

# 典型露天煤矿全生命周期碳排放核算及其区域环境影响

刘明奇<sup>1</sup>, 张小平<sup>2</sup>, 王瑜<sup>2</sup>, 杨志鹏<sup>2</sup>, 于昕弘<sup>1</sup>, 胡阿古达木<sup>1</sup>, 杨国庆<sup>1</sup>, 朱颖<sup>1</sup>, 曹英楠<sup>1</sup>, 刘伟<sup>1</sup>,  
郑天龙<sup>3</sup>, 霍耀强<sup>1</sup>, 刘建国<sup>1</sup>

(1. 内蒙古工业大学资源与环境工程学院, 内蒙古呼和浩特 010051; 2. 神华准格尔能源有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 010300;  
3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:**碳排放核算是减污降碳协同增效目标中的重要环节, 煤炭行业是碳减排的重点领域之一。文中以典型露天煤矿为研究对象, 构建煤炭产品全生命周期的碳排放核算模型, 量化矿区各生产环节的碳排放清单, 评估露天矿区碳排放对区域环境的影响。根据全生命周期理论, 将煤矿生产企业的碳排放核算环节分为煤炭开采、煤炭洗选、运输储存、使用消费以及其他步骤, 在核算过程中总结归类碳排放来源。其中, 直接碳排放包括燃料燃烧 CO<sub>2</sub> 排放以及 CH<sub>4</sub> 逸散排放; 间接碳排放包括净购入电力及水力消耗碳排放。结果表明: 露天煤矿年碳排放量为 153 817 8.60 tCO<sub>2</sub>e, 每生产 1 t 原煤排放二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 当量数为 0.05 tCO<sub>2</sub>e, 露天煤矿的碳排放主要来自煤炭开采和矿后活动导致的甲烷 (CH<sub>4</sub>) 逸散排放 (占比 79.92%)。除此之外, 化石燃料燃烧的碳排放占总碳排放量的 13.71%; 电力和水力碳排放占比最少 (6.37%)。我国近 10 a 露天煤矿温室气体年平均碳排放量为  $(3.24 \pm 0.77) \times 10^7$  tCO<sub>2</sub>e, 相当于  $(5.23 \pm 1.24) \times 10^8$  颗树木 1 a 的固碳量, 或 (113.83 ± 27.00) 万公顷杨树林 1 a 的固碳量。同时, 按照目前的开采方法和工艺, 全国每年会产生超过 23 亿元的额外经济支出, 并且随着露天煤矿开采量的增加而逐年增大。因此, 减少煤炭露天开采过程中的碳排放极为重要, 尤其需进一步关注逸散环节。研究结果对煤炭行业构建规范的碳排放核算体系、评估其区域环境影响具有重要的启示意义。

**关键词:** 碳排放; 露天煤矿; 温室气体; 核算模型; 全生命周期

中图分类号: TD355 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)06-3072-13

## Full lifecycle carbon emissions accounting and regional environmental impact assessment of typical open-pit coal mines

LIU Mingqi<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoping<sup>2</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>, YANG Zhipeng<sup>2</sup>, YU Xinhong<sup>1</sup>, HU Agudamu<sup>1</sup>, YANG Guoqing<sup>1</sup>,  
ZHU Ying<sup>1</sup>, CAO Yingnan<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, ZHENG Tianlong<sup>3</sup>, HUO Yaoqiang<sup>1</sup>, LIU Jianguo<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Control and Institutions in Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051; 2. Shenhua Zhungeer Energy Co., Ltd., Ordos 010300; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

**Abstract:** Carbon emission accounting is an indispensable and important part of the synergistic goal of pollution reduc-

收稿日期: 2024-07-17 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0844

基金项目: 内蒙古自治区本级引进人才科研支持资助项目 (DC2300001435); 鄂尔多斯科技重大专项资助项目 (ZD20232301); 准格尔旗应用技术研究与开发资助项目 (2023YY-13)

作者简介: 刘明奇 (2000—), 男, 黑龙江大庆人, 硕士研究生。E-mail: mingqi0529@outlook.com

通讯作者: 霍耀强 (1993—), 男, 内蒙古包头人, 博士, 讲师。E-mail: yqhuo@imut.edu.cn

引用格式: 刘明奇, 张小平, 王瑜, 等. 典型露天煤矿全生命周期碳排放核算及其区域环境影响[J]. 煤炭学报, 2025, 50(6): 3072-3084.

LIU Mingqi, ZHANG Xiaoping, WANG Yu, et al. Full lifecycle carbon emissions accounting and regional environmental impact assessment of typical open-pit coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(6): 3072-3084.



移动阅读

tion and carbon reduction, and the coal industry is one of the key areas of carbon emission reduction. In this study, a typical open-pit coal mine was taken as the research object, a carbon emission accounting model for the whole life cycle of coal products was constructed, the carbon emission inventory of each production link in the mining area was quantified, and the impact of carbon emissions in the open-pit mining area on the regional environment was evaluated. According to the life cycle assessment (LCA) methodology, the carbon emissions of coal mining enterprises can be categorized into phases including coal extraction, coal beneficiation, transportation and storage, utilization and consumption, as well as other associated processes. Within this model, sources of carbon emissions have been systematically summarized. Direct carbon emissions encompass CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion and methane (CH<sub>4</sub>) fugitive emissions. Indirect carbon emissions, on the other hand, include those associated with the net purchase of electricity and water consumption. The results of the accounting process indicate that the annual carbon emission of open-pit coal mine is 1 538 178.60 tCO<sub>2</sub>e, and the carbon dioxide equivalent emission per 1 t of raw coal produced is 0.05 tCO<sub>2</sub>e, which mainly comes from methane fugitive emissions caused by coal mining and post-mine activities (accounting for 79.92%). In addition, carbon emissions from fossil fuel combustion account for 13.71% of the total carbon emissions; whereas emissions associated with electricity and water consumption represent the smallest proportion, at 6.37%. The average annual greenhouse gas emissions of open-pit coal mines in China in the past ten years are  $(3.24 \pm 0.77) \times 10^7$  tCO<sub>2</sub>e, which is equivalent to the annual carbon sequestration of  $(5.23 \pm 1.24) \times 10^8$  trees, which is converted into the annual carbon sequestration of  $(113.83 \pm 27.00)$  hectares of poplar forests. At the same time, according to the current mining methods and processes, the country will generate more than 2.3 billion yuan of additional economic expenditure every year, and with the increase in open-pit coal mining, it will increase year by year. Therefore, reducing carbon emissions during the open-pit coal mining process is of significant importance, with particular emphasis needed on mitigating fugitive emissions. The research findings have significant implications for the development of a standardized carbon emissions accounting system in the coal industry and for assessing its regional environmental impact.

