

历史遗留矿山生态破坏与污染状况评价方法研究 ——以黄河流域甘肃段为例

李春亮^{1,2}, 鲜永亮¹, 靳仲娥¹, 杨紫恒¹

1. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000;
2. 甘肃省地学大数据工程研究中心, 甘肃 兰州 730000



摘要:为系统评估黄河流域(甘肃段)历史遗留矿山生态破坏与污染现状,有效开展矿区生态环境综合评价与治理工作,从自然资源、林草及等角度综合考虑,提出了一种基于层次分析法(AHP)的矿山生态环境综合评价方法。基于矿山生态破坏、植被破坏和污染状况三大维度,遴选12个关键指标,构建了一套科学合理的矿山生态环境综合评价指标体系。该体系实现了对矿山生态环境问题的量化评估和等级划分,为制定差异化生态修复策略提供了理论支撑。以兰州市作为典型研究区,对该评价方法的适应性和可行性进行了实证检验,结果表明,在受采矿活动影响的34个乡镇中,生态环境影响程度存在显著差异,其中影响严重、较严重和较轻的乡镇数量分别为10个、13个和11个,评价结果与实地调查结果高度契合。据此,提出“分级管控、时序优化”的生态修复策略,以实现精准施策与资源高效配置。

关键词:历史遗留矿山;生态环境;层次分析法;指标体系;综合评价

中图分类号:P66 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)06-1242-11 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.204

引用格式:李春亮,鲜永亮,靳仲娥,等.历史遗留矿山生态破坏与污染状况评价方法研究——以黄河流域甘肃段为例[J].黄金科学技术,2025,33(6):1242-1252.LI Chunliang, XIAN Yongliang, JIN Zhong'e, et al. Research on Evaluation Methods for Ecological Destruction and Pollution Status of Historical Abandoned Mines—Taking the Gansu Section of the Yellow River Basin as an Example[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(6): 1242-1252.

我国是矿业大国,长期以来采矿活动引发了一系列矿山生态环境问题,包括矿山地质环境破坏、土地资源损毁、矿区地下水体结构破坏和水污染等,严重影响矿区生态系统(王世虎,2018;妙超等,2024)。随着我国生态文明建设的深入推进,系统开展矿山生态环境评价和修复治理工作,是恢复和重建矿区生态系统的核心任务(白中科等,2018)。当前,历史遗留矿山的修复治理是矿区环境治理中的重点和难点,这类矿山形成于以往不同发展阶段的采矿活动,其特点是责任主体灭失,现由政府承

担生态修复和污染治理责任的废弃矿山,面临着治理任务艰巨和治理成本高昂等挑战(杨金中等,2022)。由于历史遗留矿山在全国范围内分布广泛、地质环境复杂、矿产类型多样、规模不一,且生态退化和污染程度存在明显差异,因此,在开展历史遗留矿山修复治理工作之前,需要先对其生态环境状况进行科学评价。

当前,针对历史遗留矿山的生态环境状况评价研究主要有2个方面。一方面,随着对地质环境、矿山生态和环境污染等问题的研究不断深入,以及

收稿日期:2024-07-07;修订日期:2025-06-20

基金项目:甘肃省自然资源厅青年人才团队项目“甘肃省黄河流域历史遗留矿山生态破坏与污染状况调查评价方法研究与应用”(编号:202310)、甘肃省陇原青年英才项目(编号:202311)、甘肃省自然资源厅科技项目(编号:202410)和甘肃省自然资源厅青年人才团队项目(编号:202408)联合资助

作者简介:李春亮(1985—),男,天津人,正高级工程师,从事水工环地质及区域化探等工作。E-mail:342495990@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

相关法律法规的逐步完善与落实,评价工作从以往对单个矿山单个因素(如地质灾害和地下水污染等)的评价,逐步发展为覆盖“矿—农—城”复合区和矿山生态的综合性评价(白中科等,2018)。这一演变体现在评价对象和评价指标的系统化上,初期研究主要针对矿山环境地质问题构建综合评价指标体系(徐友宁等,2003;赵朝贺等,2013),随后转向关注生态和环境要素,建立矿山地质环境质量评价指标(邹长新等,2011),最后发展为选取地质、生态和环境相关的12个指标,综合评价采矿活动对矿区生态环境的影响(Saedpanah et al, 2019)。另一方面,对系统性评价指标体系的模型构建和权重赋值展开了研究。自20世纪90年代起,国外学者率先通过建立影响因子分级单元体系(Cendrero et al, 1992)和决策树理论(Lemly, 2007)等方法开展环境评价,随后发展出基于矩阵库的露天采矿环境评估算法(Mirmohammadi et al, 2009)。随着多属性决策方法(朱建军, 2005)的发展,一种层次化、结构化的多指标系统性决策方法——AHP法,被广泛应用于矿山生态环境评价中(Saaty, 1980; 储敏, 2005; Shome et al, 2024)。国内相关研究兴起于2000年前后,初期研究是基于AHP法构建矿山生态环境定量综合评价模式(陈桥等, 2006),随后相继发展出FUZZY-AHP(陈振武等, 2017)、SMAIMA(于扬等, 2017)和AHP-EWM(薛庆等, 2023)等综合评价模型,并针对不同矿山类型建立专门的评价体系(陈磊等, 2017; 王红梅, 2020)。

综上所述,矿山生态环境问题和污染状况评价研究已形成较为成熟的体系,但总体来看,现有研究仍存在2个方面的不足:一是矿山生态环境问题评价指标体系单一,评价结果不能综合反映矿山的生态环境问题和无法满足不同管理部门的需求;二是仅进行单个矿山生态环境问题评价,在指导矿山生态修复时难以确定重点区域。鉴于此,本文综合考虑生态破坏、植被破坏和污染状况等因素,选择多维度评价指标,同时选择层次分析法作为评价模型和指标权重赋值方法,建立针对历史遗留矿山生态破坏与污染状况评价的指标体系,从单个矿山和区域尺度(行政区、流域或生态功能区)2个层面提出了区域历史遗留矿山生态破坏与污染状况评价方法,为政府有关部门监管、国土空间规划与治理

