基于多源数据的露天矿区生态修复成效评价方法研究*

丁家有[1],李少丹[1,2],张小霞[1],刘硕[3,4],袁运许[3,4],胡引翠[1,2]

(1.河北师范大学 地理科学学院, 河北 石家庄 050024;
2.河北省环境变化遥感识别技术创新中心, 河北 石家庄 050024;
3.河北省地质资源环境监测与保护重点实验室, 河北 石家庄 050022;
4.河北省地质环境监测院, 河北 石家庄 050022)

摘要:为科学评价露天矿区生态修复成效,基于遥感、降水、土壤等多源数据,从宏观与微观两个层面,构建了包含植被覆盖度、土壤湿度、水土保持、空气质量及景观生态风险5个指标的综合评价体系。以石家庄鹿泉曲寨水泥矿区为背景,对该矿区2021年和2023年生态修复状况进行量化评估。结果表明,2021—2023年间,矿区植被覆盖度整体提升,土壤湿度改善,水土流失总体减轻,空气质量向好,综合修复效果"较好"以上区域的占比由47.38%增至57.74%,反映修复措施整体有效。然而,"较差"与"差"等级区域的占比亦有所增加,主要与局部景观破碎化、土地利用类型转换带来的生态风险有关。因此,建议针对高风险区域实施精细化治理,优化植被配置与景观连通性,以提升矿区生态修复的整体质量与可持续性。所构建的评价方法可为矿区生态修复的监测评估与科学管理提供参考。

关键词:露天矿区;生态修复;多源数据;综合评价;景观生态风险

中图分类号:X171.4;TD804 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0217-09

Research on the Evaluation Method of Ecological Restoration Effect in Open-Pit Mining Areas Based on Multi-Source Data

DING Jiayou[1], *LI Shaodan*[1,2], *ZHANG Xiaoxia*[1], *LIU Shuo*[3,4], *YUAN Yunxu*[3,4], *HU Yincui*[1,2]

(1.School of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050024, China;
2.Hebei Technological Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Changes, Shijiazhuang, Hebei 050024, China;
3.Hebei Key Laboratory of Geological Resources, Environment Monitoring and Protection, Shijiazhuang, Hebei 050022, China;
4.Hebei Institute of Geological Environment Monitoring, Shijiazhuang, Hebei 050022, China)

Abstract: To scientifically evaluate the effectiveness of ecological restoration in open-pit mining areas, a comprehensive assessment system comprising five indicators, including vegetation coverage, soil moisture, soil and water conservation, air quality and landscape ecological risk, was established from both macro and micro perspectives, based on multi-source data such as remote sensing, precipitation, and soil information. Taking the Quzhai mining area for cement in Luquan, Shijiazhuang as the experimental area, quantitative assessment of ecological restoration status from 2021 to 2023 was carried out. The results show that from 2021 to 2023, the overall vegetation coverage in the mining area increases, soil moisture improves, soil erosion decreases, air quality improves, and the proportion of areas with "good" comprehensive restoration effects increases from 47.38% to 57.74%, reflecting the overall effectiveness of restoration measures. However, the proportion of "relatively poor" and "poor" level areas has also increases, mainly due to ecological risks caused by local landscape fragmentation and land use type conversion. Therefore, it is recommended to implement refined management for high-risk areas, as well as optimize vegetation configuration and landscape connectivity, in order to enhance the overall quality and sustainability of ecological

* **收稿日期**:2025-01-07
基金项目:自然资源部部省合作项目(2023ZRBSHZ006);河北省"三三三人才工程"资助项目
作者简介:丁家有(2000—),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事遥感与矿山应用研究。E-mail:18370712476@163.com
通信作者:袁运许(1982—),男,河北沧州人,正高级工程师,主要从事矿山地质环境监测保护、矿山环境修复治理研究。E-mail:123382313@qq.com

restoration in mining areas. The evaluation method constructed in this study can provide a reference for monitoring, assessment, and scientific management of ecological restoration in mining areas.

Key words: Open-pit mining area, Ecological restoration, Multi-source data, Comprehensive evaluation, Landscape ecological risk

0 引言

近年来,随着工业化和城镇化的快速推进,矿产资源的开采为经济发展提供了重要支撑。然而,露天矿区的开发和利用对生态环境造成了显著影响,尤其是植被破坏、土壤侵蚀、空气污染等问题日益突出,对区域生态系统的稳定性构成了巨大挑战[1-3]。因此,科学评估矿区的生态修复效果,对于优化土地利用、恢复生态平衡和实现区域绿色发展具有重要意义。

遥感因其覆盖范围广和综合性强的特点,已被广泛应用于矿区生态环境监测与评价。刘子菁等[4]选用植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover,FVC)和植被净第一生产力(Net Primary Productivity of Vegetation,NPP)作为评价矿区开采后生态修复效果的重要指标,从植被覆盖度角度对矿区生态修复效果进行评价。除单一角度外,考虑到矿区生态修复效果的影响因素有多个方面,也有学者选取了多种指标进行综合评价[5-8],如王小宇等[5]通过绿度、湿度、干度和热度四个指标构建遥感生态指数,以此定量分析矿区生态环境质量的时空演变情况;王宁涛等[6]利用遥感和地理信息系统技术从 Landsat TM 影像中提取了植被覆盖度、土地利用、土壤类型以及高程信息,实现了对矿区水土流失的定量监测,并针对矿区的水土流失情况提出了改善对策;马丽丽等[7]选用了包含水体、植被、居民地和生态多样性等 6 项指标构建生态修复效果评价体系,包含了生态与人类社会等各方面,但数据获取难度大,可操作性和泛化能力不强。

