

DOI: 10.12401/j.nwg.2023085

陕北煤炭基地矿山生态修复成效评估体系 构建与实现

蔺楠, 陈莹, 马露, 李聪聪, 刘俊蓉, 张旭谦

(西安煤航遥感信息有限公司, 陕西 西安 710199)

摘要: 煤炭资源是中国陕北地区社会经济发展的重要支柱, 科学谋划矿山生态修复工作是维护陕北地区生态安全与能源安全的关键途径, 而矿山生态修复成效评估是其中必不可少的环节, 用以展现当地生态环境治理和自然资源保护的效益。笔者立足于矿山生态修复工作流程, 通过遥感监测、物联网站点监测、人工实地调查与采样手段, 基于矿山生态环境多源监测数据, 从生态效益、社会效益及经济效益 3 大类别、12 项指标出发, 构建适用于陕北煤炭基地矿山生态修复成效评估体系。利用遥感、大数据、云计算等信息化技术, 搭建矿山生态修复监管平台, 实现修复成效智能评估功能, 旨在形成高效、合理的矿山生态修复成效评估体系, 全面展现陕北煤炭基地矿山生态修复工作的综合效益, 以期对矿山生态修复工程监管提供理论指导和技术支撑。

关键词: 矿山生态修复; 陕北煤炭基地; 矿山监测; 成效评估体系; 监管平台

中图分类号: P627

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0089-09

Construction and Implementation of Evaluation System for Ecological Restoration Effectiveness of Mines in Northern Shaanxi Coal Base

LIN Nan, CHEN Ying, MA Lu, LI Congcong, LIU Junrong, ZHANG Xuqian

(Xi'an Meihang Remote Sensing Information Co., Ltd., Xi'an 710199, Shaanxi, China)

Abstract: Coal resource is an important pillar of social and economic development in northern Shaanxi coal base. Scientific planning of mine ecological restoration is a key way to maintain ecological security and energy security in northern Shaanxi, and the evaluation of mine ecological restoration is an indispensable part, which is used to show the benefits of local ecological environment management and natural resource protection. Based on the workflow of mine ecological restoration, through remote sensing monitoring, Internet of things site monitoring, artificial field investigation and sampling methods, and based on the multi-source monitoring data of mine ecological environment, this paper starts from three categories and twelve indicators of ecological, social and economic benefits, a suitable evaluation system for the mine ecological restoration effectiveness in the northern Shaanxi coal base has been constructed. By using remote sensing, big data, cloud computing and other information technologies, a mine ecological restoration supervision platform has been established to achieve intelligent evaluation of restoration effectiveness. The aim is to establish an efficient and reasonable evaluation system for

收稿日期: 2022-12-31; 修回日期: 2023-04-25; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西省秦创原矿山环境修复治理与智能化监测“科学家+工程师”队伍(2022KXJ-087)资助。

作者简介: 蔺楠(1996-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事矿山地质环境保护修复与监测评价工作。E-mail: cyyy961@163.com。

ecological restoration effectiveness of mines , comprehensively demonstrating the comprehensive benefits of mine ecological restoration in northern Shaanxi coal base, and provide theoretical guidance and technical support for mine ecological restoration project supervision.

Keywords: mine ecological restoration; northern Shaanxi coal base; mine monitoring; effectiveness evaluation system; supervision platform

在国家富强、民族复兴与生态文明建设并重的今天,煤炭资源依然是中国陕北地区经济和社会发展必不可少的能源基础。煤炭资源开采往往会对矿山环境造成严重的破坏,对周边环境及民众生产生活造成显著负面影响。由于陕北煤炭基地的生态脆弱性与生态区位重要性,煤炭资源开发对矿山生态状况的影响受到广泛关注。作为矿产资源开发利用大国,矿山生态修复是生态文明建设的关键举措,也是中国生态安全与能源安全战略的命脉所在。自2016年以来,在“山水林田湖草是一个生命共同体”理念的指导下,国家分3批组织了25项山水林田湖草生态保护修复试点工程,共涉及24个省(直辖市、自治区),大多分布于中国重点生态功能区(罗明等,2019)。矿山生态修复作为其中的重点工作,成为维持生态空间和恢复生态功能的重要手段。

随着矿山生态修复项目的开展,世界各国对矿山生态环境问题和修复治理成效的关注度大幅提升。矿山生态修复涵盖矿山地质环境保护与土地复垦的内容,对生态环境监测与修复成效评估提出更加系统规范的要求。在实际的矿山生态修复项目中,由多源遥感监测、物联网站点观测、人工实地调查与采样三者相结合的监测模式研究已经成为矿山生态环境监测的主要方向,并逐步向天空地深一体化监测的模式发展转变(张成业等,2022),成为中国基础国情调查的特色手段(张志等,2016)。矿山生态环境监测研究日益成为矿山生态修复领域新的挑战。随着监测数据的丰富和修复治理进程的推进,针对不同类型的矿区环境特征,结合数理方法的定量评估成为生态修复工程监管领域的研究热点,矿山生态修复成效评估的理论和正在初步形成。近年来,遥感技术与大数据技术的发展为矿山生态修复工程监管带来新的机遇,矿山生态修复成效评估趋向智能化发展。2022年7月,自然资源部发布了《矿山生态修复技术规范》系列行业标准,首次在生态修复角度将相关政策指南与工程技术体系做以归纳总

