基于AHP-熵值法和模糊综合评价的废弃矿山地质环境修复效益评价研究*

田彦清[1,2]，李博[3,4]

（1.中国五矿集团有限公司， 北京 100010；
2.中国地质大学（北京）工程技术学院， 北京 100083；
3.中国地质矿业有限公司， 北京 100029；
4.北京化工大学 经济管理学院， 北京 100029）

摘要：地质环境修复效益评价旨在服务于废弃矿山地质环境治理效益预判和修复成效评估，为修复工程实践提供可靠决策支撑和有效监督方式。通过梳理国内外文献和聚类分析相关影响指标，结合三重底线理论和可持续发展理论，从经济、社会、生态和可持续发展四个维度构建了废弃矿山地质环境修复效益评价指标体系，采用AHP与熵值法组合赋予指标权重，运用模糊综合评价法构建修复评价模型，并在张家口市历史遗留废弃矿山地质环境修复工程中开展实证应用。结果表明，该市的废弃矿山地质环境修复工程综合评价值为89.85，修复成效等级为良好，生态效益和社会效益评价值相对较高，说明案例工程总体达到了消除隐患、改善生态、提升功能的修复目标；可持续发展和经济效益评价值相对偏低，仍需从完善维护制度、强化宣传教育、实施动态监测监管等方面优化措施，进一步提高修复综合效益。该评价指标体系和模型科学、可行，能有效评估废弃矿山地质环境修复效益，为同类工程的效益评价提供了参考借鉴。

关键词：废弃矿山；地质环境修复；效益评价；层次分析法；熵值法；模糊综合评价

中图分类号：TD88；X171.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)05-0202-09

Research on Benefits Evaluation of Geological Environment Restoration in Abandoned Mines Based on AHP-Entropy Method and Fuzzy Comprehensive Evaluation

Tian Yanqing[1,2], *Li Bo*[3,4]

(1.China Minmetals Corporation, Beijing 100010, China;
2.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
3.China National Geological and Mining Corporation, Beijing 100029, China;
4. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Benefit evaluation of geological environment restoration aims to serve the prediction of the benefits of geological environment governance in abandoned mines and the assessment of the effectiveness of restoration, providing reliable decision-making support and effective supervision methods for restoration engineering practices. Through the review of domestic and foreign literatures and the cluster analysis of relevant influencing indicators, combined with the triple bottom line theory and sustainable development theory, a benefit evaluation index system for the geological environment restoration of abandoned mines was constructed from four dimensions, including economy, society, ecology, and sustainable development. The analytic hierarchy process (AHP) and entropy method were used in combination to assign weights to the indicators, and the fuzzy comprehensive evaluation method was used to construct the restoration evaluation model. The model was empirically applied in the geological environment restoration project of historical abandoned mines in Zhangjiakou city. The results show that the evaluation result benefit of geological environment restoration of abandoned mines in the city is 89.85, and the restoration effectiveness level is good. The ecological and social benefit evaluation values are relatively high, indicating that the case project has generally achieved the restoration goals of eliminating hazards, improving the ecology, and enhancing functions. The sustainable development and economic benefit evaluation values are relatively low, and measures still need to be optimized from

* **收稿日期**：2025-11-28
作者简介：田彦清(1985—)，男，陕西宝鸡人，博士研究生，高级工程师，研究方向为矿山生态修复及安全管理。E-mail：tianyanqing@hotmail.com

aspects such as improving maintenance systems and mechanisms, strengthening publicity and education, and implementing dynamic monitoring and supervision to further improve the comprehensive benefits of restoration. The proposed evaluation index system and model are scientific and feasible, and can effectively evaluate the benefits of geological environment restoration in abandoned mines, providing a reference for the benefit evaluation of similar projects.

Key words: Abandoned mine, Geological environment restoration, Benefit evaluation, Analytic hierarchy process (AHP), Entropy method, Fuzzy comprehensive evaluation

0 引言

废弃矿山地质环境修复作为响应我国生态文明建设的重要举措,旨在解决早期粗放式矿产资源开发后遗留的地质环境问题,被赋予了推动社会文明进步的重大使命[1]。近年来,我国统筹推进矿山地质环境修复和绿色矿山建设,以示范工程引领带动废弃矿山修复系统化,截至 2023 年底全国累计完成修复治理历史遗留废弃矿山面积超过 320 000 hm^2,有效改善了矿区生态状况和周边人居环境[2]。但当前社会各界对废弃矿山修复的重要性和必要性认识不均衡,修复效益评价存在局限性,严重影响和制约了绿色矿山建设的进程和执行力。废弃矿山地质环境修复效益评价是预测和检验修复成效的重要方式,科学适用的修复效益评价指标体系和模型可为评估修复质量提供有力支撑。政府的支持和投入、资本的介入和支撑力度、项目承建方的参与积极性和效益预测等因素,对保障修复项目的成功实施起到至关重要的作用。

