露天石灰岩矿山生态脆弱性评价及修复策略探讨*

赵振华[1,2]，韩琳[1,2]，徐扬[1,2]，袁辉[1,2]，孙雅飞[1,2]，徐英乾[3]，郝杰[1,2]

（1.山东省地矿工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队)， 山东 济南 250014；
2.山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心， 山东 济南 250013；
3.韶关学院 化学与土木工程学院， 广东 韶关市 512005）

摘要：针对济南市露天石灰岩矿山生态退化与损伤机理，基于“压力-状态-响应”(PSR)模型框架，构建了包括矿区生态要素和环境要素的济南市露天石灰岩矿山生态脆弱性评价指标体系，并在济南市李家窝废弃露天矿进行了工程应用分析。研究表明，崩滑流易发程度、矿区地表塌陷程度、植被覆盖率以及土壤侵蚀程度4个指标可在短期内完成修复，可用于矿山生态修复项目的验收与短期修复成效的评价，为实现矿山生态系统的短期修复成效所采取的措施，可视为人工促进自然修复模式的起点。基于生态综合指数*EVI*界限值的逆推法可用于量化人工干扰程度，认为*EVI*=3.75时的植被覆盖率能够实现较理想的自然修复效果。研究提出了“生态重塑、区域整治、景观重建”的生态修复策略，可为类似矿区的生态修复工作提供理论依据和实践指导。

关键词：生态脆弱性评价；短期修复成效；修复策略；植被覆盖率；生态综合指数

中图分类号：TD167；X171.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)07-0242-07

Ecological Vulnerability Assessment and Restoration Strategy of Open-Pit Limestone Mine

ZHAO Zhenhua[1,2], *HAN Lin*[1,2], *XU Yang*[1,2], *YUAN Hui*[1,2], *SUN Yafei*[1,2], *XU Yingqian*[3], *HAO Jie*[1,2]

(1.Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute (801 Hydrogeology and Engineering Geology Brigade, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources), Jinan, Shandong 250014, China;
2.Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan, Shandong 250013, China;
3.School of Chemistry & Civil Engineering, Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong 512005, China)

Abstract: Aiming at the ecological degradation and damage mechanism of open-pit limestone mines in Jinan, the evaluation index system of ecological vulnerability of open-pit limestone mines in Jinan was constructed based on the “pressure-state-response” (PSR) model framework, including the ecological and environmental elements of the mining area. The engineering application analysis was carried out in Lijiawo abandoned open-pit mine in Jinan. The research shows that the four indicators of landslide prone degree, degree of surface subsidence in the mining area, vegetation coverage and soil erosion can be restored in a short time, which can be used for the acceptance of ecological restoration projects and the evaluation of short-term restoration effects in mine. The measures taken to achieve the short-term restoration effect of ecological system in mines can be regarded as the starting point of the artificial promotion of natural restoration mode. The inverse method based on the limit value of EVI can be used to quantify the degree of artificial interference, and it is considered that the vegetation coverage can achieve ideal natural restoration effect when *EVI* = 3.75. The research puts forward the ecological restoration strategy of “ecological remodeling, regional renovation, landscape reconstruction”, which can provide theoretical basis and practical guidance for the ecological restoration work in similar mining areas.

Key words: Ecological vulnerability assessment, Short-term restoration effect, Restoration strategy, Vegetation coverage, Ecological comprehensive index

* **收稿日期**：2024-07-24

作者简介：赵振华(1982—)，男，山东安丘人，硕士，正高级工程师，主要从事水工环地质和矿山生态修复方面的研究工作。E-mail：16607713@qq.com

通信作者：郝杰(1986—)，男，山东潍坊人，硕士，高级工程师，主要从事水工环地质和矿山生态修复方面的研究工作。E-mail：422171399@qq.com

0　引言

矿山开采能够促进经济发展并推动社会进步，但也对自然环境造成了严重破坏。当前关于矿山生态修复的研究主要集中在矿山本身[1-3]，但实际上，矿山生态修复并不仅限于对单一生态要素的治理，而是涉及多方面因素的复杂系统工程[4-6]。