**Key words:** carbon emission accounting; open-pit mines; greenhouse gas; accounting model; life cycle

## 0 引 言

我国是能源消耗大国,2022年我国的能源消费总量达到54.1亿t标准煤,其中煤炭资源的开采和使用占有很大的比例<sup>[1]</sup>,其占能源消费总量的56.2%。煤炭开采分为井工开采和露天开采2种方式,其中露天开采以较低的能耗、更安全的作业工艺等优势,成为了一种常用的煤炭开采方法,并且在国家煤炭安全生产管理规划中处于优先发展的地位<sup>[2]</sup>。煤炭开采加工业属于高耗能产业,其能耗在38个工业从属行业中排名第7位<sup>[3]</sup>,露天煤矿在开采过程中通过耗能及逸散等形式造成大量温室气体排放<sup>[4]</sup>。过量的温室气体会导致温室效应和全球变暖、气候变化与极端天气事件、冰川与极地融化、生物多样性减少等一系列问题<sup>[5]</sup>。

对于露天矿区温室气体排放的相关研究尚缺乏科学准确的碳排放核算体系,无法精准量化温室气体的排放情况,评估其减排效果。现有的关于厂区内层面的碳排放核算主要参考联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)发布《国家温室气体清单指南体系》以及我国发

布的《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》(简称《指南》)进行核算。其中,IPCC提供的方法包含厂区内所有涉及到可能产生碳排放的部分和相对应的计算方法,但是有关参数的选择和计算并不完全贴合我国露天矿区的实际情况;而指南中的核算方法又没有完全包含核算主体中所有可能涉及的碳排放环节,只包括主要生产过程的<sup>[6]</sup>。为弥补这一不足,徐宏祥等<sup>[7]</sup>对比分析不同种类的碳排放核算方法,梳理了目前在这一领域中比较权威的碳排放核算标准,包括IPCC制定的国家温室气体核算指南,WRI、C40和ICLEI出台的城市温室气体核算标准,世界资源研究所和世界可持续发展工商理事会公布的温室气体核算体系以及ISO制定的温室气体排放系列标准等,并据此完善了选煤厂的碳排放统计核算体系;郭远超等<sup>[8]</sup>通过核算露天矿区生产活动的碳排放量,提出了节能减排的策略和方案,但是并未覆盖整个煤炭生产企业诸如煤炭洗选,新水消耗等所有碳排放环节。因此,当前关于露天煤矿碳排放核算方法不够完善,缺乏针对露天煤矿全流程各生产环节温室气体排放的核算方法体系。

全生命周期碳排放核算方法的发展和应用,为探

究露天矿区温室气体排放特征提供了帮助。生命周期理论最早由美国经济学家雷蒙德·弗农提出<sup>[9]</sup>,该理论从产品生产的全过程出发,分析了创新期、成长期、成熟期、标准化期和衰亡期 5 个不同的生产阶段。全生命周期碳排放核算被广泛应用于建筑行业、制造业、农业和食品行业等,综合考虑了从原材料获取、生产制造、分销、使用、直至最终处置或再循环所有阶段的温室气体排放情况。陈昊等<sup>[10]</sup>利用全生命周期的碳核算方法得出了建筑物的温室气体排放量,认为建筑物运行阶段和建筑材料生产阶段的碳排放总量极高,二者相加接近建筑物全生命周期碳排放的 90% 以上。康小平等<sup>[11]</sup>针对制造业的碳排放问题,利用全生命周期法核算电动汽车从生产到回收整个过程的碳排放量,单车的全生命周期碳排放量为 2 017 8.91 kg。但是在露天矿区碳排放核算过程中尚未充分利用全生命周期这一理念。

较全面地核算露天煤矿开采全过程中温室气体的排放量,能够进一步优化矿区的能源消耗结构并评估碳排放情况。笔者以内蒙古某露天矿区为例,利用全生命周期碳排放核算的方法,构建露天煤矿碳排放核算模型,量化露天煤矿全生命周期的碳排放清单,以揭示各生产环节碳排放特征和强度,进而分析露天矿区碳排放的环境和经济效益。研究结果为露天矿区减污降碳协同增效措施提供了重要的参考价值。

## 1 核算方法与数据来源

### 1.1 碳排放核算模型构建

#### 1.1.1 核算方法的选择

基于《IPCC 温室气体核算指南》与《中国煤炭生产企业温室气体排放核算指南》,结合全生命周期理论,构建碳排放核算模型。除此之外,利用单位煤炭的碳排放效率衡量煤炭企业的相对碳排放量高低,并以此提出相关建议,以期优化煤炭行业的碳排放管理体系提供了新的视角和技术支撑。

#### 1.1.2 露天矿区核算边界的界定

以整个露天矿区为例,其主体以独立企业单位为核算边界,核算在运营上受其控制的所有生产设计及附属设施产生的温室气体排放量。设施范围包括基本生产系统、辅助生产系统以及直接为生产服务的附属生产系统。其中辅助生产系统包括运输、提升、排水降尘系统以及厂区内的动力、供电、采暖、制冷、机修和仓库等等,附属生产系统包括生产指挥系统(厂部)以及厂区内为生产服务的部门和单位(如职工食堂、车间浴室等)。