当前,国内外学者围绕矿山修复效益评价的研究主要集中在生态效益评价[3-5]、社会效益评价[6-7]、经济效益评价[8-9]等方面,不同学者依据不同的出发点和目的,采用的理论和评价方法不尽相同,尚未形成较为权威的评价体系,缺乏统一的评价标准。如 Ličina 等[10]、Kentula[11]、秦静等[12]多侧重于物种多样性、土壤植被覆盖、土地复垦、水源涵养等生态效益方面的评价;李积普等[13]、李甫等[14]采用人均收入水平、投入产出比、生态产品价值等指标衡量修复的经济效益;马跃[8]、陈震[15]从人口数量变化、政府补贴、就业率等角度考虑修复的社会效益;还有学者从经济成本、利益相关者的满意度、文化生态服务价值等方面对废弃矿山修复效益进行评估,并提出可持续发展不足的问题[16-17];在评价方法上,以替代成本法、市场价格法、支付意愿、碳交易等为主[18-19],反映出废弃矿山修复效益可由多个变量衡量或综合评价;另有研究将蚁群算法、机器学习法等[20-21]引入矿区生态修复效益评价中,通过优化指标与公式来提升评价精准度,但计算模型过于复杂,实操性和推广度不高。

基于上述国内外研究现状可知,现有研究以生态功能恢复和生态效益评估偏多,而针对废弃矿山地质环境修复效益评价系统性高的体系及实用性强的模型较为鲜见,并且大多数研究都着眼于单体矿山或局部区域的修复效益评价与分析,很少涉及连片矿区或地域性地质环境修复综合效益的评价探讨与应用情形[22]。为此,本文从经济效益、生态效益、社会效益及可持续发展四个维度构建了较为全面且相对便捷的废弃矿山修复效益评价指标体系和评价模型,服务于废弃矿山地质环境修复和治理效益预判或成效评估,以期为废弃矿山地质环境修复实践提供有益参考。

1 评价指标体系构建

1.1 理论基础

英国学者约翰·埃尔金顿于 1997 年首次提出三重底线理论[23],认为企业要实现可持续发展,既要关注经济效益,也要考虑对社会的正面影响和对环境保护所需承担的责任,构成“三重效益”的综合需求,这一观点与废弃矿山地质环境修复项目实施目的相契合,共同影响着修复成效。可持续发展理论[24]是以协调环境保护、经济发展和生活品质提升为目标的综合性发展范式,随着国家政策的大力扶持和绿色矿山建设的推进,资源利用、生态保护、经济发展等方面的可持续发展理念驱动矿山修复工作,并且为其提供了长效性和前瞻性思考的理论思考视角,有助于从长远和根源上给废弃矿山修复的相关政策实施提供参考。

1.2 指标确定

通过整理相关文献后发现,常见的矿山修复效益评价指标主要包括经济、社会、生态和综合 4 个方面,见表 1。受个人主观因素影响,不同学者对经济

效益、社会效益、生态效益三者的要素分类界定存在差异。比如,马跃[8]认为政府生态补贴属于社会效益,而李甫等[14]认为生态补偿资金属于经济效益。废弃矿山修复深刻影响着人类福祉,以期实现经济、社会和生态的可持续发展。因此,将有益于长期发展的要素归为可持续发展指标,从而推进废弃矿山地质环境修复的可持续发展[17]。根据《生态保护修复成效评估技术指南(试行)》《国土空间生态保护修复工程成效评估规范(批复稿)》《矿山生态修复技术规范 第1部分:通则》等文件,在三重底线理论和可持续发展理论基础上,结合国内外文献梳理和相关影响指标聚类分析,本研究提出以经济效益、可持续发展、生态效益和社会效益为准则层的评价指标体系,并根据普遍适用性、可获得性和可操作性等原则,对具体指标内容初步筛选,结果如图1所示。

表1 文献中有关矿山修复效益评价的典型指标统计

Table 1 Statistics of typical indicators for evaluating the benefits of mine restoration in the literature

类别	具体内容	文献来源
经济效益	达产期产品利润率、土地可利用率、农产品产量、林产品产量、旅游收入、居民收入增长率、生态衍生产业产值增长率、农民增收、企业盈利、生态补偿、绿色金融、碳排放交易等。	[8][9][14][19][21]
社会效益	新增就业率、公众满意度、培养人才量、参观人数、政府生态补贴、上下游产业联动收益、新增就业岗位、社会资本参与率、人居环境改善、防灾减灾能力、形象提升、社会发展、示范引领、公众意识、景观美学等。	[3][4][6][8][13][14][16][18]
生态效益	植被覆盖率、修复面积、土地复垦量、生物多样性、水资源供应、调节气候、消除地质隐患、固碳释氧、土壤质量、水质净化、地表径流系数、地表水改善、地下水改善、土壤改善、植被提升、水源涵养、土壤保持、净化环境、碳固存、物种群落、减少粉尘效益等。	[3][5][8][9][10][11][12][13][14]
综合效益	经济、社会和生态的综合交互效益。	[5][7][13][15]

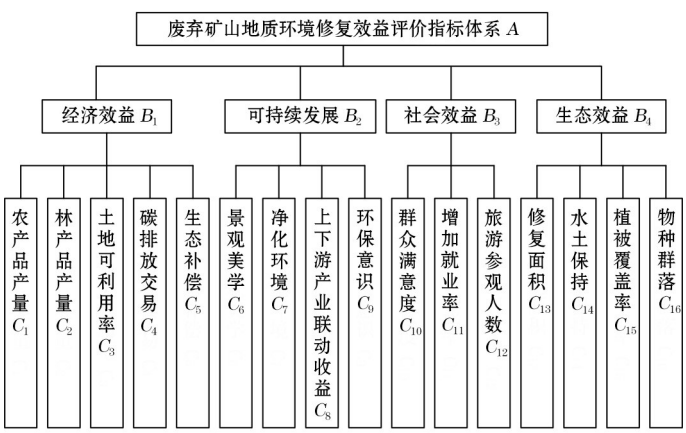


图1 废弃矿山地质环境修复效益评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of geological environment restoration benefits in abandoned mines

