



煤矿区绿色低碳评价指标构建及应用

金向阳 李杨 于雷 李要娜 雷兴海 王楠 鄢明慈 夏雪 任玉琦

引用本文:

金向阳, 李杨, 于雷, 等. 煤矿区绿色低碳评价指标构建及应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 131–142.

JIN Xiangyang, LI Yang, YU Lei. Construction and application of green and low-carbon evaluation indicators for coal mining areas[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 131–142.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1806>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双碳背景下龙王沟煤矿新型绿色矿山建设

The new green mine construction in Longwanggou Coal Mine under the background of carbon peaking and carbon neutrality
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 440–448 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1612>

露天煤矿绿色开采生态环境评价体系模糊评判研究

Study on evaluation model and application of green mining ecological environment evaluation system in open-pit coal mine
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5ac1606a-275a-44ce-99fa-ad72adf94ba0>

基于GT-ANP理论的生态脆弱区煤-水协调绿色开采度评价

Evaluation of coal water coordinated green mining degree in ecologically fragile area based on GT-ANP theory
煤炭科学技术. 2021, 49(8): 203–210 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4414e8d9-978c-428c-bcb0-d36e3b8a3d99>

双碳战略中煤气共采技术发展路径的思考

Thoughts on the development path of coal and gas co-mining technology in dual carbon strategy
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 138–153 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1689>

碳中和目标下矿区土地复垦与生态修复的机遇与挑战

Opportunities and challenges of land reclamation and ecological restoration in mining areas under carbon neutral target
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 474–483 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0047>

深部煤炭地下气化制氢碳排放核算及碳减排潜力分析

Carbon emission accounting and carbon reduction analysis for deep coal underground gasification to hydrogen
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 531–541 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1638>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

金向阳, 李 杨, 于 雷, 等. 煤矿区绿色低碳评价指标构建及应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 131–142.
JIN Xiangyang, LI Yang, YU Lei, *et al.* Construction and application of green and low-carbon evaluation indicators for coal mining areas[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 131–142.

煤矿区绿色低碳评价指标构建及应用

金向阳^{1,2}, 李 杨¹, 于 雷², 李要娜², 雷兴海¹, 王 楠¹, 鄢明慈¹, 夏 雪¹, 任玉琦¹

(1. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083; 2. 中煤科工集团国际工程有限公司, 北京 100013)

摘 要: 煤矿矿区是煤炭生产的重要基地, 对当地经济和能源供应具有重要意义。在我国能源开发和环境保护中, 矿区规划占据着举足轻重的地位。随着全球能源格局的变化以及我国提出的“碳达峰、碳中和”战略目标, 煤矿矿区的规划不再仅仅局限于资源的开采, 更要注重生态环境的保护与修复, 以及矿区经济的可持续发展。因此, 有必要将“双碳”规划的内容纳入到矿区总体规划中, 以此来引导煤炭行业的可持续发展, 并支持国家的“双碳”战略目标。为了进行矿区“双碳”规划, 首先需要对矿区的碳排放现状进行详细评估, 从而为“双碳”规划提供科学依据。以煤矿矿区为视角, 提出了“三步法”构建评价指标, 即综合分析法初选指标、社会网络分析法补充指标和模型法校核指标。该指标体系包含 7 项一级指标和 36 项二级指标, 引入模糊变量隶属度函数, 建立模型对二级评价指标量化计算, 采用逐层模糊综合评价法, 对矿区绿色低碳度进行评价。以宁夏积家井矿区为案例, 应用本研究的评价体系进行实证分析。结果表明, 积家井矿区在绿色低碳发展方面尚处于较低水平, 但同时也显示出巨大的改善潜力。针对评价结果, 提出矿区未来应当注重合理利用土地资源, 加强土地复垦, 强化生态重建与保护措施, 为矿区的绿色低碳转型提供了可行的路径。

关键词: 煤矿矿区; 碳排放; 绿色低碳; 评价指标; 模糊综合评价

中图分类号: TD82

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)04-0131-12

Construction and application of green and low-carbon evaluation indicators for coal mining areas

JIN Xiangyang^{1,2}, LI Yang¹, YU Lei², LI Yaona², LEI Xinghai¹, WANG Nan¹, YAN Mingci¹, XIA Xue¹, REN Yuqi¹

(1. School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. International Engineering Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China)

Abstract: Coal mining areas serve as pivotal bases for coal production, holding significant importance for local economies and energy supply. In the development of China's energy and environmental protection, the planning of mining areas plays a crucial role. With the changing global energy landscape and China's strategic goals of peaking carbon emissions and achieving carbon neutrality, the planning of coal mining areas transcends the mere extraction of resources, emphasizing the protection and restoration of the ecological environment, as well as the sustainable development of the mining economy. Therefore, it is imperative to integrate the content of “dual-carbon” planning into the overall planning of mining areas to guide the sustainable development of the coal industry and support the national “dual-carbon” strategic objectives. To implement “dual-carbon” planning for mining areas, a detailed assessment of the current carbon emissions status of the mining areas is required to provide a scientific basis for “dual-carbon” planning. This study, from the perspective of coal mining areas, proposes a “three-step method” to construct evaluation indicators, namely, the initial selection of indicators through comprehensive analysis, supplementation of indicators via social network analysis, and verification of indicators using the model method. The indicator system comprises seven primary indicators and thirty-six secondary indicators, incorporating the fuzzy variable membership degree function to establish a model for the quantitative calculation of secondary evaluation indicators and employing a hierarchical fuzzy comprehensive eval-

收稿日期: 2023-11-23

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.12438/cst.2023-1806

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52074293); 河北省自然科学基金资助项目(E2020402041); 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3004603)

作者简介: 金向阳(1980—), 男, 吉林榆树人, 正高级工程师, 博士研究生。E-mail: xyking@126.com

通讯作者: 李 杨(1982—), 男, 河北唐山人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: liyangcumbt@163.com

uation method to assess the green and low-carbon status of mining areas. Taking the Ningxia Jijiajing mining area as a case study, this study applies the evaluation system for empirical analysis. The results indicate that the Jijiajing mining area is currently at a lower level of green and low-carbon development but also shows great potential for improvement. In light of the evaluation results, this study suggests that the mining area should focus on the rational utilization of land resources, strengthen land reclamation, and reinforce ecological reconstruction and protection measures, providing a viable path for the green and low-carbon transformation of the mining area.

Key words: coal mining areas; carbon emissions; green and low-carbon; evaluation indicators; fuzzy comprehensive evaluation

0 引言

全球气候变化和碳排放问题已成为当今世界面临的重大挑战。随着全球气温的持续升高,减少碳排放成为国际社会的共识。众多国家纷纷提出了实现碳中和的宏伟目标,以减缓气候变化的影响。中国作为世界上最大的碳排放国之一,其能源需求主要依赖于煤炭。因此,煤炭产业的绿色低碳转型对于实现国家的碳中和目标具有重要意义。

煤矿矿区(以下简称“矿区”)由多座煤矿及配套服务设施组成,是煤炭生产的重要基地,对于当地经济和能源供应具有重要意义。矿区规划作为国家煤矿审批立项的依据,具有重要指导作用。因此,在矿区总体规划中增加“双碳”规划,有利于实现国家“双碳”目标。为了进行“双碳”规划,需要构建矿区绿色低碳评价指标以评价矿区碳排放现状,评估减碳潜力,进而确定“双碳”目标和实现路径。

