

文章编号: 1004-4051(2024)05-0080-09

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20240306

露天煤矿碳排放核算及碳中和实现路径: 以魏家峁煤矿为例

郑玉蓉^{1,2}, 王耀龙³, 张 飞³, 张永贵³, 孙文彬^{1,2}

(1. 矿业大学(北京)内蒙古研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017004;

2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

3. 北方魏家峁煤电有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010308)

摘 要:厘清露天煤矿碳排放特征是实现露天煤矿“双碳”目标的前提和基础。在分析识别露天煤矿碳排放源的基础上,基于煤炭开发碳排放源清单分析方法构建了露天煤矿碳排放核算模型。以魏家峁煤矿为例,分析了不同排放源的碳排放特征,并提出了露天煤矿碳中和实现路径。研究结果表明:露天煤矿碳排放源包括直接碳排放源(能源消耗(以燃油和炸药为主)、逃逸和非受控燃烧)和间接碳排放源(电力消耗和水消耗)两类。2022 年,魏家峁煤矿的碳排放总量为 112 785.978 t,其中,直接碳排放量为 79 874.508 t,间接碳排放量为 32 911.470 t。燃油消耗为魏家峁煤矿碳排放的主要贡献者,由其产生的碳排放量占煤矿碳排放总量的 47.152%。基于碳排放特征,魏家峁煤矿可采取四大路径实现低碳发展:优化煤矿生产系统和能源利用模式,减少能源消耗带来的碳排放;综合利用矿山智能化和物联网技术,降低不必要的设备损耗和能源消耗;促进传统能源和新能源的耦合利用,降低能源消耗的碳排放系数;通过生态恢复,增强矿区生态系统的固碳增汇效益。研究结果可为露天煤矿碳排放核算和减排策略制定提供参考。

关键词:露天煤矿;碳排放;碳中和;核算模型;碳排放源

中图分类号: TD-9; X752 **文献标识码:** A

Accounting of carbon emission in open-pit coal mines and path for carbon neutrality: taking Weijiamao Coal Mine as an example

ZHENG Yurong^{1,2}, WANG Yaolong³, ZHANG Fei³,
ZHANG Yonggui³, SUN Wenbin^{1,2}

(1. China University of Mining and Technology (Beijing) Inner Mongolia Research Institute, Ordos 017004, China;

2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing,
Beijing 100083, China;

3. North Weijiamao Power and Coal Co., Ltd., Ordos 010308, China)

Abstract: Clarifying the carbon emission characteristics of open-pit coal mines is the prerequisite and foundation for realizing the goal of “double carbon”. On the basis of analyzing and identifying the

收稿日期: 2024-03-05 责任编辑: 刘硕

基金项目: 鄂尔多斯市标志性团队项目资助; 国家自然科学基金项目资助(编号: 42271435)

第一作者简介: 郑玉蓉(1996—), 女, 汉族, 山西临汾人, 博士研究生, 主要从事煤炭企业碳排放核算和减排策略研究, E-mail: zyr3246671038@163.com。

通讯作者简介: 张永贵(1988—), 男, 汉族, 高级工程师, 主要从事露天采矿技术和管理, E-mail: 82031682@nupc.cn。

引用格式: 郑玉蓉, 王耀龙, 张飞, 等. 露天煤矿碳排放核算及碳中和实现路径: 以魏家峁煤矿为例[J]. 中国矿业, 2024, 33(5): 80-88.

ZHENG Yurong, WANG Yaolong, ZHANG Fei, et al. Accounting of carbon emission in open-pit coal mines and path for carbon neutrality: taking Weijiamao Coal Mine as an example[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 80-88.

carbon emission sources of open-pit coal mines, the accounting model of carbon emission is constructed based on carbon emission source inventory method. The carbon emission characteristics of different emission sources are analyzed by taking Weijiamao Coal Mine as an example, and paths for carbon neutrality of Weijiamao Coal Mine are proposed. The results show that the carbon emission sources from open-pit coal mines including two categories: the one is direct carbon emission sources, including carbon emission from energy consumption (mainly fuel oil and explosives), fugitive emissions and uncontrolled combustion; the other one is indirect carbon emission sources, mainly from electricity and water consumption. The total carbon emission of Weijiamao Coal Mine in 2022 is 112 785.978 tons. The direct carbon emission is 79 874.508 tons and the indirect carbon emission is 32 911.470 tons. Fuel consumption is the main contributor of carbon emission in Weijiamao Coal Mine, accounting for 47.152% of the total carbon emission. Based on the carbon emission characteristics, Weijiamao Coal Mine can adopt four major paths to achieve low-carbon development: optimizing the production system and energy utilization mode of coal mine to reduce carbon emission from energy consumption; comprehensively utilizing the intelligence and Internet of Things technology of mine to reduce unnecessary equipment loss and energy consumption; promoting the coupled use of traditional energy and new energy to reduce the emission coefficient of energy consumption; restore the ecological environment to enhance the carbon sequestration and sink enhancement benefits of the ecosystems in mining areas. The obtained results can provide a reference for carbon emission accounting and emission reduction strategy development in open-pit coal mines.