矿山生态环境提供参考依据。

1 甘肃省黄河流域历史遗留矿山现状

以甘肃省黄河流域作为研究区,对甘肃省黄河流域历史遗留矿山进行了摸底调查,并在开展生态破坏调查评价的基础上,加入了污染状况与植被破坏指标,开展了探索性综合评价。甘肃省黄河流域历史遗留矿山分布在兰州、平凉、白银、庆阳、甘南、定西、天水、临夏和武威(古浪县、天祝县南部)9个市(州)(图1),流域范围内历史遗留的矿山数量较多。根据自然资源部2021年全国历史遗留矿山核查最终认定,截至2022年12月,黄河流域甘肃省境内共有历史遗留矿山3 463个(表1),约占甘肃省历史遗留矿山总数的57.32%。

甘肃省黄河流域历史遗留矿山共涉及7类矿产。其中,贵金属类矿产主要分布在定西市、甘南州、天水市和武威市;化工原料非金属类矿产主要分布在平凉市;黑色金属类矿产涉及数量较少,主要分布在天水市;能源类矿产主要分布在白银市和平凉市;冶金辅助原料非金属类矿产主要分布在平凉市;有色金属类矿产主要分布在甘南州,兰州市和平凉市少有分布;建材及其他非金属类矿产涉及数量最多,白银市、定西市、甘南州、兰州市、临夏州、平凉市、庆阳市、天水市和武威市均有分布。据野外实际调查和室内总结分析,研究区内历史遗留矿山中存在地质安全隐患的矿山有101处;所有矿山均存在地形地貌破坏现象,总破坏面积为1 967.6564 hm^2 ;存在地表堆积物的矿山有826个,总堆积面积为932.6364 hm^2 ,最大堆积高度为86.2 m。

按照甘肃省地质环境背景划分,历史遗留矿山分布于7个地质环境亚区(图2)。将本次调查结果与图斑往期调查结果进行对比发现,藏北高原地质环境区(甘南州)地形地貌破坏以山体破坏为主,形成规模大小不一的露天采场,同时采场内及周边有残留废渣堆积,土地资源破坏以草地为主,耕地只有少量破坏,图斑内土壤基本与原始土壤类型一致。共和盆地地质环境区(临夏州)地形地貌破坏比较严重,基本上都是山体破坏形成规模较大的掌子面,严重破坏地形地貌景观,且恢复治理难度大。陇西黄土高原地质环境区(白银市、兰州市、定西市

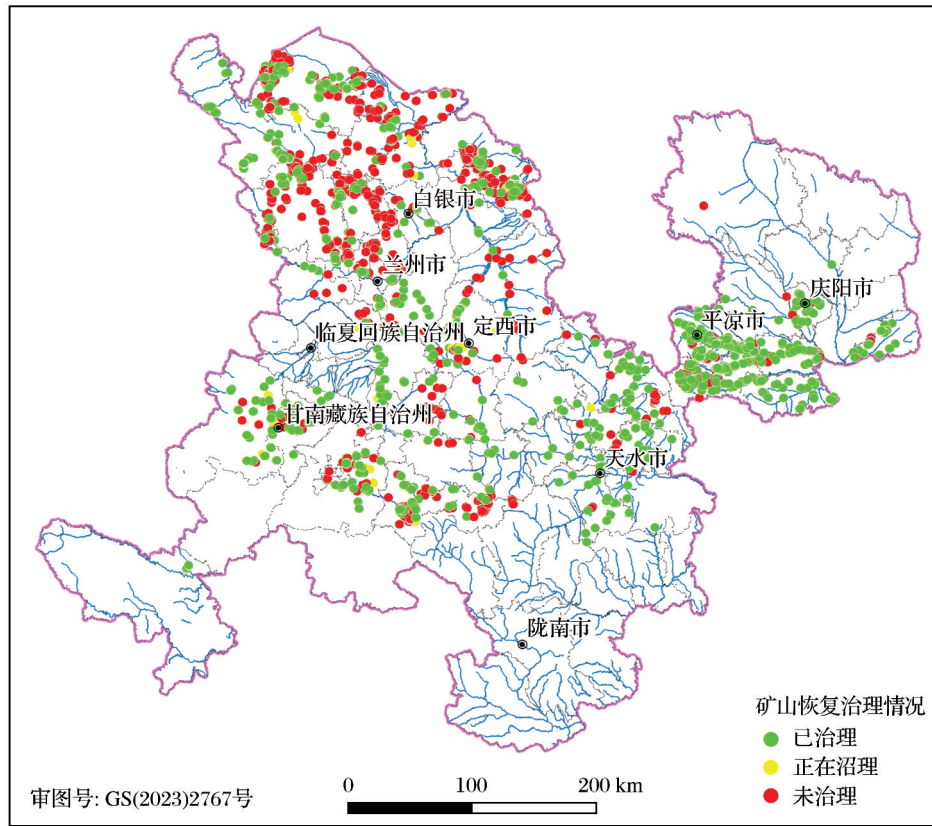


图1 甘肃省黄河流域历史遗留矿山分布图

Fig. 1 Distribution map of historical abandoned mines in the Yellow River Basin of Gansu Province