结,为矿山生态环境监测和成效评估工作提供纲领思路和技术支撑。

矿山生态修复项目能够带来诸多生态、社会、经济效益,也存在着监测手段不全面、评估指标不聚焦、修复成效不明确的问题。科学的成效评估方法有助于为矿山生态修复项目各环节提供指导,保障矿山生态修复项目顺利开展(王力等,2022)。笔者立足矿山生态修复工作的全流程,基于多源矿山生态环境监测数据,在生态修复成效评估环节构建科学合理的评估体系,为矿山生态修复项目诠释关键阶段的实践指导,探索其适宜的生态效益、社会效益及经济效益评估方法,为后期矿山生态修复工程项目的顺利落位、确保修复工程取得显著成效提供决策参考。

1 研究基础

1.1 矿山生态修复

矿山生态修复是指通过多种生态环境修复手段,对矿山开采导致的矿山生态系统破坏问题进行修复与重建,其内涵是平衡矿山开采与生态保护的关系。矿山生态修复工作流程一般包括基础调查与问题识别、方案编制、方案实施、监测与管护、成效评估5个阶段。在项目主体工程完成竣工验收后,根据矿山地质环境监测的结果,从生态效益、社会效益、经济效益方面对修复成效进行评估。矿山生态修复工作流程如图1所示。

1.2 基于多源数据的矿山环境监测

矿山环境是区域生态环境的重要组成部分。当前矿山环境监测主要利用天基、空基和地基等空间信息观测技术,结合原位采样等方法,辅助人工调查手段进行数据采集,全面呈现矿山生态环境监测成果与环境特征,服务于矿山生态修复项目的进度监测与成效评估(强建华,2021;高俊华等,2022)。

通过搭建“天-空-地-深”多要素、多尺度、多

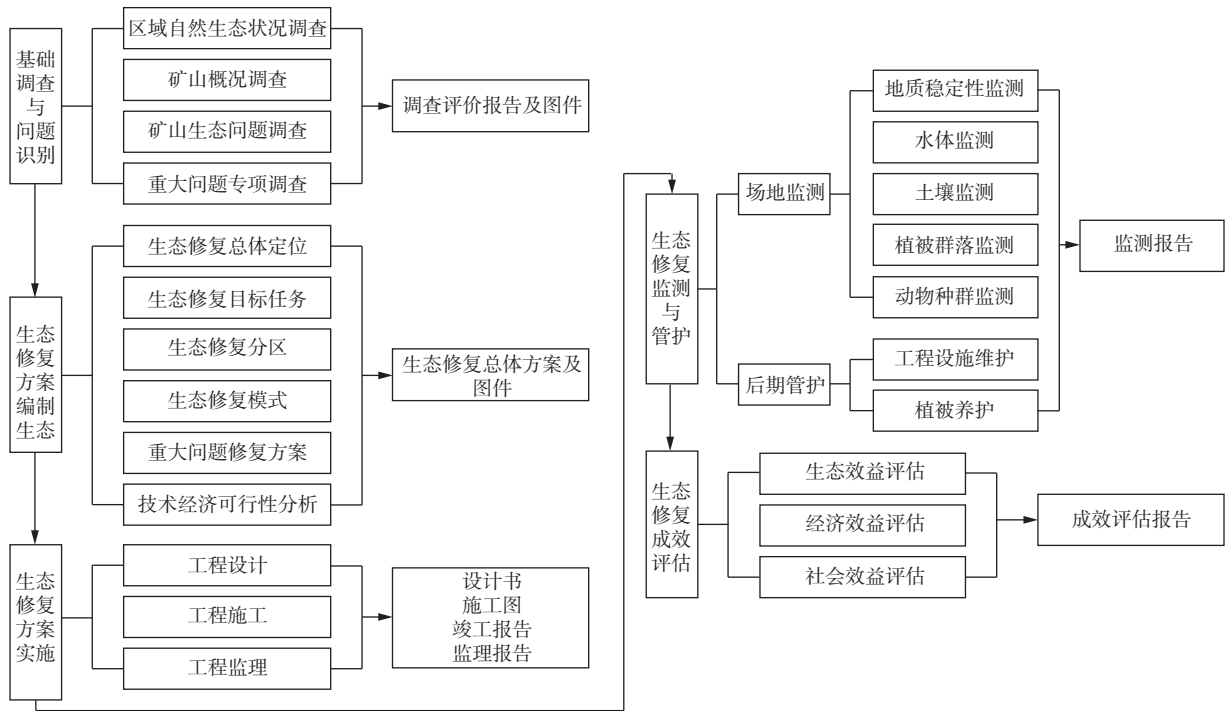


图 1 矿山生态修复工作流程图

Fig. 1 Mine ecological restoration workflow

时相协同的矿山生态环境监测网络,收集与处理矿山生态修复项目的多源遥感数据(多时相、多传感器、多光谱的遥感数据)和观测数据(定点、实地调查采样数据、物联网设备观测数据),获取综合反映矿山生态修复工程的生态效益的指标信息。基于遥感数据获取的地质安全隐患、地表水、土壤、植被在生态环境监测中具有很强的普适性,相应的监测数据分析方法在近几年取得一系列突破。