目前国内外学术界对煤炭行业的绿色低碳评价指标研究多集中在宏观和微观领域,宏观领域集中在较大区域,微观领域集中在生产煤矿,鲜有以矿区为单位构建绿色低碳评价指标。煤炭行业绿色低碳领域评价指标体系主要研究成果有:刘峰建立了低碳矿山建设效果的三阶段评价模型^[1];马栋栋^[2]、王晓琳^[3]、WANG等^[4]、吴甜^[5]、陆浩杰^[6]运用系统分析方法,构建煤炭企业低碳经济综合评价指标体系,运用层次分析法(AHP)得出指标权重,选取煤炭企业进行案例应用;严慧^[7]、CHEN等^[8]基于DPSIR概念模型,对绿色矿山建设进行评价;何高文^[9]采用基于梯形模糊层次分析法和熵值法组合赋权的线性加权评价方法对伊宁矿区绿色发展水平进行评价;郝秀强等^[10]运用归纳总结法,提出了不同约束条件下“安全高效绿色”井工矿评价指标体系,对上湾煤矿进行评价;靖培星等^[11]以《国家级绿色矿山建设基本条件》框架为基础,构建井工煤矿绿色矿山评价体系;王心宇^[12]利用AHP法和模糊综合评价法对某煤炭企业进行了实证分析;LI等^[13]建立评价系统评估煤炭企业的科学开采水平;贾雪莹^[14]采用粗糙集评价法评价了煤矿低碳发展现状;李小帆^[15]运用文献研

究法构建煤炭企业低碳发展水平评价指标体系,对神华集团低碳发展水平进行评价;季闪电等^[16]以政策文件为基础,选取20个指标,运用模糊数学分析法分析忻州市煤炭行业绿色矿山情况;于淮钰^[17]基于主成分分析法对陕煤绿色低碳高质量发展情况进行评价;王佳奇等^[18]采用综合分析法,建立生态环境评价指标体系,对哈拉沟煤矿生态环境进行评价;于波^[19]运用文献频率分析法,构建煤炭企业高质量发展评价指标,应用于伊泰煤炭有限公司;LIU等^[20]采用AHP-SPA方法进行绿色矿山评价。在非煤行业评价指标选取方法的主要研究成果有:贡金涛^[21]、王一飞^[22]、高锡荣^[23]运用社会网络分析法建立评价指标。

上述研究成果对矿区绿色低碳研究有很大借鉴作用,但存在以下问题:①研究尺度方面:以往研究多以宏观和微观为主,很少有针对矿区的中观研究;评价指标选取方法方面:大多采用主观分析法,如综合分析法、专家咨询法,导致主观性高、普适性差;部分研究运用模型法,如DSR、DPSIR模型,可有效减少主要指标遗漏,但对于次要指标及具体指标仍难以避免缺失;少量研究采用文献指标频率分析法,该方法受文献数量影响较大,由于基于矿区文献研究少,难以适用;非煤行业运用社会网络分析法,该方法可以综合考虑各种因素之间的复杂关系,有助于建立更全面的评价指标体系,但该方法需要大量的数据来支持对各种指标之间关系的分析。②具体评价指标构成方面:适用矿区的绿色低碳指标少。现有研究多集中在煤炭企业高质量发展和煤矿绿色开采方面,在煤矿低碳开采方面也有少量研究。③指标评价标准和评价方法方面:评价标准缺少依据,主观性强;大多采用评分累积法,按照总分值,对照标准进行评价。该方法简单、易操作,但忽略指标间的相互关系^[16];少量采用AHP法和模糊综合评价法等主客观分析法,可有效提高评价结果可信度。

本文主要创新点和意义:①研究尺度方面。以矿区为研究尺度,构建矿区绿色低碳评价指标,进而确定矿区“双碳”目标,对矿区内煤矿审批和技术改造具有重要指导作用。②评价指标选取方法方面。

提出“三步法”筛选评价指标,即初选指标、补充指标和校核指标。第一步,采用综合分析法从绿色低碳国家标准、行业标准、政策文件中提炼评价指标;第二步,采用社会网络分析法,从团体标准、公开文献中补充评价指标;第三步,为避免指标遗漏和重复,采用 DPSIR 模型分析校核。该方法有效减少评价指标遗漏,提高准确性。③具体评价指标方面。针对矿区特点,系统地提出了 36 项矿区绿色低碳评价具体指标,对其余矿区有借鉴意义。④评价方法方面。运用层次分析法和多重专家咨询法的综合赋权法对指标赋权、逐层模糊综合评价法进行评价。可提高指标的适用范围和评价结果的可信度。⑤评价结论方面。根据宁夏积家井矿区评价结果:“土地复垦率”“植被变化率”“吨煤电耗”“温室气体采集率”“吨煤碳排放量”“环保投入占比”和“能源结构”权重超过 5%,合计权重 48.10%。结论表明,矿区应更加注重土地复垦和生态重建。

1 煤矿矿区绿色低碳评价意义

根据自然资源部发布的《全国矿产资源规划(2016—2020 年)》,全国共设置 14 个大型煤炭基地。在煤炭基地内,根据煤炭资源分布、地质条件、生态环境、外部建设条件、经济发展需求以及地方政府规划等多方面因素来划分矿区。截至 2020 年底,全国共划分 162 个煤矿矿区^[24]。国家将矿区总体规划作为矿区内煤矿审批立项的前置条件。矿区总体规划是一项综合性的规划活动,其核心目的在于通过对矿区地质特征、资源分布、环境状况、经济潜力以及社会影响等进行全面的分析和系统性的规划,以达到资源合理利用和区域可持续发展的目标。矿区总体规划不仅关注矿产资源的有效开发,还涉及环境保护、社会责任、经济效益等多重因素的平衡与协调。

在矿区总体规划中增加“双碳”规划,是煤炭行业实现“双碳”目标的前提和保障,对矿区绿色低碳现状评价是矿区进行“双碳”规划的基础。

在当前的矿区总体规划实践中,“双碳”规划仍然处于起步阶段。这意味着在规划过程中对矿区现状评价、碳排放的考量和对碳中和目标的实现路径评估还不够深入和全面。

首先,现有的矿区总体规划在矿区现状评价和“双碳”影响评价方面的不足。主要表现为缺少系统的绿色低碳矿区现状评价指标体系。许多规划仍然停留在对碳排放的一般性认识上,缺乏科学、系统的评价体系和具体的量化数据和深入的分析。

其次,对于“双碳”目标的实现路径,现有规划通常没有提供清晰的路线图和实施策略。这不仅涉及到技术层面的创新,如清洁能源的使用、碳捕捉和存储技术的应用,还包括政策和管理层面的调整。

因此,为了更好地应对全球气候变化挑战,现行的矿区总体规划需要在“双碳”规划方面进行进一步的深化和完善。这包括建立科学的矿区绿色低碳评价指标体系,明确碳减排的具体目标和措施,以及制定实现碳中和的具体路径和策略。通过这些措施,矿区规划将能更有效地促进矿区的绿色低碳发展,为实现全球气候目标做出积极贡献。

2 煤矿矿区绿色低碳评价指标体系

评价矿区绿色低碳发展水平需要一套科学的理论、评估方法和考核标准,其既能够反映矿区绿色低碳发展现状,又能反映矿区向低碳转型的潜力,帮助矿区了解其低碳发展的现状与差距,找出优势与劣势。同时,为其他矿区提供成功经验,进而推动煤炭行业低碳转型进程,实现“双碳”目标。矿区绿色低碳指标体系评价流程如图 1 所示。

