煤矿地质环境的重要影响因素。

2.3. 地质构造

地质构造是指地球表面各种宏观级别的地质建筑,包括构造线、构造带、构造盆等。它来自于地球内部的自然力量,如板块运动、地震等。地质构造对煤矿开采有直接影响,煤矿一般位于构造线的折合部位,容易发生断层、褶皱等地质灾害,构造同样影响煤炭的分布[19]。因此在煤矿地质环境的保护和治理中,需要对地质构造进行综合评估和针对性调查,制定相应的构造控制措施。

煤矿地质环境的影响是多层面的。为了有效保护和治理煤矿地质环境,必须对其组成进行深入研究,结合实际情况开展精细化和定位化的环境保护和治理工作,提高治理的针对性和有效性,从而达到保护煤炭资源和维护生态环境的双重目标。

3. 煤矿地质环境评价

3.1. 煤矿地质环境污染评价方法

当前国内外进行地质环境评价时采用的方法较为多样化,主要有加权比较法、层次分析法、与 GIS 相结合的图层叠加分析法、模糊综合评判法、综合指数法等。

3.1.1. 层次分析法

层次分析法[20]-[23] (Analytic Hierarchy Process, AHP)是一种将复杂问题分解为多个层次,通过建立层次结构模型,对各层次元素进行两两比较确定相对重要性,进而综合得出各元素权重的方法。在煤矿地质环境评价中应用广泛,基本原理为:将问题分解成各个组成因素,再将这些因素按支配关系分组形成递阶层次结构,通过两两比较的方式确定层次中诸多因素的相对重要性,就可以得到一个重要性比较矩阵,进行归一化处理即可得到各指标因素的权重。这种方法极大程度的降低了分析难度,使这类问题的决策和排序得到了简化。

针对上一层某元素,对本层与之相关元素进行两两比较,根据相对重要程度赋予 1~9 标度值,构建判断矩阵。例如,对于准则层 B_1 属性的 C_1 和 C_2 两个指标,若认为 C_1 比 C_2 稍重要,可赋予 C_1 与 C_2 比较值为 3,反之 C_2 与 C_1 比较值为 $1/3$ 。具体见表 1。

Table 1. On the scale of judgment matrix and its meaning
表 1. 判断矩阵标度及其含义

指标 X_i 和 X_j 的重要程度比较	X_i	X_j
指标 X_i 和 X_j 一样重要	1	1
指标 X_i 比 X_j 稍微重要	3	$1/3$
指标 X_i 比 X_j 明显重要	5	$1/5$
指标 X_i 比 X_j 强烈重要	7	$1/7$
指标 X_i 比 X_j 极端重要	9	$1/9$
指标 X_i 与 X_j 重要程度介于上述等级之间 2、4、6、8 相应倒数		

对于已经确定的构造矩阵,我们需要对所构造出来矩阵进行一致性的判断,通过计算判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} 及对应的特征向量 W ,将特征向量归一化后得到各元素权重向量。

一致性指标 CI 计算:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

计算的结果如果为 0, 则表示具有一致性; 如果计算的结果不为 0, 我们可以通过下表进一步进行一致性的判断。寻找对应的平均随机一致性指标 RI , 随机一致性指标 RI 可查表得到[20]。

一致性比例:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

当 $CR < 0.1$ 时, 认为判断矩阵的一致性可以接受, 权重向量合理, 否则应对判断矩阵作适当修正。

将各指标权重与对应指标值相乘并累加, 即可得到综合评价价值, 具体为设置 B 为准则层权重向量, C_i 为第 i 个指标层权重向量, x_{ij} 为第 i 个准则层下第 j 个指标值, 则综合评价价值 Y :

$$Y = \sum_{i=1}^m B_i \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

其中 m 为准则层元素个数, n 为第 i 个准则层下指标层元素个数。根据不同指标层赋分得出综合评分。

3.1.2. 综合指数法

综合指数法是将多个评价指标通过一定的数学方法综合成一个指数, 以反映煤矿地质环境的总体状况[24][25]。该方法通过能反映煤矿地质环境特征的指标, 构建煤矿地质环境综合评价指数模型, 可通过熵权法确定指标权重 ω_i , 通过计算指标的信息熵 E_i 来确定权重, 信息熵越小, 该指标提供的信息量越大, 权重越高。信息熵:

$$E_i = -k \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

其中,

$$k = \ln \frac{1}{m} \quad (5)$$

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m x_{ij}} \quad (6)$$

x_{ij} 为第 i 个指标第 j 个样本的值, m 为样本数量, 权重 ω_i :

$$\omega_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^n (1 - E_i)} \quad (7)$$