1.3 矿山生态修复成效评估体系

矿山生态修复成效从生态效益、社会效益及经济

效益 3 个方面进行评估。生态效益主要表明矿山生态修复工程项目实施后对矿区及周边生态系统的改善作用。社会效益重点说明矿山生态修复工程项目实施后对社会的贡献。经济效益重点说明矿山生态修复工程项目实施后生态环境改善对地方经济的促进作用。本研究主要讨论矿山生态修复工作流程中的生态修复监测与生态修复成效评估环节,构建矿山生态修复成效评估体系,实现矿山生态修复成效评估功能,服务矿山生态修复工程监管领域,其技术路线如图 2 所示。

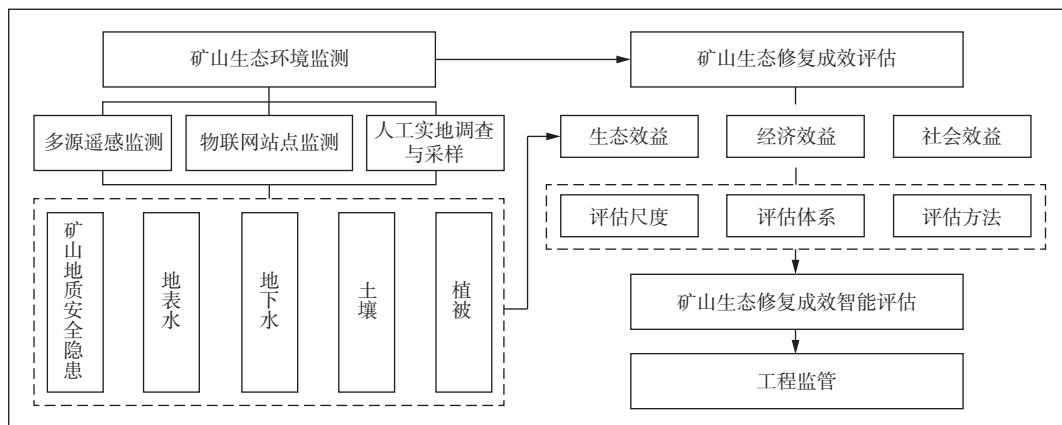


图 2 技术路线图

Fig. 2 Technology road map

2 基于多源数据的矿山地质环境监测

2.1 监测数据获取

2.1.1 多源遥感监测

多源遥感技术以其高时效、高精度、大范围、低成本的独特优势(Yao et al., 2022),在矿山地质安全隐患监测领域广泛应用(强建华, 2013)。通过配备不同光谱特性的传感器载荷,可采集到矿区高分辨率光学影像、热红外影像及雷达影像等。其中,高分辨率遥感影像可满足分米级甚至厘米级的监测精度,在矿山环境方面具有较好的监测能力。InSAR技术可对矿山地质安全隐患开展多尺度研究,为边坡、地面塌陷监测提供科学方法。热红外遥感影像解译可为煤火隐患跟踪监测提供特需的技术手段,以共同分析采矿扰动下的矿山生态环境现状特征。

多源遥感技术可以满足定量化的水体监测需求,在水体面积变化与污染物的迁移分布特征方面具备研究潜力(王玺森等, 2022)。水体在可见光、近红外及短波红外波段的吸收特性逐渐增强,其反射率特征为水体信息判读提供更多可能。常用的遥感数据源包括美国陆地卫星系列(Landsat 1-8)、中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)、Sentinel-2和部分国产卫星系列等。

在植被类型与植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)识别方面,高空间分辨率及高光谱影像数据的应用具有较大的发挥空间。高空间分辨率影像数据可展现不同的植被类型的空间纹理特征,高光谱影像数据可展现不同植被类型的光谱反射率曲线的差异,从而进行植被类型识别和植被覆盖度的计算(王楠, 2018; Du et al., 2023)。数据源以中高分辨率的GF和Landsat系列数据为主,可以获得FVC栅格数据。

2.1.2 物联网站点监测

选用GNSS形变监测仪在全区范围对已开采未沉稳区和计划开采区域的地面塌陷进行地表绝对位移监测,包括竖向位移、水平位移等信息。同时,结合地面调查等手段,查清采矿地面塌陷及其破坏情况。