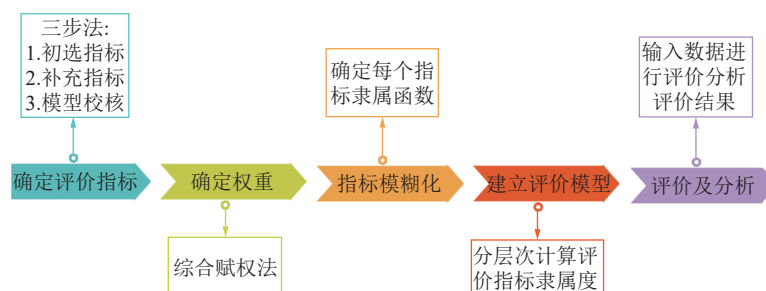


图 1 绿色低碳指标体系评价流程

Fig.1 Assessment flow of green and low-carbon index system

2.1 评价指标体系建立的原则

在构建矿区碳排放评价指标体系时,为确保评

价体系的有效性和适用性,应遵循以下原则:

1) 科学性。理论基础: 指标体系应基于科学的

理论和方法,确保其评价结果的准确性和可靠性。
数据支持:指标的选择和计算应基于充分的数据支持,确保评价的客观性。

2)系统性。全面覆盖:指标体系应全面覆盖矿区绿色低碳的各个方面,包括直接碳排放、间接碳排放以及相关的管理和政策措施。层次结构:指标应具有合理的层次结构,既包括宏观指标,也包括微观指标。

3)可操作性。实用性:指标应易于理解和应用,便于矿区管理者和决策者使用。可测量性:指标应具有明确的量化标准和计算方法,便于进行实际的测量和评估。

4)动态性。适应性:指标体系应能适应矿区运营和环境变化,包括新技术的应用和政策的更新。更新机制:应定期对指标体系进行审查和更新,以反映最新的科学研究和行业发展。

5)可比性。标准化:指标应符合国际或国家标准,以便于不同矿区或行业之间的比较。一致性:确保评价方法和结果的一致性,便于进行横向和纵向的比较分析。

遵循这些原则,可以构建出一个科学、系统、可操作、动态且具有可比性的碳排放评价指标体系,有助于矿区更有效地管理和减少碳排放,促进绿色低碳发展。

2.2 评价指标选取

2.2.1 评价指标常用选取方法

评价指标选取方法主要有:专家咨询法、综合分析法、主成分分析法、因子分析法、社会网络分析法、模型法等。

1)专家咨询法:适用于对主观性较强的评价指标进行选取。优点是能够充分利用专家的经验 and 知识,可进行多轮咨询;缺点是容易受专家主观因素影响。

2)综合分析法:适用于数据较多、主观性较强的评价指标进行选取。优点是充分利用现有规程、规范、研究成果;缺点是容易受指标选取者主观因素影响。

3)主成分分析法:适用于多指标综合评价,且指标之间存在一定相关性的情况,一般用于指标优化。优点是能够将多个相关指标转化为少数几个无关变量,减少了评价指标的重复性。缺点:需要对指标间的相关性进行分析,计算较为复杂。

4)因子分析法:是一种多变量统计技术,可以用于评价指标选取。它通过发现隐藏在一组观测变量背后的共性因素,从而减少指标的数量,提取出更为简洁的评价指标。

5)社会网络分析法:近几年部分学者开始应用该方法进行评价指标选取,该方法通过社会网络关系分析确定哪些利益相关者对评价对象产生了重要的影响,从而选择与这些利益相关者关联的评价指标。社会网络分析法适用于需要考虑利益相关者影响的评价对象,能够帮助我们理解评价对象与其周围社会环境的关系,但在实际应用中需要收集大量的相关数据,并且对网络结构的分析较为复杂,需采用专用软件^[22-23]。

6)模型法:目前有多种模型可供选择,如 DP-SIR 模型,该模型是一种用于环境评价的工具模型,代表着“驱动力(Driving forces)—压力(Pressures)—状态(State)—影响(Impacts)—响应(Responses)”。该模型可以帮助确定和选择与评价目标相关的关键指标进行评价。DPSIR 模型适用于环境评价,能够帮助我们理解评价对象与环境之间的相互关系,但在实际应用中需要对压力、状态、影响和应对进行准确定义,并且需要考虑各因素之间的复杂关联^[7]。

2.2.2 “三步法”构建评价指标

为避免关键指标遗漏和重复,提高评价科学性和适用性,笔者提出“三步法”构建评价指标,即初选指标、补充指标和校核指标。第 1 步,采用综合分析法从绿色低碳国家标准、行业标准、政策文件中提炼评价指标;第 2 步,采用社会网络分析法,从团体标准、公开文献中补充评价指标;第 3 步,为避免指标遗漏和重复,采用 DPSIR 模型分析校核。评价指标构建“三步法”步骤如图 2 所示。

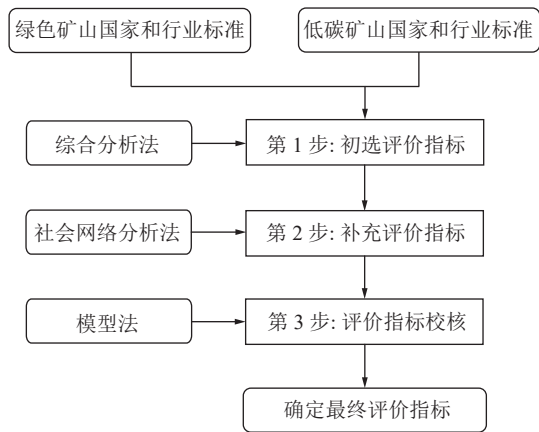


图 2 评价指标构建“三步法”步骤

Fig.2 Three-step process for constructing evaluation indicators

1)初选评价指标。

关于煤炭绿色低碳评价指标的国家标准、行业标准、政策文件主要有:GB/T 50878—2013《国家绿色工业建筑评价标准》、DZT 0315—2018《煤炭行业

绿色矿山建设规范》、煤炭采选业清洁生产评价指标体系(国家发展改革委等, 2019)、GBT 51366—2019《建筑碳排放计算标准》、绿色矿山评价指标(自然资源部, 2020)、煤炭清洁高效利用重点领域标杆水平和基准水平(2022 年版)、宁夏回族自治区工业企业碳排放管理体系评价规则。

国家标准、行业标准和政策文件是在相关领域内的统一规范和指导性文件。因此, 上述绿色低碳文件是评价指标研究的基础。因此, 应优先提取。运用综合分析法从上述标准和文件提取适用于矿区的评价指标, 初选的评价指标见表 1 中 1~10、13~25 项。