Keywords: open-pit coal mine; carbon emission; carbon neutrality; accounting model; carbon emission source

0 引言

自工业革命以来,人类活动导致大气中 CO_2 浓度持续增加,碳排放量从1959年的8.9 Gt CO_2 增长至2022年的36.1 Gt CO_2 ,由此带来了一系列的生态环境问题和气候问题,如极端气候、自然灾害等,对人类生活和经济发展造成巨大损失^[1]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)的评估报告指出化石能源是两大主要的碳源之一^[2],而中国近70%的碳排放来源于化石燃料的使用^[3]。在中国的能源消费结构中,化石能源占比长期超过80%,处于绝对主体地位^[4]。其中,煤炭消费量占能源消费总量的56%。目前,中国约70%的 CO_2 增长是由于煤炭使用量增加导致的^[5]。因此,煤炭行业高质量低碳化发展是中国实现碳中和目标的关键^[6]。厘清煤炭行业碳排放量和排放特征对于寻找可持续利用煤炭资源途径、实现煤炭行业低碳化发展至关重要^[7-8]。

随着“双碳”目标的提出,由能源消耗引起的温室气体问题和煤炭行业节能减排受到越来越多的关注^[9]。煤炭企业碳排放核算是制定合理碳减排措施的基础和前提^[1]。露天煤矿的开发与建设是中国大型煤炭基地的重要组成部分,是重要的一次能源生产大户,我国露天煤矿的产量由2003年的0.80亿t增长至2022年的10.57亿t^[10]。同时,露天煤矿也是重要的能源消耗单位,煤炭开采需要耗费大量的炸药、燃油、电力等能源,由此带来了大量的碳排放,

是煤炭行业节能减排的重点之一^[9,11]。掌握露天煤矿的碳排放源,构建碳排放核算模型,分析露天煤矿及不同碳排放源的碳排放特征是精准化制定碳减排措施的关键一环^[12]。然而,近年来多数学者在核算露天煤矿碳排放时,对碳排放源的识别并不全面,遗漏了一部分碳排放源(如水、煤层低温氧化)及其碳排放核算模型。鉴于此,本文在现有研究的基础上,从宏观角度,对露天煤矿碳排放源进行识别,构建了露天煤矿碳排放核算模型。在此基础上,以魏家崙煤矿为例,分析了不同碳排放源的碳排放特征,进而提出露天煤矿碳减排和碳中和实现路径,可为露天煤矿碳排放核算和减排策略制定提供参考。

1 露天煤矿碳排放核算概述

科学、准确地核算碳排放量是开展碳排放相关研究、制定碳减排政策的基础性工作^[1,13-14]。为了提供统一规范的碳排放核算方法论,IPCC发布了《2006年国家温室气体清单指南》(以下简称“指南”)^[15],提出了立足于能源消耗数据的碳排放核算方法,其核心是在核算边界内加和各类能源消耗量和对应的排放因子的乘积,得到碳排放总量^[16-17]。以此为蓝本,国内外机构先后发布了一系列的核算标准和模型^[5,18-19],为具体行业碳排放核算提供了参考标准。在此基础上,学者们从煤炭开采过程出发,对碳排放核算模型进行修正和完善,给出了煤炭企业各类温室气体排放总量的计算模型和计算方法,使其更适用于露天

煤矿碳排放核算^[19],此外,为提高碳排放核算结果的适用性和准确性,学者们不断改进完善核算模型,并对排放因子进行修正更新^[20-22]。

1.1 露天煤矿碳排放核算现状

目前,围绕露天煤矿碳排放核算,学者们主要展开了两方面研究:露天煤矿碳排放核算模型构建和碳排放特征分析。碳排放核算边界确定是进行碳排放核算模型构建和碳排放特征分析的前提和基础^[5,8]。煤炭开发过程是指露天煤矿生成煤炭产品的过程,包括原煤开采和煤炭洗选两个过程。据此,学者们划定了露天煤矿开采碳排放核算的边界,包括爆破、采装、运输、排土、洗选、运输和存储环节。针对碳排放核算模型构建,学者们提出并构建了基于能源消耗和露天煤矿生产环节的碳排放核算模型。

从能源消耗出发的碳排放模型,需考虑碳排放核算边界内所有环节涉及的碳排放源。以露天煤矿的碳排放源为抓手,在全面梳理碳排放源的基础上,学者们构建了基于排放源的碳排放核算模型。刘福明等^[23]构建了基于能源消耗(煤炭、柴油、电能)的碳排放核算模型。在此基础上,才庆祥等^[11]考虑了逸散排放源,完善了露天矿区碳排放核算模型,并将其用于小龙潭矿务局布沼坝露天煤矿能源消耗碳排放量进行计算。周游^[9]、张振芳^[24]、宁芳^[25]、徐宏祥等^[26]均围绕直接碳排放源中的燃油(柴油、汽油)、炸药、逸散、自燃,以及间接碳排放源中的电力构建了碳排放量初步核算模型。

从露天煤矿生产环节出发的碳排放核算模型则聚焦于不同生产环节(爆破、采装、运输、排土等)的碳排放量,以不同生产环节为边界,通过识别不同生产环节所涉及的能源消耗类型,计算其消耗量,得到该生产环节的碳排放量,进而得到露天煤矿的碳排放总量。目前,针对生产环节的碳排放核算模型构建的研究较少,张振芳^[24]围绕穿孔、爆破、采装、破碎、运输、排土等环节构建了碳排放核算模型。