地下水监测常用指标中的水位、水温可使用物联网监测设备进行实时监测;地下水水质监测的主要手段是人工取样及水质全分析检测,包括硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮等26项。通过在监测区构建网络基站,布设水位、水温传感器等采集、接收装备,实现地下水监测站点的定时采样。物联网站点所获取的监测信

息将实时传输至SQL SERVER数据库服务器,同时将水质数据人工录入至相应数据库,以便监测主管部门、监测主体单位及监测实施单位查询、浏览与使用。

2.2 监测数据分析

2.2.1 矿山地质安全隐患

矿山地质安全隐患包括煤火隐患、边坡隐患和地面塌陷。煤火监测一直是矿山地质安全隐患监测的重点和难点。将热红外遥感与多传感器探测相结合,获取地表的热辐射值,从而得到地表温度的异常变化。通过阈值分割与空间叠加分析,对煤火隐患进行时空特征及演变趋势的分析,是目前煤火监测主要方法(蒋卫国, 2010)。边坡隐患监测数据解译主要基于三维点云模型(Three-dimensional Point Cloud Model, 3DPCM),DOM作为辅助图像,结合无人机遥感影像和DSM评估危险区的地形和地质特征。地面塌陷监测主要是利用InSAR技术对雷达数据进行解译,根据不同时相的数字高程模型的特征比对(Digital Elevation Model, DEM),结合人工地面调查验证,获取矿区地表沉降区域,圈定沉降中心、沉降范围及沉降量及地面沉降发育趋势(王国飞, 2021)。

2.2.2 水体

在矿区地表水体遥感监测中,应用最为广泛的方法是水体指数法进行水体识别与面积监测。其中,NDWI(Normalized Difference Water Index)(付慧等, 2017)、MNDWI(Modified NDWI)(董军等, 2020)等水体指数多用于水体像元识别与提取。通过构建遥感影像光谱信息和水体实测数据之间的关系,获取与预测区域水体空间信息特征(Cao et al., 2017; 付慧等, 2017)。对于矿区地下水,通过由SQL SERVER数据库服务器及物联网监测设备读取的自动监测及人工采样数据,计算出全年地下水变化值,结合收集来的其他地下水监测数据,插值法求得全区地下水变化趋势面。

2.2.3 土壤

土壤包括土壤质量与土壤污染指标。矿区的土壤质量指标采用人工采样法,包括土壤养分(N、P、K)、土壤有机质、土壤结构等,土壤污染指标重点分析其中重金属元素含量。二者均可选用插值法得到研究区域的土壤指标栅格数据,如公式(1)所示。

$$S_z = \sqrt{\frac{S_1^2 + \max S_i^2}{2}}, S_i = C_{is}/S_{i0} \quad (1)$$

式中: S_z 代表土壤质量指数; S_1^2 代表同一样品中多种污染物中单项污染指数的平均值; $\max S_i$ 代表同

一样品中多种污染物中的最大单项污染指数; S_i 代表污染物 i 的污染指数; C_{is} 代表土壤中污染物 i 的实测浓度; S_{i0} 代表土壤中污染物 i 的评估标准值。

2.2.4 植被

植被是矿山生态环境监测研究中焦点要素(范德芹等, 2016)。当前结合实地调查的遥感手段主要能获得植被覆盖度、植被类型和植被成活率指标。多年以来, 全球已发展大量利用植被指数时序数据监测植物群落的方法, 归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是应用最广泛的计算方法(Mckenna et al., 2020)。NDVI可通过近红外波段(NIR)与可见光红外波段(R)之间的光谱差异化计算, 放大与增强对植被光谱响应, 消除部分太阳高度角和大气等观测条件影响的噪声, 从而灵敏地监测植被长势特征(Hu et al., 2019)。计算如公式(2)所示:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2)$$

在植被遥感监测研究中, 使用像元二分模型进行FVC遥感反演, 是目前使用最为广泛的方法。地面混合像元多以植被和土壤2种地物分布组成, 像元的NDVI值与FVC值线性正相关关系。利用植被覆盖度与归一化植被指数之间存在的显著相关性, FVC的计算公式如公式(3)所示。

$$FVC = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (3)$$

式中: FVC是植被覆盖度; $NDVI_{min}$ 是裸土或没有植被覆盖的像元值, 取累积概率为5%的NDVI值; $NDVI_{max}$ 是完全被植被覆盖的像元值, 取累积概率为95%的NDVI值。

3 矿山生态修复成效评估体系

3.1 评估尺度

矿山生态修复成效评估体系立足于矿山生态修复项目, 将成效评估阶段的生态效益、社会效益及经济效益进行量化评估。以生产矿山与历史遗留矿山为评估对象, 开展适用于矿区(1:5000~1:10000)、区县(1:50000)及地市(1:500000)等尺度研究。以矿产资源开发利用所诱发和加剧环境影响, 以及矿山生态修复项目的治理成效作为评估分级依据, 构建矿山生态修复成效评估体系。