从空间角度分析，矿山生态修复的概念并不局限于矿区，而是应涵盖更广阔的范围以满足区域整体治理的需求。目前矿山修复领域已经初步确立了系统治理的理念，但在实际操作中，工作重点仍然集中于地形排险、土壤重构以及植被恢复等基础性工程。虽然这些修复措施能够在短期内改善生态环境，但由于缺乏系统性考量，其长期效果往往难以持续，部分项目甚至出现了“一年绿、两年黄、三年死光光”的现象。

从时间角度分析，矿山生态修复具有一定的周期性。对于生态破坏严重的废弃矿山，若仅依赖自然力进行恢复，将要经历极其漫长的过程，而过强的人工干预又易出现重工程而轻生态的现象，造成生态功能单一化。基于自然的解决方案（NbS）的理念[7]强调在矿山生态修复中，通过部分人为干预使得生态进入自我恢复的阶段，从而实现持续性修复。“山水林田湖草生命共同体”理念诠释了生态系统整体性修复的内在涵义[8]。

CROUZEILLES 等[9]基于 133 项研究的 Meta 分析表明，在热带森林恢复中，自然更新在生物多样性和植被结构的恢复效果上显著优于主动恢复，颠覆了“主动恢复优先”的传统策略认知。雷少刚等[10]提出的引导型矿山修复理念，强调了人工干预的必要性。卞正富等[11]进一步指出了引导型矿山修复理念的关键是对限制性因素及其阈值的识别与修复，并进一步讨论了其修复目标的合理程度。孙晓玲等[12]构建了矿山生态修复成效评价体系，并确定了生态安全、生态功能、景观服务、可持续发展 4 个一级指标，提出涵盖修复策略与成效的多维提升路径。BRADSHAW[13-14]对矿山土壤自然恢复潜力进行研究，提出在解除极端限制因子后，利用植被自修复机制可实现低成本、可持续的生态重建。刘祥宏等[15]提出采取人工治理措施能够提升植物自然恢复的效率与质量，但需通过人工治理面积占比界定人工干预程度。然而，上述研究主要停留在理念层面，鉴于地域差异显著，在控制因子的选择、人工参与的程度等关键指标方面尚未形成统一的标准，制约了其实践应用价值。

本研究针对济南市露天石灰岩矿山开采后矿区及其周边地区所面临的生态问题，揭示了矿区生态系统受损及退化的内在机理，并以此为基础构建了矿山生态脆弱性评价指标体系。基于李家窝废弃矿山的实证研究，证实了新构建的评价指标体系的合理性，并探讨了矿山生态系统的短期修复成效与人工促进生态修复模式之间的内在联系。文章还提出了用于量化人工干扰程度的逆推法，最终形成了“生态重塑、区域整治、景观重建”的生态修复策略。

1　矿区生态系统的损伤与退化机理

济南市露天石灰岩矿区开采存在大规模岩石剥离和堆放，导致矿区的地形地貌发生了根本性改变。这不仅增加了周边区域矿山地质灾害的风险，还对当地植被覆盖率与地下水位产生了影响。矿区植被覆盖率降低导致土壤的水源涵养能力下降，在雨水冲刷作用下，土壤中的有机质和微量元素大量流失，这些流失物质最终汇入河流，导致下游地区出现严重的淤积，同时造成水量减少和水质恶化。

矿坑的疏干排水导致矿区及其周边地区的地下水位进一步下降，开采过程中产生的矿渣和废料对水质造成严重的污染，这些因素的共同作用对矿区及其周边的地下水资源构成了重大威胁。与此同时，矿区植被覆盖率的不足与水土流失还造成了当地生物多样性降低与土壤贫瘠，导致农村建设用地与耕地减少。矿区生态系统的损伤与退化机理如图 1 所示。

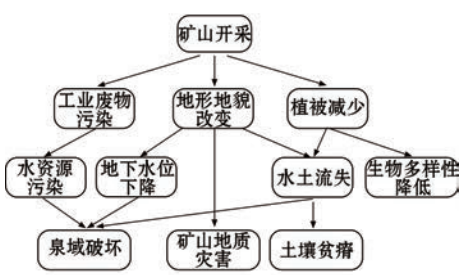


图 1　矿区生态系统的损伤与退化机理

Fig.1　The damage and degradation mechanism of ecosystem in mining area

综上所述，矿山生态修复所面临的典型生态问题繁多，涵盖了植物、土地、微生物、水资源等多个生态要素。鉴于各生态要素间内在的相互联系，选择恰当的理论模型以构建生态修复效果评价体系至关重要。