1.3 评价指标权重计算

1.3.1 权重分配方法

层次分析法(AHP)[25-27]可对复杂系统作结构化分解,通过分层与逐对比较,实现对各类关联因素的统筹分析。熵值法[26,28]是依据各指标的信息熵来度量离散程度,进而确定其相对重要性。指标的熵值与其信息效用价值成反比,熵值越小,表明该指标的变异程度越大,所蕴含的信息量越多,对评价结果的贡献度越高,故而在权重分配上应获得更大的份额。层次分析法和熵值法的具体过程参见文献[25]至[28]。

AHP-熵值组合赋权法是指依次运用层次分析法(AHP)与熵值法分别计算各指标的权重,随后将两种方法所得的主、客观权重进行集成,从而获得一套兼具经验判断与数据支撑、更为合理与客观的综合权重体系。组合赋权的计算公式为:

$$W_j^* = \frac{W_j V_j}{\sum W_j V_j} \tag{1}$$

式中:W_j^* 是组合赋权的权重;W_j 是层次分析法的权重;V_j 是熵值法的权重。

1.3.2 数据来源与处理

采用实地调查和线上调查相结合方式,面向从事废弃矿山地质环境修复行业的专家、项目经理、技术人员等发放调查问卷,发出问卷35份,最终收回有效问卷30份。首先对有效问卷进行信度分析及

效度分析,最后再通过 SPASSAU 计算各指标信息熵及权重。

(1)信度分析。信度分析用于评估定量数据的测量可靠性。通常认为,信度系数(Cronbach α 系数)高于 0.8 代表信度优异,0.7～0.8 为良好,0.6～0.7 为可接受,而低于 0.6 则表明信度不足。利用 SPASSAU 计算得出的信度分析结果见表 2。从表 2 中可知,本研究数据的信度系数为 0.907,显著高于 0.8 的阈值,表明数据质量优秀,具备进行后续分析的高度可靠性。

表 2 信度分析统计结果

Table 2 Statistical results of reliability analysis

评价指标	校正项总计相关性	项已删除的 α 系数	Cronbach α 系数
农产品产量 C_1	0.430	0.906	0.907
林产品产量 C_2	0.430	0.906	
土地可利用率 C_3	0.573	0.902	
碳排放交易 C_4	0.517	0.904	
生态补偿 C_5	0.525	0.903	
景观美学 C_6	0.526	0.903	
净化环境 C_7	0.709	0.899	
上下游产业联动收益 C_8	0.525	0.903	
环保意识 C_9	0.714	0.897	
群众满意度 C_{10}	0.628	0.900	
增加就业率 C_{11}	0.705	0.897	
旅游参观人数 C_{12}	0.632	0.900	
修复面积 C_{13}	0.568	0.902	
水土保持 C_{14}	0.575	0.902	
植被覆盖率 C_{15}	0.711	0.897	
物种群落 C_{16}	0.648	0.899	

注:标准化 Cronbach α 系数=0.907。

(2) 效度分析。效度分析用以检验研究项目中定量数据设计的合理性,通常通过 KMO 值进行衡量。其标准通常界定为:KMO 大于 0.8 代表效度很好;$0.7<KMO\leqslant 0.8$ 代表效度较好;$0.6\leqslant KMO\leqslant 0.7$代表效度一般;$KMO<0.6$ 则代表效度不佳。此外,若测量仅包含两个题项,则 KMO 值固定为 0.5。利用 SPASSAU 计算得出的效度分析结果见表 3,各项测量指标均满足效度检验要求。所有研究项对应的共同度值均高于 0.4 的可接受标准,表明研究项信息提取效果良好。KMO 检验值为 0.685,超过 0.6 的基本门槛,证明样本数据适合进行因子分析。各因子的方差解释率分别为 32.181%、24.911%、15.534%和 8.888%,经过旋转后累积方差解释率最高达到 81.515%,显著高于 50%的最低标准,表明研究项的信息能够被有效提取。

表 3 效度分析统计结果

Table 3 Statistical results of validity analysis

名称	因子载荷系数				共同度(公因子方差)
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	
农产品产量 C_1	−0.049	0.904	0.030	0.216	0.868
林产品产量 C_2	−0.049	0.904	0.030	0.216	0.868
土地可利用率 C_3	0.087	0.742	0.445	0.006	0.756
碳排放交易 C_4	0.082	0.817	0.231	0.039	0.729
生态补偿 C_5	0.157	0.808	0.228	−0.124	0.745
景观美学 C_6	0.083	0.259	0.917	0.070	0.921
净化环境 C_7	0.260	0.353	0.815	0.219	0.904
上下游产业联动收益 C_8	0.206	0.382	0.190	0.701	0.716
环保意识 C_9	0.504	0.294	0.443	0.327	0.644
群众满意度 C_{10}	0.929	0.113	0.010	−0.149	0.899
增加就业率 C_{11}	0.939	0.141	−0.022	0.100	0.911
旅游参观人数 C_{12}	0.776	−0.114	0.225	0.444	0.863
修复面积 C_{13}	0.670	0.032	0.425	−0.179	0.664
水土保持 C_{14}	0.704	0.087	0.401	−0.339	0.780
植被覆盖率 C_{15}	0.845	−0.031	0.222	0.379	0.908
物种群落 C_{16}	0.853	−0.004	0.027	0.374	0.868
特征根值(旋转前)	6.861	3.770	1.328	1.083	—
方差解释率/%(旋转前)	42.882	23.562	14.718	8.301	—
累积方差解释率/%(旋转前)	42.882	66.445	81.162	89.463	—
特征根值(旋转后)	5.149	3.986	2.485	1.422	—
方差解释率/%(旋转后)	32.181	24.911	15.534	8.888	—
累积方差解释率/%(旋转后)	32.181	57.092	72.626	81.515	—
KMO 值	0.685				—
df	120				—