由于各评价指标的量纲和数量级不同, 需对指标进行标准化处理, 将其转化为无量纲的数值。通常可采用极差标准化、标准差标准化。以极差标准化为例, x_{ij}^* 为标准化之后的值, $x_{i\max}$ 和 $x_{i\min}$ 分别为第 i 个指标的最小值和最大值。

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (8)$$

综合指数 S :

$$S = \sum_{i=1}^m \omega_i x_{ij}^* \quad (9)$$

根据综合指数 S 的大小对煤矿地质环境进行分级评价, 一般来说, 综合指数越高, 表明煤矿地质环

境状况越差。

3.2. 谢家集区煤矿地质环境评价

矿区主要受谢一矿、李一矿和新庄孜矿采煤活动影响,形成的地下采空区诱发覆盖岩层变形破坏、地表形成采煤沉陷凹地、积水洼地、沉陷湖塘等,造成土地、道路、建筑、环境等均受到不同程度的破坏。

3.2.1. 评价指标体系构建

基于谢家集矿区的实际情况和生态修复特点,本研究构建了包含目标层、准则层和指标层的三级评价指标体系。如表 2 所示。下面分别代入层次分析法和综合指数法进行计算。

Table 2. Indicators of coal mine geological environment evaluation in Xiejiaji district

表 2. 谢家集区煤矿地质环境评价指标表

目标层	准则层	指标层	指标性质	评价标准
谢家集区 煤矿地质 环境评价	沉降环境 B ₁	年均沉降速率(mm/a) C ₁	负向指标	≤2: 优, 2~5: 良, 5~10: 中, >10: 差
		沉陷面积占比(%) C ₂	负向指标	≤10: 优, 10~20: 良, 20~30: 中, >30: 差
	土体环境 B ₂	有机质含量(g/kg) C ₃	正向指标	≥20: 优, 15~20: 良, 10~15: 中, <10: 差
		Cd 含量(mg/kg) C ₄	负向指标	≤0.3: 优, 0.3~0.6: 良, 0.6~1.0: 中, >1.0: 差
		pH 值 C ₅	范围指标	6.5~7.5: 优, 6.0~6.5 或 7.5~8.0: 良, 其余: 中差
	水体环境 B ₃	COD 含量(mg/L) C ₆	负向指标	≤20: 优, 20~30: 良, 30~40: 中, >40: 差
		TN 含量(mg/L) C ₇	负向指标	≤1.0: 优, 1.0~1.5: 良, 1.5~2.0: 中, >2.0: 差
		TP 含量(mg/L) C ₈	负向指标	≤0.1: 优, 0.1~0.2: 良, 0.2~0.3: 中, >0.3: 差

注: 表中评价标准基于研究区实际情况和相关标准(《土壤环境质量标准》《地表水环境质量标准》)制定。

结合前人的研究成果以及相关文献,通过野外实地调查。最后邀请相关单位的专家结合这些因素对各个评价指标进行了打分,得出目标层判断矩阵表,如表 3 所示。

Table 3. Target layer judgment matrix table

表 3. 目标层判断矩阵表

目标层 A	B ₁	B ₂	B ₃
B ₁	1	2	3
B ₂	1/2	1	2
B ₃	1/3	1/2	1

求取目标层矩阵 A 的最大特征值为 $\lambda_{\max} = 3.0092$, 一致性指标 $CI = 0.0046$, 对应阶数下平均随机一致性指标 $RI = 0.58$, 计算得随机一致性比率 $CR = 0.0079 < 0.1$, 表明判断矩阵具有满意的一致性, 权重分配合理。对目标层矩阵 A 每一列进行归一化处理, 将归一化 A 矩阵各行相加, 得到一个关于目标层 A 的列向量, 最后将得到的 A 的列向量进行归一化, 即可得目标层各准则层权重向量为 B₁: 0.545, B₂: 0.303, B₃: 0.152。采用同样的方法确定各指标层权重, 在此不再赘述计算过程。经处理后, 各指标层权重依次为: C₁ (0.250)、C₂ (0.250)、C₃ (0.183)、C₄ (0.124)、C₅ (0.087)、C₆ (0.045)、C₇ (0.035)、C₈ (0.030)。由此构建层次分析模型, 结合各指标数据进行综合评价。根据式(3)进行计算, 得到综合评价值分值。