表 1 评价指标构建结果

Table 1 Evaluation index construction result

序号	一级指标(准则层)	二级指标(指标层)	指标内涵	指标属性	指标性质
1	规划管理 G_1	组织机构 X_1	企业绿色低碳矿山建设组织机构和职责制度的合理程度	正向	定性
2		双碳规划 X_2	矿区总体规划经过批准, 总体规划有“双碳”规划内容, 并有计划的严格实施	正向	定性
3		碳排放管理 X_3	企业碳排放管理规章制度完善度, 目标责任制落实度, 监督制度完善度, 碳排放监测制度完善度	正向	定性
4		管理体系 X_4	企业有无环境管理体系认证, 职业健康管理体系认证, 碳足迹认证, 节能认证, 能源管理体系认证	正向	定性
5		信息披露 X_5	信息平台完善程度, 企业环保信息、碳排放信息公示程度	正向	定性
6	基础设施 G_2	企业布局 X_6	企业布局合理程度, 土地节约程度	正向	定性
7		建筑节能 X_7	建筑节能程度	正向	定性
8		设备节能 X_8	建筑设备、公共设备的节能程度	正向	定性
9		低碳运输 X_9	煤炭运输、矸石场运输设备的低碳程度	正向	定性
10		绿化率 X_{10}	工业场地绿化覆盖率	正向	定量
11	生产经营 G_3	吨煤炭排放量 X_{11}	矿区碳排放总量/矿区原煤年产量 $\times 100\%$	反向	定量
12		全员生产效率 X_{12}	矿区原煤年产量/(原煤生产人员出勤人数 \times 设计年工作日)	正向	定量
13		能源结构 X_{13}	低碳能源供应量/能源总消耗量	正向	定量
14		技术工艺 X_{14}	采煤工艺、选煤工艺、掘进工艺等主要系统工艺智能化程度	正向	定量
15		低碳采购 X_{15}	采购产品的碳排放、材料的可再生性、节能性能、包装和运输、环保认证、供应链管理	正向	定量
16		低碳办公 X_{16}	办公场所能源消耗、废物管理、低碳办公用品采购、办公设备能效、低碳通勤	正向	定量
17	产品绿色 G_4	温室气体采集率 X_{17}	瓦斯利用率, CO_2 采集率	正向	定量
18		绿色开采率 X_{18}	绿色开采量/可采储量 $\times 100\%$	正向	定量
19		原煤入选率 X_{19}	分选原煤量/原煤总量 $\times 100\%$	正向	定量
20		煤矸石利用率 X_{20}	煤矸石再利用量/煤矸石总量 $\times 100\%$	正向	定量
21		矿井水利用率 X_{21}	矿井水利用量/矿井水可利用总量 $\times 100\%$	正向	定量
22	绩效 G_5	采区回采率 X_{22}	采出煤量总量/采区动用煤量 $\times 100\%$	正向	定量
23		循环利用率 X_{23}	物料循环利用量/物料消耗总量 $\times 100\%$	正向	定量
24		吨煤电耗 X_{24}	年耗电总量/原煤年产量	反向	定量
25		吨煤水耗 X_{25}	年耗新鲜水总量/原煤年产量	反向	定量
26		环保投入占比 X_{26}	环保投资资金/投资金额总额 $\times 100\%$	正向	定量
27	生态治理 G_6	生态承载力 X_{27}	生态承载力评价指数	正向	定量
28		土地复垦率 X_{28}	已恢复土地面积/被破坏土地面积 $\times 100\%$	正向	定量
29		植被变化率 X_{29}	(植被覆盖面积—开发前植被覆盖面积)/开发前植被覆盖面积 $\times 100\%$	正向	定量
30		土地沉陷面积率 X_{30}	土地沉陷面积/矿区总面积 $\times 100\%$	反向	定量
31	矿区和谐 G_7	劳动保护 X_{31}	采取的劳动保护措施及效果	正向	定性
32		低碳文化 X_{32}	包括: 低碳生活、低碳宣传	正向	定性
33		当地就业 X_{33}	带动当地就业情况	正向	定性
34		对外合作 X_{34}	与高校、科研院所所在绿色低碳方面的合作	正向	定性
35		员工收入增长率 X_{35}	(本年度的人均收入—上一年度的人均收入)/上一年度的人均收入 $\times 100\%$	正向	定量
36		公众满意度 X_{36}	通过调查问卷法确定	正向	定性

2) 补充评价指标。

钱鸣高院士于 2003 年提出了煤矿绿色开采理念, 经过近 20 年的研究和工程实践, 我国煤矿绿色低碳理论、技术和评价指标体系取得大量研究成果^[25], 这些研究成果可作为评价指标的补充。

通过收集和筛选煤矿相关绿色低碳团体标准、研究文献,在对文献研读的基础上,通过社会网络分析的方法筛选评价指标,与第一步初选的评价指标合并,构建新的评价指标,第二步补充评价指标工作步骤:样本收集→样本筛选→构建网络→指标提取→分析解释→合并指标。

样本选择: 将中国知网作为文献数据库, 以“煤矿+绿色+评价指标”作为研究文献的检索字段。在中国知网的检索系统中, 检索项目包括“主题”“篇名”“关键词”“摘要”四项。总计检索出相关研究文献 189 篇, 统计时间为 2003—2023 年。

样本筛选: 对以上检索得到的 189 篇研究文献进行初步筛选, 筛选标准为研究文献的主题与绿色低碳的相符程度和研究文献的来源。如果期刊和论文有相同作者, 且评价指标相似度高, 则保留期刊文章。根据以上原则, 最终筛选出 35 篇文献(参考文献 1—16 为其中具有代表性的 16 篇)。将 35 篇文献和 8 篇团体标准, 合计 43 篇文件作为样本。

研究方法: 社会网络分析法(SNA)在评价指标选取中的优点如下: ① 揭示关系。SNA 能够揭示不同实体之间的关系, 帮助评价者理解和分析实体之

间的相互作用和影响;② 综合性。SNA 能够综合考虑多个实体之间的关系, 不仅关注单个实体的属性, 而是考虑整个网络的结构和特征;③ 可视化。SNA 可以通过可视化方法直观展现实体之间的关系, 帮助评价者更直观地理解评价对象的结构和特点;④ 发现关键节点。SNA 能够帮助评价者发现网络中的关键节点和核心成员, 对于评价对象的影响和重要性进行辨识。

基于 SNA 的特点, 首先对筛选的 43 篇样本进行研读, 构建网络, 提出一级指标, 并对一级指标进行统计, 形成社会网络分析软件需求的数据格式。经过统计发现, 样本文献中提出了 102 项一级指标, 对与第一步初选的评价指标相同的指标进行合并、剔除, 得到 56 项一级指标, 建立关系矩阵, 利用社会网络分析软件 Ucinet6 进行处理后, 使用 NetDraw 绘制网络图(图 3, 说明: 图中方块代表各个作者所提出的一级指标, 圆圈代表每篇研究文献的作者。其中, 方块的大小代表网络中心度的大小, 中心度越高, 方块越大, 表示受关注程度越高。)。提取出网络中心度较高的“生态治理、环境保护、低碳能源、低碳经济、和谐发展”。由于“环境保护”“绩效”“与生态治理”重叠性较高, 将其调整为“环保投入占比”作为二级指标。“低碳能源”与二级指标“能源结构”内涵相同, “低碳经济”与二级指标“绩效”内涵相近。因此, 一级指标增加“生态治理”和“矿区和谐”。

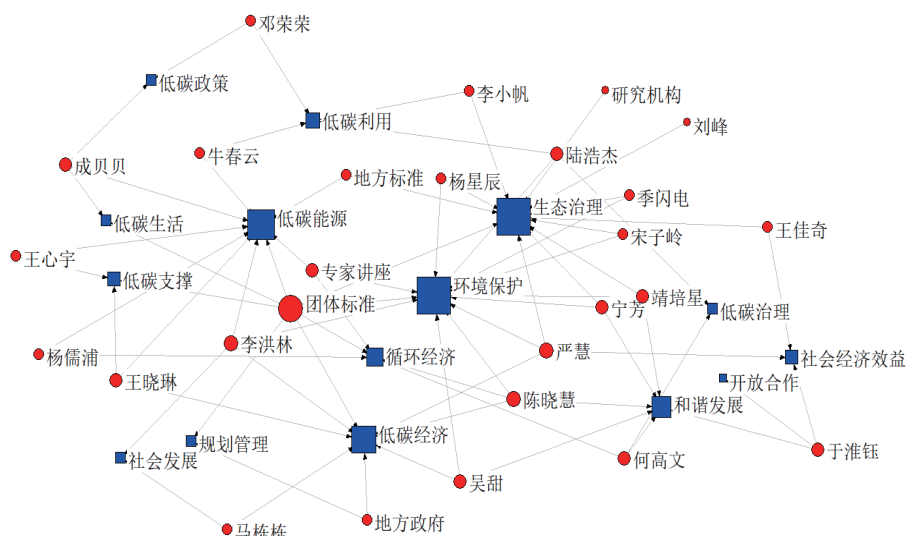


图 3 一级指标社会网络关系

Fig.3 First-level indicator: social network

重复同样过程,采用社会网络分析法提取补充二级指标“生态承载力、土地复垦率、植被变化率、

土地沉陷面积率、劳动保护、低碳文化、当地就业、对外合作”。

3)分析校核指标。

基于 DPSIR 模型特点和适用范围,选取 DPSIR 模型作为矿区评价指标校核及补充的工具模型。

① DPSIR 模型起源及结构。DPSIR 模型的起源可以追溯到 20 世纪 70 年代初,当时环境保护和管理成为国际社会关注的焦点。在这个时期,人们开始意识到环境问题不仅仅是单个事件或因素引起的,而是由一系列相互作用的因素导致的。为了更好地理解和管理这些复杂的环境问题,提出 PSR (Pressure-State-Response) 和 DSR (Driving force-State-Response) 2 种模型,逐渐发展成 DPSIR 模型^[7]。DPSIR 是一个缩写,代表着“驱动力(Driving forces)—压力(Pressures)—状态(State)—影响(Impacts)—响应(Responses)”。DPSIR 模型可以帮助确定和选择与评价目标相关的关键指标,从而对一个系统进行评价。