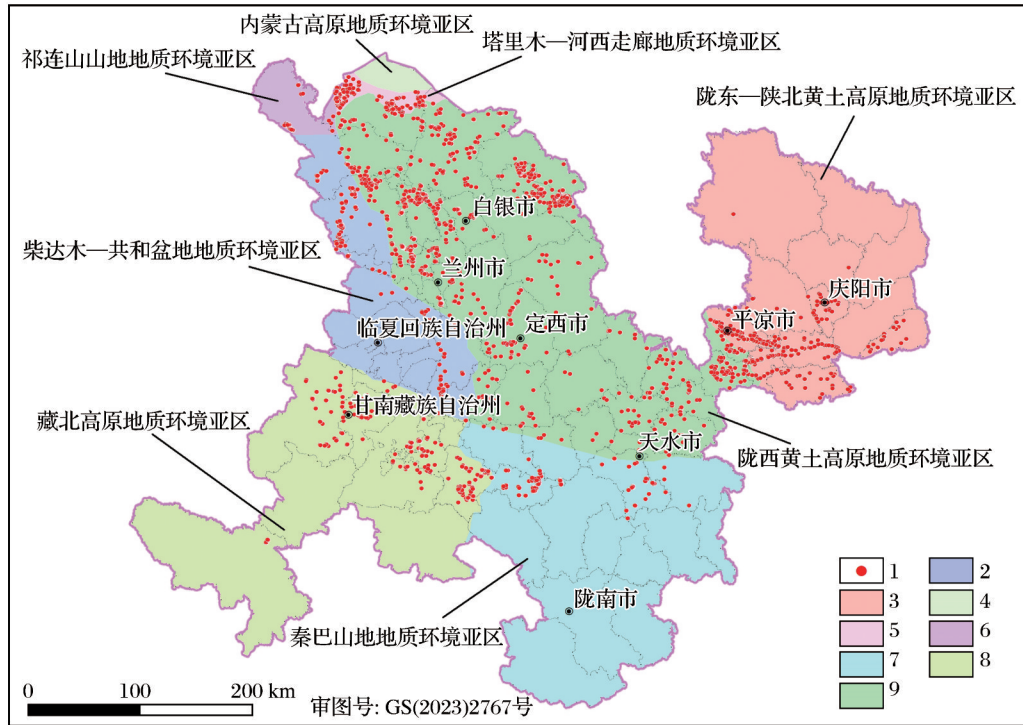
表1 甘肃省黄河流域历史遗留矿山统计

Table 1 Statistics of historical abandoned mines in the Yellow River Basin of Gansu Province

市(州)	未治理矿山		已治理矿山		正在治理矿山		矿山总数/个	矿山总面积/hm ²
	数量/个	面积/hm ²	数量/个	面积/hm ²	数量/个	面积/hm ²		
白银市	528	1 596.55	87	316.58	51	335.35	666	2 248.48
定西市	258	776.74	168	581.81	45	247.34	471	1 605.88
甘南州	64	139.83	135	303.65	13	43.06	212	486.54
兰州市	677	1 817.40	203	493.33	18	38.22	898	2 348.95
临夏州	6	143.46	5	7.37	-	-	11	150.83
平凉市	195	1 041.66	387	1 138.14	6	13.39	588	2 193.19
庆阳市	34	51.64	56	143.25	-	-	90	194.88
天水市	34	52.97	96	163.56	3	9.91	133	226.45
武威市	165	329.50	224	684.37	5	142.70	394	1 156.57
合计	1 961	5 949.74	1 361	3 832.06	141	829.97	3 463	10 611.77

和天水市)地形地貌破坏以山体破坏为主,形成规模大小不一的露天采场,同时采场内及周边有残留废渣堆积,土地资源破坏以草地为主,耕地只有少量破坏,图斑内土壤类型基本与原始土壤类型一致。陇东黄土高原地质环境区(庆阳市和平凉市)

地形地貌破坏以山体破坏为主,有少数沟谷采砂活动形成的露天采坑,规模较小,通常沿沟谷呈带状分布,土地资源破坏以草地为主。内蒙古高原地质环境区(武威市)造成的生态环境问题与共和盆地地质环境区相似。



1. 黄河流域历史遗留矿山;2. 柴达木—共和盆地地质环境亚区;3. 陇东—陕北黄土高原地质环境亚区;4. 内蒙古高原地质环境亚区;5. 塔里木—河西走廊地质环境亚区;6. 祁连山山地地质环境亚区;7. 秦巴山地地质环境亚区;8. 藏北高原地质环境亚区;9. 陇西黄土高原地质环境亚区

图2 甘肃省黄河流域地质环境分区图

Fig. 2 Geological environment zoning map of the Yellow River Basin in Gansu Province

2 矿山生态环境综合评价方法

2.1 总体思路

本研究综合考虑矿山所处区域的生态系统和格局以及生态环境问题及其影响,以服务政府部门监管和规划,指导历史遗留矿山生态修复项目安排顺序为目的,构建了一套科学合理的评价指标体系。选取矿山生态破坏、植被破坏和污染状况作为准则层(二级指标);选取区位重要性、地质安全、地形地貌、土地资源、表层土壤、植被破坏规模、占用破坏级别、起源与类别、恢复状况、固体废物堆存、酸性废水和农用地污染 12 个指标作为指标层(三级指标),对矿山生态破坏与污染状况进行综合评价分级,最终将受到矿山生态破坏与污染状况的影响划分为 3 个等级,分别为严重、较严重和较轻。

2.2 评价方法

本研究选择同时具备定量和定性表征意义的层次分析法作为历史遗留矿山生态破坏与污染状况评价的方法。层次分析法首先需要将组成系统

的各个因素按照其支配关系构成递阶层次结构,然后通过比较同层因素的重要性构建判断矩阵并进行一致性检验,之后再计算各层次对于系统的总排序权重,最终得到最底层(方案层)所有因素对于最高层(总目标)的排序权重(朱建军,2005)。在本文中,系统性决策方案即为确定影响历史遗留矿山生态破坏与污染状况的各影响因素的权重。首先,需要将矿山生态环境系统分解为 3 个子系统,分别选取各个子系统中具有代表性的评价指标(因子),对其表现程度进行等级划分,并运用专家打分法,按等级对每个指标进行量化,给出归一化指标。然后,将同一子系统内各评价指标值按权重进行叠加,得出一个子系统评分,再将各子系统评分按权重叠加,得出每个评价单元的矿山生态环境质量分值。最后,对各单位的指标情况进行综合分析,对本地区历史遗留矿山生态破坏和污染状况进行总体评价。