(3) 信息熵及权重计算。利用 SPASSAU 系统计算信息熵及权重,结果见表 4。各项间的权重大小有着一定的差异,其中植被覆盖率 C_{15} 项的权重最高,为 12.80%,景观美学 C_6 项的权重最低,为 2.71%。

表 4 信息熵及权重计算结果

Table 4 Calculation results of information entropy and weights

评价指标	信息熵值 e	信息效用值 d	权重系数 w/%
农产品产量 C_1	0.995 6	0.004 4	4.32
林产品产量 C_2	0.995 6	0.004 4	4.32
土地可利用率 C_3	0.995 6	0.004 4	4.32
碳排放交易 C_4	0.993 1	0.006 9	6.72
生态补偿 C_5	0.994 4	0.005 6	5.45
景观美学 C_6	0.997 2	0.002 8	2.71
净化环境 C_7	0.996 5	0.003 5	3.41
上下游产业联动收益 C_8	0.994 3	0.005 7	5.54
环保意识 C_9	0.994 1	0.005 9	5.82
群众满意度 C_{10}	0.991 2	0.008 8	8.63
增加就业率 C_{11}	0.989 2	0.010 8	10.54
旅游参观人数 C_{12}	0.990 2	0.009 8	9.57
修复面积 C_{13}	0.996 8	0.003 2	3.09
水土保持 C_{14}	0.996 9	0.003 1	3.03
植被覆盖率 C_{15}	0.986 9	0.013 1	12.80
物种群落 C_{16}	0.990 0	0.010 0	9.73

(4) 确定组合权重。运用乘法合成法,计算组合权重,结果见表 5。

表 5 组合权重

Table 5 Combination weight

准则层	方案层	AHP 权重/%	熵值法权重/%	组合权重/%	排序
经济效益 B_1 $W=28.21\%$	农产品产量 C_1	6.91	4.32	4.97	7
	林产品产量 C_2	3.61	4.32	2.60	16
	土地可利用率 C_3	12.19	4.32	8.76	3
	碳排放交易 C_4	7.01	6.72	7.84	5
	生态补偿 C_5	4.46	5.45	4.04	9
可持续发展 B_2 $W=13.64\%$	景观美学 C_6	6.50	2.71	2.93	13
	净化环境 C_7	4.60	3.41	2.61	15
	上下游产业联动收益 C_8	3.59	5.54	3.31	12
	环保意识 C_9	4.96	5.82	4.79	8
社会效益 B_3 $W=17.26\%$	群众满意度 C_{10}	3.65	8.63	5.24	6
	增加就业率 C_{11}	4.69	10.54	8.23	4
	旅游参观人数 C_{12}	2.38	9.57	3.79	10
生态效益 B_4 $W=40.89\%$	修复面积 C_{13}	6.52	3.09	3.35	11
	水土保持 C_{14}	5.21	3.03	2.62	14
	植被覆盖率 C_{15}	9.68	12.80	20.61	1
	物种群落 C_{16}	8.84	9.73	14.31	2

2 评价模型构建

模糊综合评价法[27,29-30]是一种综合考虑多种属性和多个相关因素进行评价的有效方法,可将边界界定不清、难以直接量化的因素转化为可定量分析的评价指标,从而实现对复杂对象的系统评估,在价值评价、风险评价等领域得到了广泛的应用。鉴于废弃矿山地质环境修复效益综合评价涉及众多影响因素,且诸多指标量化困难,通过与灰色关联度法、BP 神经网络法等常见评价方法比选,模糊综合评价法在处理多指标决策问题上具有显著优势,因此本文选用该方法构建评价模型。

2.1 确定评价标准

在《生态保护修复成效评估技术指南》(试行)中,根据生态保护修复成效指数(ERI)评估计算得分,确定成效等级分为优秀、良好、合格、不合格,得分越高表示恢复效果越好[31]。据此,将废弃矿山地质环境修复效益综合评价等级划分为优秀、良好、合格、不合格四个等级,对应的评语集为 E{优、良、中、差},不同等级的含义见表 6。

表 6 评价等级含义

Table 6 Implication of evaluation grades

等级	分值范围	含义
优秀	$90\leqslant ERI\leqslant 100$	可认为达到恢复目标
良好	$80\leqslant ERI<90$	提出应继续恢复的建议
合格	$60\leqslant ERI<80$	应分析实施补充恢复措施
不合格	$0\leqslant ERI<60$	有调整恢复策略的必要

2.2 构建评价模型

(1) 确定因素集 F 和评语集 E。

因素集 F 是评价项目或指标的集合:

$$F=\{f_1,f_2,\cdots,f_m\} \tag{2}$$

$$E=\{e_1,e_2,\cdots,e_n\} \tag{3}$$

式中:f_m 表示第 m 个项目或指标因素;e_n 表示第 n 个评语等级,一般有 3~5 个等级。

(2) 构造隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$。

评价主体根据评语等级对各个指标进行打分评价,最终得到隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$。

$$\boldsymbol{R}=\begin{Bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & \cdots & r_{mn} \end{Bmatrix} \tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{R}=(r_{mn})$,其中 $r_{mn}\in[0,1]$ 表示因素 F 对评语 E 的隶属度。