随着景观生态学的发展,也有部分学者引入了景观格局指数[9-12]开展矿区生态修复成效评价。NKONDJOUA[9]基于景观生态学计算了喀麦隆北部地区矿山的土地利用信息的景观指数,分析了矿区修复前后土地利用的演变规律。郭文杰[10]首先计算自然地理因子、建设经济因子、生态保护因子等矿区修复场景的适宜性,然后计算了矿区的景观破碎度、多样性和分离度,通过结合矿区修复后的景观生态特征和场景的适宜性,综合分析了废弃露天矿区的生态修复成效。景观生态学的方法为研究矿区生态修复提供了新的视角,可以从景观的角度量化和空间化矿区景观类型变动对生态系统的影响。

综上所述,关于矿区生态修复评价的研究主要集中于自然生态要素(如植被覆盖度、土壤湿度)、生态效益以及景观格局等方面,缺乏结合宏观与微观层面、生态环境与景观结构的综合评估。因此,本文综合生态环境和景观两个维度,以石家庄曲寨水泥矿区为试验区,基于遥感、降水、土壤等多源数据,从植被覆盖度、土壤湿度、水土保持、空气质量及景观生态风险五个方面系统评价矿区生态修复效果,旨在为矿区生态修复的科学决策提供依据,并为类似生态敏感区的综合治理与监测提供参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

曲寨水泥矿区位于河北省石家庄市鹿泉区太行山东麓,地势呈现西高东低的特征,属于温带半湿润大陆性季风气候,降水主要集中在 7 月、8 月,地区降水分布不均,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨。该地区建材行业对水泥用石灰岩需求旺盛,且交通便捷、工业基础优良,为矿山开采奠定了良好基础。矿区开采历史悠久,可追溯至 20 世纪 70 至 80 年代,以村民零星开采为主,到 20 世纪 90 年代后期发展为规模开采,此前由 4 家矿山企业分别进行开发,且各企业规模各不相同,开采方式包括分层开采以及浅孔或中深孔爆破。2013 年,为实现资源的优化配置,这 4 家矿山企业整合并重新设置采矿权,生产规模提升至 220.00 万 t/a,采用露天开采的方式进行作业。

1.2 研究数据

本文使用的遥感数据主要来源于 MODIS、Sentinel-2A。降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心发布的高精度气象指标栅格数据。土壤数据来源于联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)构建的世界土壤数据库 HWSD2.0。数字高程模型(DEM)数据来源于 SRTM 官网,基于《土地利用现状分类》的分类方法绘制土地利用图,并结合曲寨水泥矿区的景观特点,利用无人机数据进行目视解译获得土地利用数据。

2 评价方法

针对露天矿区的生态修复问题,本文主要从宏观和微观两个角度综合分析矿区的生态恢复情况。宏观的生态恢复评价包括植被覆盖度、土壤湿度、水土保持、空气质量、景观生态风险五个方面;微观层面主要根据矿区土地利用类型分析矿区景观格局水平。

2.1 植被覆盖度

植被覆盖度作为植被的直观量化指标,反映了植被的基本情况,是指研究区内植被垂直投影面积占地表面积的百分比,是衡量地表植被状况的重要指标之一。本文主要使用植被覆盖度指数(FVC)计算矿区的植被覆盖度,其计算公式为:

$$NDVI=\frac{NIR-R}{NIR+R} \tag{1}$$

$$FVC=\frac{NDVI-NDVI_{soil}}{NDVI_{veg}-NDVI_{soil}} \tag{2}$$

式中:$NDVI$ 是归一化植被指数;NIR 代表近红外波段的反射率;R 代表红光波段的反射率;$NDVI_{soil}$ 是无植被覆盖的 $NDVI$ 像元;$NDVI_{veg}$ 是植被完全覆盖的 $NDVI$ 像元。

FVC 的值域是[0,1],值越大,植被覆盖度越高;值越小,覆盖度越低。根据我国水利部施行的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)中植被覆盖度分级标准,将植被覆盖度分成 5 级,见表 1。

表 1 植被覆盖度分级标准

Table 1 Classification standards for vegetation coverage

分级	FVC/%	植被覆盖度
1	<10	低
2	10~30	中低
3	30~50	中
4	50~70	中高
5	>70	高

2.2 土壤湿度

本文使用可见光与短波红外干旱指数(Visible and Shortwave Drought Index,VSDI)计算矿区的土壤湿度,该指数计算方法是一种基于遥感数据进行植被覆盖区域表层土壤水分反演的方法,其计算公式为:

$$VSDI=1-[(\rho_{SWIR}-\rho_{Blue})+(\rho_{Red}+\rho_{Blue})] \tag{3}$$

式中,ρ_{SWIR}、ρ_{Blue}、ρ_{Red} 分别表示短波红外、蓝光、红光波段的光谱反射率值。

$VSDI$ 值越大,土壤湿度越高;$VSDI$ 值越小,土壤湿度越低。本文以 $VSDI$ 值为土壤湿度分级标准,将土壤湿度分为 5 个层次:极干旱($0.8<VSDI\leqslant1$)、干旱($0.6<VSDI\leqslant0.8$)、正常($0.4<VSDI\leqslant0.6$)、湿润($0.2<VSDI\leqslant0.4$)和极湿润($0<VSDI\leqslant0.2$)。