3.2 评估指标体系

3.2.1 选取原则

矿山生态修复成效评估指标的选取应遵循科学

性、标识性及易操作性原则, 并符合生态修复项目的实际需求(徐友宁等, 2003)。评估指标应便于理解与获取, 并符合生态学原理, 阐明矿山资源开发利用过程中造成矿山生态问题与矿区周边环境变化情况。定量的评估指标采用监测数据进行解译处理获取, 定性的评估指标进行问卷调查与统计分析获取。

3.2.2 评估体系构建

根据矿山生态修复项目中监测基础与成效评估的工作要求, 本研究将矿山生态修复成效分为生态效益、社会效益及经济效益3项指标, 生态效益分为地质安全隐患消除、地表水改善、地下水改善、土壤改善、植被提升5项, 社会效益分为新增就业岗位、社会资本参与率、人居环境改善和防灾减灾能力4项, 经济效益分为居民收入增长率、土地利用率和生态衍生产业产值增长率3项(表1)。其中, 研究指标获取手段包括遥感监测、物联网站点监测、人工采样与实地调查, 以及参考相关水资源数据获取。多源监测数据共同辅助矿山生态修复工程项目的成效评估工作。

3.2.3 评估指标说明

矿产资源具有社会与环境双重属性, 矿山开发活动是生态环境的胁迫因子之一。本研究围绕矿山主体进行生态修复成效评估体系构建, 主要聚焦于生态效益方面, 考虑指标的可操作性与科学性原则, 选取矿山地质环境、水土环境及植被状况等矿山环境特有的要素, 充分展现矿山生态状况与生态问题, 综合体现各矿山恢复治理情况, 是生态系统宏观变化的组成部分。在生态修复工程实施过程中, 需要对恢复治理状况开展跟踪监测与适应性管理等措施, 及时优化调整监测评估手段, 间接保障生态效益的取得。

生产矿山生态修复项目的资金投入一般使用矿山地质环境治理恢复与土地复垦基金。历史遗留矿山生态修复项目的资金投入通常分为中省资金、地方资金与社会资金。因此, 社会资本参与率指标适用于历史遗留矿山生态修复成效评估, 与新增就业岗位、人居环境改善及防灾减灾能力共同为社会效益产生可持续影响。另外, 部分矿山生态修复项目后期会进行生态产业化转型, 如地质公园、生态林等示范园区, 所产生的收入产值也可纳入经济效益的衡量范畴。

3.3 评估方法

基于矿山生态环境监测数据与调查数据, 根据研究单元的实际特征情况, 采取主客观结合的方法, 开展矿山生态修复成效评估。根据不同类型监测数据的重要程度, 以及数据之间的相关性与规律性, 对指

表1 矿山生态修复成效评估体系表

Tab. 1 Index classification of mine ecological restoration effectiveness evaluation system

目标层	准则层	分目标层	指标层	研究方法	指标类型	指标性质	
矿山生态修复成效评估	生态效益	地质安全隐患消除	煤火隐患	遥感解译, 实地调查	定量	负向	
			边坡隐患	遥感解译, 物联网监测, 实地调查	定量	负向	
			地面塌陷	遥感解译, 物联网监测, 实地调查	定量	负向	
		地表水改善	地表水径流量	水资源相关数据	定量	正向	
			地表水水质	遥感解译, 人工采样, 水资源相关数据	定量	正向	
		地下水改善	地下水位	物联网监测, 水资源相关数据	定量	正向	
			地下水水质	物联网监测, 水资源相关数据	定量	正向	
		土壤改善	土壤质量	人工采样	定量	正向	
			土壤污染	人工采样	定量	负向	
		植被提升	植被类型	遥感解译	定量	正向	
	植被覆盖度		遥感解译	定量	正向		
	植被成活率		遥感解译	定量	正向		
	社会效益	新增就业岗位	(个)	收集统计矿山生态修复工程开展全过程中所产生的就业岗位数量	定量	正向	
		社会资本参与率	(%)	收集统计生态修复工程总资金投入中, 社会资本投入所占的百分比	定量	正向	
		人居环境改善	一般/较好/很好	“一般”是指周边居民基本感受不到工程带来的效益; “较好”是指周边居民能感受到一定工程带来的效益; “很好”是指周边居民能切实感受到工程实施带来的效益	定性	正向	
		防灾减灾能力	一般/较好/很好	“一般”是指工程实施后地质安全隐患未能完全消除; “较好”是指工程实施后地质安全基本消除; “很好”是指工程实施后地质安全隐患完全消除	定性	正向	
		经济效益	居民收入增长率	(%)	根据生态修复后给地方居民带来的额外年收入增加值与常规的正常年收入的比计算	定量	正向
			土地利用率	(%)	参照修复后已恢复利用的土地面积与矿山生态修复项目治理区域内总面积的比计算	定量	正向
			生态衍生产业产值增长率	(%)	根据矿山生态修复产业化的各经济体所产生的年收入产值增长情况计算	定量	正向