(3) 确定因素集的权重向量 $\boldsymbol{W}_F$。

采用 AHP-熵值法进行组合赋权,以实现精准的权重分配。

$$\boldsymbol{W}_F=\{w_{f1},w_{f2},\cdots,w_{fm}\} \tag{5}$$

式中,w_{fi} 表示第 i 个指标的权重;m 表示指标的个数。

(4) 确定评语集的权重向量 $\boldsymbol{W}_E$。

$$\boldsymbol{W}_E=\{w_{e1},w_{e2},\cdots,w_{en}\} \tag{6}$$

式中,w_{ei} 表示第 i 个等级的赋值;n 表示等级个数。

(5) 综合评价。

结合评价指标权重 $\boldsymbol{W}_F$ 和隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$,可以得到最终评价向量 $\boldsymbol{S}$。

$$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{W}_F\times\boldsymbol{R} \tag{7}$$

(6)综合评定值 μ。

由评语集权重向量 $\boldsymbol{W}_E$ 和综合评价向量 $\boldsymbol{S}$,可以得到综合评定值 μ。

$$\mu=\boldsymbol{W}_E\times\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

3 案例应用

3.1 案例概况

张家口市矿产资源丰富,开采历史悠久,但由于早期粗放式的开采活动,造成了地形地貌景观破坏严重、地质灾害隐患突出等问题,产生了一批历史遗

留废弃矿山。近年来,随着国家和河北省有关生态保护、矿山复绿等政策文件的出台和施行,张家口市通过取缔关停、引导退出、调整结构与转型、修复整治等一系列措施,完成了一大批废弃矿山地质环境修复治理,并实施了"张家口市历史遗留废弃矿山地质环境修复工程"[2]。该工程于 2023 年 9 月开工建设,2025 年 10 月完工,治理历史遗留废弃矿山 475 座、面积约 1 129 hm^2。

3.2 确立评价指标

参照《生态保护修复成效评估技术指南》和《矿山生态修复技术规范》等文件,将废弃矿山地质环境修复效益综合评价等级划分为优秀、良好、合格、不合格四个等级,含义见表 7。从经济、社会、生态和可持续发展四个准则层形成张家口市历史遗留废弃矿山地质环境修复效益评价指标体系。

表 7 废弃矿山地质环境修复效益评价等级

Table 7 Evaluation grades for the benefits of geological environment restoration in abandoned mines

评价等级	修复成效及应对措施
优秀	可认为达到恢复目标
良好	提出应继续恢复的建议
合格	应分析实施补充恢复措施
不合格	有调整恢复策略的必要

3.3 修复效益评价

(1)构造隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$。

通过对与案例项目相关的建设单位、勘查单位、设计单位、监理单位、施工单位负责人及技术人员共 50 人进行调研,并对项目修复效益的影响因素进行评价,构建案例项目隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$,其评价结果见表 8。

表 8 张家口市废弃矿山修复效益评价调查结果

Table 8 Investigation results of the evaluation of the restoration benefits of abandoned mine in Zhangjiakou city

目标层	准则层	方案层	优秀	良好	合格	不合格
张家口市历史遗留废弃矿山地质环境修复效益评价指标体系 A	经济效益 B_1	农产品产量 C_1	10	28	10	2
		林产品产量 C_2	16	20	11	3
		土地可利用率 C_3	11	24	15	0
		碳排放交易 C_4	6	29	12	3
		生态补偿 C_5	7	31	10	2
	可持续发展 B_2	景观美学 C_6	20	20	10	0
		净化环境 C_7	22	16	12	0
		上下游产业联动收益 C_8	7	29	11	3
		环保意识 C_9	16	24	10	0
	社会效益 B_3	群众满意度 C_{10}	12	20	14	4
		增加就业率 C_{11}	9	29	10	2
		旅游参观人数 C_{12}	6	29	15	0
	生态效益 B_4	修复面积 C_{13}	13	26	10	1
		水土保持 C_{14}	20	21	9	0
		植被覆盖率 C_{15}	24	17	9	0
		物种群落 C_{16}	13	24	11	2

根据表 8 确定各指标在评语等级中对各评语的隶属程度,标记为 r_{mn},r_{mn}即为该评语在总评价人数中的比重。由此根据公式(4)构建隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$。

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix}0.20 & 0.56 & 0.20 & 0.04\\ 0.32 & 0.30 & 0.22 & 0.06\\ 0.22 & 0.48 & 0.30 & 0.00\\ 0.12 & 0.58 & 0.24 & 0.06\\ 0.14 & 0.62 & 0.20 & 0.04\\ 0.40 & 0.40 & 0.20 & 0.00\\ 0.44 & 0.32 & 0.24 & 0.00\\ 0.14 & 0.58 & 0.22 & 0.06\\ 0.32 & 0.48 & 0.20 & 0.00\\ 0.24 & 0.40 & 0.28 & 0.08\\ 0.18 & 0.58 & 0.20 & 0.04\\ 0.12 & 0.58 & 0.30 & 0.00\\ 0.26 & 0.52 & 0.20 & 0.02\\ 0.40 & 0.42 & 0.18 & 0.00\\ 0.48 & 0.34 & 0.18 & 0.00\\ 0.26 & 0.48 & 0.22 & 0.04\end{pmatrix}$$