2.3 土壤侵蚀模数

本文使用通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation,RUSLE)模型研究矿区的水土保持能力。RUSLE 模型是一种广泛应用于估算土壤侵蚀量的数学模型,其计算公式为:

$$Q=J\times K\times LS\times C\times P \tag{4}$$

式中:Q 为单位时间内单位面积的土壤流失量,t/(hm^2·a);J 为降雨侵蚀力因子,MJ·mm/(hm^2·h·a),采用章文波提出的降雨拟合模型进行估算;K 为土壤可蚀性因子,t·h/(MJ·mm),采用 WILLIAMS 等提出的环境政策综合气候模型(Environmental Policy Integrated Climate,EPIC)计算;坡长因子(L)和坡度因子(S)为地形因子,均无量纲,L 因子采用 Wischmeier 等[13]提出的公式计算;S 因子分两种情况,缓坡(<14°)采用 MECOOL 等[14]提出的公式计算,陡坡(≥14°)采用 LIU 等[15]提出的公式计算;C 为植被覆盖因子,无量纲,基于植被覆盖度的遥感数据定量估算法确定;P 为保土措施因子,无量纲,参照文献[16]和文献[17],对曲寨水泥矿区的土地利用类型赋值,林地、裸地和采矿区为 1,人工绿化为 0.7,耕地为 0.4,水域、建筑用地为 0。

根据曲寨水泥矿区的实际情况和水利部颁布的土壤侵蚀分类分级标准,制定的分级标准见表 2。

表 2 土壤侵蚀分级标准

Table 2 Classification standards for soil erosion

分级	Q/(t/(km^2·a))	侵蚀等级
1	<500	微度
2	500~2 500	轻度
3	2 500~5 000	中度
4	5 000~8 000	强度
5	8 000~15 000	极强
6	>15 000	剧烈

2.4 空气质量

露天矿区在开采、爆破和运输等活动过程中会产生大量颗粒物(如 PM_{10}、$PM_{2.5}$),针对这一情况,本文运用 MODIS 数据,基于浓密植被法(Dark Dense Vegetation, DDV)对气溶胶光学厚度

(Aerosol Optical Depth, AOD)展开反演。*AOD* 是一个无量纲的物理量,表征气溶胶对光的衰减程度,能够反映气溶胶在大气中的含量以及光学特性。通过对 *AOD* 的反演结果进行分析,有助于准确评估矿区颗粒物的浓度分布情况。由于数据结果受云影响很大,存在大量无效值,应尽量挑选晴天、少云的数据。本文利用 ArcGIS 的自然断点法,依据 *AOD* 值将曲寨水泥矿区的空气质量划分为 5 个等级,见表 3。

表 3 空气质量分级标准

Table 3 Classification standards for air quality

分级	*AOD*	空气质量
1	<0.2	优
2	0.2~0.4	较好
3	0.4~0.6	良
4	0.6~0.8	较差
5	>0.8	差

2.5 景观生态风险指数

不同的景观类型对保护生物多样性、抵抗外界干扰的能力也不同。本文从区域生态系统的景观结构出发,参考有关学者的研究,选取景观干扰度指数、脆弱度指数和损失度指数构建综合生态风险指数,分析曲寨水泥矿区的景观生态风险大小。

2.5.1 景观干扰度

景观干扰度指数用来反映不同景观所代表的生态系统受到外部干扰的程度,所受干扰越大,生态风险越大。以景观格局指数为基础,构建景观干扰度指数 E_i,以反映不同景观所代表的生态系统受到干扰的程度,相关表达式如下:

$$E_i = a\,C_i + b\,N_i + c\,D_i \tag{5}$$

景观破碎度指数 C_i:

$$C_i = \frac{n_i}{A} \tag{6}$$

景观分离度指数 N_i:

$$N_i = \frac{A}{2\,A_i}\sqrt{\frac{n_i}{A}} \tag{7}$$

景观优势度指数 D_i:

$$D_i = \frac{Q_i + M_i}{4} + \frac{L_i}{2} \tag{8}$$

$$Q_i = \frac{\text{斑块 } i \text{ 的样方数}}{\text{总样方数}} \tag{9}$$

$$M_i = \frac{\text{斑块 } i \text{ 的数目}}{\text{斑块总数}} \tag{10}$$

$$L_i = \frac{\text{斑块 } i \text{ 的面积}}{\text{样方的总面积}} \tag{11}$$

式中:n_i 为景观类型 i 的斑块数;A_i 为景观类型 i 的总面积,hm^2;A 为景观总面积,hm^2;a、b、c 分别为 C_i、N_i 和 D_i 的权重,且 $a+b+c=1$,根据文献[18]和文献[19],对 a、b 和 c 三个指标分别赋以 0.5、0.3 和 0.2 的权值。

2.5.2 景观脆弱度指数

景观脆弱度指数用于评估景观的生态脆弱性,衡量生态系统对外部干扰(如气候变化、土地利用变化、自然灾害等)的承受能力。不同的景观类型对环境变化的响应不同,研究区的景观类型所代表的生态系统以人工绿化最为脆弱,而居民和工矿用地最稳定。基于此,分别对景观类型赋以脆弱度指数:人工绿化为 6,裸地为 5,水域为 4,耕地为 3,林地为 2,居民用地、工矿用地和道路为 1,归一化处理后得到各景观类型的脆弱度指数 F_i。

2.5.3 景观损失度指数

景观损失度指数表示遭遇干扰时各类型景观所受到的生态损失的差别,即其自然属性损失的程度,用 R_i 表示:

$$R_i = E_i \times F_i \tag{12}$$

2.5.4 景观生态风险指数

景观生态风险指数是综合考虑景观干扰度指数、脆弱度指数和损失度指数后的综合结果。它反映了一个区域的总体生态风险水平,计算公式为:

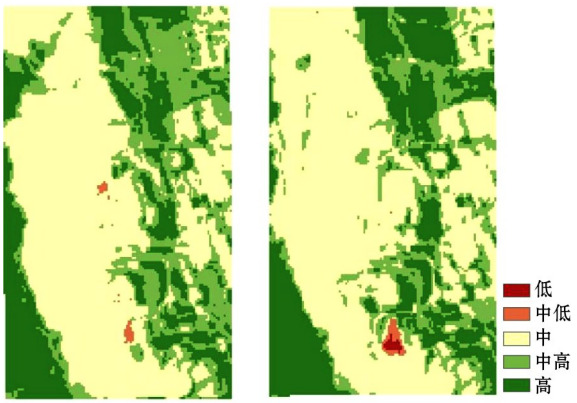
$$ERI_i = \sum_{i=1}^{N} \frac{A_{ki}}{A_k} R_i \tag{13}$$

式中:ERI_i 为第 i 个风险小区生态风险指数;A_{ki} 为第 k 个风险小区第 i 类景观的面积,hm^2;A_k 为第 k 个风险小区的面积,hm^2。

3 试验结果与分析

3.1 植被覆盖度

图 1 为 2021 年与 2023 年曲寨水泥矿区的 *FVC* 分布图。与 2021 年相比,2023 年中高和高植被覆盖区域在矿区西北部区域明显减少,但在南部有明显增加,这是由于 2023 年北部矿区不断扩大,而南部矿区缩减后处于生态修复期,植被覆盖度发生明显变化。高植被覆盖区域在东北地区明显增多,中植被覆盖区域在东部的分布略有增加,这与工厂配套设施的增加有关。中低和低植被覆盖区域面积较小,且主要分布在水体附近。



(a) 2021 年 (b) 2023 年

图 1 2021 年与 2023 年曲寨水泥矿区的 *FVC* 空间分布图

Fig.1 Spatial distribution maps of *FVC* in Quzhai mining area for cement in 2021 and 2023

表 4 为 2021 和 2023 年各等级的植被覆盖面积及其在矿区总面积中所占的比例。表中数据显示,2021 年到 2023 年,矿区中植被覆盖、中高植被覆盖和高植被覆盖的区域占主导地位。2023 年,中低、中和高植被覆盖区域面积明显增加,其中,中低植被覆盖区域的面积增加了 2 206.65 m^2,中植被覆盖区域的面积增加了 58 781 m^2,高植被覆盖度区域的面积增加了 38 506.1 m^2。值得注意的是,2023 年中高植被覆盖区域的面积比 2021 年减少了 105 933.3 m^2,这与北部采矿区的扩大及东部工厂的扩大有关。

综上,2021 年到 2023 年,曲寨水泥矿区除中高植被覆盖区域外,各植被覆盖等级区域均明显增加,尤其是中和高植被覆盖度区域,说明矿区的生态修复措施对植被恢复具有显著的效果。此外,低、中低和中植被覆盖度区域的变化主要与人类活动密切相关:一方面,西北部采矿区的扩大使植被明显减少,植被覆盖由中高和高覆盖度转为中覆盖度;另一方面,南部矿区的缩减和人工绿化的增加使得生态环境得到有效修复,中高和高植被覆盖度明显的增加。

表 4 曲寨水泥矿区植被覆盖等级情况

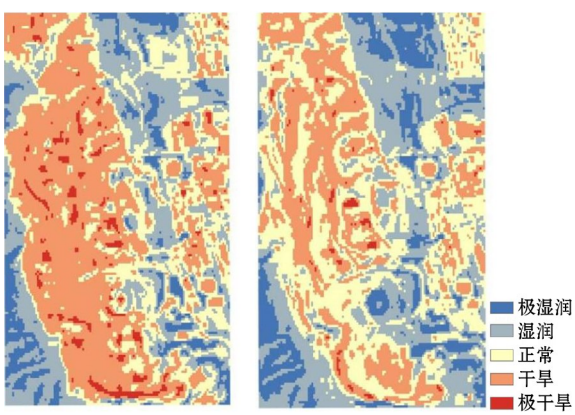
Table 4 Vegetation coverage grades in Quzhai mining area for cement

等级	2021 年		2023 年	
	面积/m^2	占比/%	面积/m^2	占比/%
低	156.09	0.01	3 086.87	0.19
中低	4 916.90	0.29	7 123.55	0.43
中	876 066.60	52.45	934 847.60	56.09
中高	422 931.40	25.32	316 998.10	19.02
高	366 270.00	21.93	404 776.10	24.28

3.2 土壤湿度

图 2 是 2021 年与 2023 年曲寨水泥矿区的 *VSDI* 空间分布图。从图 2(a)可以看到,2021 年矿区干旱区域占比较大,特别是在矿区中部和东南部,大量区域处于干旱或极干旱状态,表明土壤湿度较低。湿润和极湿润区域分布相对较少,主要集中在北部与西部,零散分布于矿区东部。从图 2(b)可以看到,2023 年在矿区北部和东南部湿润和极湿润区域显著增加,表明这些区域的土壤湿度显著改善;但在西北部,湿润和极湿润区域明显减少,这与该区域矿区开采导致植被覆盖较少有关。2023 年矿区北部、南部和东部的干旱和极干旱区域明显减少,土壤湿度达到正常水平的面积也明显增加,说明矿区的土壤条件整体上趋于湿润。