采用综合指数法时要区分正向指标与负向指标的处理方式,对负向指标需进行倒数等标准化处理,将负向指标数据进行倒数转换,使其与正向指标具有相同的变化趋势。对范围指标要进行区间标准化处理,使其数值映射到统一可比的区间内。通过式(4)计算出信息熵值,进而确定各指标的客观权重,分别为 C_1 (0.132)、 C_2 (0.141)、 C_3 (0.125)、 C_4 (0.118)、 C_5 (0.109)、 C_6 (0.097)、 C_7 (0.086)、 C_8 (0.083)。再根据式(9)就能得出不同指标综合指数 S 的分值。

根据评价标准进行打分,其中评价为优得 1 分,良得 0.7 分,中得 0.5 分,差得 0.3 分,综合评价值在 0.6~0.8 为一般区,在 0.4~0.6 之间为较重区,小于 0.4 的为严重区。结合煤矿区实际情况,对地区内煤矿地质环境影响范围进行分区。

3.2.2.评价结果及差异分析

采用 AHP 法对谢家集矿区治理前的污染状况进行评价,结果表 4 所示。

Table 4. AHP evaluation result calculation table
表 4. AHP 法评价结果计算表

区域	综合得分	评价等级
谢一矿区域	0.32	严重区
李一矿区域	0.48	较重区
西部边缘区域	0.65	一般区

根据 AHP 法评价结果,治理前谢家集矿区可划分为三个污染等级,严重区包括谢一矿区域,污染综合得分为 0.32,面积约 2.8 km²。该区域由于长期高强度开采,地表沉陷严重,年均沉降速率超过 20 mm/a,土壤有机质含量低于 10 g/kg, Cd 含量超过 1.0 mg/kg,沉陷湖水质为劣 V 类,生态环境严重恶化。

较重区为李一矿区域,综合得分为 0.48,面积约 5.2 km²。该区域开采强度相对较低,但仍存在明显的地表变形和环境污染问题,年均沉降速率在 10~20 mm/a 之间,土壤质量和水体环境处于中等污染水平。

一般区主要分布在矿区西部边缘,面积约 42 km²。该区域受开采影响较小,地表相对稳定,环境质量相对较好,但仍存在一定程度的生态退化问题。

采用综合指数法对谢家集矿区治理前的污染状况进行评价,计算结果如表 5 所示。

Table 5. CI evaluation result calculation table
表 5. CI 法评价结果计算表

区域	综合得分	评价等级	与 AHP 法对比
谢一矿区域	0.31	严重区	一致
李一矿区域	0.46	较重区	一致
西部边缘区域	0.59	较重区	略有差异

CI 法的评价结果与 AHP 法基本一致,但在轻度污染区的评价上存在一定差异。AHP 法将西部边缘评价为一般区(0.65),而 CI 法评价为较重区(0.59)。

差异主要源于两种方法在指标权重赋值上的不同。AHP 法通过层次分析主观赋予各因子权重,存在单一因子较强现象,如沉降环境 B_1 的权重就较高,而 CI 法采用等权处理,各指标权重均等,弱化了单一因子的主导作用。在西部边缘区域,土壤重金属污染较轻但生态退化指标偏高,CI 法因等权叠加导致综合得分上升,故评级略高。两种方法互为补充,AHP 法更适用于复杂污染源区的分级管理,而 CI 法可

作为快速评估工具用于大范围筛查, 结合两种方法结果, 可更科学制定分区治理策略。

4. 煤矿地质环境保护与治理建议

4.1. 防治原则

- (1) 以人为本的防治原则。
- (2) 以预防为主, 防治结合的原则。
- (3) 在开发中保护, 在保护中开发原则。
- (4) 依谁开发、谁保护, 谁破坏、谁治理的原则。
- (5) 对资源的循环利用原则。

4.2. 煤矿地质环境防治措施

4.2.1. 预防措施

煤矿地质环境的治理一定要以预防性工作为主, 在矿区建立初期选址开始就应该减少对当地土地资源和地形地貌所造成的影响和破坏。应科学规划开采布局, 合理设计开采方案, 采用先进开采技术, 减少采空区形成和地表沉陷。