笔者将煤炭作为产品,从煤炭开采、洗选、运输、

直到燃烧使用等整个工艺流程的全生命周期的角度进行分析和核算。在煤炭作为产品的整个生命周期中,将其分为煤炭开采、煤炭洗选、运输储存、使用消费以及其他步骤等 5 个环节。

除此之外,根据露天煤矿的生产实际,其碳排放核算系统边界包括:以生命周期为时间线,整个矿区基本生产系统、辅助生产系统以及直接为生产服务的附属生产系统为范围。即当煤炭从被开采操作开始,到其成为产品在厂内消耗或外运至其他区域为止,期间在该矿区划分范围内的所有碳排放活动都算作该露天煤矿的碳排放<sup>[12]</sup>。计算整个过程中区域内所有的碳排放量,最后得出单位煤炭产品生产所排放的 CO<sub>2</sub> 当量。

#### 1.1.3 碳排放源的识别

研究区域露天煤矿企业的运营过程中,将其分为煤炭开采、煤炭洗选、运输储存、使用消费以及辅助环节等 5 个环节。通过生命周期工艺流程识别排放源所划分的碳排放核算边界如图 1 所示。

露天煤矿全生命周期碳排放核算的首要环节是煤炭的开采,也是煤炭产品生命周期的起点,主要包括:穿孔、爆破、采装、破碎、运输、排土和辅助等。其中直接碳排放有开采、运输车辆的燃料燃烧、露天开采特有的炸药爆破<sup>[13]</sup>、煤炭的非受控自燃以及开采过程中造成的煤层气逸散等;而间接碳排放则包括开采过程中的电力消耗、降尘用水的使用等。

已经开采出的原煤被运输到洗选厂进行煤炭洗选,这一环节主要涉及 3 个部分,即分选前的准备作业、分选作业以及分选后的产品处理。选煤环节的各个部分都需要使用大型机械,还有采暖、空调、照明、电器和通风设备等,因此会消耗大量电能并产生大量的间接碳排放;在分选过程中除了需要循环水外还需要消耗大量的新水,该过程中的碳排放也属于间接碳排放;同时,在整个分选过程中,运输、洗选等均会排放出残留在煤炭中的甲烷(CH<sub>4</sub>)气体,这一部分的碳排放问题属于矿后 CH<sub>4</sub> 逃逸的直接碳排放;最后,整个环节涉及到的产品和人员等交通运输的燃油消耗也会产生直接碳排放。

经过洗选后的煤炭产品可以运输至储存地或进行外卖,即一部分商品煤进入存储环节,另一部分商品煤则会被用作燃料燃烧使用。若该采矿企业有供暖锅炉,那么就会在冬季使用煤炭自行采暖。这一环节主要涉及到的直接碳排放有运输车辆的燃油燃烧,商品煤使用过程的燃烧;间接排放包括采暖时的电力、水力消耗等。

除了以上说明的从煤炭被开采出来到燃烧使用



图 1 露天矿区煤炭生产企业核算边界和温室气体排放源示意

Fig.1 Schematic diagram illustrating the accounting boundary and greenhouse gas emission sources for an open-pit coal mining operation. 除公务人员和厂区运营车辆的燃油燃烧、食堂燃气灶燃料燃烧、厂区污水处理和生活垃圾处理等属于直接碳排放外, 矿山公路洒水和绿化、办公区用电用水等均属于间接碳排放。综上所述, 总结露天矿区煤炭开采企业运营过程中的主要碳排放设施及环节汇总见表 1。

表 1 主要碳排放设施及环节汇总

Table 1 Summary table of major carbon emission facilities and processes

排放类型	排放类别	排放设施	排放来源
直接碳排放	燃料燃烧CO <sub>2</sub> 排放	厂内生产车辆	燃烧柴油产生的CO <sub>2</sub> 排放
		公务用车	燃烧汽油产生的CO <sub>2</sub> 排放
		燃煤锅炉	商品煤燃烧产生的CO <sub>2</sub> 排放
		爆破炸药	开采所用炸药爆炸产生的CO <sub>2</sub> 排放
		燃气锅炉	天然气燃烧产生的CO <sub>2</sub> 排放
	CH <sub>4</sub> 逸散	煤炭非受控自燃	原煤燃烧产生的CO <sub>2</sub> 排放
		食堂	醇基燃料燃烧产生的CO <sub>2</sub> 排放
		露天开采	露天开采的CH <sub>4</sub> 逃逸排放
		矿后活动	开采后原煤洗选的CH <sub>4</sub> 逸散
		污水处理	污水处理产生的CH <sub>4</sub> 排放
间接碳排放	净购入电力	生产区和生活区	消耗外购电力产生的CO <sub>2</sub> 排放
	水力使用	降尘用水等	产区消耗新水产生的CO <sub>2</sub> 排放

1.1.4 碳排放核算模型的建立

参照表 1, 可以汇总得出露天矿区的温室气体 (Greenhouse Gas, GHG) 排放总量等于燃料燃烧时的 CO<sub>2</sub> 排放量、CH<sub>4</sub> 逃逸排放量、净购入电力和热力隐含的 CO<sub>2</sub> 排放量之和。因此可以依据以上内容构建

碳排放核算模型, 设定碳排放的核算周期为 1 a, 即当年生产商品煤所排放的 CO<sub>2</sub> 当量 E<sub>G</sub>, tCO<sub>2</sub>e。即:

$$E_G = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (1)$$

式中: E<sub>1</sub> 为燃料燃烧和炸药爆炸所产生的碳排放当量,

$t\text{CO}_2\text{e}$ ;  $E_2$  为煤炭开采过程中的温室气体逸散所产生的碳排放当量,  $t\text{CO}_2\text{e}$ ;  $E_3$  为企业日常运营所消耗电力所产生的碳排放当量,  $t\text{CO}_2\text{e}$ ;  $E_4$  为企业日常运营所消耗新水所产生的碳排放当量,  $t\text{CO}_2\text{e}$ 。