表 5 为各等级土壤湿度面积比,2021 年到 2023 年矿区土壤湿度呈现出显著的改善趋势,湿润和正常湿度区域面积明显增加,干旱和极干旱区域面积显著减少。湿润区域面积占比从 24.13% 增加到 27.20%,正常湿度区域面积占比从 24.07% 大幅增长到 34.74%;干旱区域面积占比和极干旱区域面积占比均有不同程度的降低。这表明矿区的复垦与生态恢复措施取得了积极成效。



(a) 2021 年 (b) 2023 年

图 2 2021 年与 2023 年曲寨水泥矿区的 *VSDI* 空间分布图

Fig.2 Spatial distribution maps of *VSDI* in Quzhai mining area for cement in 2021 and 2023

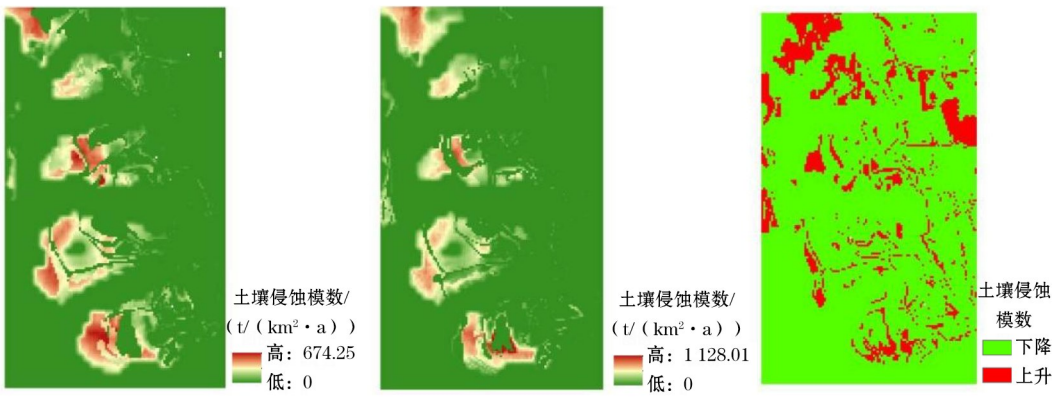
表 5 曲寨水泥矿区各等级土壤湿度面积比

Table 5 Area ratio of each grade of soil moisture in Quzhai mining area for cement %

等级	2021 年	2023 年
极湿润	8.08	12.13
湿润	24.13	27.20
正常	24.07	34.74
干旱	40.50	25.17
极干旱	3.22	0.76

3.3 土壤侵蚀模数

2021年与2023年曲寨水泥矿区土壤侵蚀模数计算结果如图3所示。从图3可以看出,矿区2021年和2023年的土壤侵蚀分布格局基本一致,矿区内的侵蚀区域主要呈西北至中南斜线方向分布。2021年土壤侵蚀模数为0～674.25 t/(km^2·a),而2023年最大值增加到1 128.01 t/(km^2·a)。土壤侵蚀模数的高值呈块状分布在采矿区地带。2023年与2021年相比,西北部的高侵蚀区域的分布范围有所扩大,这与北部采矿区面积扩大有关,矿区的地表扰动作用进一步增强。2023年,在矿区中部和南部区域的高值侵蚀区域比2021年有所减小,这与中南部采矿区实施的植被恢复工程有关。整体上,2021年到2023年矿区土壤侵蚀模数有所升高,但中南部高侵蚀区域减小,反映了侵蚀模数的变化与人类活动高度相关,尤其在矿区开采活动集中的地带表现显著。



(a) 2021年 (b) 2023年 (c) 土壤侵蚀变化趋势

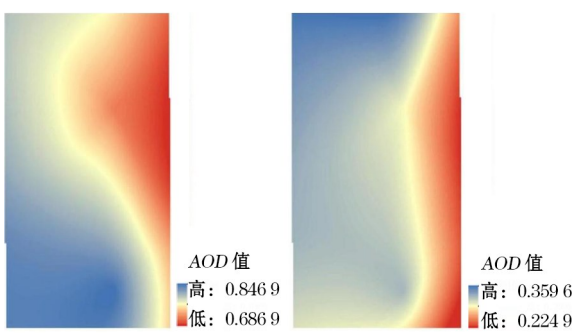
图3 2021年与2023年曲寨水泥矿区的土壤侵蚀空间分布图

Fig.3 Spatial distribution maps of soil erosion in Quzhai mining area for cement in 2021 and 2023

图3(c)为2021—2023年曲寨水泥矿区的土壤侵蚀变化趋势。从图中可以看出,土壤侵蚀在空间上的变化存在显著的区域性差异。土壤侵蚀模数上升的区域主要集中在图中的中北部区域,分布相对零散。这些区域受到了人类活动的影响,如矿区开采使地表植被遭到破坏,导致地表土壤更易受到水蚀和风蚀的影响。相反,土壤侵蚀模数下降的区域分布广泛,连通性好,说明这些区域可能采取了一定的水土保持措施或自然恢复,减轻了土壤侵蚀风险。总体来看,土壤侵蚀呈大面积下降趋势,土壤侵蚀加剧的区域分布零散,主要分布在采矿区和建筑区。

3.4 空气质量

图4为2021年与2023年曲寨水泥矿区的*AOD*空间分布图。从图4中可以看到,2021年矿区*AOD*值为0.686 9～0.846 9,2023年矿区*AOD*值为0.224 9～0.359 6,整体上呈下降趋势。从空间分布来看,曲寨水泥矿区的*AOD*值发生了显著变化。2021年矿区的*AOD*低值区域主要集中在南部和西南部,高值区域则分布在东北部。2023年矿区的低值区域范围明显扩大,逐渐向北部延伸;高值区域同样呈南北走向,分布在矿区东部。低值区域的转移可能与采矿活动中企业采取了防尘措施有关,而高值区域的分布地区土地利用类型主要为道路、工厂与居民区,人类活动的增加通常会产生大量粉尘和颗粒物,导致气溶胶浓度升高。从2021年到2023年,矿区*AOD*值的总体下降表明了曲寨水泥矿区采取的生态修复措施对空气质量的改善具有有效性。