2 评价指标体系的构建

2.1 矿山生态脆弱性评价指标体系

本文基于压力-状态-响应(PSR)模型框架构建了济南市露天石灰岩矿区的生态脆弱性评价指标体系,如图 2 所示。结合实地调研以及专家咨询等方法,所构建的生态脆弱性评价指标体系涵盖了生态要素与环境因素。

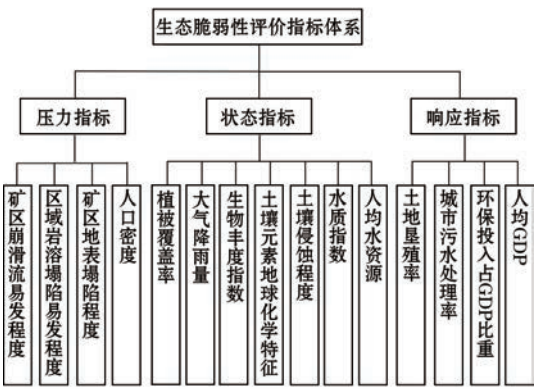


图 2 济南市露天石灰岩矿山生态脆弱性评价指标体系

Fig.2 Evaluation index system of ecological vulnerability of open-pit limestone mine in Jinan

压力指标(P)可用于评价生态系统所承受的外部压力。基于济南市露天石灰岩矿区生态损害特征,本研究选取矿区崩滑流易发程度、区域岩溶塌陷易发程度、矿区地表塌陷程度以及人口密度作为矿区生态压力指标。其中,区域岩溶塌陷易发程度[16-17]反映了该地区岩溶地质灾害发生的潜在风险,矿区崩滑流易发程度与地表塌陷程度反映了矿区因人为开采所遭受的破坏程度,人口密度则可作为衡量该区域土地使用强度的指标。

状态指标(S)是指在外部压力作用下,生态系统中各生态要素所呈现的状态,包含植被覆盖率、大气降雨量、生物丰度指数、土壤元素地球化学特征、土壤侵蚀程度、水质指数以及人均水资源等关键指标。

响应指标(R)可衡量生态系统在遭遇问题时所采取的应对措施和反应程度,主要包含以下几个指标:人均 GDP,作为衡量地区经济实力的指标,其间接体现了该地区应对压力的能力;环保投入占 GDP 的比重,该指标揭示了对环境保护和矿山生态修复的重视程度及相应的资金投入;土地垦殖率,可被视作人类对生态破坏作出反应,通过开发耕地来应对的能力;城市污水处理率,反映了该地区基础设施建设的完善程度,处理率越高,环境质量越好。

综合来看,济南市露天石灰岩矿山生态脆弱性评价指标体系覆盖了植物、土地、水资源和微生物等多个生态要素。该体系不仅包含了矿山生态修复中短期内可调整的评价指标,如矿区崩滑流易发程度、地表塌陷程度、植被覆盖率、土壤侵蚀程度,这些指标适用于对矿山修复效果进行初步评估。同时也包含了长期可改善的评价指标,例如水质指数、生物丰度指数和土地垦殖率。此外,该体系还纳入了更广泛空间的生态评价指标,如区域岩溶塌陷易发程度、大气降水量、土壤元素地球化学特征、人均 GDP、人口密度、人均水资源量、城市污水处理率以及环保投入占 GDP 的比重。因此,济南市露天石灰岩矿山生态脆弱性评价指标体系具有极强的系统性和整体性[19-21]。

2.2 评价指标权重

本研究运用层次分析法[18]构建了各评价指标间的关系,研究过程分为两个阶段:首先,通过查阅相关文献和咨询有关专家,对准则层与指标层的重要性进行比较,并赋予相应的具体分数,见表 1;其次,基于比较结果计算出各评价指标的权重。

表 1 比较标准

Table 1 Comparative standards

1	表示两个元素相比,具有同样的重要性。
3	表示两个元素相比,一个元素比另一个元素稍微重要。
5	表示两个元素相比,一个元素比另一个元素明显重要。
7	表示两个元素相比,一个元素比另一个元素强烈重要。
9	表示两个元素相比,一个元素比另一个元素极端重要。
2,4,6,8 为上述相邻判断的中值,其重要性介于两者之间。	