煤矿区地质灾害的预防措施: 在选址的过程中应避开地质灾害高发的地区, 做好前期地质勘查。同时, 在施工前要制定合理的工程设计方案, 避免因施工造成崩塌、滑坡等地质灾害。此外, 采用井下开采时, 应合理布置采区和留设保护煤柱, 防止地表沉陷和岩层移动引发灾害, 在采空区的范围内要尽量减少人员活动。禁止开展人类工程活动, 如修建房屋建筑物等。在矿区内设立长期监测系统, 对地表位移进行实时监控, 及时预警潜在风险。

含水层破坏的预防措施: 在开采过程中, 需对煤矿区地下水的水质、水位、水量展开持续监测, 并记录各项指标, 防止回注水污染含水层。煤矿开采过程中所产生的废水需进行循环利用, 尽可能不抽取新鲜地下水。同时, 政府要加大环保督查力度, 确保各项环保指标得到有效落实。

土地资源与地形地貌的保护: 煤矿开采对土地资源的破坏, 主要源于工业广场建设和煤矸石堆积所导致的土地压占。因此, 在矿区建设伊始, 就应遵循最优化的建设方案, 尽可能减少占地面积, 提升空间利用率。同时, 煤矸石堆也需进行集中且合理的堆放, 尽可能减少土地压占面积, 并采取防风、防雨、防流失等措施, 避免造成二次污染。

4.2.2. 分区治理

根据矿区地质环境问题的分布特征和破坏程度, 实行分区治理策略。谢家集应重点以谢一矿区域进行治理, 对该区域的地表沉陷、地下水漏失及煤矸石堆存等问题进行系统修复。对李一矿区域以生态恢复为主, 采取植被重建、土地复垦等措施; 对西部边缘区实施以自然恢复为主、人工干预为辅的保护性治理模式, 逐步恢复区域生态功能, 减少人为扰动, 保护原生植被与土壤结构。同时, 结合区域自然条件和社会发展需求, 合理规划土地功能再利用方向, 推动矿区可持续发展, 如淮南市春申湖治理[26][27], 因地制宜进行矿山修复。在分区治理实施过程中, 应建立动态评估机制, 定期开展地质环境质量评价, 根据监测数据调整治理方案。对已修复区域进行长期跟踪, 确保生态功能稳定恢复。同时, 强化多部门协同管理, 落实企业主体责任, 引导公众参与监督, 形成防治结合、标本兼治的长效机制, 全面提升矿区地质环境保护与治理效能[28]。

4.2.3. 治理措施建议

- (1) 地质灾害治理: 煤矿开采过程中, 常见的地质灾害类型包括崩塌、滑坡、泥石流及地面塌陷等[29]。

其中,滑坡与泥石流的诱发机制与煤矸石的不合理堆放密切相关——开采产生的固体废弃物顺坡堆积时,若堆积高度超限或坡角过陡,易因降雨入渗、重力失衡等因素引发失稳。因此,煤矸石堆的稳定性防控是滑坡与泥石流治理的核心环节:通过削坡减载降低坡体高度,平整渣体表面以优化径流路径,辅以植被恢复或柔性防护网铺设,可有效提升堆体抗滑稳定性[30]。同时,在易发生地面塌陷区域布设实时监测系统,利用无人机与 InSAR 技术对地表位移进行动态追踪,结合地质雷达探测地下空洞发育情况,提前预警潜在风险[31]-[33]。

(2) 水资源保护:由于煤矿开采对周围含水层的破坏,使得地下水严重缺失,水资源异常紧张,会极大影响开采区居民饮用水和生活用水。治理方面主要采取完善的防渗措施,对于煤矸石的淋溶水要循环利用,防止其往第四系松散层内渗透,对其中的孔隙水水质造成影响[34]。同时在煤矸石临时的堆放场地外围修建排水沟,将淋溶水引导到循环利用池,以实现节约用水的目标[35]。对于露天开采区域,应分层设置截排水系统,有效导排大气降水与地表径流,避免积水入渗加剧边坡失稳[36]。

(3) 土地资源和地形地貌:应依据矿区地形地貌特征实施阶梯式回填与土地整形工程,对采空塌陷区采用煤矸石充填并覆土复垦,恢复可利用土地资源[37]。对于露天矿坑壁和排土场边坡,采取阶梯状削坡与植被重建技术,降低水土流失风险[38][39]。同时结合高分辨率遥感影像与数字高程模型(DEM)动态监测地形变化,优化整治方案,提升土地承载力与生态功能[40]。