(a) 2021年 (b) 2023年

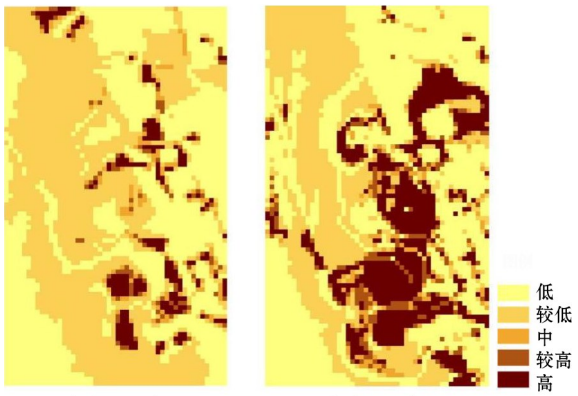
图4 2021年与2023年曲寨水泥矿区的*AOD*空间分布图

Fig.4 Spatial distribution maps of *AOD* in Quzhai mining area for cement in 2021 and 2023

3.5 景观生态风险指数

为了探索曲寨水泥矿区景观生态风险的空间分布特征,将每个生态风险评价单元的*ERI*作为其中心点的属性值,利用ArcGIS得到曲寨水泥矿区景观生态风险的空间分布。结合曲寨水泥矿区的实际

情况和 ERI 指数,利用自然断点法依据 ERI 将曲寨水泥矿区的生态风险划分为 5 个等级:高生态风险区($ERI>0.45$)、较高生态风险区($0.35<ERI\leqslant 0.45$)、中生态风险区($0.25<ERI\leqslant 0.35$)、较低生态风险区($0.15<ERI\leqslant 0.25$)、低生态风险区($ERI\leqslant 0.15$)。图 5 为 2021 年与 2023 年曲寨水泥矿区的景观生态风险空间分布图,表 6 为各生态风险等级区域所占的面积比。



(a) 2021 年 (b) 2023 年

图 5 2021 年与 2023 年曲寨水泥矿区的景观生态风险空间分布图

Fig.5 Spatial distribution maps of landscape ecological risk in Quzhai mining area for cement in 2021 and 2023

表 6 曲寨水泥矿区各生态风险等级区域面积比

Table 6 Area ratio of each ecological risk grade region in Quzhai mining area for cement %

等级	2021 年	2023 年
低	42.38	43.57
较低	46.49	28.45
中	3.25	4.73
较高	2.54	4.94
高	5.34	18.31

从 2021 年到 2023 年,曲寨水泥矿区的景观生态风险整体呈现上升趋势,其中低、较低和高生态风险区所占面积较大,而中、较高生态风险区所占面积较小。各景观生态风险等级的面积占比和分布格局具有以下特点。

(1) 低生态风险区、中生态风险区和较高生态风险区的面积占比略微上升。低生态风险区的整体变化较小,主要分布于矿区的东北部、东南部和西南部区域,这些区域植被覆盖较好,受到人类活动的干扰较少,生态系统保持了相对稳定性。

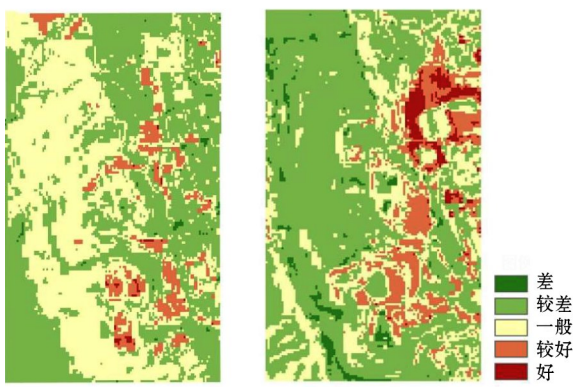
(2) 较低生态风险区的面积占比从 46.49% 显著下降至 28.45%,减少幅度较大的区域集中在矿区中东部和南部地区。在西北地区,较低风险区面积略微增加,这是因为部分林地转变为矿区开采区,导致景观稳定度下降和生态风险等级升高。

(3) 高生态风险区的面积占比从 5.34% 增长到 18.31%,呈现快速增加趋势。在研究时段内,中东部地区部分耕地转为裸地、建筑用地等类型,同时部分林地转为耕地、裸地等类型;而中南地区的采矿区由于采取了生态修复措施,逐渐转为零散的人工绿化、裸地等类型,人类活动使完整的景观斑块变得较破碎,景观结构的稳定性受到一定的破坏。

曲寨水泥矿区的景观生态风险等级从 2021 年到 2023 年呈现向更高等级转移的趋势,低风险区面积占比维持稳定,但较低风险区面积显著减少,且高风险区面积大幅增加,表明矿区景观生态系统面临更大的压力。建议对高风险区域采取有效的生态修复和景观优化措施,例如恢复植被、减少人为干扰和加强生态保护等,以遏制生态风险的持续上升。