令 a_{ij} 代表第 i 个因素相对于第 j 个因素的比较结果,建立成对比较矩阵 $\boldsymbol{A}$,见式(1)。

$$\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}=\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \tag{1}$$

其中,$a_{ij}=1/a_{ji}$,$a_{ii}=1$,n 为成对比较矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的阶数。

首先计算成对比较矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的最大特征值 λ_{max} 与相应的特征向量,随后计算一致性指标 CI 和一致性比率 CR,见式(2)、式(3)。

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \tag{2}$$

$$CR=\frac{CI}{RI}<0.1 \tag{3}$$

式中，RI 为随机一致性指标，可通过查阅相关表格获得。

当一致性比率 $CR<0.1$ 时，即认为满足一致性要求。然后，对成对比较矩阵执行归一化处理，计算出最大特征值对应的特征向量 $\boldsymbol{w}$，该向量即代表了评价指标的权重。济南市生态脆弱性评价指标的权重见表 2。

表 2　各评价指标权重

Table 2　Weight of each evaluation indicator

目标层	准则层		指标层	
	指标	权重	指标	全局权重
生态脆弱性评价	压力指标	0.417	矿区崩滑流易发程度	0.064 6
			区域岩溶塌陷易发程度	0.079 8
			矿区地表塌陷程度	0.150 6
			人口密度	0.122 0
	状态指标	0.327	植被覆盖率	0.073 7
			大气降雨量	0.026 3
			生物丰度指数	0.062 6
			土壤元素地球化学特征	0.030 9
			土壤侵蚀程度	0.036 8
			水质指数	0.044 1
			人均水资源	0.052 6
	响应指标	0.256	土地垦殖率	0.098 8
			城市污水处理率	0.050 2
			环保投入占 GDP 比重	0.036 0
			人均 GDP	0.071 0

2.3　矿山生态脆弱性评价标准

指标层各项指标可分为定性指标与定量指标两类。对于定性指标，包括矿区崩滑流易发程度、区域岩溶塌陷易发程度、矿区地表塌陷程度、土壤元素地球化学特征、土壤侵蚀程度、城市污水处理率与环保投入占 GDP 比重，采用分等级赋值法进行标准化处理，其标准分值为 0～10[19-21]。

定量指标标准化处理采用极差法，首先需区分指标类型：正向指标，包括人口密度、大气降雨量、土地垦殖率；负向指标，包括水质指数、植被覆盖率、生物丰度指数、人均水资源量与人均 GDP。正向指标和负向指标的标准分值计算见式(4)、式(5)。

$$A_i^+ = \frac{a_i - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \times 10 \tag{4}$$

$$A_i^- = \frac{a_{\max} - a_i}{a_{\max} - a_{\min}} \times 10 \tag{5}$$

式中：a_i 为第 i 个指标的数据；$a_{\max}$ 和 $a_{\min}$ 分别为第 i 个指标的最大值和最小值；A_i^+、A_i^- 分别为正向指标、负向指标的标准分值。

生态综合指数 EVI 计算如下：

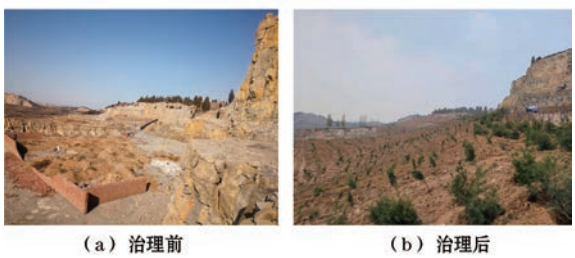
$$EVI = \sum_{i=1}^{n} A_i w_i \tag{6}$$

式中：w_i 为第 i 个指标的权重；A_i 为各指标标准分值。

根据泰山地区生态脆弱性评价的标准[19-20]：$EVI \leqslant 3$，脆弱性低；$3 < EVI \leqslant 4$，脆弱性较低；$4 < EVI \leqslant 5$，脆弱性较高；$EVI > 5$，脆弱性高。