1) 燃料燃烧和炸药爆炸所产生的碳排放量计算过程为

$$E_1 = AD_i \times EF_i \quad (2)$$

式中:  $E_1$  为不同燃料燃烧所产生的碳排放当量,  $t\text{CO}_2\text{e}$ ;  $AD$  为第  $i$  种燃料的年使用量,  $t/a$  或  $\text{Nm}^3/a$ ;  $EF_i$  为第  $i$  种燃料所对应的碳排放因子,  $t\text{CO}_2\text{e}/t$ 。

2) 煤炭开采过程中的温室气体逸散所产生的碳排放量计算过程为

$$E_2 = AD_j \times EF_j \times \text{GWP}_j \quad (3)$$

式中:  $E_2$  为煤炭开采过程中和矿后活动等逸散环节所产生的碳排放当量,  $t\text{CO}_2\text{e}$ ;  $AD_j$  为第  $j$  个环节产生逸散物质的量,  $t/a$ ;  $EF_j$  为第  $j$  个环节逸散过程涉及的碳排放因子,  $t\text{CO}_2\text{e}/t$ ;  $\text{GWP}_j$  为全球变暖潜能值。

3) 企业日常运营所消耗电力产生的碳排放量计算过程为:

$$E_3 = AD_m \times EF_m \quad (4)$$

式中:  $E_3$  为企业所消耗的净购入电力产生的碳排放当量,  $t\text{CO}_2\text{e}$ ;  $AD_m$  为企业消耗的电量,  $\text{MWh}/a$ ;  $EF_m$  为当地电力使用的碳排放因子,  $t\text{CO}_2\text{e}/\text{MWh}$ 。

4) 企业日常运营所消耗新水所产生的碳排放量计算过程为

$$E_4 = AD_n \times EF_n \quad (5)$$

式中:  $E_4$  为企业消耗新水时产生的碳排放当量,  $t\text{CO}_2\text{e}$ ;  $AD_n$  为企业耗水量,  $t/a$ ;  $EF_n$  为水力消耗的碳排放因子,  $t\text{CO}_2\text{e}/t$ 。

## 1.2 排放因子的确定

### 1.2.1 物质燃烧的碳排放因子

#### 1) 燃料燃烧的碳排放因子

露天煤矿生产企业涉及的燃料主要包括烟煤、天然气、汽油、柴油以及醇基燃料。这些燃料的碳排放因子  $EF_i$  可以由缺省值或实测值计算得出。若其中有燃料的含碳量 (Carbon Content, CC) 未进行实测, 可以根据《指南》的规定, 取低位发热量和单位热值含碳量的默认值, 二者相乘即可计算得出相对应燃料的含碳量。若燃料的碳氧化率 (Oxidation Factor, OF) 若未进行实测, 也可以根据《指南》的规定, 取相对应的缺省值。核算所涉及到的燃料的相关数据见表 2。

其中醇基燃料为液态甲醇, 若醇基燃料的含碳量 CC 未进行实测, 可以将甲醇体积分数按 75% 计算, 根据甲醇分子式  $\text{CH}_3\text{OH}$  可计算得出含碳量为  $0.38 t\text{C}/t$ , 考虑纯度后的醇基燃料含碳量为  $0.28 t\text{C}/t$ 。

燃料的碳排放因子可以通过《指南》中提供的计算方法计算得出:

$$EF_i = \text{CC} \times \text{OF} \times \frac{44}{12} \quad (6)$$

式中:  $EF_i$  为碳排放因子,  $t\text{CO}_2\text{e}/t$ ;  $i$  为不同种类的燃料; CC 为燃料的含碳量,  $t\text{C}/t$ ; OF 为燃料的碳氧化率, %。

表 2 碳排放核算模型所涉及燃料的计算参数

Table 2 Calculation parameters of fuels involved in the carbon emission accounting model

燃料名称	低位发热量	单位热值含碳量/( $t\text{C} \cdot \text{GJ}^{-1}$ )	碳氧化率/%	碳排放因子	数值来源
烟煤	20.22 GJ/t	0.03	93	1.80 $t\text{CO}_2\text{e}/t$	实测值
天然气	389.31 GJ/( $\text{万Nm}^3$ )	0.02	99	21.62 $t\text{CO}_2\text{e}/(\text{万m}^3)$	缺省值
汽油	44.80 GJ/t	0.02	98	3.04 $t\text{CO}_2\text{e}/t$	缺省值
柴油	43.33 GJ/t	0.02	98	3.15 $t\text{CO}_2\text{e}/t$	缺省值
醇基燃料	—	—	98	1.01 $t\text{CO}_2\text{e}/t$	缺省值

#### 2) 爆破炸药的碳排放因子

露天矿用常用的炸药主要有 5 种, 分别为铵梯炸药、铵油炸药、浆状炸药、水胶炸药和乳化炸药。

在计算常用炸药的碳排放因子时可以采用 Brinkley-Wilson(B-W) 方法, 该方法是确定反应方程式时经常使用的一种方法, 产物确定的原则为以能量为先, 先将 H 原子全部生成  $\text{H}_2\text{O}$ , 剩余 O 原子先与 C 生成 CO, 若 O 原子还未全部使用, 再使 CO 生成  $\text{CO}_2$  (即  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}-\text{CO}_2$  方法)。经计算可得出部分常

用炸药的碳排放因子见表 3。

#### 1.2.2 逸散过程中的碳排放因子

目前, 我国发布了《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南 (试行)》, 除此之外世界上其他的产煤大国大多数都采用了 IPCC2006 的方法核算碳排放量<sup>[14]</sup>。所以文中结合上述 2 种方法及其他产煤大国清单编制经验综合分析后, 认为采用《指南》中的逸散碳排放因子更加符合我国的国情和实际情况。

表 3 露天煤矿部分常用炸药的碳排放因子  
Table 3 Carbon emission factors for commonly used explosives in open-pit coal mines

炸药名称	氧平衡	炸药类型	碳排放因子/(tCO <sub>2</sub> e · t <sup>-1</sup> )
硝酸炸药	正氧	一类	0.26
岩石硝酸炸药	正氧	一类	0.23
2号岩石硝酸炸药	正氧	一类	0.22
铵油炸药	负氧	二类	0.18
抗水铵油炸药	正氧	一类	0.19
露天铵油炸药	负氧	二类	0.19
铵沥蜡炸药	正氧	一类	0.21