3.6 综合生态修复成效评价指标

综上,植被覆盖度、土壤湿度、水土保持、空气质量用于判断矿区修复前后生态环境的 4 个要素的变化,景观生态风险指数则从景观空间结构的角度分析矿区修复前后地类的稳定性和生态安全格局。本文将植被覆盖度、土壤湿度、水土保持、空气质量和景观生态风险五个指标分别赋予 0.2 的权重进行加权总和,得到综合生态修复成效评价指标。根据加权结果和矿区的实际情况,将生态修复效果划分为 5 个层次:好(<1.98)、较好(1.98~2.36)、一般(2.36~2.74)、较差(2.74~3.12)和差(>3.12),最终结果见图 6 和表 7。



(a) 2021 年 (b) 2023 年

图 6 2021 年与 2023 年曲寨水泥矿区的生态修复效果等级

Fig.6 Ecological restoration effect grades in Quzhai mining area for cement in 2021 and 2023

表 7 曲寨水泥矿区生态修复效果各等级面积占比

Table 7 Area proportion of each grade of ecological restoration effect in Quzhai mining area for cement %

修复效果等级	2021 年	2023 年
好	0.47	2.69
较好	47.38	57.74
一般	45.26	25.51
较差	6.60	11.29
差	0.29	2.77

2021 年至 2023 年,曲寨水泥矿区的生态修复效果整体上呈明显改善的趋势,但仍有部分区域修复效果一般。从图 7 可看出,2023 年,较好和好两个等级的生态修复区域显著增加,尤其是在矿区北部和部分中心区域;而较差和差区域的面积有所扩大,主要集中在矿区的南部以及东部的部分区域。南部部分区域修复情况较差,主要是因为矿区修复导致地表景观类型发生变动,原本完整的景观类型变得破碎,景观的整体性和连通性变差。此外,由采矿区转变为人工绿化和裸地的区域景观脆弱性较高,土壤侵蚀度也有所增加。东部区域的修复情况较差主要是部分耕地和林地转为建筑用地、人工绿化和裸地,导致植被减少、土壤侵蚀增加和景观生态风险增高。对此,建议在南部区域设置生态缓冲带,增加景观连贯性,减少景观破碎化的负面影响;在东部区域进一步优化土地利用结构,在建筑用地周围增加绿化隔离带和透水地面,减少对原有生态系统的影响;在南部和东部的生态恢复中,可以引入本土树种、耐旱植物,同时采用乔、灌、草结合的植被结构,增强生态稳定性和水土保持能力。

表 7 的数据表明,修复效果好的面积比例从 2021 年的 0.47%增长至 2023 年的 2.69%,增长幅度较显著,反映了部分区域修复措施的成效。修复效果较好的比例也从 47.38%增加至 57.74%,面积占比最大,这进一步证明生态环境整体有所恢复。修复效果一般的比例从 45.26%下降至 25.51%。结合图 7 可以看出,该等级大部分区域生态状况改善为较好或好等级,同时也有部分区域退化至较差或差等级。修复效果为较差等级的比例从 6.60%升至 11.29%,差等级的比例从 0.29%升至 2.77%,表明矿区局部区域存在生态恶化趋势,这与矿区建筑用地的增加以及修复措施导致的景观破碎化和分离有关。总体上,尽管修复效果好和较好等级的修复面积比例显著增加,但较差和差等级的区域仍有扩大趋势,说明部分修复措施仍需优化。因此,建议进一步对矿区施行“分区精细化治理”:对于修复效果较好的区域,进一步优化植被结构,提高生物多样性;对于修复效果较差的区域,加强水土保持和人工生态修复措施,提高整体恢复质量;在裸地及生态恢复较慢的区域,采用植被护坡、生态蓄水池等措施,提升土壤水分含量,提高水土保持能力;对矿区周围扬尘较大的区域,实施洒水降尘、建设绿化防护带、设置防风屏障等措施,减少二次扬尘污染,提高空气质量。

4 结论

本研究以石家庄鹿泉曲寨水泥矿区为研究对象,结合多源数据,构建了由植被覆盖度、土壤湿度、土壤侵蚀模数、空气质量和景观生态风险指数等 5 个因素组成的综合生态修复成效评价指标,综合分析对比了 2021 年和 2023 年矿区的生态修复情况,得到以下主要结论。

(1) 矿区生态修复整体呈积极趋势,植被覆盖度与土壤湿度显著改善,水土流失总体减轻,空气质量提升,生态修复“较好”以上的区域占比由 47.38%提升至 57.74%。

(2) 局部区域仍存在生态风险加剧现象,主要表现为景观破碎化程度增加、高风险区面积扩大,以及部分区域土壤侵蚀与空气质量指标波动,反映出修复过程中景观结构变化与人为干扰的负面影响。

(3) 为实现矿区生态修复的持续提升,建议实施“分区精细化治理”:在植被恢复滞后区域优选本土物种,提升系统稳定性;在侵蚀高风险区结合工程与生态措施强化水土保持;通过构建生态廊道、优化土地利用结构等方式降低景观破碎度与生态风险。此外,应建立长效监测机制,实现修复过程的动态评估与适应性管理。本研究所提出的评价方法与体系可为类似露天矿区的生态修复评价与治理决策提供参考。

参考文献(References):

[1] 邢宇,王静雅,杨金中,等.全国废弃露天矿山采矿用地分布状况与存在问题[J].自然资源遥感,2024,36(2):21-26.
XING Yu, WANG Jingya, YANG Jinzhong, et al. Distributions and existing problems of mining land of abandoned open-pit mines in China[J].Remote Sensing for Natural Resources,2024,36(2):21-26.

[2] 雷少刚,王维忠,李园园,等.北方大型露天矿区土壤有机碳库扰动与恢复研究[J].煤炭科学技术,2023,51(12):100-109.
LEI Shaogang, WANG Weizhong, LI Yuanyuan, et al. Study on disturbance and restoration of soil organic carbon pool in large-scale open-pit mining areas in Northern China [J].Coal Science and Technology,2023,51(12):100-109.

