

北京市王平煤矿生态环境质量多尺度评价研究

钟安亚^{1,2}, 孙娟³, 胡春明²

1. 华北理工大学矿业工程学院, 唐山 063210;
2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;
3. 北京市生态环境评估与投诉中心, 北京 100161)

摘要: 随着我国对生态文明建设的愈加重视, 矿山生态环境修复效果评估已成为其中重要一环。以北京王平煤矿为对象, 采用 Continuous Ordered Weighted Averaging(C-OWA)算子改进的综合指数法构建生态修复效果指数(Ecological Restoration Effectiveness Index, EREI), 依据相关评价体系构建原则, 综合考虑矿区生态修复中各生态因子及其相互之间的定量关系, 从而探索性地建立一套具有代表性、系统性的评价指标体系, 从工程区尺度进行监测评价; 同时运用遥感信息解译计算的遥感生态指数(Remote Sensing Ecology Index, RSEI), 从生态功能区尺度进行监测评价。研究表明, 王平煤矿区生态环境修复效果良好, 植被丰富度与覆盖度对研究区生态环境质量影响最大, 与实地调研相符; EREI与RSEI指数计算结果分别为0.672和0.729, 评价等级均为“良”。通过评价原则、指标分析等方面加以理论论证并结合实证研究, 以期为后续矿山生态环境评价指标体系构建及监测相关研究提供参考。

关键词: 王平煤矿; C-OWA; 评价体系; 修复效果; RSEI

中图分类号: X828

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022060035

Multi-scale evaluation of restoration effect of Wangping Coal Mine in Beijing

ZHONG Anya^{1,2}, SUN Juan³, HU Chunming²

1. School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;
2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;
3. Beijing Municipal Center for Ecological Environment Assessment and Complaints, Beijing 100161, China)

Abstract: With the increasing attention paid to the construction of ecological civilization in China, the evaluation of the effect of mine ecological environment restoration has become an important part of it. Taking Beijing Wangping Coal Mine as the object, the comprehensive index method improved by C-OWA operators was used to construct the ecological restoration effect index (EREI). And according to the construction principle of the relevant evaluation system, the ecological factors in the ecological restoration of the mining area and the quantitative relationship between them were comprehensively considered. A representative and systematic evaluation index system was explored and established to monitor and evaluate from the scale of the project area. At the same time, the RSEI index calculated by remote sensing information interpretation was used to monitor and evaluate from the scale of the ecological function area. The results showed that the ecological environment restoration effect of Wangping Coal Mine was good, and the vegetation richness and coverage had a large effect on the ecological environment quality of the study area, which was consistent with the field research. The calculation results of EREI and RSEI indexes were 0.672 and 0.729, respectively, and the evaluation grades were "good". Through analysis of the evaluation principles, index, and other aspects of theoretical demonstration combined with empirical research, it provided a reference for the subsequent mine ecological environment evaluation index system construction and monitoring related research.

Keywords: Wangping Coal Mine; C-OWA; evaluation system; repair effect; RSEI

CLC number: X828

随着党的“十八大”召开, “五位一体”总体布局
战略目标的提出, 中国对于生态文明建设的重视提

高至一个新高度。我国矿产资源开采历史悠久, 在
为国家经济发展提供坚实保障的同时, 因不合理矿

收稿日期: 2022-06-22

录用日期: 2022-08-25

基金项目: 中国-斯里兰卡水技术研究与示范联合中心; 中国科学院中国-斯里兰卡联合科教中心

作者简介: 钟安亚(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向: 生态恢复与环境评价。E-mail: zhonganya@126.com

通信作者: 胡春明(1982—), 男, 博士、高级工程师。研究方向: 湿地生态系统保护及水生态修复技术。E-mail: cmhu@rcees.ac.cn

引用格式: 钟安亚, 孙娟, 胡春明. 北京市王平煤矿生态环境质量多尺度评价研究[J]. 环境保护科学, 2023, 49(3): 139-144.