DPSIR 框架模型描述了一条从经济、社会和政策方面引发环境问题的因果关系链。在这个链条中,驱动力(D)为引起环境变化的初始原因。压力(P)代表直接引起环境变化的直接原因,主要指人类对环境或资源的需求和索取。状态(S)指生态环境的直接变化,是由于驱动力和压力造成的,是承受人类生态安全的系统所处的状态。影响(I)代表某些生态环境变化进一步产生的环境问题。响应(R)代表人类为维持正常生活所采取的恢复生态环境的措施,通过人类活动又反作用于经济、社会发展引发的压力(P)、状态(S)和影响(I),从而形成一个有机的循环系统。DPSIR 模型结构如图 4 所示。

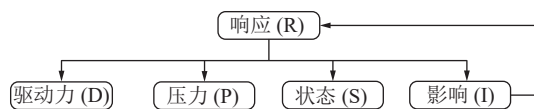


图 4 DPSIR 模型结构

Fig.4 DPSIR model structure

② DPSIR 模型适用范围。环境评估:评估污染、生态系统健康等。社会经济系统:分析经济发展、社会变迁对环境和社会的影响。健康评估:了解环境变化如何影响公共健康。可持续发展:监测和评估可持续发展目标的实现情况。

③ DPSIR 模型优点。结构化框架:DPSIR 提供了一个清晰的分析框架,有助于系统地识别和关联各种因素。全面性:能够覆盖从原因到后果的全过程,有助于全面理解问题。政策相关性:通过连接响应和政策,DPSIR 模型可以直接用于指导政策制定。

④ DPSIR 模型应用。应用 DPSIR 模型校核分

析评价指标工作步骤:输入指标→识别驱动力→分析确定压力→识别分析状态→识别分析影响→识别分析响应→确定最终评价指标。

应用 DPSIR 模型选取评价指标的过程具体步骤如下:

输入指标:将表 1 评价指标构建结果表中的二级指标 1~32 项输入 DPSIR 模型进行分析和校核。

识别驱动力:这些是引起系统变化的根本原因,是导致绿色低碳矿山建设理论和实践的驱动因素。与驱动力相关的指标如下:双碳规划(减少碳排放和碳中和的战略规划)、低碳文化(企业和社会的低碳文化推动环保行为)。

分析确定压力:压力是由驱动力产生的,直接作用于系统的因素。与压力相关的指标如下:吨煤电耗(煤炭生产的电能消耗情况)、吨煤水耗(煤炭生产的水资源消耗情况)。

识别分析状态:指系统当前的状况。与状态相关的指标如下:绿化系数(反映矿区植被覆盖和生态状态)、煤矸石利用率(煤矸石的利用情况)、矿井水利用率(矿井水的回收利用率)、采区回采率(采区资源的采出率)、循环利用率(资源的循环利用率)、绿色开采率(绿色开采占比)、原煤入选率(运煤入选比例)、土地复垦率(开采后土地恢复情况)、能源结构(能源的种类和使用方式)、建筑节能(建筑设计和运营中的节能措施)、设备节能(使用高效设备减少能源消耗)、温室气体采集率(生产过程中减少污染)、技术工艺(主要工艺系统智能化程度)、低碳采购(采购环节的低碳选择)、低碳办公(办公环境中实施的节能减排措施)、低碳运输(运输方式的碳排放影响)。

识别分析影响:影响是状态变化对人类或生态系统的后果。与影响相关的指标如下:当地就业(矿区对当地就业的影响和贡献)、生态承载力(生态系统支撑人类活动的 ability)、植被变化率(植被覆盖的变化反映了生态环境的变化)、土地沉陷面积率(矿区开采导致地面沉降)。

识别分析响应:响应是对前述所有因素的回应,包括政策制定、管理措施等。与响应相关的指标:环保投入占比(对环保措施的投资比例)、劳动保护(保护矿工安全和健康的措施)、碳排放管理(管理碳排放的相关制度等)、组织机构(组织的结构和管理方式)、管理体系(管理体系是推动环境保护的基础)、信息披露(透明度有助于提高环保意识)、企业布局(企业的结构布局对环境影响很大)、对外合作(可以

促进绿色技术和实践的交流)。

经 DPSIR 模型分析,驱动力因素、压力因素和影响因素有所欠缺。从驱动力角度分析,选取体现煤炭行业的 2 项重要经济指标:“全员生产效率”和“员工收入增长率”;从压力因素分析,增加“吨煤碳排放量”指标;从影响因素分析,增加“公众满意度”指标。

经 DPSIR 模型分析校核,“三步法”确定的最终矿区一级评价指标 7 项,二级评价指标 36 项。评价指标见表 1。

2.3 评价指标赋权

确定指标权重是为了反映不同指标的重要程度,是评价工作的基础。指标权重确定方法有许多种,主观赋权法主要有: AHP、专家咨询法(德尔菲法)、最佳最差法,客观赋权法主要有:熵权法、主成分分析法、方差分析法,以及多种方法组合的综合赋权法。由于矿区范围较大,数据收集困难,尤其对于新规划矿区,没有大量历史数据,因此,本文选择 AHP 法,但为了克服 AHP 法主观性强的缺点,采用多轮专家咨询法对 AHP 法计算结果打分,最终确定指标权重,综合赋权法流程如图 5 所示。

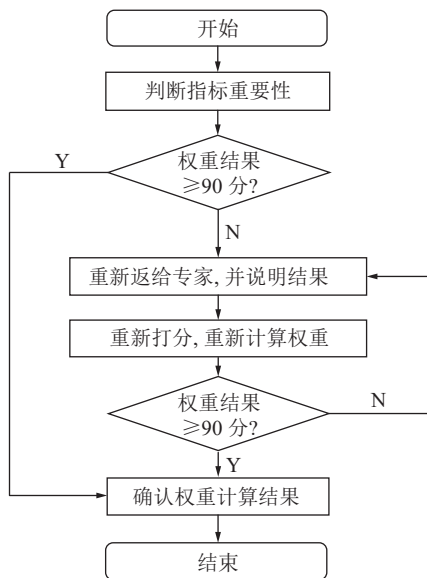


图 5 综合赋权法流程

Fig.5 Flow of comprehensive weighting method

1)构造判断矩阵。对同一级别各评价指标之间进行两两比较,采用专家咨询法确定评价指标的重要程度,构造出比较判断矩阵,构造判断矩阵时采用 9 位标度法。 B_1-B_n 对上级别 A 的判断矩阵如下:

$$X = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

2)计算指标权重和一致性检验。计算判断矩阵的最大特征根和特征向量,并进行一致性检验。计算判断矩阵最大特征根和特征向量可采用算数平均法、方根法、几何平均法等。

一致性指标 C_1 和一致性比率 C_R 的计算:

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (1)$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (2)$$

式中: λ_{\max} 为最大特征根; R_1 为平均随机一致性指标,可以通过查表得到; $C_R < 0.1$ 时,通过一致性检验。

2.4 评价方法

为了确保权重的准确性和客观性,综合应用了层次分析法和多轮专家咨询法确定各个指标的权重。层次分析法能够将定性的事物进行定量分析,具有较强的系统性和高可靠性。然而,将层次分析法和专家咨询法结合使用容易产生循环,从而导致标度不能准确把握,进而产生指标信息丢失的问题^[12]。因此,采用模糊综合评价法来修正上述问题。

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的评价方法,它通过模糊关系的合成,对事物的综合评价进行量化分析。模糊综合评价法能够处理评价指标的模糊性和不确定性,较为灵活。能够较好适用于评价指标不确定性较大的情况。运用模糊综合评价法的工作步骤如下:分析指标→确定评价集→确定指标集→确定模糊关系函数→确定权重分配→进行模糊合成→评价结果分析。

1)分析指标。由表 1 可知,评价指标分定性指标和定量指标,为提高评价指标隶属度值准确性,应优先采用定量方法确定。对于定量指标,采用函数法建立隶属度值计算模型;对于定性指标,采用专家打分法综合计算。

2)确定评价指标集(因素集)、评价集因素集设为 U_i , 评价集设为 V_j 。

3)隶属度值计算模型。

① 正向定量指标。该指标与绿色低碳指标正相关,即其值越大对绿色低碳度贡献率越大。此指标取值区间为 $[x_{i, \min}, x_{i, \max}] (i = 1, 2, \cdots, n)$, 表 1 中, X_{10} 、 X_{12} 、 X_{14} 、 X_{26} 、 X_{35} 属于该类指标。

正向定量指标模型见式(3)。

$$\mu(X_i) = \begin{cases} 0, & X_i \leq x_{i,\min} \\ (X_i - x_{i,\min}) / (x_{i,\max} - x_{i,\min}), & x_{i,\max} > X_i > x_{i,\min} \\ 1, & X_i > x_{i,\max} \end{cases} \quad (3)$$

② 反向定量指标。该指标与绿色低碳指标负相关, 即其值越大对绿色低碳度贡献率越小。此指标取值区间为 $[x_{i,\min}, x_{i,\max}]$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 表 1 中, X_{11} 、 X_{24} 、 X_{25} 、 X_{30} 属于该类指标。

反向定量指标模型见式(4):

$$\mu(X_i) = \begin{cases} 1, & X_i \leq x_{i,\min} \\ -(X_i - x_{i,\max}) / (x_{i,\max} - x_{i,\min}), & x_{i,\max} > X_i > x_{i,\min} \\ 0, & X_i > x_{i,\max} \end{cases} \quad (4)$$

③ 连续性比率指标。该指标为连续性比率指标, 无相关标准范围, 取值范围 $[x_{i,\min}, x_{i,\max}] = [0, 1.0]$, ($i = 1, 2, \dots, n$), 表 1 中, X_{13} 、 X_{15} 、 X_{16} 、 X_{17} 、 X_{18} 、 X_{19} 、 X_{20} 、 X_{21} 、 X_{22} 、 X_{23} 、 X_{27} 、 X_{28} 、 X_{29} 属于该类指标。

连续性比率指标模型见式(5)。

$$\mu(X_i) = \begin{cases} P_i, & X_i \text{ 为正向指标} \\ 1 - P_i, & X_i \text{ 为反向指标} \end{cases} \quad (5)$$

式(3)—式(5)中, $\mu(X_i)$ 为第 i 种评价因素 X_i 的隶属度值, P_i 为指标计算或实测值, X_i 为矿区第 i 种评价指标的实测值。

④ 定性指标计算。采用专家咨询法, 根据专家的打分情况, 计算元素隶属度。

$$\mu(X_i) = \left[\sum_{j=1}^m (S_j \times K_j) \right] / n \quad (6)$$

式中, $\mu(X_i)$ 为第 i 种评价因素 X_i 的隶属度值; m 为评价集数量; n 为专家人数; S_j 为第 j 个评价分数 (分值范围 0~1); K_j 为第 j 个评价专家人数。

4) 模糊合成及评价。根据矿区元素定量值较多的特点, 采用逐层模糊综合评价法进行评价, 建立评价模型^[26]。利用“2.3 评价指标赋权”中的计算方法, 确定各个二级指标 X_i 的权重系数 W_i 及该指标的隶属度 $\mu(X_i)$ 值, 根据式(7)、式(8), 逐层计算, 得到矿区绿色低碳评价指标 G 的值。

$$G_k = \sum_{i=1}^{N_j} \left[W_i \sum_{m=1}^{N_m} \mu_m(X_i) \right] \quad (7)$$

$$G = \sum_{j=1}^{N_k} (W_{kj} \times G_k) \quad (8)$$

式中, G_k 为第 k 个一级指标值; N_j 为第 k 个一级指标的第 j 个二级指标的个数为二级指标 X_i 的权重系数; $\mu_m(X_i)$ 为第 i 种评价因子 X_i 对应于 $m=1, 2, \dots, N_m$ 个等级标准所对应隶属度值; G 为绿色低碳指

数(目标值); N_j 为一级指标个数; W_{kj} 为第 j 个一级指标 G_k 的权重系数。

根据上述计算得到 G_k 和 G 值, 对照等级标准, 确定评价对象的评价等级。

3 实例研究

以宁夏积家井煤矿矿区为例, 对矿区绿色低碳评价指标体系开展实际的评价应用。积家井矿区为在建矿区, 目前矿区内有 3 座生产矿井, 配套建有 3 座洗煤厂, 采用综合机械化开采, 部分系统实现智能化。规划管理方面, 矿区绿色低碳矿山建设刚刚起步, 组织机构还不完善, 未建设碳管理平台; 基础设施方面, 矿山布局合理, 除运输车辆未低碳化外, 其余指标较好; 生产经营方面, 吨煤碳排放量和技术工艺做得较好, 全员生产效率一般, 其余指标较差; 产品绿色方面, 原煤全部分选, 煤矸石利用率 49%, 矿井水回用率 55.3%, 未采用充填开采、保水开采等绿色开采, 瓦斯和 CO_2 未抽采; 绩效方面, 采区采出率 83%, 循环利用率 22%, 吨煤电耗 29 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 环保投资占比 5.2%; 生态治理方面, 生态承载力指数 0.468, 土地复垦率 38.5%, 植被变化率 66.7%, 土地沉陷面积率 3%; 矿区和谐方面, 低碳文化刚刚起步, 对外合作较少, 其他指标做得较好。

目前, 各学者在评价绿色低碳经济时, 由于建立的评价体系、采用的评价方法不同, 在绿色低碳等级划分标准上存在差异。为了更好地表示矿区绿色低碳发展水平, 参考王心宇等^[12]研究成果, 对矿区绿色低碳发展指数等级划分为 3 级: 弱低碳, 表示低碳建设管理处于较低水平, 还有很大提升空间; 基本低碳, 表示低碳建设管理已经有一定成效, 处于中等水平; 强低碳, 表示低碳建设管理水平排在同行业前列。等级划分标准见表 2。

表 2 表 3 积家井矿区绿色低碳发展指数等级划分标准
Table 2 Classification standard for green and low-carbon development index of Jijiajing mining area

等级	I	II	III
绿色低碳发展指数 G	$0.5 > G \geq 0$	$0.8 > G \geq 0.5$	$1.0 \geq G \geq 0.8$
绿色低碳表征状态	弱低碳	基本低碳	强低碳