3　案例分析

济南市废弃石灰岩露天矿山治理区域坐落于高新区李家窝村的北面，由于矿山开采造成山体破损严重、植被破坏、生态失衡，该地区水源涵养能力差，各边坡临空面大且易发生崩塌等地质灾害。通过排险削坡、残丘清理、渣土内倒、续坡整形、渣石清理、种植土回填、毛石挡墙构筑、绿化工程修复等综合治理工程，矿区生态环境得到了明显改善，如图 3 所示。



(a) 治理前　　(b) 治理后

图 3　治理前后的对比

Fig.3　Comparison before and after ecological restoration

3.1　矿山生态修复成效评价

依据修复前后矿区地形地貌、植被覆盖、土壤状况、水质以及微生物等生态要素的变化，结合矿区所在地区环境评价指标的相应变动，EVI 值的计算划分为 5 个递进式修复阶段：阶段Ⅰ，修复前；阶段Ⅱ，修复崩滑流易发程度、矿区地表塌陷程度、植被覆盖率以及土壤侵蚀程度；阶段Ⅲ，实现水质指数提升；阶段Ⅳ，实现生物丰度指数提升；阶段Ⅴ，提升土地开垦殖率、人均水资源量以及环保投资在 GDP 中的比重，同时减少区域岩溶塌陷易发程度。

如图 4 所示，李家窝废弃石灰岩露天矿山在修复前的 EVI 值高达 5.61，属于生态脆弱性等级高的地区；随着对各个生态要素进行修复，EVI 值逐渐下降，完成阶段Ⅳ修复工作后，EVI 值降至 3.58，达到较低脆弱性水平。数据分析结果与现场修复效果(见图 3)几乎一致，验证了本文所构建的评价指标体系的合理性。

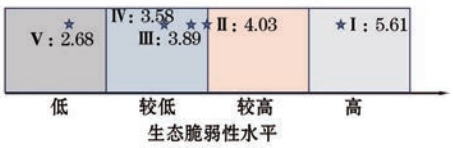


图 4 不同修复阶段的 *EVI* 值

Fig.4 *EVI* values at different restoration stages

除了矿区内部的生态要素外,矿山所在地区的环境也会对生态脆弱性分析产生显著影响,因此,矿山生态修复工作需要扩展到更广阔的空间范围。本文构建的济南市露天石灰岩矿山生态脆弱性评价指标体系特别纳入了矿区所在地区的环境因素,如完成阶段Ⅴ修复工作后,*EVI* 值降至 2.68,矿山生态处于低脆弱性区间,相较于仅关注矿区内部生态要素的修复阶段Ⅳ,这种方法带来了更显著的改善。

3.2 矿山生态系统短期修复成效评价

近年来,系统性整治的理念深入人心,然而,各生态要素的恢复往往需要较长时间。对于大多数矿山生态修复项目而言,如何对修复后的矿山生态系统进行短期修复成效的评价至关重要。结合现场经验,可认为崩滑流易发程度、矿区地表塌陷程度、植被覆盖率以及土壤侵蚀程度 4 个指标可在短期内修复,可用于矿山生态修复项目的验收与短期修复成效的评价。例如,完成阶段Ⅱ修复工作后,*EVI* 值已降至 4.03,矿山生态脆弱性水平由高降低至较高,在一定程度上反映了矿山生态环境的改善。

此外,矿山生态系统短期修复成效的评价可为人工促进自然生态修复模式中的人工干预程度的量化提供理论基础。在矿山生态修复过程中,通过人为干预采取相应的措施,部分生态要素在短期内得以修复,为自然恢复奠定了基础,最终实现矿区生态系统的全面修复。因此,为实现矿山生态系统的短期修复成效所采取的措施,可视为人工促进自然修复模式的起点,与当前流行的重工程轻生态的环境保护项目在理念上存在显著差异。

3.3 人工干预程度探讨

为了充分激发自然恢复的潜力,必须对人工干预的程度进行量化,以便直接指导实际工程,如杨文斌等[22]、白中科等[23-24]提出通过植被覆盖率来调控矿山生态修复过程中的人工干预程度。

依据泰山地区生态脆弱性评价标准,设定 $EVI=3.75$ 作为矿山生态脆弱性处于较低水平的界限值。与此同时,利用 *EVI* 的界限值反推矿区生态恢复所需的植被覆盖率(简称逆推法),可认为该植被覆盖率能够较大限度地激发自然恢复潜力。