(4) 煤矸石综合利用:目前阶段,煤矸石的主要应用在对路基填充、对采空塌陷区填充或是在土地复垦过程中用其进行地形改造[41][42]。其他还有用于制造建筑材料,如煤矸石砖和水泥等,同时部分高热值煤矸石可作为制砖原料,在高温焙烧过程中实现能源自给[43]-[46]。

5. 结论

煤矿开采带来的生态环境问题需通过系统性、多维度的治理措施加以解决。本文系统分析了煤矿地质环境影响因素及评价方法,以谢家集矿区为例,基于层次分析法、综合指数法构建了评价体系,将矿区划分为严重区、较重区、一般区三类区域。同时,本文总结“预防为主、分区治理、综合利用”的治理思路,包括了地质灾害防控、水资源保护、土地复垦、煤矸石资源化等针对性措施,形成了“评价-分区-治理”的技术框架,丰富了煤矿地质环境治理的理论与方法,为煤矿开采地区可持续发展、推动矿区生态修复提供了参考。未来应进一步加强生态修复与绿色采矿技术的融合,在保障能源供应的同时,实现矿区可持续发展,推动形成人与自然和谐共生的现代化矿业发展格局。

参考文献

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- [2] 余伟健, 孙梅霖, 杜锦滢, 等. “双碳”目标下矿山生态修复及减排增汇途径研究进展[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(1): 38-46.
- [3] 刘瑞平, 陈华清, 彭婕, 等. 我国矿山生态修复进展简介[J]. 中国地质, 2024, 51(6): 1802.
- [4] 郑美楠, 邓喀中, 郭庆彪, 等. 淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷 InSAR 监测与规律分析[J]. 武汉大学学报, 2024, 49(8): 1356-1366.
- [5] 迟凤妹, 刘国林, 陶秋香, 等. 联合 SBAS-InSAR 与概率积分模型的郓城煤矿沉降监测与分析[J]. 地球物理学进展, 2025, 40(2): 0484-0494.
- [6] 李全生, 李淋, 方杰, 等. 北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 323-333.
- [7] 刘传泽. 基于 GIS 的煤矿地质灾害危险性评价及开采区块等级划分研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- [8] 程刚, 王振雪, 施斌, 等. DFOS 在矿山工程安全开采监测中的研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2923-2949.