综上所述,学者们从能源消耗和生产环节两个角度出发构建露天煤矿碳排放核算模型,基于生产环节的碳排放核算模型实质上是以生产环节为主,以能源消耗碳排放核算模型为基础,核算煤炭开发过程中不同环节的碳排放源,进而得到碳排放总量。但目前不同学者所构建的核算模型并未完全覆盖露天煤矿开采洗选过程中的全部碳排放源。针对露天煤矿碳排放特征的研究,多是在构建露天煤矿碳排放核算模型的基础上,利用能源消耗数据和排放因子数据计算碳排放量,进而比较不同能源类型、不同生产环节或者不同生产工艺所带来的碳排放及其动

态变化^[9,24,27]。张振芳^[24]比较了安家岭煤矿、黑岱沟煤矿、伊敏河煤矿、布沼坝煤矿等国内具有代表性的露天煤矿能源消耗碳排放,并分析了不同生产工艺的碳排放水平。周游^[9]、徐宏祥等^[26]在构建碳排放核算模型的基础上,分别以哈尔乌素露天煤矿、黑岱沟选煤厂能源消耗情况为基础分析了能源消耗碳排放水平。

1.2 露天煤矿碳排放特征

露天煤矿碳排放主要来源于露天开采和煤炭洗选过程。露天开采是指将煤炭资源从敞露的原始自然环境中挖掘出来的过程,是煤炭开采的重要形式之一,主要包括穿孔、爆破、采装、破碎、运输和排土等流程。煤炭洗选是指对直接开采出的含有矸石和其他杂质的毛煤进行分选、筛分等工序,清除杂质和矸石,使煤的各方面质量达到国家规定的基本要求^[5],包括破碎、分选、脱水、煤泥处理等过程。露天煤矿开采、分选过程中大量能源(炸药、燃油、原煤、天然气、电力等)消耗产生的温室气体排放是露天煤矿最主要的排放源。煤炭开采过程中及开采后煤层原始状态遭到破坏,封存在煤层中的温室气体会发生逃逸,释放到大气中,导致大气中CO₂浓度的增加。此外,露天煤矿煤炭、煤矸石等的缓慢氧化和自燃也会带来额外的CO₂排放。

1.3 露天煤矿主要碳排放源

按照IPCC规定,露天煤矿的碳排放源可分为直接碳排放源和间接碳排放源。

1)直接碳排放源:包括能源消耗、逃逸和非受控燃烧。①能源消耗:露天煤矿开发过程中消耗的主要能源包括燃油和炸药。露天煤矿采选过程中矿用自卸车、装载机、平路机等设备消耗数万吨燃油,燃油不仅是露天开采成本的主要组成部分,也是露天开采过程中主要的碳排放源^[10]。炸药是露天煤矿特有的排放源^[9],露天煤矿开采过程中岩层、煤层爆破时所使用的炸药以铵油炸药为主,爆炸时会释放大量的CO₂。②逃逸:主要是指露天开采导致煤层及邻近煤层的原始状态遭到破坏,会将原来吸附或封存在煤炭中的CH₄和CO₂释放到大气中^[9-10]。③非受控燃烧:包括自燃和低温氧化导致的CO₂排放。一方面,由于露天煤矿的特性,采煤工作面长期暴露,露天煤矿采煤区、堆煤区以及排土场煤层、原煤及煤矸石会发生自燃现象,向大气中排放大量的温室气体;另一方面,露天煤矿未采出部分及堆放的煤炭、煤矸石,慢慢氧化后也会排放CO₂。

2)间接碳排放源:主要为煤炭采选过程中由电力消耗和水消耗产生的碳排放。露天煤矿采选过程

中最主要的间接碳排放源来自于电力的消耗。电力主要用于驱动钻机、挖掘机、破碎机、排土机等各种大型设备,CO₂排放量大^[10],因此,在进行露天煤矿碳排放核算时,需将电力消耗产生的碳排放考虑在内。此外,露天煤矿开采过程中,除循环水外还需消耗大量新水,也会带来碳排放,水主要用于抑制露天作业时产生大量粉尘扬尘和煤炭洗选过程,减缓煤层氧化和减少自燃。

2 露天煤矿碳排放核算

2.1 露天煤矿碳排放核算模型

根据1.2节对露天煤矿碳排放源的分析,露天煤矿碳排放量的计算见式(1)。

$$E = E_{ene} + E_{fug} + E_{ele} + E_{wat} + E_{uncon} \quad (1)$$

式中: E 为露天煤矿碳排放总量, t; E_{ene} 为能源消耗产生的碳排放量, t; E_{fug} 为逃逸产生的碳排放量, t; E_{ele} 为电力消耗产生的碳排放量, t; E_{wat} 为水消耗产生的碳排放量, t; E_{uncon} 为露天煤矿煤层、煤矸石非受控燃烧产生的碳排放量, t。

2.2 露天煤矿碳排放核算公式

2.2.1 直接碳排放

1) 能源消耗碳排放。能源消耗碳排放量等于研究时间尺度内各类能源的消耗量乘以对应的碳排放因子,具体表达式见式(2)。

$$E_{ene} = \sum_i M_i \times EF_i \quad (2)$$

式中: M_i 为第 i 类能源的消耗量, t, 露天煤矿主要能源类型为燃油(柴油、汽油)和炸药,各类能源的消耗量可从企业能源消耗原始记录或统计台账中获取; EF_i 为第 i 类能源的碳排放因子, t/t, 排放因子可通过实测得到,对于不具备实测条件的露天煤矿,可按需求采用《2006年IPCC国家温室气体清单指南》或《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》中规定的缺省值,炸药碳排放因子可通过对其化学反应的分析得到或参考相关文献已有计算结果^[24]。