2.3 评价单元

根据《甘肃省黄河流域历史遗留矿山生态破坏

与污染状况调查评价工作方案》，调查评价过程以历史遗留矿山(图斑)作为调查评价对象。因此,为了得到研究区内所有历史遗留矿山的生态破坏和污染程度评价结果,继而为后续实施“分级管控、时序优化”的生态修复策略提供依据,本文以单矿山作为最小调查单元和最小评价单元。此外,在基础数据翔实的基础上,可采用行政区、流域或生态功能区等作为评价单元进行区域等级评价定级。因此,为了获得某一区域历史遗留矿山的生态破坏和污染状况,本文以乡镇行政界线为边界确定区域评价单元,开展区域层面的历史遗留矿山生态状况评价工作。根据以上对单矿山和区域2个层面评价单元的划分依据和原则,本文将研究区内的历史遗留矿山划分为2个层级的评价单元,以此开展后续的调查与评价工作。

2.4 评价体系的建立

根据矿山生态环境破坏情况,选取影响程度突出的关键指标进行评价,构建矿山生态环境评价体系如图3所示,包括3个层次,即目标层、准则层和指标层。

(1) 评价指标的层次划分

目标层(A),为层次结构的最高级,即矿山生态破坏与污染状况评价。准则层(B),包括区矿山生态破坏评价(B₁)、矿山植被破坏评价(B₂)和矿山污染状况评价(B₃)。指标层(C),用以衡量准则层的指标(C₁~C₁₂)。

(2) 评价指标的选取

①生态破坏评价指标。为了能够反映历史遗留矿山范围内的地质安全隐患、地形地貌破坏情况、土地资源损毁情况和表层土壤破坏情况等内容,综合研究区现场调查结果,选择区位重要性、地质安全、地形地貌、土地损毁和土壤破坏5项指标作为矿山生态破坏评价指标。

②植被破坏评价指标。为了能够反映矿山占用前土地的利用类型、质量、重要性程度,以及植被恢复现状,综合研究区现场调查结果,选择占用破坏规模、占用破坏级别、起源与类别和恢复状况4项指标作为矿山植被破坏评价指标。

③污染状况评价指标。为了能够反映矿山固体废物、酸性废水存量和影响对象,综合研究区现场调查结果,选择固体废物、酸性废水和农用地污

染这3项指标作为矿山污染状况评价指标。

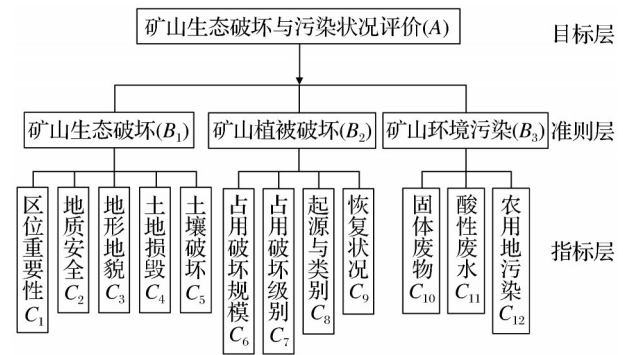


图3 矿山生态破坏与污染状况评价指标体系

Fig. 3 Evaluation index system of mine ecological damage and pollution status

(3) 确定评价指标权重

①构建判断矩阵。判断矩阵的建立是从层次分析结构的第二层开始,对上一层的某一因素从上到下依次计算各因素在某一层次上的权重,并通过两两对比对矿山生态破坏和污染状况的影响的相对重要性(标度法)来构造判断矩阵(表2)。层次分析法由美国运筹学家托马斯·萨蒂于20世纪70年代提出,通过构建判断矩阵量化因素间的相对重要性,利用线性代数知识,精确地求出判断矩阵的最大特征根所对应的特征向量,目的是对各测评要素的重要程度进行排序,归一化后的特征向量即为评价指标的权重。以构造目标层—准则层判断矩阵为例,其判断矩阵(记为A)见表3。

表2 判断矩阵1-9标度的含义

Table 2 Meaning of scale 1-9 for judgement matrix

重要性标度	含义
1	表示2个因素a与b的重要性相同
3	表示2个因素a与b相比,a比b稍微重要
5	表示2个因素a与b相比,a比b明显重要
7	表示2个因素a与b相比,a比b强烈重要
9	表示2个因素a与b相比,a比b极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素a _i 与因素a _j 的重要性之比为a _{ij} ,那么因素j与因素i的重要性之比为a _{ji} =1/a _{ij}

②确定权重。在求解矩阵特征向量时,“和法”可以通过计算矩阵行向量的算数平均值快速得到矩阵的特征向量,因此本文选择“和法”求解判断矩

表3 目标层—准则层判断矩阵A

Table 3 Target layer-criterion layer judgment matrix

A	B ₁	B ₂	B ₃
B ₁	1	3	2
B ₂	1/3	1	1/2
B ₃	1/2	2	1

阵的特征向量。

首先,将矩阵A的每一个元素按照式(1)进行标准化处理,得到A的标准化矩阵A':

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

$$A' = \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: a_{ij} 为矩阵A的第*i*行第*j*列元素; \bar{a}_{ij} 为 a_{ij} 的标准化结果;A'为A标准化矩阵。

其次,对 \bar{a}_{ij} 按行求和,得到特征向量 \bar{w}_i :

$$\bar{w}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad (3)$$

最后,将特征向量 \bar{w}_i 归一化,得到:

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i} \quad (4)$$

计算得到矩阵A的归一化特征向量为 $W = [W_1 \ W_2 \ W_3]^T = [0.53 \ 0.16 \ 0.31]^T$,即评价指标生态破坏、植被破坏和污染状况的权重分别为0.53,0.16,0.31。

(4)一致性检验

一致性检验的目的是避免其他因素对判断矩阵构成干扰,以此来保证构造矩阵排序时的准确性。

①计算判断矩阵的最大特征值 λ_{max} ,即:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{w_i} \quad (5)$$