### 1) 开采过程中的碳排放因子

露天开采过程中会产生 CH<sub>4</sub> 气体的逸散问题, 根据《指南》, 可得露天开采时每开采出 1 t 原煤时的 CH<sub>4</sub> 碳排放因子为 1.34 kgCH<sub>4</sub>/t。在 IPCC2006 国家温室气体清单指南 2019 修订版中查询得 CH<sub>4</sub> 的全球变暖潜能值 (Global Warming Potential, GWP) 为 23, 故其逸散过程中的碳排放因子计算过程为

$$EF_1 = EF_2 \times GWP \quad (7)$$

式中:  $EF_1$  为露天开采中产生 CO<sub>2</sub> 当量的碳排放因子, tCO<sub>2</sub>e/t;  $EF_2$  为露天开采中产生 CH<sub>4</sub> 的碳排放因子, tCH<sub>4</sub>/t; GWP 为 CH<sub>4</sub> 的全球变暖潜能值。

经过计算可得露天矿开采过程中逸散过程中的碳排放因子为 0.03 tCO<sub>2</sub>e/t。

### 2) 开采后的碳排放因子

露天煤炭开采后仍会产生 CH<sub>4</sub> 的逸散, 根据《指南》, 可得露天开采方式每开采出 1 t 原煤时的 CH<sub>4</sub> 碳排放因子为 0.50 m<sup>3</sup>/t, CH<sub>4</sub> 密度按标准状况 (1 个标准大气压, 20 °C) 下 0.67 kg/m<sup>3</sup> 进行计算。其逸散碳排放因子计算过程为

$$EF_3 = EF_4 \times GWP \times \rho \quad (8)$$

式中:  $EF_3$  为露天开采后产生 CO<sub>2</sub> 的碳排放因子, tCO<sub>2</sub>e/t;  $EF_4$  为露天开采后产生 CH<sub>4</sub> 的碳排放因子, tCH<sub>4</sub>/t; GWP 为 CH<sub>4</sub> 的全球变暖潜能值;  $\rho$  为甲烷的密度, kg/m<sup>3</sup>。

经过计算可得露天煤矿采后逸散的碳排放因子为 0.01 tCO<sub>2</sub>e/t。

### 3) 污水处理过程中的碳排放因子

污水处理过程中的碳排放问题的研究目前较少, 文中按照 IPCC 中所给核算标准进行计算, 计算过程为

$$EF_5 = B_0 \times MCF \times 23 \quad (9)$$

式中:  $EF_5$  为污水处理碳排放因子, kgCO<sub>2</sub>e/kgCOD;  $B_0$  为 CH<sub>4</sub> 的最大产生能力, kgCH<sub>4</sub>/kgCOD, 一般采用厂里排放污水特定数据, 但详尽的特定数据较难获取, 如果没有该数据, 则采用 IPCC 所提供的 COD 缺省因子为 0.25 kgCH<sub>4</sub>/kgCOD; MCF 为 CH<sub>4</sub> 修正因子。

根据 IPCC 温室气体排放清单, 对于未处理的工业废水, 若直接向海洋、河流、湖泊排放则 MCF 值取 0.10。有些废水排放的有机物含量过高可能导致变成厌氧环境, 此处暂时不予考虑。对于管理完善、CH<sub>4</sub> 会从沉积池或其他料袋排放出来的耗氧处理厂, MCF 取 0; 对于管理不完善、过载的耗氧处理厂, MCF 取 0.30; 对于污泥的厌氧酸化池, 和厌氧反应堆 (如上流式厌氧污泥床反应器, 固定膜反应堆), MCF 取 0.80, 此处不考虑 CH<sub>4</sub> 回收; 对于深度不足 2 m 的厌氧化粪池, MCF 取 0.20; 对于深度超过 2 m 的厌氧化粪池, MCF 取 0.80。

### 4) 生活垃圾处理过程中的碳排放因子

矿区一般使用卫生填埋的方式自行处理生活垃圾。生活垃圾的厌氧填埋过程中, 在无 CH<sub>4</sub> 收集处理的情况下, 其碳排放量达到最大值, CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的排放因子分别为:

$$EF_6 = DOC \times DOC_f \times MCF \times F \times \frac{16}{12} \quad (10)$$

$$EF_7 = DOC \times DOC_f \times (1 - MCF \times F) \times \frac{44}{12} \quad (11)$$

式中:  $EF_6$  为生活垃圾处理产生 CH<sub>4</sub> 的碳排放因子, tCH<sub>4</sub>/t;  $EF_7$  为生活垃圾处理产生 CO<sub>2</sub> 的碳排放因子, tCO<sub>2</sub>e/t; DOC 为可降解有机碳, 清单中东亚国家缺省值一般推荐 14%;  $DOC_f$  为实际可以分解的可降解有机碳的比例, IPCC 推荐值为 50%; MCF 为 CH<sub>4</sub> 氧化因子, 厌氧填埋场取 100%, 准好氧填埋场存在半有氧环境, 产生的 CH<sub>4</sub> 较少; F 为填埋气中 CH<sub>4</sub> 体积分数。最后可得露天矿区生活垃圾卫生填埋产生的最大可能碳排放因子为 1.11 tCO<sub>2</sub>e/t。

### 1.2.3 电力消耗过程中的碳排放因子

为了准确追踪和评估不同电力生产方式对环境的影响, 美国、澳大利亚、加拿大、英国和新西兰等国家已经建立起定期编制并发布其国内电网的整体碳排放因子数据报告的相关机制<sup>[15-17]</sup>, 其中详尽涵盖了火电、水电、风电和核电等各种电力来源所产生的综合温室气体排放情况。这一举措旨在提高能源使用的透明度, 并支持各自的气候行动与可持续发展目标<sup>[18-19]</sup>。