根据层次分析法比较判断矩阵及式(1)—式(8)计算的隶属度和权重值见表 3。

利用上述评价指标体系和评价模型, 得出矿区绿色低碳指数值 $G=0.490$, 属于“弱低碳”的标准。通过对积家井矿区绿色低碳评价的分析结果得出,

表 3 表 4 积家井矿区绿色低碳评价指标计算值
Table 3 Calculated value of green and low carbon evaluation index of Jijiajing mining area

一级指标	二级指标 X_i	绿色低碳因子隶属度 μ	权重 $W_i/\%$
规划管理 G_1	组织机构 X_1	0.622	0.434
	双碳规划 X_2	0.486	2.312
	碳排放管理 X_3	0.231	1.818
	管理体系 X_4	0.389	0.906
	信息披露 X_5	0.134	0.479
基础设施 G_2	企业布局 X_6	0.921	0.640
	建筑节能 X_7	0.877	0.469
	设备节能 X_8	0.823	1.148
	低碳运输 X_9	0.232	1.042
	绿化率 X_{10}	0.895	1.611
生产经营 G_3	吨煤炭排放量 X_{11}	0.869	5.383
	全员生产效率 X_{12}	0.524	2.160
	能源结构 X_{13}	0.167	5.081
	技术工艺 X_{14}	0.620	4.820
	低碳采购 X_{15}	0.050	2.425
	低碳办公 X_{16}	0.110	1.212
产品绿色 G_4	温室气体采集率 X_{17}	0.000	6.819
	绿色开采率 X_{18}	0.000	4.719
	原煤入选率 X_{19}	1.000	2.094
	煤矸石利用率 X_{20}	0.490	4.613
	矿井水利用率 X_{21}	0.553	1.234
绩效 G_5	采区回采率 X_{22}	0.830	1.399
	循环利用率 X_{23}	0.220	2.900
	吨煤电耗 X_{24}	0.337	7.940
	吨煤水耗 X_{25}	0.565	1.030
	环保投入占比 X_{26}	0.914	5.170
生态治理 G_6	生态承载力 X_{27}	0.468	3.011
	土地复垦率 X_{28}	0.385	9.034
	植被变化率 X_{29}	0.667	8.672
	土地沉陷面积率 X_{30}	0.971	4.653
矿区和谐 G_7	劳动保护 X_{31}	0.923	0.209
	低碳文化 X_{32}	0.368	1.176
	当地就业 X_{33}	0.862	0.983
	对外合作 X_{34}	0.355	0.447
	员工收入增长率 X_{35}	0.766	0.678
	公众满意度 X_{36}	0.854	1.277

积家井矿区在“基础设施”“矿区和谐”“生态治理”“绩效”方面都走在了全国煤炭矿区的前列,矿区的“产品绿色”“规划管理”“生产经营”方面还有提升

空间。二级指标的“温室气体采集率”“能源结构”和“绿色开采”权重且提升空间大,提升空间大的主要原因是受低浓度瓦斯利用技术限制绿色开采成本限制和当地电力结构所决定。在以后的矿山生产运营中大力发展低浓度瓦斯利用技术,尤其是回风井低浓度瓦斯利用和 CCUS 技术。同时,大力发展绿色开采和塌陷区治理和利用,使积家井矿区成为绿色低碳示范矿区。

4 讨 论

根据上述积家井矿区的实例研究可知,矿区的一级评价指标“生态治理”“生产经营”“产品绿色”“绩效”在绿色低碳评价体系中所占权重较高,合计达到 84.37%,尤其是“生态治理”,其权重超过 25%。二级评价指标“土地复垦率”“植被变化率”“吨煤电耗”“温室气体采集率”“吨煤碳排放量”“环保投入占比”和“能源结构”权重超过 5%,合计权重超过 48.10%。结论表明,矿区应更加注重土地复垦和生态重建。这些结论与以往煤矿过多关注节能改造、智能化建设、外购绿电和提高煤矿瓦斯抽采利用率的减碳路径有所不同。

“温室气体采集率”主要指煤炭生产过程的瓦斯和 CO₂ 逸散排放。以往只关注高瓦斯矿区的瓦斯抽采利用^[27]。研究表明,低瓦斯矿区也需要进行瓦斯抽采利用,尤其是低浓度瓦斯利用。同时,与甲烷浓度相比,低瓦斯矿区 CO₂ 浓度更高,即使瓦斯的温室气体潜能是 CO₂ 的 25 倍以上^[28]。因此,低瓦斯矿区除了研究瓦斯抽采利用和低浓度回风井瓦斯利用外,还应重点研究 CO₂ 的收集和利用。

“能源结构”对矿区绿色低碳水平影响较大,这与其他行业相同,但煤炭行业由于生产煤炭的天然优势,导致直接使用大量煤炭,产生较多碳排放。因此,首先,矿区应减少煤炭使用。其次,煤矿开采产生采煤沉陷区,沉陷区破坏生态环境,减少碳汇。但在采煤沉陷区具备土地、矿井水、井下储能等多种优势,开发风电、光伏等新能源,不仅能够改变电力结构,光伏面板冲洗水源用于灌溉可提高植物和土壤的碳汇能力。矿区应重点研究采煤沉陷区“风电+光伏+储能+林草复垦”。

煤矿开采产生大量煤矸石^[29-30],煤矸石排放不仅占用大量土地,煤矸石自燃及瓦斯和 CO₂ 逸散都会产生大量碳排放。提高煤矸石利用率,不仅减少直接碳排放,同时也能循环梯级利用,从而减少间接碳排放。

提出“三步法”构建评价指标,从而使矿区评价指标尽量全面、科学、准确反映矿区现状。但由于现有矿区绿色低碳评价指标方面文献较少,应用社会网络分析法时,导致数据样本少。需要根据各个矿区具体情况增减评价指标。此外,积家井矿区为规划在建矿区,目前生产矿井少,历史碳排放资料较少,定量指标隶属度计算值难免有偏差,下一步将增加样本数量。

5 结 论

1)以矿区为研究尺度,构建了矿区绿色低碳评价指标体系,以“规划先行”为理念,改变传统的先开采后治理模式为源头规划控制碳排放模式。根据矿区一级和二级评价指标的评价结果,确定矿区“双碳”目标和实现路径,对区内煤矿审批和技术改造具有重要指导作用。

2)矿区绿色低碳评价指标体系由两级共36项具体评价指标构成,综合评价指标为矿区“绿色低碳度”指标,是对矿区绿色低碳开发程度的综合评价指标。

3)为克服评价指标选取方法少且主观性强的缺点,提出“三步法”筛选评价指标,即初选指标、补充指标和校核指标。第一步,采用综合分析法从绿色低碳国家标准、行业标准、政策文件中提炼评价指标;第二步,采用社会网络分析法,从团体标准、公开文献中补充评价指标;第三步,为避免指标遗漏和重复,采用DPSIR模型分析校核。该方法有效减少评价指标遗漏,提高评价的权威性、科学性和准确性。

4)由于在矿区规划阶段,评价样本数量少,应用熵权法等客观法评价难度大。运用层次分析法和多重专家咨询法的综合赋权法对指标赋权、模糊综合评价法进行评价。有效克服了单一主观评价法的不足,提高了指标的适用范围和评价结果的可信度。

5)引入模糊变量隶属度函数,建立模型对二级评价指标量化计算,采用逐层模糊综合评判法,确定各级评价指标的绿色低碳评价因子的量化值,提高了计算结果的科学性。

6)根据我国煤矿矿区规划情况、自然条件、资源条件、建设条件、开采技术条件、生态治理等条件,结合现有研究成果,将露天煤矿绿色低碳度划分为3个等级,作为评价矿区绿色低碳度的标准。通过积家井矿区实例应用分析,建立的绿色低碳评价体系是可行的。