以李家窝废弃露天矿为例,由于在施工过程中采用了挡土墙支护技术,可以认为该矿区崩滑流易发程度极低(评分为 0)。在此基础上,进一步分析其他短期内可修复生态要素之间的联系,如图 5 所示。

由图 5 可知,矿区地表塌陷程度与土地侵蚀程度越高,对植被覆盖率的需求也越高。例如,当土壤侵蚀程度与矿区地表塌陷程度评分均为 3 时,植被覆盖率需要达到 46.51%才能满足 $EVI=3.75$。

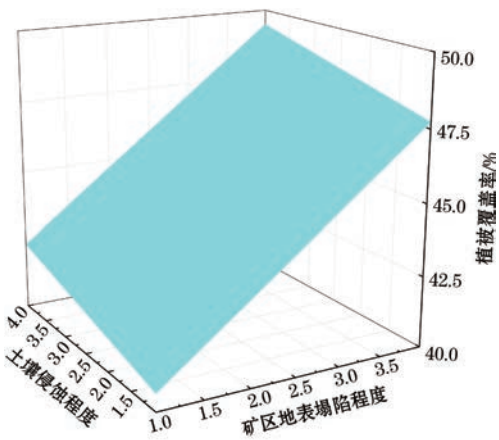


图 5 与矿区地表塌陷程度和土壤侵蚀程度相对应的植被覆盖率

Fig.5 Vegetation coverage corresponding to the degrees of surface subsidence and soil erosion in the mining area

式(7)能够量化人工干预程度的控制因子与植被覆盖率之间的关系,是引导型矿山生态修复理念的具体应用。

$$z=0.023\ 77x+0.005\ 807y+0.376\ 4(x\geqslant 1,y\leqslant 4) \tag{7}$$

式中:x、y 分别为矿区地表塌陷程度和土壤侵蚀程度的评分;z 为植被覆盖率。

4 矿区生态修复策略

(1) 生态重塑。矿山生态修复的核心任务是生态系统的恢复与重建。在采场,通过实施削坡减载、危岩爆破、采空区回填以及场地平整和挡土墙建设等措施,可以有效治理土地,消除安全隐患,为土壤修复和土地复垦奠定基础。引入有机质和有益微生物菌群至新覆盖的土壤,为植被生长创造了理想条件,同时也为某些锯齿动物提供了营养,从而提升了矿区的生物多样性。植被覆盖率是生态恢复的关键

保障,茂盛的植被能够改善土壤的水土保持功能,有助于地下水的补给,形成良性循环,最终实现矿区“生态重塑”的目标。

(2) 区域整治。核心在于保护矿山所在地区的水资源量和水质,这一目标可通过提升植被覆盖率、增加城市污水处理率以及提高环保投入在 GDP 中的比重来实现。具体从“增容”与“治污”两方面开展。“增容”通过提高矿区的植被覆盖率而改善土壤涵养水分的能力。“治污”对于水质较好的区域建立水体监测网络,进行实时监控;对于水质不佳的区域,一方面加大城市污染整治的资金投入力度,完善污水处理系统,提高污水处理率,另一方面,加强宣传教育,使水资源保护的意识深入人心,构建“控制源头、过程管理、末端再利用”的“治污”整治方案。

(3) 景观重建。“景观重建”基于“区域整治”和“生态重塑”的成果,充分考虑矿区及其周边景观的破碎与重组,优化土地、水资源和生物多样性等资源的配置。这一过程旨在提升矿区的景观价值,确保恢复后的生态系统与周边环境和谐相融,打造成适宜公众休闲与旅游的场所。

综上,“生态重塑”致力于恢复矿区内的各种生态要素,“区域整治”着眼于对矿山所在地区环境因素的综合改善;“景观重建”旨在使矿区与周边环境和谐融合,实现生态、经济和社会效益的平衡统一。

5 结论

(1) 济南市露天石灰岩矿区的生态退化呈多要素联动特征,开采活动直接改变了地形地貌(如岩层剥离、渣土堆放),诱发地质灾害风险(崩滑流、岩溶塌陷);其次,植被覆盖率的降低削弱了土壤水源涵养能力,导致水土流失加剧,造成水量减少、水质恶化;同时,矿坑疏干排水与废料污染进一步降低地下水位并污染水体。