- [9] 侯公羽, 李哲, 王皓, 等. 光纤传感技术在煤矿安全监测中的应用进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(6): 2215-2230.
- [10] 宋海彬, 武富庆, 谷冰妍. 基于层次分析法的矿区生态修复效益评价体系与应用. 煤炭经济研究. 2023, 43(11): 41-48.
- [11] 范静涛, 陈伯恒, 李悦, 等. 矿山生态修复土壤重构技术: 从固体废物利用到生态恢复[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(6): 2077-2087.
- [12] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1-15.
- [13] 范立民, 马雄德, 李永红, 李成, 姚超伟, 向茂西, 仵拨云, 彭捷. 西部高强度采煤区煤矿地质灾害现状与防控技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 276-285.
- [14] 赵洪宝, 李岳, 张鸿伟, 等. 基于土壤肥力恢复力模型的河曲露天煤矿复垦治理效果评价[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(1): 77-87.
- [15] 刘婧婧. 山西省掌石沟煤矿地质环境问题及生态修复治理[J]. 西部探矿工程, 2025, 37(7): 149-151.
- [16] 刘海涛, 倪东滢. 煤矿区域生态环境质量影响因素的综合识别[J]. 黑龙江科技大学学报, 2024, 34(3): 341-346.
- [17] 张永波, 郑强, 徐树媛, 等. 矿山水环境保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023: 395.
- [18] 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(6): 129-131.
- [19] 李栋. 煤矿区构造控灾机理及地质环境承载能力研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(5): 178-180.
- [20] Saaty, T.L. (1988) Multi-Criteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process. Pittsburgh.
- [21] 窦强. 基于 GIS 和层次分析法的深圳市废弃矿山地质环境评价[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [22] 柳锐, 张电吉, 姬立杰, 等. 基于模糊综合评价的矿山地质环境评价分析[J]. 采矿技术, 2024, 24(1): 214-219.
- [23] 徐博, 张文轩, 孙静, 等. 基于层次分析法的平度市旧店镇金矿区矿山地质环境影响评价[J]. 山东国土资源, 2025, 41(10): 46-53.
- [24] 党志伟. 基于综合指数法的矿山地质环境评价研究——以高平市为例[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [25] 李昊宸, 刘莉, 肖卓棱, 等. 重庆中梁山矿区生态环境质量时空变化分析[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(S1): 220-226.
- [26] 王经钰, 邓睿, 方昌婷. 生态修复理论下的采煤塌陷区生态恢复措施探究——以淮南市春申湖为例[J]. 现代园艺, 2022, 45(17): 92-93+70.
- [27] 金珊珊, 陈妍. 工业“伤疤”变身城市“绿肾”[N]. 江淮时报, 2025-08-22(001).
- [28] 鄂尔多斯市绿色矿山建设管理条例[N]. 鄂尔多斯日报, 2025-10-18(004).
- [29] 刘兴章. 四川华蓥市煤矿地质环境综合评价及防治建议[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [30] 谢武平, 何益君, 曾蔚, 等. 露天煤矿矿山地质环境因子提取与环境恢复治理分区综合评价研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(8): 85-91.
- [31] Stothard, P. and Shirani Faradonbeh, R. (2023) Application of UAVs in the Mining Industry and Towards an Integrated UAV-AI-MR Technology for Mine Rehabilitation Surveillance. *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*, 132, 65-88. <https://doi.org/10.1080/25726668.2023.2174831>
- [32] 李金超. 基于 InSAR 和 Sentinel-1A 的淮南矿区形变灾害监测研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [33] 施望科, 贾伟航, 徐劼, 等. 结合 SBAS-InSAR 技术与瞬变电磁法在煤矿区沉降监测中的应用[J]. 遥感信息, 2024, 39(3): 97-103.
- [34] 韩岳允, 王涛. 基于水工环地质调查的煤矿采空区稳定性评价与治理技术研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(18): 172-174.
- [35] 张华, 于海成. 矿山地质环境问题分析评价与生态修复治理对策——以劳武煤矿为例[J]. 中国井矿盐, 2024, 55(2): 35-37.
- [36] 方杰, 徐智敏, 程伟, 等. 北方防沙带干旱半干旱露天矿区水资源保护利用关键技术与途径[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(7): 12-26.
- [37] 董叶. 淮南市采煤塌陷区景观环境修复与景观再生设计研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [38] 夏冬, 邵国梁, 李富平, 等. 新世纪我国露天矿边坡地灾监测预警与生态修复互馈研究进展与展望[J]. 金属矿山,

- 2025(4): 241-255.
- [39] 徐俏. 新疆北部草地露天矿废弃地生态修复关键技术及成效评估[D]: [博士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2024.
 - [40] 邹兰兰. 灵泉露天煤矿生态环境遥感监测与修复效果评价[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
 - [41] 范晓平, 刘京, 康哲, 等. 煤矸石综合利用与矿山生态修复的战略思考[J]. 环境卫生工程, 2023, 31(1): 8-15.
 - [42] 崔昕茹, 霍雪萍, 周炳杰, 等. 我国煤矸石空间分布特征与分级分质利用路径[J]. 环境科学, 2025, 46(4): 2281-2291.
 - [43] Li, J., Fan, Z., Tian, L., *et al.* (2026) Synergistic Utilization of Industrial Solid Wastes: Developing Pervious Concrete via an Alkali-Activated Binder Based on OPC, Activated Gold Tailings, GGBS and Coal Gangue Aggregate. *Construction and Building Materials*, **506**, Article ID: 144967.
 - [44] Xu, W., Wang, G., Liu, B., Han, Y., Sun, P., Zeng, J., *et al.* (2026) Fabrication and Properties of Sustainable Superhydrophobic Coating Utilizing Coal Gangue. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **38**, Article 04025583. <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-21278>
 - [45] Song, Q., Song, T., Nie, J., Zhou, H., Hu, Y., Chen, Y., *et al.* (2025) An Investigation on the Use of Coal Gangue and Coal Gasification Slag as Reducing Agent in Synergistic Utilization of Steel Slag for Higher-Activity Supplementary Cementitious Materials. *Construction and Building Materials*, **477**, Article ID: 141094. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141094>
 - [46] 李雅迪. 我国煤矸石综合利用现状与展望[J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(4): 127-133.