7)根据宁夏积家井矿区评价结果:“土地复垦率”

“植被变化率”“吨煤电耗”“温室气体采集率”“吨煤碳排放量”“环保投入占比”和“能源结构”权重超过5%,合计权重48.10%。结论表明,矿区应更加注重土地复垦和生态重建。

参考文献(References):

- [1] 刘 峰. 煤炭行业低碳生态矿山建设模式及评价研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2011.
LIU Feng. Study on the construction mode and evaluation of low-carbon and ecological mine in coal industry [D]. Beijing: China University of Mining and Technology -Beijing, 2011.
- [2] 马栋栋. 煤炭企业发展低碳经济的综合评价与路径设计 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2012.
MA Dongdong. Comprehensive evaluation and path design on development of low carbon economic in coal enterprises [D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2012.
- [3] 王晓琳. 盘江集团煤炭矿区低碳经济模式研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
WANG Xiaolin. Study on the low-carbon economy model of Panjiang coal mining area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [4] WANG Bangjun, YAN Fang, ZHAO Jialu. Comprehensive evaluation on low-carbon development of coal enterprise groups[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(18): 17939–17949.
- [5] 吴 甜. 陕西省煤炭企业低碳化程度评估体系研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
WU Tian. The research on evaluation system of low-carbon coal enterprise in Shaanxi province [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014.
- [6] 陆浩杰. 基于 AHP-熵权法的煤炭企业低碳经济综合评价研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
LU Haojie. The study on comprehensive evaluation of low carbon economy in coal enterprises based on AHP-entropy method [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014.
- [7] 严 慧. 大屯矿区绿色矿山建设评价及对策研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
YAN Hui. Research on evaluation and countermeasures of green mine construction for Datun mining area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [8] CHEN Jinhui, JISKANI Izhar Mithal, YAN Hui. Evaluation and future framework of green mine construction in China based on the DPSIR model.[J]. Sustainable Environment Research, 2020, 30(1): 13.
- [9] 何高文. 新疆伊宁矿区绿色发展评价研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
HE Gaowen. Study on evaluation of green development of Yining mining area in Xinjiang [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [10] 郝秀强, 赵怡晴. 基于综合评价指数法的安全高效绿色井工矿评价方法研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(11): 97–100.
HAO Xiuqiang, ZHAO Yiqing. Study of safe, high efficiency and green underground coal mine assessment based on comprehens-

- ive evaluation index method[J]. Coal Engineering, 2015, 47(11): 97-100.
- [11] 靖培星, 卢明银, 巩维才, 等. 基于区间直觉模糊熵和变权理论的井工煤矿绿色矿山评价[J]. 中国矿业, 2016, 25(12): 59-63, 75.
- JING Peixing, LU Mingyin, GONG Weicai, *et al.* Gong Weicai, *et al.* Evaluation of underground coal mining green mine based on interval-valued intuitionistic fuzzy entropy and variable weight theory[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(12): 59-63, 75.
- [12] 王心宇. 煤炭企业低碳经济综合评价方法及实证研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2016.
- WANG Xinyu. Comprehensive evaluation method and empirical study on low-carbon economy of coal enterprises [D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2016.
- [13] LI Chongmao, NIE Rui. An evaluating system for scientific mining of China's coal resources[J]. Resources Policy, 2017, 53: 317-327.
- [14] 贾雪莹. 基于粗糙集的我国煤炭企业低碳经济发展水平评价研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- JIA Xueying. Research on evaluation of low-carbon economic development level of coal enterprises in China based on rough set [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [15] 李小帆. 煤炭企业低碳发展水平评价及预测研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- LI Xiaofan. Research on evaluation and prediction of low carbon development level of coal enterprises [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [16] 季闪电, 杨 洋. 忻州市煤炭行业绿色矿山建设评价指标体系研究: 以王家岭煤矿为例[J]. 中国矿业, 2020, 29(7): 65-69.
- JI Shandian, YANG Feng. Research on the evaluation index system of green mine construction in the coal industry of Xinzhou city: a case study of Wangjialing coal mine[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(7): 65-69.
- [17] 于淮钰. 大型煤炭企业高质量发展评价体系研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
- YU Huaiyu. Research on evaluation system of high-quality development of large coal enterprises [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [18] 王佳奇, 卢明银, 王庆雄, 等. 基于熵权法-云模型保水开采生态环境评价研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 291-298.
- WANG Jiaqi, LU Mingyin, WANG Qingxiong, *et al.* Study on ecological environment assessment of water conservation mining based on entropy weight method and cloud model[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 291-298.
- [19] 于 波. 煤炭企业高质量发展评价指标体系构建与应用: 以伊泰煤炭有限公司为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2022.
- YU Bo. Construction and application of evaluation index system for high-quality development of coal enterprises: a case study of Yitai coal limited company [D]. Huhehaote: Inner Mongolia University, 2022.
- [20] LIU Quanlong, QIU zunxiang, MA Li, *et al.* Evaluation and empirical research on green mine construction in coal industry based on the AHP-SPA model[J]. Resources Policy, 2023, 82: 103503.
- [21] 贡金涛. 社会网络分析在学科评估中的应用: 以美国 28 所图书情报院校为例 [D]. 沈阳: 辽宁师范大学, 2010.
- GONG Jintao. Initiative exploration on analysis of social network applying in subject assessment: case on 28 LIS schools in America [D]. Shenyang: Liaoning Normal University, 2010.
- [22] 王一飞, 肖久灵, 汪建康. 企业技术创新能力测度: 社会网络分析的视角[J]. 科技进步与对策, 2011, 28(15): 77-81.
- WANG Yifei, XIAO Jiuling, WANG Jiankang. Measurement of enterprise technological innovation capability: a perspective of social network analysis[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2011, 28(15): 77-81.
- [23] 高锡荣, 杨 娜. 基于社会网络分析方法的论文评价指标体系构建[J]. 情报科学, 2017, 35(4): 97-102, 144.
- GAO Xirong, YANG Na. Establishment of the index system for paper evaluation by social network analysis[J]. Information Science, 2017, 35(4): 97-102, 144.
- [24] 陶贵鑫. 我国重点煤矿区生态修复现状评价及规划策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- TAO Guixin. Evaluation and planning strategy of ecological restoration in key coal mining areas of China [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [25] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 1-15.
- XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 1-15.
- [26] 宋子岭, 范军富, 祁文辉, 等. 露天煤矿绿色开采技术与评价指标体系研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 350-358.
- SONG Ziling, FAN Junfu, QI Wenhui, *et al.* Study on the surface coal mine green mining technology and appraising index system[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 350-358.
- [27] 任世华, 谢亚辰, 焦小森, 等. 煤炭开发过程碳排放特征及碳中和发展的技术途径[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 60-68.
- REN Shihua, XIE Yachen, JIAO Xiaomiao, *et al.* Characteristics of carbon emissions during coal development and technical approaches for carbon neutral development[J]. Engineering Science and Technology, 2022, 54(1): 60-68.
- [28] LI Yang, JIN Xiangyang, WANG Guoliang, *et al.* Construction and Application of a Carbon Emission Model for China's Coal Production Enterprises and Result Analysis[J]. Frontiers in energy research, 2022, 10: 889877.
- [29] 郭洋楠, 李能考, 何瑞敏. 神东矿区煤矸石综合利用研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 144-147.
- GUO Yangnan, LI Nengkao, HE Ruimin. Study on comprehensive utilization of coal refuse in Shendong mining area[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 144-147.
- [30] 顾成进, 杨宝贵, 路绍杰, 等. 双碳背景下龙王沟煤矿新型绿色矿山建设[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 440-448.
- GU Chengjin, YANG Baogui, LU Shaojie, *et al.* The new green mine construction in Longwanggou coal mine under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 440-448.