②计算随机一致性指标 I_c ,即:

$$I_c = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

③查找随机一致性指标 I_R

从表4查找随机一致性指标 I_R 。

④计算一致性比例 R_c

$$R_c = \frac{I_c}{I_R} \quad (7)$$

当 $R_c < 0.10$ 时,判断矩阵的一致性符合要求,否则判断矩阵的元素应适当修正。得出矩阵A的最

大特征值为3.01, I_c 为0.0056, $R_c=0.0096$,符合一致性检验要求。求得的各评价指标权重见表4。

表4 平均随机一致性指标 I_R 的数值

Table 4 Values of average random consistency index (I_R)

n	I_R	n	I_R
1	0	5	1.12
2	0	6	1.24
3	0.58	7	1.32
4	0.9	8	1.41

注:n为矩阵的阶数

2.5 评价因子分级与取值

参照《黄河流域历史遗留矿山生态破坏与污染状况调查评价技术方案》,将矿山生态破坏与污染状况的程度(各评价指标)划分为严重、较严重和较轻3个级别,并分别赋值10分、7分和4分。根据层次分析法所确定的针对本研究对象的评价体系构建判断矩阵,通过MATLAB软件编写判断矩阵特征向量、特征值和一致性参数的求解脚本,最终运行脚本得到各评价指标的权重系数(表4)。

2.6 单矿山评价

为了对各矿山生态环境进行对比并划分等级,需要按照目标层得分(记为 A_0)对各矿山进行等级划分。本次采用甘肃省黄河流域历史遗留矿山分布区矿山生态环境调查结果与评价等级进行相互验证,最终确定了等级划分阈值,即 $A_0 \geq 6$,表示矿山生态破坏与污染的影响严重(I); $4 < A_0 < 6$,表示矿山生态破坏与污染的影响较严重(II); $A_0 \leq 4$,表示矿山生态破坏与污染的影响较轻(III)。

2.7 区域性综合评价

区域性综合评价是在单矿山评价结果的基础上,以某一级层的具体区域作为评价单元,对区域矿山生态破坏和污染状况进行综合评价,区域可以按照行政单元(市、县、乡)、流域或生态功能区等进行划分。区域评价以区域内I、II级矿山面积数量为依据,当区内I级和II级矿山面积占总破坏面积的比例大于等于60%时,将该区域划分为矿山生态破坏与污染影响严重区;当区内I级和II级矿山分布面积占总破坏面积的比例为40%~60%时,将该区域划分为矿山生态破坏与污染影响较严重区;当区内I级和II级矿山分布面积占总破坏面积的比

表4 矿山生态破坏与污染状况综合评价指标权重分配表

Table 4 Weight allocation table for comprehensive evaluation index of ecological destruction and pollution in mines

准则层 (B)/权重 (a_i)	指标层 (C) (b_i)	指标变量(X_i)得分依据		
		10分	7分	4分
矿山生态破坏 (B_1)/ (0.53)	区位重要性 (C_1)	0.31 国家公园、自然保护区核心保护区;永久基本农田内;城镇村周边1 km范围内;交通干线两侧0.5 km范围内	国家公园、自然保护区一般控制区、自然公园;城镇村周边1~2 km范围内;交通干线两侧0.5~1.0 km范围内	自然保护地以外的生态保护红线区域;城镇村周边2~5 km范围内;交通干线两侧1~2 km范围内
	地质安全(C_2)	0.23 地质灾害及隐患点数量大于等于3处;规模大型以上;危害程度大	地质灾害及隐患点数量大于等于2处;规模中等;危害程度中	地质灾害及隐患点数量大于等于1处;规模小;危害程度小
	地形地貌(C_3)	0.23 破坏山体高度大于50 m;露天采坑深度大于50 m;地表堆积高度大于20 m	破坏山体高度20~50 m;露天采坑高度20~50 m;地表堆积高度10~20 m	破坏山体高度小于20 m;露天采坑高度小于20 m;地表堆积高度小于10 m
	土地资源(C_4)	0.13 破坏山体面积大于1 hm ² ;露天采坑面积大于2 hm ² ;地表堆积面积大于2 hm ²	破坏山体面积0.5~1.0 hm ² ;露天采坑面积0.5~2.0 hm ² ;地表堆积面积0.5~2.0 hm ²	破坏山体面积小于0.5 hm ² ;露天采坑面积小于0.5 hm ² ;地表堆积面积小于0.5 hm ²
	土壤(C_5)	0.1 砾质或更粗面积大于50%	砂质面积大于50%	黏质和壤质面积大于50%
矿山植被破坏 (B_2)/ (0.16)	占用破坏规模(C_6)	0.3 占用林地草地湿地100 hm ² (含)以上	占用林地草地湿地10~100 hm ²	占用林地草地湿地2~10 hm ²
恢复状况(C_9)	占用破坏级别(C_7)	0.2 自然保护地内的林地、草地、湿地, I级保护林地	I级以外,郁闭度大于0.4的乔木林地竹林地、植被覆盖度大于等于60%的灌木林地和草地、非自然保护地内的湿地	I、II级以外,郁闭度小于0.4的乔木林地竹林地,覆盖度小于60%的灌木林地和覆盖度20%以上的草地
	起源与类别(C_8)	0.2 天然国家级公益林、湿地	天然地方公益林、人工国家级公益林、覆盖度大于60%的草地	天然商品林、人工地方公益林,覆盖度20%~60%的草地
	恢复状况(C_9)	0.3 暂不具备恢复条件,或者只适宜恢复为林地草地湿地以外的其他土地	已经恢复为其他林地、草地,或者已具备恢复林地草地湿地条件	已恢复为郁闭度小于0.4的乔木林地竹林地、灌木林地和覆盖度20%以上草地
矿山污染状况 (B_3)/ (0.31)	固体废物(C_{10})	0.3 危险废物(未按标准贮存或处置)	第II类一般工业固体废物或硫化矿开采产生的固体废物	第I类一般工业固体废物
	酸性废水(C_{11})	0.3 周边5 km存在:严格管控类农用地;酸性废水存量大于等于0.5万t;主要污染物有毒、有害	周边20 km存在:严格管控类农用地;酸性废水存量大于等于0.3万t;主要污染物有毒、有害	周边20 km存在:安全利用类农用地;酸性废水存量小于0.3万t
	农用地污染(C_{12})	0.4 周边5 km存在:安全利用类农用地面积占总面积大于等于80%;农田灌溉水超标	周边20 km存在:安全利用类农用地面积占总面积大于等于50%;农田灌溉水超标	周边20 km存在:安全利用类农用地面积占总面积的比例大于等于30%;农田灌溉水超标