产资源开发利用方式导致遗留大量的矿山废弃地,产生了诸多矿山生态环境问题^[1]。近年来,国家投入大量资金与技术支持,而在治理后矿山生态修复效果如何,是否达到预期目标,备受国内外各界关注。

国际上早在 20 世纪 60 年代便开始矿山废弃地生态修复效果的研究,并多角度地提出一些评价指标体系与方法,从而综合考量研究区生态修复质量^[2-3]。国际生态委员会从生态系统抗干扰能力、生态恢复的功能与结构以及相邻生态系统的物质能量交流 3 个角度提出了矿区生态恢复质量评价的 9 个指标^[4]。KRABbenhofT et al^[5]通过分析对比矿山废弃地修复区与周边区域植被因子及土壤因子的差异,最终提出了地形土壤单元评价方法,对研究区生态修复效果进行了有效评价。中国在该领域起步较晚,但发展迅速。中国学者普遍认为矿山生态修复效果评估涉及多学科的研究方法,在实践中多应用生态系统评估理论、生态系统服务价值方法进行综合评价^[6]。刘永光^[7]通过以植物群落性状、土壤理化性状和土壤种子库性状 3 个层次构建了矿山修复指标体系,对北京市某矿山废弃地工程生态恢复的效果进行评估,取得良好效果。不同矿山废弃地因自然条件、人类活动和政策等因素影响,在构建评价指标体系时要因地制宜,多方面、多角度综合考虑。

目前,我国学者多侧重于矿山生态修复工程区开展研究。王创业等^[8]运用 AHP 法基于地质环境、地质背景和人类扰动 3 方面构建评价模型对鄂尔多斯煤矿生态环境质量进行评价,所得结果与实际情况基本相符。但矿山修复后生态系统服务功能及其效果体现,不仅表现在工程区域,对于周边区域也有着积极优化影响。随着社会各界对矿山废弃地生态修复工作的支持力度大幅提升,国家对生态文明建设的高度重视。基于上述情况,本研究结合遥感监测与实验分析方法多尺度对王平煤矿生态环境质量进行综合评价分析,以期为王平煤矿土地合理规划、生态修复工程维护管理等提供依据。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

王平煤矿废弃地位于北京市门头沟区王平镇境内,研究区地处东经 115°57'33" ~ 115°58'57",北纬 39°57'17" ~ 39°57'59",属暖温带半湿润半干旱季

风气候。总面积 123 hm²,位于王平镇政府及王平村煤矿的西侧,俗称坨坨洼地区。研究区平均海拔 328 m,自王平村开始,自东向西,海拔从 170 m 逐步上升为最高处 370 m。而研究区自北向南,高差变化从 312 到 357 m,变化相对较小。区域内有煤矸石山压占及塌陷坑 2 个典型煤矿废弃地生态环境破坏类型,为门头沟区生态修复示范工程。

研究区生态修复工程自 2007 年开始陆续实施,于 2010 年完成治理。2011—2020 年通过生态种植区、京津风沙源治理工程等项目,使王平煤矿废弃地生态环境进一步得到改善。研究区位,见图 1。

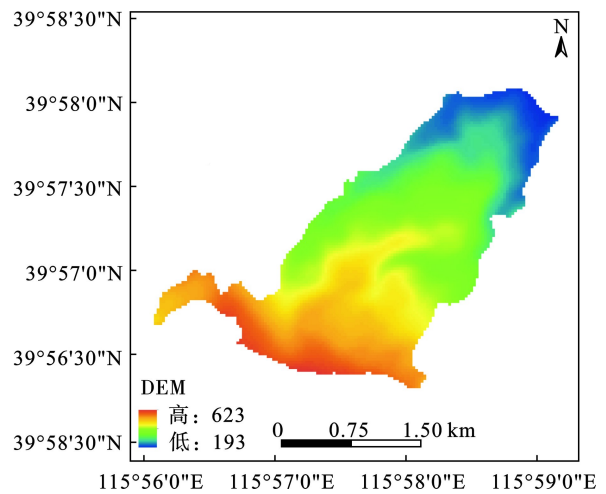


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源

依据高分一号遥感影像数据并结合现场踏勘及采样条件,在王平煤矿划分 3 类研究对比区域:对照区、高修复区与低修复区。且 3 类研究区均位于王平煤矿修复区中部,各研究分区样品采集时间为 2021 年 7—8 月。

对于各研究分区土壤调查,为了保证样品的代表性,采取采集混合样的方案。根据实际情况,低修复区与高修复区采用对角线布点法,对照区采用梅花布点法(根据地势情况,布点法进行修改)。每个区域采集 9 个混合样,每个混合样依据对角线法由 5 个土样混合得到,3 个区域一共采集 27 个土样。