2) 逃逸碳排放。逃逸碳排放量包括露天开采过程中的CH₄逃逸量(折算为CO₂排放量)和矿后活动(原煤运输、洗选和存储等过程)CH₄逃逸量(折算为CO₂排放量),计算见式(3)。

$$E_{fug} = (E_{mining} + E_{post-mining}) \times 0.67 \times 10^{-1} \times GWP \quad (3)$$

式中: E_{mining} 为开采过程产生的CH₄逃逸量; $E_{post-mining}$ 为矿后活动产生的CH₄逃逸量; GWP 为甲烷的全球增温潜势系数,根据IPCC评估报告,100 a时间尺度内1 t CH₄相当于21 t CO₂的增温能力,故 GWP 取值21^[8]。 E_{mining} 和 $E_{post-mining}$ 计算方式见式(4)和式(5)。

$$E_{mining} = G \times EF_{mining} \quad (4)$$

$$E_{post-mining} = G \times EF_{post-mining} \quad (5)$$

式中: G 为原煤产量; EF_{mining} 为开采阶段的CH₄逃逸因子, kg/t; $EF_{post-mining}$ 为矿后活动CH₄逃逸因子, kg/t。由于现阶段无法获取实测CH₄逃逸因子,可参照《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》中规定的CH₄逃逸因子:露天开采CH₄逃逸因子为1.34 kg/t,矿后活动CH₄逃逸因子为0.34 kg/t。

3) 非受控燃烧碳排放。露天煤矿非受控燃烧CO₂排放主要来源于煤层缓慢氧化和自燃,其计算公式见式(6)。

$$E_{uncon} = E_{comb} + E_{oxi} \quad (6)$$

式中: E_{comb} 为自燃导致的碳排放量, t; E_{oxi} 为氧化产生的碳排放量, t。

E_{comb} 的计算方式见式(7)。

$$E_{comb} = \sum_i Q_i \times EF_{combi} \quad (7)$$

式中: Q_i 为第 i 种燃烧源的燃烧量, t; EF_{combi} 为第 i 种燃烧源的碳排放因子, t/t, 各燃烧源的碳排放因子可根据碳含量(%) 和碳氧化率(%) 获得,具体表达式见式(8)。

$$EF_{combi} = C_i \times \beta \times \frac{44}{12} \quad (8)$$

式中: C_i 为第 i 种燃烧源的碳含量, %; β 为碳氧化因子。中国露天煤矿主要燃料碳含量和碳氧化率见表1。

表1 中国露天煤矿主要燃料碳含量和碳氧化率

Table 1 Carbon content and carbon oxidation rate of main fuel in open-pit coal mine in China

燃料类型	碳含量 C_i /%	碳氧化率 β /%	排放因子 $EF/(t/t)$
无烟煤	90~98	94	3.1~3.4
烟煤	75~90	93	2.5~3.1
褐煤	60~75	96	2.1~2.7
泥炭	50~60	100*	1.8~2.2

注: *为净发热值未知,假设的碳氧化因子。

露天煤矿未采出部分缓慢氧化碳排放量计算见式(9)。

$$EF_{oxi} = \frac{1-k}{k} \times G \times Q \times \gamma \times m \quad (9)$$

式中: k 为露天煤矿工作面回采率, %; G 为原煤产量, t; Q 为原煤平均发热量, MJ/kg; γ 为燃料的含碳率, kg/MJ; m 为原煤的氧化率, %。

2.2.2 间接碳排放

1) 电力消耗碳排放。露天煤矿电力消耗引起的温室气体排放等于用电量乘以所在区域电网的排放

因子,具体表达式见式(10)。

$$E_{ele} = D \times EF_{ele} \quad (10)$$

式中: D 为核算时间内露天煤矿的耗电量, MWh, 耗

电量数据可从企业记录台账中获取; EF_{ele} 为露天煤矿所在区域电网平均排放因子, t/MWh, 区域电网覆盖范围及平均排放因子见表2。

表2 区域电网覆盖范围及平均排放因子

Table 2 Coverage of regional power grid and average emission factors

电网名称	覆盖省份	$EF_{OM}/(t/MWh)$	$EF_{BM}/(t/MWh)$
华北区域电网	北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、内蒙古自治区	0.941 9	0.481 9
东北区域电网	辽宁省、吉林省、黑龙江省	1.082 6	0.239 9
华东区域电网	上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省	0.792 1	0.387 0
华中区域电网	河南省、湖北省、湖南省、江西省、四川省、重庆市	0.858 7	0.285 4
西北区域电网	陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区	0.892 2	0.440 7
南方区域电网	广东省、广西壮族自治区、云南省、贵州省	0.804 2	0.213 5

资料来源: 中华人民共和国生态环境部《2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》。

注: ①表中 OM 为2015—2017年电量边际排放因子的加权平均值; BM 为截至2017年统计数据的容量边际排放因子。②本结果以公开的上网电厂的汇总数据为基础计算得出。

2) 水消耗碳排放。露天煤矿水消耗引起的温室气体排放量等于耗水量乘以对应的排放因子, 具体表达式见式(11)。

$$E_{wat} = W \times EF_{wat} \quad (11)$$

式中: W 为核算时间内露天煤矿的耗水量, t, 耗水量数据可从企业记录台账中获取; EF_{wat} 为水的排放因子, t/t。

3 应用实例

北方魏家崮煤电有限责任公司位于内蒙古准格尔煤田东南部, 魏家崮镇西侧6 km, 行政隶属内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗魏家崮镇管辖。魏家崮煤矿是魏家崮煤电一体化项目的两个子项之一, 生产能力为14 Mt/a, 现有产能为1 500万 t/a, 2022年全年实际完成剥离量6 169.8万 m³, 采煤1 059.3万 t。本文以魏家崮煤矿作为核算主体进行2022年碳排放核算, 以为露天煤矿碳减排提供参考依据。