注:变量得分确定采取上一级别优先原则,只要有一条符合即为该级别

例小于40%时,将其划分为矿山生态破坏与污染影响较轻区。

3 评价方法的应用

选择兰州市历史遗留矿山作为试点区域,采用本研究提出的生态环境综合评价方法对遗留矿山进行综合评价。调查显示:兰州市现有历史遗留矿

山898个,面积为2 348.95 hm²,其中包括已治理(包括自然恢复、转型利用和工程治理)矿山203个,正在治理矿山18个,未治理图斑677个,分布于永登、榆中、红古、皋兰和七里河5个县(区)34个乡镇;矿山开采方式以露天开采为主,露天开采矿山818个,井工作业矿山78个,复合开采矿山2个。通过开展系统的遗留矿山生态现状调查,取得以下认识:兰州市范围内存在地质安全隐患的矿山有19处;所

有矿山均存在地形地貌破坏,总破坏面积为 1 072.15 hm²;存在地表堆积物的矿山有 239 个,总堆积面积为 142.97 hm²。通过开展单矿山评价后,得出兰州市历史遗留矿山中生态破坏与污染影响划分为严重、较严重和较轻的矿山分别为 104 个、466 个和 107 个。

根据矿山调查结果和单矿山评价结果,以乡镇行政范围为界,开展了矿山生态破坏与污染状况评价,全市涉及历史遗留矿山的乡镇有 34 个,如图 4 所示。其中,划分为矿山生态破坏与污染影响严重的乡(镇)有 10 个,分别为永登县城关镇、民乐乡、通远乡、武胜驿镇、柳树镇和坪城乡,皋兰县黑石镇、水阜镇、忠和镇和九合镇;划分为矿山生态破坏与污染影响较严重的乡(镇)有 13 个,分别为永登县赛拉隆乡、连城镇、河桥镇、中堡镇、上川镇、龙泉寺镇、红城镇和树屏镇,皋兰县石洞镇和什川镇,红古区矿区街道和海石湾镇,榆中县连搭乡;划分为矿山生态破坏与污染影响较轻的乡(镇)有 11 个,

分别为永登县七山乡、大同镇和苦水镇,七里河区阿干镇和魏岭乡,榆中县高崖镇、马坡乡、定远镇和平镇,红古区华龙街道和红古镇。

综合上述评估结果,结合当前我国矿山生态修复相关政策,建议实行“分级管控、时序优化”的生态修复策略。对于受到矿山生态破坏和污染影响严重的地区,尽快开展矿山地质环境恢复治理工作,防止矿山地质生态环境问题扩大化。对于受到矿山生态破坏与污染影响较严重区,建议相关单位编制矿山地质环境恢复治理方案,借助国家和省级专项,逐步开展相关矿山的恢复治理工作。对于受到矿山生态破坏与污染影响较轻的地区,以地质环境保护为主,防止生态环境再次遭到破坏。此外,建议优先采用“土壤重构—植被适配—地貌重塑”递进修复模式,建立省级矿山生态档案数据库,推行“政府主导+企业认领+第三方评估”市场化修复机制,将修复成效与建设用地指标置换、碳汇交易权益挂钩。在政策方面,建议设立省级生态修复专

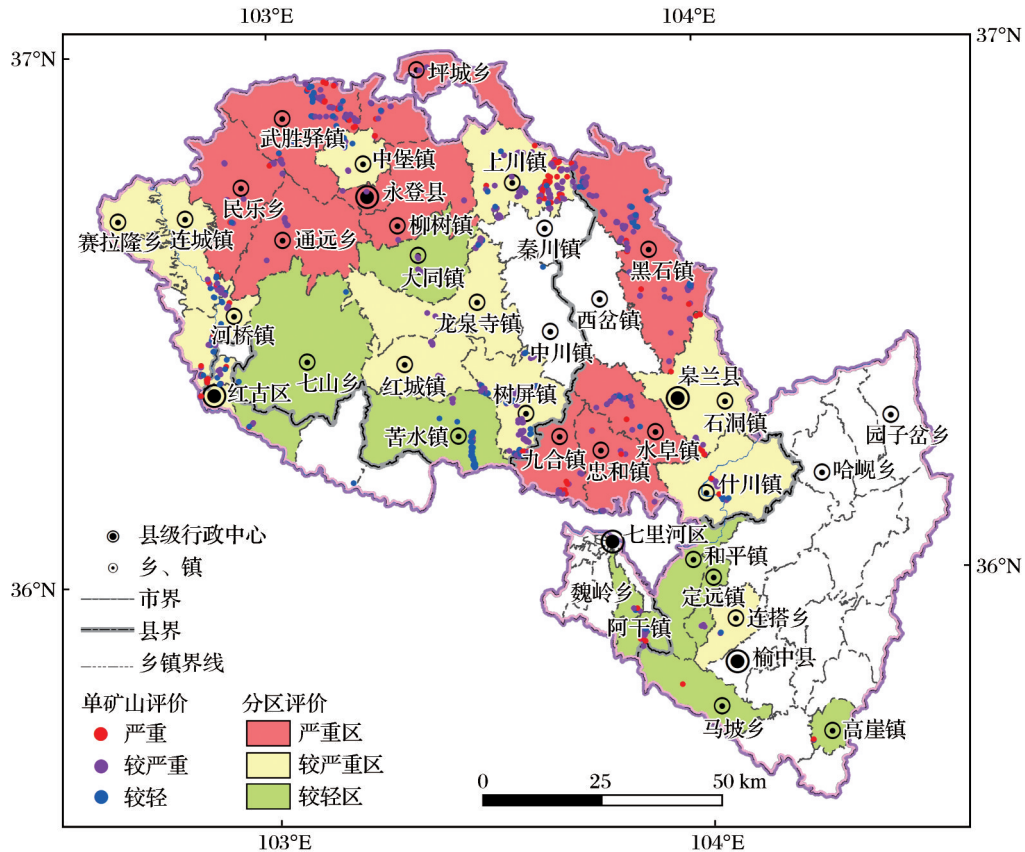


图 4 兰州市历史遗留矿山生态破坏与污染状况评价分级

Fig. 4 Evaluation and classification of ecological destruction and pollution of historical abandoned mines in Lanzhou City