对于各研究分区植被调查,在不同植物修复模式里分别随机设置样方,其中草本采用 1 m×1 m=1 m²的样方,灌木采用 4 m×4 m=16 m²的样方,乔木采用 10 m×10 m=100 m²的样方。根据生态样方调查的结果,确定研究区域内的优势物种。在每个典型样地内分别采集每种优势物种的植物体样品。其

中:乔木采集枝叶,灌木采集地上植株,草本采集地上植株。采样方案同土壤采样方案。

2 基于工程区尺度综合评价模型构建

2.1 王平煤矿修复效果评价体系构建

王平煤矿区境内共有关闭的大小煤窑、矿井20多个,多年无序开采给该地区生态环境造成了极大的破坏和严重的污染,形成了大面积的采空区,造成多处地表塌陷。本研究以王平煤矿修复区原生自然环境条件为研究重点,仅考察自然环境因素。

评价指标体系的构建是区域生态环境评价中的关键一环,关乎评价结果的客观性、科学性等关键因素。通过对王平煤矿生态环境问题进行实地调查和查阅矿区生态环境评价相关文献及政府政策文件,结合实地调查结果与专家指导意见,秉承评价因子选取的科学性、可操作性和综合性等原则^[9-10],从生态修复学、地质学和系统工程学角度提出一套较为规范化、完善的反映矿山生境特性的综合定量评价体系。

评价研究结果可表示原生自然环境下的王平煤矿修复效果^[11]。鉴于研究区地理环境的复杂性,将评价指标体系分为2个层次展开^[12]:第1层次划分为矿山原生生态环境的4个准则层—土壤理化性质、植被理化性质、植被群落现状和重金属污染现状;第2层次在4个准则层基础上筛选出15项与矿区生态环境息息相关的具体指标,包括:pH、土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾4项土壤理化性质指数;植物全碳、全氮、全磷和全钾4项植被理化性质指数;植被丰富度、植被覆盖度2项植被群落指数;Cu、Zn、Pb和Cd4项重金属污染指数。

2.2 改进的综合指数评价法

目前对于矿区生态环境评价,主要采用模糊综合评价、灰色关联分析、聚类分析和综合指数评价等方法^[13-14]。其中综合指数评价法的优点在于将不同单位性质的指标量纲化,并转换为某一标准形式,可在复杂的情况下,进行生态环境综合评价^[15]。一般对于综合指数评价法权重确定多采用专家打分法,但该方法易受主观因素干扰,进而影响最终结果。因此,本研究基于综合指数评价法,对权重确定方法进行改进,最终结合王平煤矿修复区实地情况对研究区修复效果进行评价分析。

2.2.1 权重确定 综合指数评价法的核心之处在于对指标权重的确定^[16]。目前常见的赋权方法主

要分为主观赋权法和客观赋权法^[17]。目前常用的主观赋权法有德尔菲法、层次分析法、最小平方法和环比评分法等^[18]。常见的客观赋权法有熵权法、CRITIC法、主成分分析法和数据包络法等^[19]。其中客观赋权法主要依据大量的原始数据之间的内在关系来确定权重,而本研究无法提供大量原始数据,因而最终采用主观赋权法。

美国学者YAGER^[20]提出了一种连续的有序加权平均算子(C-OWA)。作为一种指标权重优化衡量的主观赋权方法,合理地解决了多指标、多层次,信息参与过多的问题,科学地将专家极端决策合理分配,从而达到降低主观因素的影响,使赋权结果更具科学性与客观性^[21]。目前广泛应用于水利工程、施工安全和金融投资等领域^[22-24]。因此,本研究引入C-OWA算子对综合指数评价法的指标赋权进行改进,综合运用数理知识构建生态修复指数模型(EREI)。步骤如下。

(1)首先邀请 n 位环境影响评价领域的专家学者对同层次指标进行评价打分,所得数据构成决策集合 $(a_1, a_2, a_3, \dots, a_i, \dots, a_n)$,然后将集合中的数据从大至小排序,得到新的数据集合 $(b_0, b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_{n-1})$,其中 $b_0 \geq b_1 \geq b_2 \geq \dots \geq b_j \geq \dots \geq b_{n-1}$ 。