标要素逐一赋值主观权重与客观权重, 通过要素分值叠加计算各评估指标权重, 从而得到矿山生态修复成效评估结果。在本研究中, 主观方法选用具有专家经验支持的层次分析法, 客观方法选用可用于评估数据内部规律的熵权法。

3.3.1 数据预处理

(1) 构建评估矩阵

将 100 m×100 m 以上的数据网格单元视为评估对象, 将 n 个评估指标各自的 m 个评估对象定义为原始数据矩阵 V, 如公式(4)所示:

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} \dots \quad (4)$$

(2) 原始数据标准化

为消除不同量纲的影响, 采用极值法对数据进行标准化处理, 将原始数据映射到 [0,1] 之间, 计算公式如下:

正向指标归一化计算方法:

$$x_{ij} = \frac{v_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} (v_{ij})}{\max_{1 \leq i \leq m} (v_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq m} (v_{ij})} \quad (5)$$

逆向指标归一化计算方法:

$$x_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq m} (v_{ij}) - v_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} (v_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq m} (v_{ij})} \quad (6)$$

3.3.2 指标权重获取

(1) 层次分析法指标权重

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是在结构模型的基础上, 通过矩阵形式的演算, 将定性分析和定量分析进行统一合理化处理的评估方法。层次分析法首先将目标层复杂问题归纳分解成准则层及指标层, 再将其依次分配成有序的递阶层次结构。结合实际资料和专家经验的研判, 确定所有层次中各指标的相对重要性, 从而获取层次分析法主观权重。

(2) 熵权法指标权重

熵权法 (Entropy Weight Method, EWM) 是基于信息熵原理, 度量指标信息的不确定性与离散性特征,

从而判断指标对结果的综合影响程度的评估方法。首先将各指标数据通过空间化与重采样处理, 统一其空间分辨率进行数据预处理, 进而逐步计算样本点贡献度、指标熵值、指标信息熵冗余度等, 最终获取熵权法客观权重。

(3) 主客观组合法指标权重

将层次分析法与熵权法的权重结果结合起来, 共同计算主客观组合权重。 w_{1j} 和 w_{2j} 分别为层次分析法和熵权法得到的权重, w_j 为主客观组合权重。针对具体研究区而言, 实际矿区的复杂情况对评估结果起到关键影响作用。因此, 主观权重和客观权重在计算组合权重时应具备不同比重。通常情况下, 层次分析法权重应略大于熵权法, 比重记作 a 。计算公式如公式(7)所示:

$$w_j = a \cdot w_{1j} + (1 - a) \cdot w_{2j} \quad (7)$$

3.3.3 评估结果计算

在相应研究尺度网格下完成相应指标数据的预处理与提取, 以及各指标的主客观组合权重值 w_j 的计算, 将各指标数据的栅格图层进行叠加分析, 得到最终评估结果 Q 。综合分析评估模型如公式(8)所示:

$$Q = \sum_{j=1}^n w_j \cdot v_{ij} \quad (8)$$

式中: w_j 为第 j 个指标的主客观组合权重值, v_{ij} 为标准化矩阵中网格尺度研究单元的数值。随后, 结合研究单元矿山生态环境实际情况, 对评估结果的科学性、客观性进行实践检验和分析, 不断优化参数输入, 提升评估体系的适用性与稳定性。

4 陕北煤炭基地矿山生态修复成效评估功能实现

4.1 功能设计

榆林市是中国陕北地区典型的煤炭资源型城市, 在黄河流域生态安全与能源安全战略中占据重要地位(史怀昱等, 2016)。随着矿产资源开发力度不断加大, 生态环境破坏严重, 对矿山生态修复工程的治理效果提出了更高的要求(徐友宁等, 2022)。然而, 目前生态修复领域的关键技术和标准规范支撑不足, 亟需完善矿山生态修复工程监管措施, 建立相应的生态修复监管机制, 研究矿山生态修复成效评估方法。通过成效评估工作明确工程实施的效果和存在的问题, 及时开展工程适应性管理, 促进矿山生态修复领域的健康可持续发展(王燕等, 2023)。本功能基于矿山生态修复监管平台, 面向矿山生态修复成效评估和工程监管的需求, 研发矿山生态修复成效智能评估功能模块, 对矿山生态修复项目的生态效益、社会效益及经济效益进行全方位评估(徐友宁等, 2002)。功能模块开发采用前后端分离模式, 涉及开发语言和框架有 Java、JavaScript、Vue、WebGIS, 数据库采用 MySQL 进行建设。