项基金并探索“修复券”交易制度,对完成修复主体给予土地使用税减免、优先获取矿权等激励,探索“生态修复+光伏产业”、“矿山公园+文旅融合”等产业导入模式,形成可持续的长效治理机制。

4 结论

(1)综合矿山生态破坏、矿山植被破坏和矿山污染状况3个方面的12个指标,结合研究区的地质背景、历史遗留矿山生态破坏状况、矿山生态修复相关政策、不同管理部门的差异化需求和当前我国的生态文明建设需要,构建了甘肃省黄河流域历史遗留矿山生态破坏与污染状况评价指标体系。在此基础上,运用层次分析法建立了综合评价模型,实现了矿山生态环境破坏程度的定量化评价。

(2)基于单个历史遗留矿山的评价结果,提出区域(行政区、流域或生态功能区)层面矿山生态环境破坏程度综合评价方法,有助于在矿山生态修复治理中抓住重点区域,有针对性地谋划项目、布局项目和分类施策。

(3)运用综合评价模型,对兰州市历史遗留矿山生态破坏与污染状况进行了单矿山评价和以乡镇级行政单元为评价单元的区域综合评价。结果表明:477个未治理单矿山中有104个影响严重、466个较严重和107个较轻,34个乡镇中有10个影响严重、13个较严重和11个较轻。该结果可为后续开展修复治理工作提供建议。

(4)本次建立的评价指标体系和评价模型主要针对甘肃省黄河流域,即甘肃省中南部区域,由于甘肃省地跨多个地质环境单元,该方法能否适用于河西地区历史遗留矿山生态破坏与污染状况评价还需进一步探讨。

参考文献 (References):

Cendrero A, Francis E, Díaz de Terán J R, 1992. Geoenvironmental units as a basis for the assessment, regulation and management of the Earth's surface[M]//Planning the Use of the Earth's Surface. Berlin, Heidelberg: Springer.

Lemly AD, 2007. A procedure for NEPA assessment of selenium hazards associated with mining[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 125(1):361-375.

Mirmohammadi M, Gholamnejad J, Fattahpour V, et al, 2009. Designing of an environmental assessment algorithm for surface mining projects[J]. Journal of Environmental Management, 90(8):2422-2435.

Saaty T L, 1980. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation[M]. New York: McGraw-Hill.

Saedpanah S, Amanollahi J, 2019. Environmental pollution and geo-ecological risk assessment of the Qhorveh mining area in western Iran[J]. Environmental Pollution, 253:811-820.

Shome S D, Mhaske S N, Chakravorty S, et al, 2024. Assessment of environmental severity around the mining region using GIS-based AHP model: a case study of the Dongri Buzurg manganese ore mine, India[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series D, 105(2):769-794.

白中科,周伟,王金满,等,2018.再论矿区生态系统恢复重建[J].中国土地科学,32(11):1-9.

Bai Zhongke, Zhou Wei, Wang Jinman, et al, 2018. Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas[J]. China Land Science, 32(11):1-9.

陈磊,王家鼎,谷天峰,等,2017.大西沟铁矿生态环境模糊综合评价研究[J].土壤通报,48(4):794-799.

Chen Lei, Wang Jiading, Gu Tianfeng, et al, 2017. Study on fuzzy comprehensive evaluation of ecological environment in Daxigou iron mine[J]. Chinese Journal of Soil Science, 48(4):794-799.

陈桥,胡克,雒昆利,等,2006.基于AHP法的矿山生态环境综合评价模式研究[J].中国矿业大学学报,35(3):377-383.

Chen Qiao, Hu Ke, Luo Kunli, et al, 2006. Study on the synthetical assessment model of mine eco-environments based on AHP[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 35(3):377-383.

陈振武,许福美,2017.基于AHP与FUZZY的矿山生态环境综合评价研究[J].科技通报,33(12):262-269.

Chen Zhenwu, Xu Fumei, 2017. Study on the comprehensive evaluation of mine ecological environment based on AHP and FUZZY[J]. Bulletin of Science and Technology, 33(12):262-269.

储敏,2005.层次分析法中判断矩阵的构造问题[D].南京:南京理工大学.

Chu Min, 2005. The construction problem of judgment matrix in analytic hierarchy process[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology.

妙超,王焘,孙羽,等,2024.废弃露天矿山生态问题评价及修复治理研究:以洛南县7处历史遗留矿山为例[J].四川地质学报,44(1):108-112.