我国一般采用区域电网排放因子计算电力消耗

过程的碳排放量,但我国地区之间差异较大,并且地区之间常存在电力交换,所以部分学者提出了不同的电网排放因子清单。

宋然平等<sup>[20]</sup>提出的我国区域电网企业外购电力排放因子,与国际上通行的电网排放因子含义相同,包含了所有电力类型的综合排放因子,除考虑数据的可获得性时,将内蒙古统一放在华北电网外,电网排放因子清单中不同电网区域的划分与我国区域电网实际分布基本一致;另外还考虑了电网间电力交换的影响,因此宋然平等人提出的电力排放因子是当前我国核算电力间接碳排放量较为合适的电网因子选择。文献<sup>[20]</sup>提出的我国区域电网企业外购电排放因子如下:华北、东北、华中、华东、西北和南方地区的外购电排放因子分别为 11.33、11.42、7.06、7.88、8.16、6.73 tCO<sub>2</sub>/(10 MWh)。

参照文献<sup>[20]</sup>,马翠梅等<sup>[21]</sup>探究了我国省级电网温室气体排放因子的计算方法,且考虑到了进出口电力以及省级交换电力,与区域级电网因子相比,省级电网因子的核算结果更加精确,具体数据见表 4。

表 4 省级电网温室气体排放因子 kgCO<sub>2</sub>e  
Table 4 Greenhouse gas emission factors for provincial power grids kgCO<sub>2</sub>e kWh

地区	排放因子	地区	排放因子
北京	0.98	河南	1.04
天津	1.02	湖北	0.43
河北	1.10	湖南	0.65
山西	1.09	重庆	0.69
内蒙古	1.19	四川	0.36
山东	1.07	广东	0.69
辽宁	1.09	广西	0.52
吉林	1.02	贵州	0.77
黑龙江	1.11	云南	0.55
上海	0.81	海南	0.73
江苏	0.82	陕西	1.02
浙江	0.72	甘肃	0.69
安徽	0.91	青海	0.27
福建	0.56	宁夏	1.08
江西	0.90	新疆	0.85

### 1.2.4 新水消耗过程的碳排放因子

新水消耗过程的排放因子等于水折煤系数乘以标煤的排放因子。根据《综合能耗计算通则》(GB/T2589—2020),新水折煤系数为 0.09 kg/t,根据《可再生能源建筑应用示范项目测评导则》,标准煤 CO<sub>2</sub> 的排放因子

为 2.47 tCO<sub>2</sub>e/t,故新水消耗过程的的排放因子为  $2.12 \times 10^{-4}$  tCO<sub>2</sub>e/t。

## 1.3 数据来源及不确定性分析

### 1.3.1 数据来源与参数确定

选取内蒙古自治区鄂尔多斯市某露天煤矿开采企业为研究对象,该企业是我国自行设计、自行施工的特大型露天煤矿,目前该矿的核定生产能力为 3 400 万 t/a。其主要产品为原煤,以 2021 年为例,该年度的产量为 3 393.76 万 t。

该露天煤矿企业运营过程中各排放源的活动水平数据来自于企业的生产统计台账数据、发票数据运营记录及年度报告等,数据的选用原则依据《指南》中规定,对多个活动水平数据来源进行交叉验证,以选用数据质量更高、更准确的数据。相关参数及排放因子主要来源于《指南》中的缺省值和企业实验室的实测值。排放源活动水平数据、相关参数及排放因子的来源见表 5—表 6。

### 1.3.2 不确定性分析

为了进一步量化企业碳排放数据核算过程的不确定性,根据表 5—表 6,采用误差传播法计算不确定性,该过程主要应用 2 个误差传播公式,一是加减运算的误差传播公式,二是乘除运算的误差传播公式<sup>[25]</sup>。

当不确定性由乘法合并时,计算过程为

$$U_i = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_i^2} \quad (12)$$

式中:  $U_i$  为总的的不确定性;  $U_j$  为每个相乘量的不确定性。

当不确定性由加法或减法合并时,计算过程如下:

$$U_i = \frac{\sqrt{(U_1 \times x_1)^2 + (U_2 \times x_2)^2 + \dots + (U_j \times x_j)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_j|} \quad (13)$$

式中:  $U_j$  为每个相加/减量的不确定性;  $x_j$  为每个相加/减的数值。

露天煤矿碳排放核算的不确定性分析结果见表 7。由表 7 可知:本文案例核算过程活动水平数据和相关参数选取合理,对结果不确定性影响较小,露天煤矿碳排放总量的不确定性为 3.90%,数据可信度较高。

## 2 结果与讨论

### 2.1 露天煤矿各生产环节活动水平

在以企业经营主体为研究对象的碳排放核算中,涉及的活动水平数据包括包括化石燃料(原煤、天然气、汽油、柴油、醇基燃料和炸药等)的消耗量、原煤产量、污水处理量、生活垃圾处理量、净购入电力使用量以及新水的消耗量等。经统计,该露天煤矿 2021 年度涉及的各种活动水平数据见表 8。

表5 排放源活动水平数据来源及不确定性

Table 5 Emission source activity level data sources and uncertainties

排放源类型	活动水平数据	数据来源	监测方法	不确定性/%
燃煤锅炉	烟煤消耗量	能源统计表、生产统计报表	磅秤	0.17
燃气锅炉	天然气消耗量	外购发票、发票转供量、天然气购销台帐、能源统计表	天然气计量表具	2.00
厂内生产车辆	柴油消耗量	外购发票、能源统计表、生产统计报表	磅秤	0.17
公务用车	汽油消耗量	外购发票、能源统计表、生产统计报表	磅秤	0.17
食堂灶具	醇基燃料消耗量	外购发票、能源统计表、生产统计报表	计量表具	2.00
爆破炸药	炸药消耗量	外购发票、能源统计表、生产统计报表	磅秤	0.17
开采过程中逸散	原煤产量	销售发票、销售台帐、生产统计报表	磅秤	0.17
煤矿开采后逸散	原煤产量	销售发票、销售台帐、生产统计报表	磅秤	0.17
污水处理产生的逸散	污水处理量	处理报表	流量计	0.06
生活垃圾填埋产生的逸散	生活垃圾处理量	处理报表	磅秤	0.17
耗电设备等	净购入电量	外购电力发票、外购电力台帐、转供电力发票、转供电力台帐、能源统计表	电表	0.50
厂内用水	耗水量	外购发票、能源统计表、生产统计报表	流量计	0.06