4.2 智能评估

该功能模块将修复成效的生态效益、社会效益、经济效益通过图表的形式进行可视化展示(图 3)。该



图 3 智能评估功能模块图

Fig. 3 Intelligent evaluation function module

模块右侧为榆林市遥感影像,可通过选择对应项目,实现各修复项目区在影像上的定位,便于监管人员和项目人员同步查看项目分布和修复治理的实景影像。同时,下侧台账表格对项目的总体修复成效和修复成效评估指标项进行展示,便于监管人员整体把控具体修复情况。该功能支持项目间评分对比,直观展示各项目之间的修复效果差异。将主客观结合的评估方法嵌入功能模块中,采用算法自动运行与评分,避免人为主观因素,对各矿山生态修复的生态效益、社会效益及经济效益进行评估结果的运算、打分与分级,实现矿山生态修复成效的智能评估,完善矿山生态修复监管机制,为该领域的工程项目监管提供决策参考。

5 展望

随着多年来修复工程的实践,中国的矿山生态修复工作逐渐向综合治理、生态功能恢复、资源循环利用的方式转变,逐步实现“生态-社会-经济”的协同发展。陕北地区是中国能源富集的重点生态脆弱区,该体系的构建与实现对陕北煤炭基地生态修复具有示范作用。本研究所确立的矿山生态修复评估体系将全面服务于陕北煤炭基地矿山生态修复项目,还原了矿山开采活动在区域生态系统中的关键影响,为矿山安全生产和可持续发展提供一定的参考价值和指导意义。矿山生态修复评估体系功能的实现,为矿山生态修复监管工作提供智慧化的施策平台,构建矿山生态修复工作的数字孪生与创新发展新格局,助力矿山生态修复工程监管领域的升级。

由于矿区单元的环境特征各异,在实际矿山生态修复项目中所布设的监测站点有很大不同。因此,评估体系中指标要素的数据采集方法还需要进一步探索,在一定程度上解除不同的监测区中复杂多异的环境特征、地质背景、矿产资源背景等因素限制,从而保证矿山生态修复成效评估结果的准确性,以及后续的生态修复施策不存在偏差,真实反映区域尺度下的自然生态状况。

在评估功能的实现中,大数据技术可纳入更多科学的智能算法,也为指标权重的选取提供强有力的数理支持。在社会效益及经济效益的评估中,存在更多统计数据优化与应用的空间,社会效益及经济效益评估的内容、广度、频度、信息发布可进一步完善。为进一步保证矿山生态修复成效评估精度,保障工程监管措施落位,可从评估指标所涉及的监测要素数据源、

评估分析方法等方面进行深入研究,从中挖掘具有潜在价值的矿山生态环境信息参量。

参考文献(References):

- 董军,王慧,秦胜,等. 兖州煤田采矿影响下水环境演变研究[J]. *中国矿业*, 2020, 29(06): 127-132.
- DONG Jun, WANG Hui, QIN Sheng, et al. Evolution of water environment under the influence of mining in Yanzhou coalfield[J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(06): 127-132.
- 范德芹,赵学胜,朱文泉,等. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 304-319.
- FAN Deiqin, ZHAO Xuesheng, ZHU Wenquan, et al. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(3): 304-319.
- 付慧,王萍. 矿区水体变化遥感监测方法研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2017, 40(07): 95-98+103.
- FU Hui, WANG Ping. Study on Monitoring Water Change in Mining Area Based on Remote Sensing Method[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2017, 40(07): 95-98+103.
- 高俊华,邹联学,龙欢,等. 基于遥感动态监测的吉林省矿山地质环境及生态修复变化特征分析[J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(3): 240-248.
- GAO Junhua, ZOU Lianxue, LONG Huan, et al. Analysis on characteristics of mine geological environment and ecological restoration changes in Jilin Province based on dynamic remote sensing monitoring[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, 34(3): 240-248.
- 蒋卫国,武建军,顾磊,等. 基于遥感技术的乌达煤田火区变化监测[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(06): 964-968.
- JIANG Weiguo, WU Jianjun, GU Lei, et al. Change monitoring in Wuda coalfield fire area based on remote sensing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(06): 964-968.
- 罗明,于恩逸,周妍,等. 山水林田湖草生态保护修复试点工程布局及技术策略[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8692-8701.
- LUO Ming, YU Enyi, ZHOU Yan, et al. Distribution and technical strategies of ecological protection and restoration projects for mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8692-8701.
- 强建华. 陕西省重点成矿带与矿集区矿山地质环境遥感监测研究[J]. *西北地质*, 2013, 46(3): 203-211.
- QIANG Jianhua. Study of remote sensing monitoring concerning geological environment of major metallogenic belt and mining concentrations in Shaanxi province[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(3): 203-211.
- 强建华. 遥感技术在新疆南部地区矿山环境调查及生态修复中