(2)采用组合数计算新的数据集合权重,得到加权向量 α_{j+1} ,见式(1):

$$\alpha_{j+1} = \frac{C_{n-1}^j}{\sum_{k=0}^{n-1} C_{n-1}^k} = \frac{C_{n-1}^j}{2^{n-1}}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (1)$$

式中, C_{n-1}^j 为从 $n-1$ 个数据中除去 j 个数据的组合数。

(3)加权向量 α 对决策数据计算加权,得到指标绝对权重值,见式(2):

$$\bar{\omega}_i = \sum_{j=0}^{n-1} \alpha_{j+1} b_j \quad (2)$$

式中, $i \in [1, m]$, $\alpha_j \in [0, 1]$, $j \in [1, n]$, m 表示指标数目。

(4)最后计算指标得相对权重,见式(3):

$$\omega_i = \frac{\bar{\omega}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{\omega}_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

本次研究邀请了中国科学院生态环境研究中心6位环境影响评价领域专家学者,采用10分制对各个指标进行评分,基于评分数据,运用C-OWA算子对各个指标赋予权重,所得王平煤矿修复效果指标体系各因子权值,见表1。

表 1 王平煤矿修复效果评价指标体系
Table 1 Wangping coal mine restoration effect evaluation index system

目标层	准则层	指标层/符号	单位	权重
王平煤矿生态修复效果A	土壤理化性质 B ₁ (0.28)	pH/C ₁₁	-	0.07
		有机质/C ₁₂	g·kg ⁻¹	0.08
		全氮/C ₁₃	g·kg ⁻¹	0.07
		速效磷/C ₁₄	mg·kg ⁻¹	0.08
		速效钾/C ₁₅	mg·kg ⁻¹	0.08
	植被理化性质 B ₂ (0.24)	全碳/C ₂₁	g·kg ⁻¹	0.05
		全氮/C ₂₂	g·kg ⁻¹	0.05
		全磷/C ₂₃	mg·kg ⁻¹	0.05
		全钾/C ₂₄	mg·kg ⁻¹	0.05
	植被群落现状 B ₃ (0.33)	植被丰富度指数/C ₃₁	-	0.15
		植被覆盖度/C ₃₂	%	0.15
	土壤重金属污染现状 B ₄ (0.15)	Cu污染指数/C ₃₃	μg·kg ⁻¹	0.03
		Zn污染指数/C ₃₄	μg·kg ⁻¹	0.03
		Pb污染指数/C ₃₅	μg·kg ⁻¹	0.03
		Cd污染指数/C ₃₆	μg·kg ⁻¹	0.03

2.2.2 评价分级标准划分 矿区生态环境综合指数是一个动态变化的数值,因此需根据实地情况选择评价分级标准。本研究参考我国生态环境部2015年颁布的《生态环境状况评价技术规范》,将研究区生态环境修复效果指标体系分为5级,见表2。

表 2 王平煤矿生态环境修复效果评价体系分级标准
Table 2 Grading standard of evaluation system for ecological environment restoration effect of Wangping coal mine

等级	评价分级	状况表征
I	(0,0.2]	差
II	(0.2,0.4]	较差
III	(0.4,0.6]	一般
IV	(0.6,0.8]	良
V	(0.8,1.0]	优

2.2.3 数据处理 以对照分区的指标值作为评估目标值,采用综合指数评价法对修复工程区的指标现状值进行评估。

(1) 指标计算方法

对于评价指标为正向指标,数值越大,表征的生态系统状况越好,见式(4):

$$S_i, j = C_i, j / C_i, d \quad (4)$$

对于评价指标为负向指标,数值越大,表征的生态系统状况越差,见式(5):

$$S_i, j = C_i, d / C_i, j \quad (5)$$

式中: S_i, j 表示评估指标 i 的分值; C_i, j 表示评估指

标 i 在工程分区的实际调查值; C_i, d 表示评估指标 i 在对照分区的实际调查值。

(2) 工程分区生态修复效果评估

通过基于改进综合指数评价法建立了生态修复效果指数(EREI),进而评估单一工程分区的实际效果,见式(6):

$$EREI_j = \sum_{i=1}^n \left(W_i I_i / \sum_{i=1}^n I_i \right) \quad (6)$$

式中: $EREI_j$ 表示第 j 个工程分区的生态修复效果指数; n 表示评估选用的评价指标的总数; W_i 评估选用的第 i 个评价指标的分值; I_i 评估选用的第 i 个评价指标的权重。