3.1 直接碳排放

3.1.1 能源消耗碳排放

魏家崮煤矿主要消耗能源包括以下方面。①燃油(以柴油为主): 煤炭开采过程中大型设备的动力源; ②炸药: 用于对煤层、岩层进行爆破作业, 魏家崮煤矿爆破作业以铵油炸药为主。2022年, 魏家崮煤矿消耗柴油16 557.277 t, 柴油燃烧对应的排放因子采取IPCC缺省值; 消耗炸药7 487.907 t, 其对应的排放因子取化学平衡常数法和Brinkley-Wilson法的平均值^[24]。根据式(2)计算得到燃油消耗导致的碳排放量为53 180.651 t, 炸药爆破产生的碳排放量为1 405.480 t。

3.1.2 逃逸碳排放

由于魏家崮煤矿无实测CH₄逃逸值, 采用生产

数据和《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》中规定的CH₄逃逸因子(露天开采为1.34 kg/t, 矿后活动为0.34 kg/t), 按照式(3)~式(5)进行逃逸碳排放量计算。2022年, 魏家崮煤矿逃逸碳排放量为25 039.309 t, 其中, 露天开采过程逃逸碳排放量为19 971.830 t, 矿后活动逃逸碳排放量为5 067.479 t。

3.1.3 非受控燃烧碳排放

由于魏家崮煤矿2022年生产过程中未出现煤层自燃现象, 因此, 此处忽略自燃导致的碳排放。魏家崮煤矿工作面回采率为96%, 有4%的煤炭不能回收会发生缓慢氧化产生CO₂, 所以需对煤层氧化产生的CO₂进行核算。参照《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》, 原煤平均发热量 Q 取值为0.019 MJ/kg, 原煤含碳率 γ 取值为0.027 kg/MJ, 原煤的氧化率 m 取行业经验值为30%。按照式(9)计算得到该矿煤层缓慢氧化产生的碳排放量为249.068 t。

3.2 间接碳排放

3.2.1 电力消耗碳排放

2022年, 魏家崮煤矿消耗电量46 150 MWh, 排放因子采用华北区域电网电量边际排放因子和容量边际排放因子的平均值(0.711 9 t/MWh), 按照式(10)计算得到该煤矿电力消耗碳排放量为32 854.185 t。

3.2.2 水消耗碳排放

2022年魏家崮煤矿消耗电量27.021万 t, 排放因子为 2.12×10^{-4} ^[28], 按照式(11)计算得到该煤矿水消耗碳排放量为57.285 t。

3.3 碳排放特征分析

根据以上数据计算得到, 2022年魏家崮煤矿的

碳排放总量为 112 785.978 t, 其中, 直接碳排放量为 79 874.508 t, 间接碳排放量为 32 911.470 t。燃油消耗产生的碳排放量最多, 占比为 47.152%; 其次为电力消耗碳排放量和逃逸碳排放量, 分别占碳排放总量的 29.130% 和 22.201%。由此可见, 能源消耗量和碳排放强度是最主要的影响因素, 由能源消耗产生的碳排放量占比达到 77.578%。因此, 优化煤炭开采系统、制定相应的节能减能措施是实现露天煤矿碳中和目标的必然要求。

4 露天煤矿碳中和实现路径

露天煤矿作为重要的能源消耗单位, 其节能减排是实现煤炭行业碳中和目标的重点之一。综合露天煤矿的碳排放源和魏家崙煤矿的碳排放特征, 从碳减排和碳增汇两个角度出发, 给出了露天煤矿碳中和目标的实现路径, 以期魏家崙煤矿节能减排目标的实现提供有力支撑, 同时可为其他露天煤矿碳中和目标的实现提供参考依据。

4.1 优化煤矿生产系统和能源利用模式

魏家崙煤矿采选过程中消耗的油、电力等能源产生的碳排放量占碳排放总量的 77.578%。因此, 优化露天煤矿生产系统, 提升能源利用率, 减少能源耗费是实现魏家崙煤矿碳中和的优先途径。

优化能源生产系统, 发展基于节能减排的煤炭生产设计方案, 尽量实现集中生产, 简化生产运输环节, 降低运距, 提高运输效率, 降低运输成本, 可减少煤炭开采过程中长距离运输柴油消耗带来的碳排放^[29-31]; 加强生产开采运输设备的维护和检修, 对于能耗高、效率低以及国家公布淘汰的机电设备必须有计划的进行改造或更新, 优先使用资源回收率高、污染排放少的清洁生产技术、先进设备和工艺, 以提高设备能源利用率, 减少能源消耗; 在保证矿区生产安全的情况下, 严格按照生产计划和规模优化资源配置, 减少资源浪费^[8]; 推进煤矿区地上地下资源立体开发再利用模式的实现, 充分结合节水、节电、余热等回收利用技术, 实现矿区资源化、能源化和功能化利用, 亦可减少矿区能源、资源消耗。