(2) 确定因素集的权重向量 $\boldsymbol{W}_F$。

通过 AHP-熵值法确定因素集权重向量 $\boldsymbol{W}_F$。经计算,得到经济效益指标 B_1 的权重向量 $\boldsymbol{W}_F$=(4.97%,2.60%,8.76%,7.84%,4.04%);可持续发展指标 B_2 的权重向量 $\boldsymbol{W}_F$=(2.93%,2.61%,3.31%,4.80%);社会效益指标 B_3 的权重向量 $\boldsymbol{W}_F$=(5.24%,8.23%,3.79%);生态效益指标 B_4 的权重向量 $\boldsymbol{W}_F$=(3.35%,2.62%,20.61%,14.31%)。

(3)确定评语集的权重向量 $\boldsymbol{W}_E$。

参考《生态保护修复成效评估技术指南》生态保护修复成效分级表,将 $\boldsymbol{W}_E$ 划分为 4 个等级,并赋值 $\boldsymbol{W}_E$=(100,90,80,60)。

(4)计算综合评定向量 $\boldsymbol{S}$。

根据公式(7),计算得到综合评定向量 $\boldsymbol{S}=\boldsymbol{W}_F\times\boldsymbol{R}$=(0.283,0.471,0.220,0.026),结果见表 9。

表 9 综合权重计算

Table 9 Comprehensive weight calculation

方案层	优秀	良好	合格	不合格	因素集的权重向量/%
农产品产量 C_1	0.20	0.56	0.20	0.04	4.97
林产品产量 C_2	0.32	0.40	0.22	0.06	2.60
土地可利用率 C_3	0.22	0.48	0.30	0.00	8.76
碳排放交易 C_4	0.12	0.58	0.24	0.06	7.84
生态补偿 C_5	0.14	0.62	0.20	0.04	4.04
景观美学 C_6	0.40	0.40	0.20	0.00	2.93
净化环境 C_7	0.44	0.32	0.24	0.00	2.61

续表

方案层	优秀	良好	合格	不合格	因素集的权重向量/%
上下游产业联动收益 C_8	0.14	0.58	0.22	0.06	3.31
环保意识 C_9	0.32	0.48	0.20	0.00	4.80
群众满意度 C_{10}	0.24	0.40	0.28	0.08	5.24
增加就业率 C_{11}	0.18	0.58	0.20	0.04	8.23
旅游参观人数 C_{12}	0.12	0.58	0.30	0.00	3.79
修复面积 C_{13}	0.26	0.52	0.20	0.02	3.35
水土保持 C_{14}	0.40	0.42	0.18	0.00	2.62
植被覆盖率 C_{15}	0.48	0.34	0.18	0.00	20.61
物种群落 C_{16}	0.26	0.48	0.22	0.04	14.31
综合隶属度 $\boldsymbol{S}$	0.283	0.471	0.220	0.026	—

(5)计算综合评定值 μ。

综合得分:$\mu=\boldsymbol{W}_E\times\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}=89.85$

3.4 评价结果与分析

张家口市历史遗留废弃矿山地质环境修复工程效益评估的综合评定值 μ 为 89.85,对照评语等级得知,修复成效与良好等级接近,总体实现了消除隐患、改善生态、提升功能的修复目标,产生了较为显著的生态、社会和经济效益。修复前后成效对比如图 2 所示。修复治理后,植被覆盖率和水源涵养能力得到提升,实现了生态保护与经济社会发展“双赢”。根据工程实施后估算,在生态效益方面,恢复林地、草地面积 558.58 hm^2,治理恢复边坡面积 240.18 hm^2,废弃矿山区域植被覆盖率增加 50%,有效恢复矿区生态环境及周边约 5 万人的居住环境;在经济效益方面,盘活废弃土地资源 20.09 hm^2,土地复垦利用率达到 70%,碳减排效益约 12.87×10^4 t/a,并带动了新型城镇化与旅游产业进步,促进林果种植、畜牧养殖、农副产品流通和旅游服务等相关行业的协同发展;在社会效益方面,治理过程中解决了附近部分人员的短期就业问题,增加了部分居民经济收入,治理后大量耕地与林地资源得以恢复,并为第三产业和农业园区旅游等属地特色经济发展奠定了基础;在可持续发展方面,减少扬尘污染 1 500 t/a 以上,抑制扬尘 560 t/a 以上,释放氧气约 12.7×10^4 t/a,矿区生态环境及周边人居环境得到持续净化,工程的实施也形成了可复制、可推广的矿山修复有效模式。同时,实证分析发现,“植被覆盖率”“物种群落”和“土地可利用率”3 项指标权重占比较大,但实际评价中被评定为“合格”的占比分别为 0.18,0.22 和 0.30,反映出其成效并不突出,需进一步完善维护制度、强化宣传教育、实施动态监测监管等措施,以提高修复能力[32];“群众满意度”“上下游产业联动收益”等指标评价较为靠后,修复实际成效相对偏弱,需进一步探索将修复治理与产业发展深度融合,带动周边产业升级和配套开发[33],增加和拓宽属地就业渠道,促进综合修复效益提升。



(a)修复治理前 (b)修复治理后

图 2 张家口市历史遗留废弃矿山修复工程修复治理成效(局部)

Fig.2 Restoration and governance achievements of historical abandoned mine in Zhangjiakou city (partial)