(3) 生态修复工程效果评估

王平煤矿整体生态修复区的 EREI 值计算,见式(7):

$$EREI = \sum_{j=1}^n (EREI_j S_j / S) \quad (7)$$

式中: $EREI$ 表示矿山生态修复工程的生态修复效果指数; $EREI_j$ 表示第 j 个工程分区的生态修复效果指数; S 表示矿山生态修复各工程分区总面积; S_j 第 j 个工程分区的面积。

3 基于生态功能区尺度综合评价模型

近些年,因遥感技术实时高效、覆盖范围广和快速等特点,已广泛应用于生态环境监测评价领域^[25]。其中在2013年徐涵秋^[26]提出了遥感生态指数模型(RSEI),该模型运用主成分分析耦合绿度、湿度、干度和热度4个生态指标,根据指标贡献率建立模型。采用该多指标评价模型进行评估监测可准确地反映出区域生态环境质量。目前已广泛应用于矿区生态环境监测^[27]、地貌环境研究^[28]和矿业城市景观格局变化^[29]。因此,本研究尝试采用RSEI模型对改进综合指数评价法的评价结果进行验证。选用数据为2021年8月Landsat OLI遥感影像,RSEI模型各分量指标描述及计算如下。

(1) 绿度指标。归一化植被差异指数(NDVI)与叶面积指数,植被状况及覆盖度休戚相关,为广泛使用的植被指标之一^[30]。因此,RSEI模型多采用NDVI作为绿度指标。

(2) 湿度指标。以缨帽变量的三分量表示湿度指数(WET),可表征为土壤、植被湿度含量,反映区

域生态环境湿度状况。

(3) 干度指标。由于研究区人为扰动较频繁, 存在一定比例的建筑用地与裸土区域, 加重区域干化程度, 因而选择由裸土指数和建筑指数两者合成得到干度指数 NDBSI 表示^[31]。

(4) 热度指标。以地表温度表示热度, 目前地表温度反演主要有单窗算法、单通道法和大气校正法等, 本研究采用大气校正法反演计算地表温度 (LST)^[32-34]。

(5) RSEI 指数计算。因各分量指标单位存在不同, 为消除量纲差异, 需进行标准化处理^[35], 见式 (8~9):

$$NI_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (8)$$

式中: NI_i 表示标准化后某像素的指标值; I_i 表示该指标像元值; I_{\max} 表示该指标的最大值; I_{\min} 表示该指标的最小值。

$$RSEI_0 = PCA(FVC, WET, LST, NDSI) \quad (9)$$

式中, PCA 为主成分分析。

在主成分分析之后再次对第一主成分进行标准化计算, 最终结果便是 RSEI, 见式 (10):

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{\min}) / (RSEI_{\max} - RSEI_{\min}) \quad (10)$$

经标准化处理后 RSEI 指数范围为 [0, 1], 越接近于 1 表示王平煤矿区生态环境质量愈好, 越接近于 0 王平煤矿区生态环境质量则愈差。本研究同样依据《生态环境状况评价技术规范》, 同时结合前人研究进行分类。以 0.2 为标准分为 5 级, 分别表征优 (0.8, 1.0]、良 (0.6, 0.8]、一般 (0.4, 0.6]、较差 (0.2, 0.4] 和差 (0, 0.2], 见图 2。

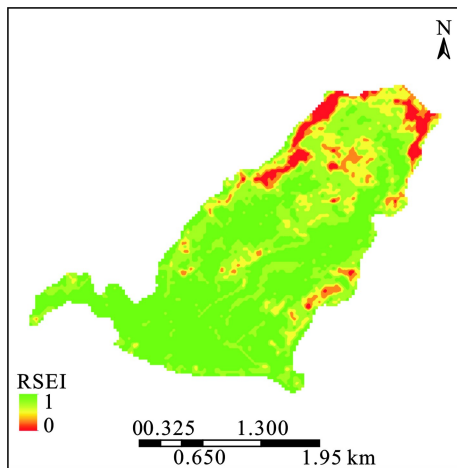


图 2 2021 年 8 月王平煤矿各级 RSEI 空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of RSEI at all levels in Wangping coal mine in August 2021