相关学者对哈尔乌素露天煤矿^[9]、布沼坝露天煤矿^[11]、平朔东露天煤矿^[32], 以及晋陕蒙宁甘区、华东区、东北区、华南区和新青区五大产煤区域^[33]的碳排放核算结果均表明能源利用碳排放(包括燃油(主要为柴油)、电力等)在露天煤矿碳排放量中占较大比重。特别是运输过程能源消耗带来的碳排放量占露天煤矿碳排放总量的 80%^[34]。因而, 如何缩短运输距离, 提高能源利用效率, 减少能源消耗量, 对于实现煤矿的碳减排至关重要。同时, 考虑到露天煤矿

基本开采流程的一致性和标准化的特征, 上述露天煤矿生产系统优化和能源利用模式可为相似矿区碳减排策略的制定提供有效参考。

4.2 促进传统能源和新能源的耦合利用

促进传统能源和新能源的耦合利用、协同发展既是露天煤矿绿色低碳转型的重要路径, 也是促进新能源规模化发展的关键手段^[35]。煤矿生态系统有大量的土地、风、光等自然资源, 可再生能源发展和利用优势大^[36-38], 加强传统能源和新能源的耦合利用力度, 推进新能源的投入和使用, 是减少露天煤矿能源消耗碳排放量的重要途径。

依托露天煤矿现有设施和条件, 通过盘活充分利用露天煤矿排土场、废弃矿区等闲置土地大力开发光伏、风力发电项目, 加快推进大型风电光伏基地建设, 拓展新能源应用场景, 集中打造风光氢储能一体的新能源产业基地, 提高矿区及周围可再生能源的消费比, 降低传统能源消耗的碳排放系数和碳排放量, 进而减少整个煤炭开采能源链的碳排放^[27]。

我国煤炭资源富集区与太阳能、风能资源富集区具有很大的重叠性^[32], 为新能源的开发和利用提供了有力条件。根据新能源赋存特点和露天煤矿地理环境优势(沉陷区、采空区、排土场), 充分挖掘其再利用和新能源发展潜力, 加快推动风电、太阳能发电等新能源利用和发展, 可推动露天煤矿绿色发展。

4.3 综合利用矿山智能化和物联网技术

推动露天煤矿的智能化建设, 实现矿区管理体制和生产模式的整体升级, 可提升生产系统生产效率, 减少能源资源消耗。综合应用智能矿山综合监控和管理平台, 强化其在综采工作面实时监测、煤岩识别、智能放煤、装备智能化定位方面的能力, 可提高设备的利用效率、降低设备运维成本^[35]。应用物联网技术在矿山的能源使用和资源配置以及路径规划等方面的优势, 可减少煤炭开采过程中不必要的设备损耗和能源消耗, 助力碳中和目标的实现。

我国智能化露天矿山相对较少, 且生产辅助决策方面能力较弱^[10]。强化现有智能化矿山的生产辅助决策, 并以此为样本, 带动其他露天矿区智能化发展, 实现透明化统一化管理, 对提高开采效率, 减小能源和设备损耗具有重要意义。

4.4 通过生态恢复增强矿区生态系统固碳增汇效益

露天采矿活动需要消除所有地表植被, 露天煤矿开采中对土地资源的挖损、塌陷、压占改变了原始地貌和景观, 破坏了土壤结构和水文条件。这种负面影响会随着时间的推移被放大, 进而导致区域生态系统固碳能力衰退^[39-41]。矿区土地复垦和生态重

建是恢复其生态系统固碳能力,实现矿区生态系统由扰动后的“碳源”向“碳汇”转变,进而实现区域碳平衡的重要方式。

对于露天开采场、煤矿排土场、渣堆、矿区边坡和崖壁以及煤炭开采形成的采煤沉陷区,综合运用自然恢复和人工修复两种手段,恢复矿区生态。首先完成矿区地貌重塑、土壤重构和植被重建,消除矿山地质灾害、改善土壤理化性质、实现矿区复绿,提高土壤的碳截获能力和植被碳储量,进而实现露天矿区景观重现、生物多样性重组与保护,补齐生态短板,推进矿区绿色转型,实现矿区生态系统碳汇功能的最大化。在此基础上充分挖掘区域的自然资源和人文资源,推动矿区转型为绿色产业基地,多角度提升矿区生态系统的碳汇能力,实现露天矿区社会经济效益和生态效益的同步提升。

露天煤矿所在地属干旱、荒漠、高原以及草原地带,分布区域干旱少雨,整体生态属脆弱区,生态弹性力小^[10,42]。加之矿区开采对自然地表的破坏,生态功能受损^[42]。因此,通过地质恢复手段,植树造林等绿色重建手段,恢复生态系统功能^[43],可助力区域固碳能力提升和碳中和目标的实现。

5 结 论

在分析识别露天煤矿碳排放源的基础上,基于煤炭开发碳排放源清单分析方法构建完善了露天煤矿碳排放核算模型。以魏家崙煤矿为例估算了不同碳排放源的碳排放量,并提出了露天煤矿碳中和实现路径,可为露天煤矿碳排放核算和碳中和路径制定提供有效参考。

1)露天煤矿碳排放源包括直接碳排放源和间接碳排放源两类:直接碳排放源包括能源消耗碳排放(以燃油和炸药为主)、逃逸和非受控燃烧;间接碳排放源主要为电力消耗带来的碳排放,以及水消耗带来的碳排放。