Miao Chao, Wang Tao, Sun

- Yu, et al, 2024. Evaluation of ecological problems and study on restoration and treatment of abandoned open-pit mines, taking seven historic mines in Luonan County as an example[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 44(1): 108-112.
- 王红梅, 2020. 基于层次分析法的煤矿矿山生态环境评价定量模型研究[J]. *中国矿业*, 29(7): 70-75. Wang Hongmei, 2020. The study on eco-environmental evaluation model of coal mine based on analytic hierarchy process method[J]. *China Mining Magazine*, 29(7): 70-75.
- 王世虎, 2018. 生态文明建设背景下历史遗留矿山环境问题与对策[J]. *矿业安全与环保*, 45(6): 88-91, 96. Wang Shihu, 2018. Environmental problems and countermeasures of legacy abandoned mine under the background of ecological civilization construction [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 45(6): 88-91, 96.
- 徐友宁, 袁汉春, 何芳, 等, 2003. 矿山环境地质问题综合评价指标体系[J]. *地质通报*, 22(10): 829-832. Xu Youning, Yuan Hanchun, He Fang, et al, 2003. Comprehensive evaluation index system of the environmental geological problems of mines [J]. *Regional Geology of China*, 22(10): 829-832.
- 薛庆, 董双发, 牛海威, 等, 2023. 基于AHP-EWM综合权重的矿山地质环境评价:以清镇铝土矿区为例[J]. *矿产勘查*, 14(4): 639-647. Xue Qing, Dong Shuangfa, Niu Haiwei, et al, 2023. Evaluation of geological environment mine of in Qingzhen bauxite mine area based on AHP-EWM comprehensive weight [J]. *Mineral Exploration*, 14(4): 639-647.
- 杨金中, 姚维岭, 陈栋, 等, 2022. 历史遗留矿山核查方法研究[J]. *自然资源遥感*, 34(3): 10-16. Yang Jinzhong, Yao Weiling, Chen Dong, et al, 2022. A method for determining historically abandoned mines [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 34(3): 10-16.
- 于扬, 王登红, 田兆雪, 等, 2017. 稀土矿区环境调查 SMAIMA 方法体系、评价模型及其应用:以赣南离子吸附型稀土矿山为例[J]. *地球学报*, 38(3): 335-344. Yu Yang, Wang Denghong, Tian Zhaoxue, et al, 2017. Establishment and application of SMAIMA working method system and environment evaluation model for rare earth elements mine: a case study of ion-absorption type REE mines in southern Jiangxi Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(3): 335-344.
- 赵朝贺, 杨化超, 胡奎, 等, 2013. 矿山地质环境综合评价体系研究[J]. *煤炭工程*, 45(11): 114-116, 119. Zhao Chaohe, Yang Huachao, Hu Kui, et al, 2013. Study on comprehensive evaluation system of mine geological environment [J]. *Coal Engineering*, 45(11): 114-116, 119.
- 朱建军, 2005. 层次分析法的若干问题研究及应用[D]. 沈阳: 东北大学. Zhu Jianjun, 2005. Research on some problems of the analytic hierarchy process and its application [D]. Shenyang: Northeastern University.
- 邹长新, 沈渭寿, 刘发民, 2011. 矿山生态环境质量评价指标体系初探[J]. *中国矿业*, 20(8): 56-59, 68. Zou Changxin, Shen Weishou, Liu Famin, 2011. Preliminary research on evaluation index system of mine ecological environment quality [J]. *China Mining Magazine*, 20(8): 56-59, 68.

Research on Evaluation Methods for Ecological Destruction and Pollution Status of Historical Abandoned Mines—Taking the Gansu Section of the Yellow River Basin as an Example

LI Chunliang^{1,2}, XIAN Yongliang¹, JIN Zhong'e¹, YANG Ziheng¹

1. *Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China;*

2. *Geoscience Big Data Engineering Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China*

Abstract: To evaluate the current state of ecological destruction and pollution at historical abandoned mines in the Gansu section of the Yellow River Basin, and to facilitate comprehensive ecological assessments and remediation strategies, this study introduces a robust evaluation methodology for the mining ecological environment, employing the analytic hierarchy process (AHP). This methodology meticulously accounts for intricate geological conditions, land degradation, pollution levels, and other vital ecological factors pertinent to mining sites. It is specifically tailored to ensure that the evaluation outcomes align with the multifaceted

requirements of natural resource management, forestry and grassland management, and ecological environment authorities. Initially, twelve evaluation indicators were identified across three dimensions: ecological damage, vegetation destruction, and pollution status. A scientifically rigorous indicator system was developed based on empirical field survey data of the mining ecological environment within the study area. Subsequently, judgment matrices were formulated using the analytic hierarchy process, integrating insights from regional mining ecological environment surveys. Scripts were developed using MATLAB software to compute the eigenvectors, eigenvalues, and consistency indices of the matrices. The execution of these scripts resulted in the determination of weight coefficients for each evaluation indicator. Subsequently, the evaluation results were validated through cross-verification with actual survey data and preliminary assessment grades from historical abandoned mining areas within the Yellow River Basin in Gansu Province. This process established definitive threshold values for grading the overall assessment levels. The method facilitates a comprehensive evaluation and grading of mining-related ecological environment issues, thereby providing theoretical support for the formulation of differentiated remediation strategies. The feasibility of the method was demonstrated using Lanzhou as a representative case study, where the evaluation results exhibited a high degree of concordance with on-site investigations. The findings indicate that among the 34 townships affected by mining activities, 10 were classified as severely impacted, 13 as moderately impacted, and 11 as lightly impacted, based on the degree of influence. Consequently, recommendations for ecological restoration strategies that emphasize graded control and optimized sequencing have been proposed. This approach offers a scientific framework for the implementation of targeted ecological management interventions in mining areas situated within ecologically fragile zones.

Key words: historical abandoned mines; ecological environment; analytic hierarchy process; index system; comprehensive evaluation

国家矿山安全监察局印发 《金属非金属矿山智能化建设指南》

12月11日,为深入贯彻落实《中共中央办公厅国务院办公厅关于进一步加强矿山安全生产工作的意见》,落实七部门《关于印发〈关于深入推进矿山智能化建设促进矿山安全发展的指导意见〉的通知》,国家矿山安全监察局发布了《金属非金属矿山智能化建设指南(2025年版)》(简称《指南》)。

《指南》旨在科学规范指导金属非金属矿山开展智能化建设,紧扣“减人、增安、提效”总体目标,按照金属非金属露天矿山和地下矿山两大场景,分别提出了矿山智能化建设整体架构,分系统明确了建设目标与功能要求,涵盖信息基础、地质保障、开采设计与生产计划、采矿作业、运输作业、辅助生产

系统、安全监控、综合管控平台等十大业务系统,以功能性、效果性表述引导矿山通过“一矿一策”探索实用管用的建设模式。《指南》的发布填补了当前金属非金属矿山领域智能化顶层设计的空白,对构建系统完备、技术先进的矿山智能化体系具有重要推动作用。

国家矿山安全监察局还就各省矿山安全监管监察部门用好《指南》推进矿山智能化建设工作,提出坚持实事求是、坚持分类分级、坚持突出重点、坚持创新驱动、坚持压实责任、坚持政策引领6个方面的要求,为科学、规范、有序推进矿山智能化建设提供了科学指引。

(来源:国家矿山安全监察局)