2025 年 10 月,有关专家组对案例工程进行阶段性初步验收和评估,经过实地考察、听取意见、审阅资料等,得出初步效益评估意见为“良好”。案例应用表明,该评价指标体系和模型可行且有效,能充分反映案例工程地质环境修复的实施情况,得出的评价结果与实际修复效益相一致。

4 结论

(1) 本研究基于三重底线理论和可持续发展理论,结合国家生态安全战略新格局以及行业政策要求,通过梳理国内外文献和对相关影响指标的聚类分析,创新性地引入可持续发展指标,构建了经济效益、可持续发展、社会效益、生态效益 4 个准则层、共 16 项具体指标的综合评价指标体系,采用 AHP 与熵值法进行组合赋权,并运用模糊综合评价法构建修复效益评价模型。其中,一级指标所占权重比例最高、影响最大的为生态效益指标,而可持续发展指标所占权重最低、影响最小;二级指标中植被覆盖率

的综合权重最高、影响最大,林产品产量的综合权重最低、影响最小。

(2) 选取张家口市历史遗留废弃矿山地质环境修复工程开展效益评价,综合评定值为89.85,成效等级为良好 。其中,生态效益评价值相对较高,表明植被覆盖率与水源涵养能力显著提升,水土流失现象得到抑制;可持续发展和经济效益评价值相对偏低,仍需立足属地自身实际,通过完善维护制度、强化宣传教育、实施动态监测监管等措施,进一步提高修复综合效益。

(3) 实证研究表明,该评价体系和模型针对废弃矿山地质环境修复工程的效益预判和实施成效评估具有较好的实用性,评价过程便捷、可行,评价结果客观、真实,可为加快推进矿山地质环境修复提供参考,对于推动矿业可持续发展具有较强的实践意义。

致谢:本研究得到张家口市自然资源和规划局、河北冀东建设工程有限公司、张家口地矿建设有限责任公司和中国地质矿业有限公司的帮助,在此表示感谢。

参考文献(References):

[1] 李海兵,张永忠,梅金华,等.湖南省历史遗留矿山现状及生态修复对策[J].矿业研究与开发,2023,43(12):144-151.
Li Haibing, Zhang Yongzhong, Mei Jinhua, et al.The status and ecological restoration countermeasures of historical mines in Hunan province [J]. Mining Research and Development,2023,43(12):144-151.

[2] 中华人民共和国自然资源部.国家生态保护修复公报2024[EB/OL].(2024-11-06)[2025-10-15].https://gi.mnr.gov.cn/202411/P020241106674232719694.pdf.

[3] 田博文."两山"理念下的矿区生态修复研究[D].武汉:中南民族大学,2022.
Tian Bowen. Research on ecological restoration of mining area under the concept of"Two Mountains"[D]. Wuhan: South-Central Minzu University,2022.

[4] 张春燕.北京市典型废弃矿山生态修复模式研究[D].北京:北京林业大学,2019.
Zhang Chunyan. Study on ecological restoration models of typical abandoned mines in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2019.

[5] 杨丛铭,袁颖,侯明华,等.张家口尚义县废弃矿山修复生态效益评估研究[J].河北地质大学学报,2022,45(6):116-121.
Yang Congming, Yuan Ying, Hou Minghua, et al. Ecological benefit evaluation of abandoned mine rehabilitation in Shangyi county of Zhangjiakou[J]. Journal of Hebei GEO University,2022,45(6):116-121.

[6] 张成旺.平邑县生态修复工程社会经济效益评价[J].中国水土保持,2010(3):46-48.
Zhang Chengwang. Evaluation of the social and economic benefits of the ecological restoration project in Pingyi county [J]. Soil and Water Conservation in China,2010(3):46-48.

[7] Lin Yimin, Xu Shuitai, Zhou Yuhui, et al. Satisfaction evaluation of ecological restoration in abandoned mines based on the residents' perception: a case study in Ganzhou, Jiangxi[J]. Scientific Reports,2025,14(1):27368.

[8] 马跃.废弃矿山资源化生态修复模式构建与效益评价[D].大连:大连理工大学,2021.
Ma Yue. Construction and benefit evaluation of resource-based ecological restoration mode of abandoned mine[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2021.

[9] 刘雅倩.太行山中段东麓某矿山修复工程的生态产品价值效益测算[D].石家庄:河北地质大学,2023.
Liu Yaqian. Ecological product value and benefit measurement of a mine restoration project at the eastern foot of the middle section of Taihang mountain [D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University,2023.

[10] Ličina Vlado, Akšić M F, Colić Slavica, et al. A bioassessment of soil nickel genotoxic effect in orchard planted on rehabilitated coalmine overburden [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 98(1): 374-382.

[11] Kentula M E. Perspectives on setting success criteria for wetland restoration[J]. Ecological Engineering, 2000, 15(3):199-209.

[12] 秦静,李国清,侯杰,等.矿山生态效益评估模型及其应用[J].矿业研究与开发,2022,42(11):208-214.
Qin Jing, Li Guoqing, Hou Jie, et al. Evaluation model of mine ecological benefit and its application [J]. Mining Research and Development,2022,42(11):208-214.

[13] 李积普,庄小静,谢红彬.基于模糊综合评价的福建紫金山国家矿山公园综合效益分析[J].山西师范大学学报,2021,35(2):114-120.
Li Jipu, Zhuang Xiaojing, Xie Hongbin. Analysis on comprehensive benefit of Fujian Mt. Zijin national mine park based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Shanxi Normal University Natural Science Edition,2021,35(2):114-120.