[3] 魏鹏,王大国,刘云,等.长江干支流历史遗留矿山生态修复模式及存在问题分析:以四川省为例[J].金属矿山,2022(9):209-215.
WEI Peng, WANG Daguo, LIU Yun, et al. Ecological restoration model and existing problems analysis of legacy abandoned mine in the trunk stream and tributaries of the Yangtze River: a case study of Sichuan Province[J]. Metal Mine,2022(9):209-215.

[4] 刘子菁,冯芳,杜赛,等.基于遥感资料的莲花山矿区生态修复效果评估[J].林业调查规划,2024,49(6):50-55.
LIU Zijing, FENG Fang, DU Sai, et al. Assessment of ecological restoration effect in Lianhua Mountain mining area based on remote sensing data[J]. Forest Inventory and Planning,2024,49(6):50-55.

[5] 王小宇,廉琦,张磊,等.基于遥感生态指数的纳雍鬃岭矿山生态修复区生态环境质量评价[J].环境生态学,2024,6(8):15-22.
WANG Xiaoyu, LIAN Qi, ZHANG Lei, et al. Evaluation of ecological environment quality in Nayongzongling mine ecological restoration area based on remote sensing ecological index[J]. Environmental Ecology, 2024, 6(8): 15-22.

[6] 王宁涛,陈植华,黄承忠,等.基于RS和GIS的矿区水土流失定量监测方法研究:以福建省马坑铁矿区水土流失为例[J].中国水土保持,2008(7):37-41.
WANG Ningtao, CHEN Zhihua, HUANG Chengzhong, et al. Quantitative monitoring method of soil and water loss in RS and GIS-based mining area [J]. Soil and Water Conservation in China,2008(7):37-41.

[7] 马丽丽,田淑芳,王娜.基于层次分析与模糊数学综合评判法的矿区生态环境评价[J].国土资源遥感,2013,25(3):165-170.
MA Lili, TIAN Shufang, WANG Na. Ecological environment evaluation of the mining area based on AHP and fuzzy mathematics[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2013,25(3):165-170.

[8] 江雷,娄嘉慧,史冲.基于UAV勘察与层次分析法的安阳许家沟露天矿山地质风险评价[J].中国矿业,2024,33(3):177-186.
JIANG Lei, LOU Jiahui, SHI Chong. Geological risk evaluation of the open-pit mines of Xujigou in Anyang based on UAV survey and analytic hierarchy Process[J]. China Mining Magazine,2024,33(3):177-186.

[9] NKONDJOUA T D A, NGANKAM T M. Time series analysis of remote sensing images of vegetation cover change in the Faro-Bénoué-Bouba Ndjidda ecological landscape, north region of Cameroon[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment,2022,27:100792.

[10] 郭文杰.顾及修复适宜性的废弃露天矿山生态修复成效评价:以安徽省为例[D].武汉:武汉大学,2021.
GUO Wenjie. Evaluation on the effectiveness of ecological restoration of abandoned open-pit mines in consideration of restoration suitability: taking Anhui Province as an example [D]. Wuhan: Wuhan University,2021.

[11] 宝海风,康萨如拉,贺晓,等.西鄂尔多斯露天煤矿集中分布区景观格局动态[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2020,51(5):516-524.
BAO Haifeng, KANG Saruul, HE Xiao, et al. Landscape dynamics analysis of open-pit coal mines-concentrated area in western Ordos[J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition),2020,51(5):516-524.

[12] 陆凤连,王新闯,张合兵,等.1980—2015年焦作矿区景观格局演变及驱动力分析[J].水土保持究,2018,25(4):237-243.
LU Fenglian, WANG Xinchuang, ZHANG Hebing, et al. Landscape pattern change and its driving force in Jiaozuo mining area from 1980 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation,2018,25(4):237-243.

[13] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide for conservation planning [M]. Agriculture Handbook,1978.No.537,USDA.

[14] MECOOL D K, BROWN L C, FOSTER G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE,1987,30(5):1387-1396.

[15] LIU B Y, NEARING M A, RISSE L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE,1994,37:1835-1840.

[16] 查良松,邓国徽,谷家川.1992—2013年巢湖流域土壤侵蚀动态变化[J].地理学报,2015,70(11):1708-1719.
ZHA Liangsong, DENG Guohui, GU Jiachuan. Dynamic changes of soil erosion in the Chaohu Watershed from 1992 to 2013[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(11):1708-1719.

[17] 李天宏,郑丽娜.基于RUSLE模型的延河流2001—2010年土壤侵蚀动态变化[J].自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.
LI Tianhong, ZHENG Lina. Soil Erosion in the Yanhe Watershed from 2001 to 2010 based on RUSLE model[J]. Journal of Natural Resources,2012,27(7):1164-1175.

[18] 刘春艳,张科,刘吉平.1976—2013年三江平原景观生态风险变化及驱动力[J].生态学报,2018,38(11):3729-3740.
LIU Chunyan, ZHANG Ke, LIU Jiping. A long-term site study for the ecological risk migration of landscapes and its driving forces in the Sanjiang Plain from 1976 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):3729-3740.

[19] 张学斌,石培基,罗君,等.基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析:以石羊河流域为例[J].自然资源学报,2014,29(3):410-419.
ZHANG Xuebin, SHI Peiji, LUO Jun, et al. The ecological risk assessment of arid inland river basins at the landscape scale: a case study on Shiyang River Basin[J]. Journal of Natural Resources,2014,29(3):410-419.