4 评价结果分析

本研究通过运用改进综合指数评价法构建生态修复效果指数 (EREI) 对王平煤矿修复效果进行分析研究, 将各指标参数代入公式后, 计算出王平煤矿划分的高修复区 EREI 值为 0.909, 低修复区 EREI 值为 0.619, 依据评价分级标准, 高修复区与低修复区分别评级为“优”“良”。王平煤矿整体生态修复区 EREI 值为 0.672, 评价等级为“良”; 同时计算遥感生态指数 (RSEI) 用以结果对比分析, 计算得到王平煤矿修复区总体 RSEI 数值为 0.729, 两者计算结果相差不大, 评价等级均为“良”。由此说明联用 EREI 指数与 RSEI 指数对王平煤矿进行生态修复效果评价是科学合理的。

表 1 可知, 评价指标体系指标层中各因素权重大小, 发现植被丰富度指数与植被覆盖度指数权重占比最高, 都为 0.15, 说明两者对王平煤矿生态环境修复效果影响最大。其次是土壤有机质、速效磷和速效钾, 权重为 0.08, 这 3 项指标可表征土壤养分的主要元素, 同时也是土壤提供给植物生长所必需的营养元素。而土壤重金属 Cu 污染指数、Zn 污染指数、Pb 污染指数和 Cd 污染指数的权重占比最小, 仅为 0.03。

图 2 可知, 该时期王平煤矿修复区生态环境质量主要分布于“良”级与“优”级, 两者区域面积占比分别为 29.09% 和 50.90%。这与从 2007 年所实施的植被恢复治理工程密不可分, 通过实施生态种植区、京津风沙源治理和生态公园景观重塑等项目的建设, 在近十年研究区植被得到较好恢复。评级“较差”与“差”级区域主要集中在研究区东北部边界, 主要原因是这一区域靠近王平村住宅区, 以及是丰沙铁路、G108 国道、G109 国道与门头沟区通往市区的莲石快速路等主要交通干线范围, 所以在解译中将其视为裸土类别。这两区域面积占比较小, 分别为 4.67% 和 3.55%。

综上所述, 评价定量计算结果与王平煤矿实际修复情况基本吻合。由此说明整体定量评价体系是合理的, 评价结果是可靠的。同时对王平煤矿修复区的生态环境质量进行定量评价, 通过遥感影像解译计算的 RSEI 指数用以对比分析, 误差较小。说明联用 EREI 指数与 RSEI 指数对王平煤矿进行修复效果定量评价是可行的, 两者相互印证, 使其

评价结果更为科学合理。从评价结果可知,王平煤矿自 2007 年陆续开展生态修复工程,经十余年的人为干预与自然恢复,该区域修复效果良好。

5 结论

(1)通过实验监测与遥感解译计算对王平煤矿生态环境修复效果进行评价分析,评价结果等级为“良”。结合实地调查表明经过十余年的生态修复工程治理,矿区生态环境质量整体由差转为良,修复效果良好,后续应继续保持这一良好态势。