注: 1. 不确定性依据表具有精度等级和校验报告, 其中外购电力和天然气活动水平的不确定性来自《用能单位能源计量器具配备和管理通则》(GB 17167—2006)<sup>[22]</sup>中电能表I类用户的准确度等级要求。2. 煤炭洗选过程中确实会伴随着一定的物料损耗, 这一过程旨在去除原煤中的杂质(如矸石、泥土等), 从而提升煤炭的质量。理论上, 所有产出的原煤均需经过洗选处理。因此, 在煤炭开采阶段的碳排放核算(煤炭开采过程中)问题应限于从煤炭开采直至原煤进入选煤厂之前的甲烷等温室气体的逸散量; 而煤炭开采之后核算则涵盖自煤炭进入选煤厂起直至最终储存或使用期间所产生的逸散量, 均使用原煤产量作为活动水平数据进行核算<sup>[23]</sup>。

表6 排放源排放因子及相关参数来源及不确定性

Table 6 Emission factor and related parameter sources for emission sources, and associated uncertainties

排放源类型	排放因子及相关参数	数值	来源
烟煤燃烧	烟煤低位发热量/( $\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ )	20.22	企业实验室实测值
	烟煤单位热值含碳量/( $\text{tC} \cdot \text{GJ}^{-1}$ )	0.03	缺省值
	烟煤碳氧化率/%	93	缺省值
天然气燃烧	天然气低位发热量/( $\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ )	389.31	缺省值
	天然气单位热值含碳量/( $\text{tC} \cdot \text{GJ}^{-1}$ )	0.02	缺省值
	天然气碳氧化率/%	99	缺省值
汽油燃烧	汽油低位发热量/( $\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ )	44.80	缺省值
	汽油单位热值含碳量/( $\text{tC} \cdot \text{GJ}^{-1}$ )	0.02	缺省值
	汽油碳氧化率/%	98	缺省值
柴油燃烧	柴油低位发热量/( $\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ )	43.33	缺省值
	柴油单位热值含碳量/( $\text{tC} \cdot \text{GJ}^{-1}$ )	0.02	缺省值
	柴油碳氧化率/%	98	缺省值
醇基燃料燃烧	醇基燃料单位热值含碳量/( $\text{tC} \cdot \text{t}^{-1}$ )	0.28	缺省值
	醇基燃料碳氧化率/%	98	缺省值
炸药	炸药碳排放因子/( $\text{tCO}_2\text{e} \cdot \text{t}^{-1}$ )	0.26	缺省值
采中逸散	开采过程中逸散碳排放因子/( $\text{tCO}_2\text{e} \cdot \text{t}^{-1}$ )	0.03	缺省值
矿后活动	开采后逸散碳排放因子/( $\text{tCO}_2\text{e} \cdot \text{t}^{-1}$ )	0.01	缺省值
污水处理	碳排放因子/( $\text{tCO}_2\text{e} \cdot \text{t}^{-1}$ )	0.05	缺省值
生活垃圾处理	碳排放因子/( $\text{tCO}_2\text{e} \cdot \text{t}^{-1}$ )	1.11	缺省值
净购入电力	碳排放因子/( $\text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{kWh}^{-1}$ )	1.19	缺省值
净购入新水	碳排放因子/( $\text{tCO}_2\text{e} \cdot \text{t}^{-1}$ )	0.01	缺省值

注: 基于我国2008年温室气体清单研究数据开展不确定性评估<sup>[24]</sup>。

表 7 露天煤矿碳排放核算的不确定性分析

Table 7 Uncertainty analysis of carbon emissions calculation for open-pit coal mines

排放类型	排放源	相乘量的不确定性/%	相加/减量的不确定性/%
燃料燃烧	燃煤锅炉	9.00	—
	燃气锅炉	7.42	—
	厂内生产车辆	7.35	—
	公务用车	7.35	—
	食堂灶具	5.74	—
	爆破炸药	8.00	—
逸散	开采过程中逸散	50.00	—
	矿后活动的逸散	50.00	—
	污水处理产生的逸散	28.00	—
	生活垃圾填埋产生的逸散	20.00	—
电力	耗电设备等	5.68	—
新水	厂内用水	1.00	—
排放总量	—	—	3.90

表 8 某露天矿区企业 2021 年度活动水平数据

Table 8 Activity level data for a specific open-pit mining operation in the year 2021

排放设施	活动水平数据	消耗量
燃煤锅炉	烟煤消耗量/t	6 358.61
燃气锅炉	天然气消耗量/万m <sup>3</sup>	108.21
场内生产车辆	柴油消耗量/t	58 916.11
公务用车	汽油消耗量/t	140.00
食堂灶具	醇基燃料消耗量/t	389.22
爆破炸药	炸药消耗量/t	41 469.77
开采过程中逸散	原煤产量/t	33 937 567.00
矿后活动的逸散	原煤产量/t	33 937 567.00
污水处理产生的逸散	污水处理量/t	263 686.00
生活垃圾填埋产生的逸散	生活垃圾处理量/t	150.00
耗电设备等	净购入电量/MWh	82 080.62
厂内用水	耗水量/t	1 183 395.70

## 2.2 矿区全生命周期碳排放清单

从露天煤炭开采企业的实际情况出发,以煤炭产品的全生命周期作为评价流程,结合 IPCC 国家温室气体核算指南和我国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南,并参考了以往学者的研究,成功构建了露天矿区碳排放核算模型。将企业所有涉及的碳排放环节进行了合理地计算,其结果符合国家实际以及国际标准,并以此分析了该企业的碳排放情况,见表 9。