2)2022年,魏家崙煤矿的碳排放总量为112 785.978 t,其中,直接碳排放量为79 874.508 9 t,间接碳排放量为32 911.470 t。所有排放源中,燃油消耗带来的碳排放最多(53 180.651 t),占煤矿碳排放总量的47.152%。

3)基于碳排放特征,魏家崙煤矿可采取四大途径实现低碳发展:优化煤矿生产系统和能源利用模式,减少能源消耗带来的碳排放;促进传统能源和新能源的耦合利用,减少能源消耗的排放系数;综合利用矿山智能化和物联网技术,降低不必要的设备损耗和能源消耗;通过生态恢复手段,增强矿区生态系统的固碳增汇效益。

参考文献(References):

- [1] LI Y W, Yang X X, DU E S, et al. A review on carbon emission accounting approaches for the electricity power industry[J]. *Applied Energy*, 2024, 359(4): 122681.
- [2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis: working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [3] LIU Z, GUAN D, WEI W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. *Nature*, 2015, 524(7565): 335-338.
- [4] MADZIVIRE G, MALEKA R M, TEKERE M, et al. Cradle to cradle solution to problematic waste materials from mine and coal power station: acid mine drainage, coal fly ash and carbon dioxide[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, 30(8): 100474.
- [5] 李姗姗, 袁亮. 煤炭工业全生命周期碳排放核算与影响因素[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(7): 2925-2935.
LI Shanshan, YUAN Liang. Carbon emission accounting and influencing factors for whole life cycle of coal industry[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(7): 2925-2935.
- [6] 桑树勋, 袁亮, 刘世奇, 等. 碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前景[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(4): 1430-1451.
SANG Shuxun, YUAN Liang, LIU Shiqi, et al. Geological technology for carbon neutrality and its application prospect for low carbon coal exploitation and utilization[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(4): 1430-1451.
- [7] 魏英敏. 消费伦理与保护生态环境[J]. *中国矿业大学学报(社会科学版)*, 2000(3): 3-7.
WEI Yingmin. The ethics of consumption and the protection of ecological environment[J]. *Journal of China University of Mining & Technology (Social Sciences)*, 2000(3): 3-7.
- [8] 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]. *Advanced Engineering Science*, 2022, 54(1): 60-68.
- [9] 周游. 露天煤矿温室气体核算模型构建及减排策略研究[J]. *煤炭工程*, 2019, 51(7): 138-141.
ZHOU You. Study on greenhouse gas accounting model and emission reduction strategy for open-pit coal mines[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(7): 138-141.
- [10] 白润才, 付恩三, 马力, 等. 露天煤矿安全-绿色-高效-低碳协同开采技术体系[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 298-308.
BAI Runcai, FU Ensan, MA Li, et al. Collaborative mining technological system of safety-green-high efficiency-low carbon for open pit coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 298-308.
- [11] 才庆祥, 刘福明, 陈树召. 露天煤矿温室气体排放计算方法[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(1): 103-106.
CAI Qingxiang, LIU Fuming, CHEN Shuzhao. Calculation method of greenhouse gas emission in open pit coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(1): 103-106.