(2) 基于压力-状态-响应(PSR)模型框架,构建了济南市露天石灰岩矿山生态脆弱性评价指标体系。该体系涵盖 15 项关键指标。其中,崩滑流易发程度、矿区地表塌陷程度、植被覆盖率以及土壤侵蚀程度 4 个指标可在短期内修复,可用于矿山生态修复项目的验收与短期修复成效的评价。

(3) 李家窝矿区的修复实践表明,生态综合指数(*EVI*)随递进式修复阶段进展而逐渐下降。修复前,*EVI* 为 5.61,生态脆弱性等级为高,完成阶段Ⅴ修复工作后,*EVI* 为 2.68,达到低脆弱性水平。基于 *EVI* 界限值(3.75)的逆推法可用于量化人工干扰程度,如当土壤侵蚀程度、矿区地表塌陷程度评分均为 3 时,植被覆盖率需达到 46.51% 才能满足 $EVI=3.75$。

(4) 基于济南市露天石灰岩矿山生态退化与损伤的机理,遵循“山水林田湖草生命共同体”的理念,提出了“生态重塑、区域整治、景观重建”的生态修复策略,以实现生态、经济与社会效益的平衡统一。

参考文献(References):

[1] 邓小芳.中国典型矿区生态修复研究综述[J].林业经济,2015,37(7):14-19.
DENG Xiaofang. China's typical mining area ecological restoration research review[J]. Forestry Economics,2015,37(7):14-19.

[2] 涂美义,柯波,陆世东,等.铜山口铜矿岩质边坡分区及生态修复适宜性研究[J].矿业研究与开发,2021,41(6):182-186.
TU Meiyi, KE Bo, LU Shidong, et al. Study on division and ecological restoration suitability of rock slope in tongshankou copper mine [J]. Mining Research and Development,2021,41(6):182-186.

[3] 郝杰,李洪涛,安成龙,等.露天石灰岩矿山地质环境修复难度评价方法及应用研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):175-184.
HAO Jie, LI Hongtao, AN Chenglong, et al. Difficulty evaluation method and application study of geological environment restoration in open-pit limestone mines[J]. Mining Research and Development,2024,44(4):175-184.

[4] 张进德,郗富瑞.我国废弃矿山生态修复研究[J].生态学报,2020,40(21):7921-7930.
ZHANG Jinde, XI Furui. Study on ecological restoration of abandoned mines in China[J]. Acta Ecological Sinica,2020,40(21):7921-7930.

[5] 李云鹏,孔胃,楚储,等.矿区生态系统演变与修复模式研究[J].中国矿业,2023,32(1):60-66.
LI Yunpeng, KONG Wei, CHU Chu, et al. Study on evolution and restoration model of mining area ecosystem [J]. China Mining Magazine,2023,32(1):60-66.

[6] 叶艳妹,陈莎,边微,等.基于恢复生态学的泰山地区“山水林田湖草”生态修复研究[J].生态学报,2019,39(23):8878-8885.
YE Yanmei, CHEN Sha, BIAN Wei, et al. Ecological restoration strategies of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands life community in Mountain Tai region based on the principle of restoration ecology [J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(23):8878-8885.

[7] 罗明,刘世梁,张琰.基于自然的解决方案(NbS)优先领域初探[J].中国土地,2021(2):4-11.
LUO Ming, LIU Shiliang, ZHANG Yan. Explore the priority areas of Nature-based Solutions (NbS)[J]. China Land,2021(2):4-11.

[8] 侍昊,高虹,霍宵霄,等.山水林田湖草生态保护修复江苏实践与思考[J].环境监控与预警,2022,14(2):85-90.
SHI Hao, GAO Hong, HUO Xiaoxiao, et al. Practice and reflection of Jiangsu province on the ecological protection and restoration of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes and grasslands[J]. Environmental Monitoring and Forewarning,2022,14(2):85-90.

[9] CROUZEILLES R, FERREIRA M S, CHAZDON R L, et al. Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests [J]. Science Advances,2017,3(11):e1701345.

[10] 雷少刚,卞正富,杨永均.论引导型矿山生态修复[J].煤炭学报,2022,47(2):915-921.
LEI Shaogang, BIAN Zhengfu, YANG Yongjun. Discussion on the guided restoration for mine ecosystem[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(2):915-921.