- 的应用[J]. *西北地质*, 2021, 54(3): 253–258.
- QIANG Jianhua. Application of Remote Sensing Techniques in Mine Environment Investigation and Ecological Restoration in Southern Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3): 253–258.
- 史怀昱, 陈健. 新时期城市空间管控体系构建与榆林实践[J]. *规划师*, 2016, 32(03): 120–124.
- SHI Huaiyu, CHEN Jian. Urban space governance system in the new era, Yulin[J]. *Planners*, 2016, 32(03): 120–124.
- 王国飞. 无人机遥感监测在煤矿地质灾害调查的研究与应用[J]. *山西焦煤科技*, 2021, 45(02): 20–22.
- WANG Guofei. Research and application of unmanned aerial vehicle remote sensing monitoring in coal mine geological disaster investigation[J]. *Shanxi Coking Coal Science & Technology*, 2021, 45(02): 20–22.
- 王力, 黄妮, 牛铮, 等. 山水林田湖草生态保护修复项目遥感监测及辅助绩效评价[J]. *遥感学报*, 2022, 26(08): 1547–1561.
- WANG Li, HUANG Ni, NIU Zheng, et al. Remote sensing technology for monitoring and auxiliary performance evaluation of ecological protection and restoration projects for mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(08): 1547–1561.
- 王楠, 汪桂生, 张震. 高分遥感影像下的大通废弃煤矿区生态修复林淹水胁迫灾情信息提取[J]. *测绘通报*, 2018, 496(07): 13–17+47.
- WANG Nan, WANG Guisheng, ZHANG Zhen. Monitoring of water-logging stress disaster of ecological restoration forest using high resolution remote sensing data in the Datong abandoned coal mine[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018, 496(07): 13–17+47.
- 王玺森, 王迪, 雷秋良, 等. 内陆地表水体水质遥感监测研究进展[J]. *中国农业信息*, 2022, 34(02): 1–15.
- WANG Xisen, WANG Di, LEI Qiuliang, et al. Advances in the inland surface water quality monitoring by remotely sensed imagery[J]. *China Agricultural Informatics*, 2022, 34(02): 1–15.
- 王燕, 邹长新, 林乃峰, 等. 基于生态监管的生态保护修复工程实施成效评估指标体系[J]. *生态学报*, 2023, 43(01): 118–127.
- WANG Yan, ZOU Changxin, LIN Naifeng, et al. Ecological supervision oriented evaluation indicator system for performance assessment of ecological protection and restoration project implementation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(01): 118–127.
- 徐友宁, 何芳, 张江华, 等. 西北地区矿山环境地质问题及动态数据库建设[J]. *西北地质*, 2002, 35(04): 154–166.
- XU Youning, HE Fang, ZHANG Jianghua, et al. The problems of environment geology and database for mining in Northwestern China[J]. *Northwestern Geology*, 2002, 35(04): 154–166.
- 徐友宁, 袁汉春, 何芳, 等. 矿山环境地质问题综合评价指标体系[J]. *地质通报*, 2003, 22(10): 829–832.
- XU Youning, YUAN Hanchun, HE Fang, et al. Comprehensive evaluation index system of the environmental geological problems of mines[J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(10): 829–832.
- 徐友宁, 张江华, 何芳, 等. 西北地区矿山地质环境调查与防治研究[J]. *西北地质*, 2022, 55(03): 129–139.
- XU Youning, ZHANG Jianghua, HE Fang, et al. Investigation and preventive research of mine geological environment in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(03): 129–139.
- 张成业, 李军, 雷少刚, 等. 矿区生态环境定量遥感监测研究进展与展望[J]. *金属矿山*, 2022, 51(3): 1–27.
- ZHANG Chengye, LI Jun, LEI Shaogang, et al. Progress and prospect of the quantitative remote sensing for monitoring the eco-environment in mining areas[J]. *Metal Mine*, 2022, 51(3): 1–27.
- 张志, 杨金中, 张高华, 等. 生态文明视角下的湖北省东部矿山地质环境遥感调查与分析[J]. *中国地质调查*, 2016, 3(5): 21–27.
- ZHANG Zhi, YANG Jinzhong, ZHANG Gaohua, et al. Remote sensing survey and analysis of mine geological environment in eastern Hubei Province under the perspective of ecological civilization[J]. *Geological Survey of China*, 2016, 3(5): 21–27.
- Cao Zhigang, Duan Hongtao, Feng Lian, et al. Climate-and human-induced changes in suspended particulate matter over Lake Hongze on short and long timescales[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 192: 98–113.
- Du Mengmeng, Li Minzan, Noguchi Noboru, et al. Retrieval of Fractional Vegetation Cover from Remote Sensing Image of Unmanned Aerial Vehicle Based on Mixed Pixel Decomposition Method[J]. *Drones*, 2023, (1): 43.
- Hu Xiao, Li Xinju. Information extraction of subsided cultivated land in high-groundwater-level coal mines based on unmanned aerial vehicle visible bands[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78.
- Mckenna Phillip B, Lechner Alex M, Phinn Stuart, et al. Remote Sensing of Mine Site Rehabilitation for Ecological Outcomes: A Global Systematic Review[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3535.
- Yao Kaixuan, Halike Abudurehman, Chen Limei, et al. Spatiotemporal changes of eco-environmental quality based on remote sensing-based ecological index in the Hotan Oasis, Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land*, 2022, 14(03): 262–283.