- [12] MI Z F, ZHENG J L, MENG J, et al. China's energy consumption in the new normal[J]. *Earth's Future*, 2018, 6(7): 1007-1016.
- [13] SHAN Y, GUAN D B, ZHENG H R, et al. China CO₂ emission accounts 1997-2015[J]. *Scientific Data*, 2018, 5(1): 1-14.
- [14] 王正, 周侃, 樊杰, 等. 市—县尺度能源消费碳排放核算方法研究进展[J]. *地理科学进展*, 2023, 42(7): 1406-1419.
- WANG Zheng, ZHOU Kan, FAN Jie, et al. Progress of research on energy-related carbon emission accounting methods at the prefectural and county levels progress in geography[J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(7): 1406-1419.
- [15] EGGLESTON H S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[EB/OL]. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20880391>.
- [16] SHAN Y, GUAN D, LIU J, et al. Methodology and applications of city level CO₂ emission accounts in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161(9): 1215-1225.
- [17] 郑玉蓉, 孙文彬, 杜守航, 等. 煤炭企业碳排放核算方法研究综述[J/OL]. *煤炭学报*: 1-13[2024-02-02]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1077>.
- ZHENG Yurong, SUN Wenbin, DU Shouhang, et al. Review of carbon emission accounting methods in coal enterprises[J/OL]. *Journal of China Coal Society*: 1-13[2024-02-02]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1077>.
- [18] 国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南(试行)[Z]. 2011.
- [19] 国家发展和改革委员会. 温室气体排放核算与报告要求 第11部分: 煤炭生产企业: GB/T 32151.11—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [20] ANDRES R J, BODEN T A, BRÉON F M, et al. A synthesis of carbon dioxide emissions from fossil-fuel combustion[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(5): 1845-1871.
- [21] WANG N, WEN Z G, ZHU T. An estimation of regional emission intensity of coal mine methane based on coefficient-intensity factor methodology using China as a case study[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2015, 5(4): 437-448.
- [22] 马翠梅, 戴尔阜, 刘乙辰, 等. 中国煤炭开采和矿后活动甲烷逃逸排放研究[J]. *资源科学*, 2020, 42(2): 311-322.
- MA Cuimei, DAI Erfu, LIU Yichen, et al. Methane fugitive emissions from coal mining and post-mining activities in China[J]. *Resources Science*, 2020, 42(2): 311-322.
- [23] 刘福明, 才庆祥, 陈树召, 等. 露天煤矿能源消耗引致温室气体排放计量模型建构[J]. *中国矿业*, 2012, 21(6): 61-64.
- LIU Fuming, CAI Qingxiang, CHEN Shuzhao. Calculation method preliminary of greenhouse gas emission caused by the energy consumption in open pit coal mine[J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(6): 61-64.
- [24] 张振芳. 露天煤矿碳排放量核算及碳减排途径研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [25] 宁芳. 露天煤矿污染源分布特征及生态文明评价指标体系构建[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [26] 徐宏祥, 武威, 刘利波, 等. 黑岱沟选煤厂碳排放核算研究[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(9): 16-22.
- XU Hongxiang, WU Wei, LIU Libo, et al. Carbon emission accounting for Heidaigou Coal Preparation Plant[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(9): 16-22.
- [27] YANG B Y, BAI Z K, ZHANG J J. Environmental impact of mining-associated carbon emissions and analysis of cleaner production strategies in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(11): 13649-13659.
- [28] 曹原广, 刘娜. 井工煤矿开采全生命周期碳排放特征研究[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(1): 162-167.
- CAO Yuanguang, LIU Na. Whole life cycle carbon emission characteristics of underground coal mining[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(1): 162-167.
- [29] 谢和平, 高明忠, 刘见中, 等. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1487-1503.
- XIE Heping, GAO Mingzhong, LIU Jianzhong, et al. Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1487-1503.
- [30] 刘光伟, 李晋, 柴森霖, 等. 基于时空演化的露天矿运输线路存留状态判别算法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2147-2154.
- LIU Guangwei, LI Jin, CHAI Senlin, et al. Spatio-temporal state discrimination and prediction of road transportation system in open-pit mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2147-2154.
- [31] 王东, 梁祖超, 李广贺, 等. 近水平露天煤矿相邻采坑临时中间桥对边坡的支撑效应[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(9): 3374-3383.
- WANG Dong, LIANG Zuchao, LI Guanghe, et al. Mechanical retaining effect of middle bridge on slope of adjacent open pit[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3374-3383.
- [32] 郭远超. 平朔东露天煤矿生产能耗分析及碳排放核算[J]. *露天采矿技术*, 2023, 38(6): 83-86.
- GUO Yuanchao. Energy consumption analysis and carbon emission accounting of coal mine production in Pingshuo East Open-pit Mine[J]. *Opencast Mining Technology*, 2023, 38(6): 83-86.
- [33] 葛世荣, 刘洪涛, 刘金龙, 等. 我国煤矿生产能耗现状分析及节能思路[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 9-14.
- GE Shirong, LIU Hongtao, LIU Jinlong, et al. Energy consumption analysis and energy saving strategies for coal mine production in China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 9-14.
- [34] LIU F M, CAI Q X, CHEN S Z, et al. A comparison of the energy consumption and carbon emissions for different modes of transportation in open-cut coal mines[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(2): 261-266.
- [35] 郝成亮. 煤炭与新能源协同发展的路径研究[J]. *煤炭经济研究*, 2023, 43(2): 52-56.
- HAO Chengliang. Research on the path of coordinated development of coal and new energy[J]. *Coal Economic Research*, 2023, 43(2): 52-56.
- [36] 谢和平, 侯正猛, 高峰, 等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术: 原理、现状及展望[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(5): 965-972.
- XIE Heping, HOU Zhengmeng, GAO Feng, et al. A new technology of pumped-storage power in underground coal mine: principles, present situation and future[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(5): 965-972.
- [37] 裴鹏, 任天佑, 李信, 等. 废弃煤矿抽水蓄能发电新技术可行性

- 分析[J]. 山西煤炭, 2020, 40(2): 1-4, 9.
- PEI Peng, REN Tianyou, LI Xin, et al. Feasibility study on new pumped storage power generation technology in abandoned coal mine[J]. Shanxi Coal, 2020, 40(2): 1-4, 9.
- [38] YU S W, WEI Y M, GUO H X, et al. Carbon emission coefficient measurement of the coal-to-power energy chain in China[J]. Applied Energy, 2014, 114(2): 290-300.
- [39] 原野, 赵中秋, 白中科, 等. 露天煤矿复垦生态系统碳库研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5): 903-910.
- YUAN Ye, ZHAO Zhongqiu, BAI Zhongke, et al. Research advances in carbon sequestration of reclaimed ecosystems in opencast coal mining area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(5): 903-910.
- [40] 艾婷, 李志伟. 多专业融合视角下矿山生态修复重建实践探索[J]. 中国煤炭, 2023, 49(S1): 29-35.
- AI Ting, LI Zhiwei. Practice and exploration of mine ecological restoration and reconstruction from the perspective of multidisciplinary integration[J]. China Coal, 2023, 49(S1): 29-35.
- [41] XUE Y Z. Empirical research on household carbon emissions characteristics and key impact factors in mining areas[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256(5): 120470.
- [42] 杨天鸿, 孙东东, 胥孝川, 等. 新疆大型露天矿绿色安全高效开采存在问题及对策[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 1-12.
- YANG Tianhong, SUN Dongdong, XU Xiaochuan, et al. Problems and countermeasures in green, safe and efficient mining of large-scale open-pit mines in Xinjiang[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(1): 1-12.
- [43] ZHU Y F, WANG L P, MA J, et al. Assessment of carbon sequestration potential of mining areas under ecological restoration in China[J]. Science of The Total Environment, 2024, 821(4): 171179.