(2)本研究从多尺度出发,结合宏观与微观监测方法,联用改进综合指数法所构建的生态修复效果指数(EREI)与遥感生态指数(RSEI)对王平煤矿修复区生态环境质量进行综合评价,经计算,两者结果相差不大,评价等级均一致,可为后续矿区生态环境监测评价研究提供一定参考。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 钟安亚, 谷海红, 艾艳君, 等. 我国矿区生态环境评价可视化研究分析[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(3): 186 - 194.
- [3] 关军洪, 郝培尧, 董丽, 等. 矿山废弃地生态修复研究进展[J]. 生态科学, 2017, 36(2): 193 - 200.
- [4] SHACKEIFORD N, HOBBS R J, BURGAR J M, et al. Primed for change: Developing ecological restoration for the 21st century[J]. *Restoration ecology*, 2013, 21(3): 297 - 304.
- [5] KRABBENHOFT K, KIRBY D, BIONDINI M, et al. Topedaphic unit analysis - a site Classification-System for reclaimed mined lands[J]. *Catena*, 1993, 20(3): 289 - 301.
- [6] 张宇, 王圣殿, 王依, 等. 对加快推进我国矿山生态修复的思考[J]. 中国环境管理, 2019, 11(5): 42 - 46.
- [7] 刘永光. 北京山区关停废弃矿山人工恢复效果及评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [8] 王创业, 张金山, 于贵忠. 基于 AHP 法的鄂尔多斯市煤矿矿区环境质量评价研究[J]. 煤炭工程, 2012(8): 97 - 100.
- [9] 李燕婷, 张文, 宁黎平, 等. 基于 RS 与 GIS 江仓露天矿区生态环境评价体系研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(12): 120 - 123.
- [10] 宋文. 基于遥感信息的矿业开发密集区生态评价研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2021.
- [11] 补建伟, 孙自永, 周爱国, 等. 矿山地质环境承载力评价的若干问题[J]. 金属矿山, 2015(6): 158 - 163.
- [12] 刘梦, 周爱国, 补建伟, 等. 黑河源多金属矿区地质环境承载力评价[J]. 中国矿业, 2018, 27(9): 114 - 120.
- [13] 周红, 朱芳冰. 基于优化组合权-灰关联-TOPSIS 的页岩气有利区优选[J]. 地质科技情报, 2018, 37(5): 106 - 113.
- [14] 左璐, 孙雷刚, 徐全洪, 等. 区域生态环境评价研究综述[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 806 - 817.
- [15] 廖红军, 邵怀勇, 孙小飞. 基于综合指数法的矿山地质环境评价——以攀西矿区为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(11): 34 - 36.
- [16] 高翔, 李立, 段鹏, 等. 矿山环境恢复治理效果评价[J]. 环境与发展, 2019, 31(1): 8 - 9.
- [17] 陈建强, 闫瑞兵, 刘昆轮. 乌鲁木齐矿区冲击地压危险性评价方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 22 - 29.
- [18] 谢学铭, 郑健. 基于云模型主观赋权法的多目标决策研究[J]. 中国西部科技, 2009, 8(25): 7 - 8.
- [19] 张坤. 基于组合客观赋权法的厚松散层采动水砂突涌危险性评价[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
- [20] YAGER R R. OWA aggregation over a continuous interval argument with applications to decision making[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part B*, 2004, 34(5): 1952 - 1963.
- [21] 孙少楠, 潘传旭, 张卫东. 基于 C-OWA 算子的水利设计企业 BIM 应用能力评价[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(9): 118 - 125.
- [22] 陈恺忻. 福建省农产品加工的供应链风险管理研究——以漳州市 Y 食品加工厂为例[J]. 农村经济与科技, 2018, 29(23): 151 - 153.
- [23] 陈璇, 孙开畅, 马文俊, 等. 基于区间灰色直觉模糊语言集的水利工程应急能力评价[J]. 水力发电, 2019, 45(5): 103 - 107.
- [24] 王雨, 郭海滨, 孟霄, 等. 基于云模型的装配式建筑施工安全综合评价[J]. 工程经济, 2019, 29(3): 25 - 29.
- [25] 杨江燕, 吴田, 潘肖燕, 等. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 277 - 284.
- [26] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(5): 889 - 897.
- [27] 毕卫华, 钱倬珺, 王辉, 等. 基于 RSEI 模型的平朔矿区生态环境变化研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(4): 68 - 76.
- [28] 李雪宇. 基于 GIS 的锡矿山锡矿区地质环境综合分析数值模拟研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2015.
- [29] 黄锦, 陈勇, 周皓, 等. 基于改进 RSEI 模型的矿业城市生态环境质量变化研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(1): 187 - 192.
- [30] BOEIMAN N T, STIEGLITZ M, RUETH H M, et al. Response of NDVI, biomass, and ecosystem gas exchange to long-term warming and fertilization in wet sedge tundra[J]. *Oecologia*, 2003, 135(3): 414 - 421.
- [31] 李蕊, 陈国清, 李玮贤, 等. 基于遥感生态指数的神东矿区 1995-2020 年生态环境质量的时空变化特征分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 143 - 151.
- [32] 胡德勇, 乔琨, 王兴玲, 等. 单窗算法结合 Landsat8 热红外数据反演地表温度[J]. 遥感学报, 2015, 19(6): 964 - 976.
- [33] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 2004(3): 28 - 32.
- [34] 杨学森. 基于单通道算法的 Landsat8 卫星数据地表温度反演研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [35] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7853 - 7862.