[14] 李甫,刘俊建,葛建平,等.典型水源涵养区废弃矿山生态修复效益评价指标体系研究[J].中国矿业,2023,32(52):44-52.
Li Fu, Liu Junjian, Ge Jianping, et al. Study on benefit evaluation index system of abandoned mine ecological restoration in typical water conservation area[J]. China Mining Magazine,2023,32(52):44-52.

[15] 陈震.市场化推进废弃矿山生态修复治理成效评价研究[D].合肥:合肥工业大学,2024.
Chen Zhen. Research on the evaluation of market-oriented promotion ecological restoration and governance of abandoned mines[D]. Hefei: Hefei University of Technology,2024.

[16] Lima A T, Mitchell K, O'Connell D W, et al. The legacy of surface mining: remediation, restoration, reclamation and rehabilitation[J]. Environmental Science and Policy,2016,66:227-233.

[17] Harries K L, Woinarski J, Rumpff L, et al. Characteristics and gaps in the assessment of progress in mine restoration: insights from five decades of published literature relating to native ecosystem restoration after mining[J]. Restoration Ecology,2024,32(1):14016.

[18] Mishra S K, Hitzhusen F J, Sohngen B L, et al. Costs of abandoned coal mine reclamation and associated recreation benefits in Ohio[J]. Journal of Environmental Management, 2012,100:52-58.

[19] Setiawan I E, Zhang Z Y, Corder G, et al. Evaluation of environmental and economic benefits of land reclamation in the indonesian coal mining industry[J]. Resources,2021,10(6):60.

[20] Wan Linwei, Du Chenlin. An approach to evaluation of environmental benefits for ecological mining areas based on ant colony algorithm[J]. Earth Science Informatics,2021,14(2):797-808.

[21] Wang X Q, Saied P, Hishmi J H, et al. Leveraging machine learning for monitoring afforestation in mining areas: evaluating Tata Steel's restoration efforts in Noamundi, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2025, 197(7):816.

[22] 田彦清,李博.安全作业许可在大型主题公园建设中的应用[J].工程建设,2024,56(10):43-49.
Tian Yanqing, Li Bo. Application of safe work permit in large theme park construction [J]. Engineering Construction,2024,56(10):43-49.

[23] Elkington J. Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business [J]. Environmental Quality Management,1998,8(1):37-51.

[24] 郝林钢,江恩慧,屈博,等.可持续发展理论及其在流域系统中应用研究综述[J].水资源保护,2025,41(2):173-183.
Hao Lingang, Jiang Enhui, Qu Bo, et al. Review of sustainable development theory and its application in watershed system[J]. Water Resources Protection,2025,41(2):173-183.

[25] 田彦清,杨振宏,李华,等.基于 ISM 和 AHP 的作业场所风险影响因素研究[J].中国安全科学学报,2011,21(1):140-146.
Tian Yanqing, Yang Zhenhong, Li Hua, et al. Study on affecting factors of risks at workplace based on ISM and AHP [J]. China Safety Science Journal,2011,21(1):140-146.

[26] 张洋,丘东元,张波,等.基于层次分析-熵值法的 DC-DC 变换器拓扑综合评价[J].北京航空航天大学学报,2025,51(5):1469-1479.
Zhang Yang, Qiu Dongyuan, Zhang Bo, et al. Comprehensive evaluation of DC-DC converters based on analytic hierarchy process and entropy method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2025, 51(5):1469-1479.

[27] 田彦清.基于层次分析法的集团化企业安全生产主体责任绩效评估体系研究[C]//中国职业安全健康协会.中国职业安全健康协会 2016 年学术年会论文集(上册),2016:29-39.
Tian Yanqing. Research on the performance evaluation system of the main responsibility for work safety in group enterprises based on AHP[C]//China Occupational Safety and Health Association. Proceedings of the 2016 Academic Annual Conference of COSHA (Volume Ⅰ),2016:29-39.

[28] 赵宾华,黄金华,李占斌,等.基于 AHP-熵值法组合赋权的甘肃省城市生态用水安全综合评价及影响因素分析[J].水土保持通报,2023,43(1):167-173+213.
Zhao Binhua, Huang Jinhua, Li Zhanbin, et al. Comprehensive evaluation and influencing factor analysis of urban ecological water security in Gansu province based on AHP-Entropy method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2023,43(1):167-173+213.

[29] 田彦清,杨振宏,李华,等.作业场所风险影响因素分析及评估模型研究[J].安全与环境学报,2011,11(5):222-226.
Tian Yanqing, Yang Zhenhong, Li Hua, et al. Analysis of risks-laden factors at working places and a renovated evaluation model[J]. Journal of Safety and Environment, 2011,11(5):222-226.

[30] 田彦清,李博.轧钢企业职业危害风险管理方法研究及应用[J].矿业工程,2023,21(6):67-70.
Tian Yanqing, Li Bo. Research and application of occupational hazard risk management methods in steel rolling enterprises[J]. Mining Engineering,2023,21(6):67-70.

[31] 中华人民共和国生态环境部.生态保护修复成效评估技术指南(试行)[EB/OL].(2023-01-04)[2025-10-15].https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/stzl/202301/t20230104_1009427.shtml.

[32] Yu Heng. Comprehensive effectiveness evaluation of ecological restoration in open-pit coal mines using entropy weight-topsis: a case study form China[J]. Applied Ecology and Environmental Research,2025,23(4):7567-7582.

[33] Zhang Weimin, Cai Dingxu. Benefits evaluation of ecological restoration projects based on value realization of ecological products[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 352:120139.