[11] 卞正富,雷少刚,金丹,等.矿区土地修复的几个基本问题[J].煤炭学报,2018,43(1):190-197.
BIAN Zhengfu, LEI Shaogang, JIN Dan, et al. Several basic scientific issues related to mined land restoration[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(1):190-197.

[12] 孙晓玲,余振国,陈晶.以成效评价引导矿山生态修复理念提升[J].中国矿业,2020,29(10):66-72.
SUN Xiaoling, YU Zhenguo, CHEN Jing. Promotion of mine ecological restoration concept via effectiveness evaluation[J].China Mining Magazine,2020,29(10):66-72.

[13] BRADSHAW A. Restoration of mined lands-using natural processes[J]. Ecological Engineering,2017,8(4):255-269.

[14] BRADSHAW A. The use of natural processes in reclamation-advantages and difficulties[J]. Landscape and Urban Planning, 2000,51(2/4):89-100.

[15] 刘祥宏,尹勤瑞,辛建宝,等. 生态植被自然修复及其人工促进技术研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7):1476-1488.
LIU Xianghong, YIN Qinrui, XIN Jianbao, et al. Technology research progress and prospects of natural vegetation restoration and its artificial promotion [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(7): 1476-1488.

[16] 马雪莹,张海林,李波,等.地学视角下济南市资源环境承载力评价[J].西北地质,2023,56(2):337-344.
MA Xueying, ZHANG Hailin, LI Bo, et al. Evaluation on resources and environment carrying capacity in Jinan under the geosciences perspective [J]. Northwestern Geology, 2023,56(2):337-344.

[17] 刘金花,李向,郑新奇.多尺度视角下资源环境承载力评价及其空间特征分析:以济南市为例[J].地域研究与开发,2019,38(4):115-121.
LIU Jinhua, LI Xiang, ZHENG Xinqi. Evaluation on resources and environment carrying capacity and its spatial characteristics under multi-scale perspective:a case of Ji'nan City[J]. Areal Research and Development, 2019, 38(4): 115-121.

[18] 许树柏.实用决策方法:层次分析法原理[M].天津:天津大学出版社,1988.
XU Shubo. Practical decision making method: the principle of AHP[M]. Tianjin: Tianjin University Press,1988.

[19] LONG J W, STEEL E A. Shifting perspectives in assessing socio-environmental vulnerability[J]. Sustainability, 2020, 12(7):2625.

[20] 徐飞,焦玉国,唐丽伟,等.泰安市山水林田湖草生态修复区生态脆弱性评价与生态修复对策研究[J].现代地质,2023,37(4):892-902.
XU Fei, JIAO Yuguo, TANG Liwei, et al. Ecological vulnerability evaluation and countermeasures of ecological restoration in ecological restoration areas of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands, Tai'an City [J]. Geoscience,2023,37(4):892-902.

[21] 袁明瑞,诸葛玉平,刘蕊.基于 AHP 法的泰安市生态系统脆弱性模糊评价[J].环境科学与技术,2011,34(2):173-177.
YUAN Mingrui, ZHUGE Yuping, LIU Rui. Fuzzy evaluation of Tai'an ecological vulnerability based on AHP [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(2): 173-177.

[22] 杨文斌,王涛,熊伟,等.低覆盖度治沙理论的核心水文原理概述[J].中国沙漠,2021,41(3):75-80.
YANG Wenbing, WANG Tao, XIONG Wei, et al. Overview of hydrological principle of low vegetation coverage sand control[J]. Journal of Desert Research,2021, 41(3):75-80.

[23] 白中科,周伟,王金满,等.再论矿区生态系统恢复重建[J].中国土地科学,2018,32(11):1-9.
BAI Zhongke, ZHOU Wei, WANG Jinman, et al. Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas [J]. China Land Science,2018,32(11):1-9.

[24] 白中科,师学义,周伟,等.人工如何支持引导生态系统自然修复[J].中国土地科学,2020,34(9):1-9.
BAI Zhongke, SHI Xueyi, ZHOU Wei, et al. How does artificiality support and guide the natural restoration of ecosystems[J]. China Land Science,2020,34(9):1-9.