经核算后得出该企业 2021 年碳排放量共计 1 538 178.60 tCO<sub>2</sub>e,即每生产 1 t 原煤排放 CO<sub>2</sub> 当量数为 0.05 tCO<sub>2</sub>e。其中,逸散过程的碳排放量占比最

大,达到了 79.92%;化石燃料燃烧的碳排放量占总碳排放量的 13.71%;电力和水力碳排放占比则最少,占比 6.37%,如图 2 所示。化石燃料燃烧和逸散均属于直接碳排放,故该企业的直接碳排放为主要碳排放源,其中煤炭开采和矿后活动导致的 CH<sub>4</sub> 逸散又是所有碳排放中的重点排放源,其占比远远超过其他环节的碳排放量。

## 2.3 矿区碳排放对区域环境的影响

2021 年,全国共有露天煤矿 357 处,生产能力为 98 015 万 t/a,主要分布在内蒙古、山西、新疆、云南、陕西、黑龙江、辽宁、青海和宁夏等 15 个省(区)。其中,处于生产中的煤矿有 209 处,产能为 74 211 万 t/a;

表 9 典型露天矿区 2021 年碳排放清单

Table 9 2021 Carbon emissions inventory for a representative open-pit mining operation

排放类别	排放源	活动水平数据	碳排放因子	碳排放当量/(tCO <sub>2</sub> e)
燃料燃烧	烟煤燃烧	6 358.61 t	1.80 tCO <sub>2</sub> e · t <sup>-1</sup>	11 476.32
	天然气消耗量	108.21 万m <sup>3</sup>	21.62 tCO <sub>2</sub> e · (万Nm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	2 339.69
	柴油消耗量	58 916.11 t	3.15 tCO <sub>2</sub> e · t <sup>-1</sup>	185 305.60
	汽油消耗量	140.00 t	3.04 tCO <sub>2</sub> e · t <sup>-1</sup>	425.95
	醇基燃料消耗量	389.22 t	1.01 tCO <sub>2</sub> e · t <sup>-1</sup>	393.43
	炸药消耗量	41 469.77 t	0.26 tCO <sub>2</sub> e · t <sup>-1</sup>	10 902.40
逸散	采中原煤产量	33 937 567.00 t	0.03 tCO <sub>2</sub> e · t <sup>-1</sup>	955 003.14
	采后原煤产量	33 937 567.00 t	0.01 tCO <sub>2</sub> e · t <sup>-1</sup>	261 658.64
	污水处理量	263 686.00 t	0.04 tCO <sub>2</sub> e · t <sup>-1</sup>	12 498.72
	生活垃圾处理量	150.00 t	1.11 tCO <sub>2</sub> e · t <sup>-1</sup>	166.20
电力	净购入电力	82 080.62 MWh	1.19 kgCO <sub>2</sub> · kWh <sup>-1</sup>	97 758.02
新水	新水消耗	1 183 395.70 t	0.01 tCO <sub>2</sub> e · t <sup>-1</sup>	250.50
合计				1 538 178.60

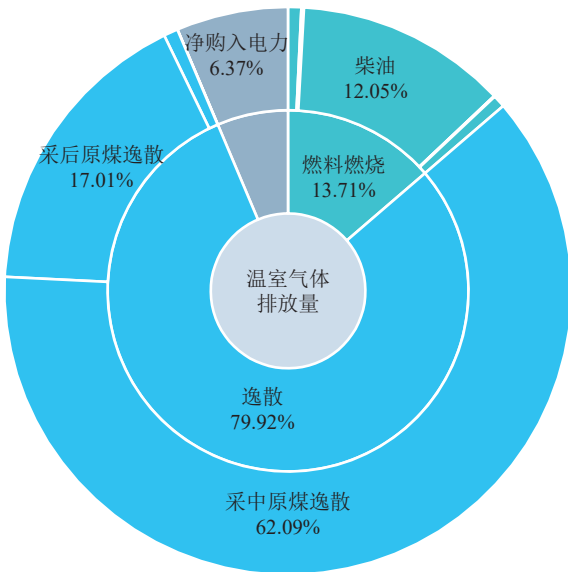


图 2 典型露天煤矿各生产环节碳排放占比

Fig.2 Percentage breakdown of carbon emissions by production stage in a typical open-pit coal mine

生产能力大于 400 万 t/a 露天煤矿有 54 处, 产能为 69 800 万 t/a, 且近年正在按照数量减少, 产能增加的趋势不断发展<sup>[26]</sup>。

煤炭资源丰富的地区一般处于我国内陆地区, 露天开采会直接破坏大量土地, 此外各类废石、废渣、尾矿的堆放也会侵占大量土地。据不完全统计, 全国矿山累计占压土地达到 586 万公顷, 破坏森林约 106 万公顷, 破坏草地 26.3 万公顷<sup>[27]</sup>。除此之外, 由于露天开采过程产能的不断提高, 其在我国煤矿产量中的占比也在逐年上升。

近 10 年我国露天煤矿产量及占比如图 3 所示,

从核算结果来看, 逸散过程是露天煤矿开采过程中最大的温室气体排放源, 主要以煤炭开采和矿后活动为主。煤炭开采的逸散一般是由于煤和相关地层的破坏、以及采场底面等泄露的温室气体, 与即时性的开采活动密切相关, 逸散源较为集中且易于监测和管理。相比较之下, 矿后活动则是煤炭开采后的加工、存储和运输过程逃逸的温室气体, 更多地表现为一种持续但较低水平的过程, 其逸散源较为分散, 管理难度更大<sup>[4]</sup>。如果一直采取现在的开采方式和处置方法, 将产生大量的温室气体排放。根据文中碳排放核算模型计算出近 10 年我国露天煤矿温室气体的排放量(图 4), 年平均碳排放量为  $(3.24 \pm 0.77) \times 10^7$  tCO<sub>2</sub>e, 其中生产过程中逸散导致的年平均碳排放量为  $(2.59 \pm 0.65) \times 10^7$  tCO<sub>2</sub>e, 并且碳排放量随着露天煤矿开采量的增加而逐年增大。

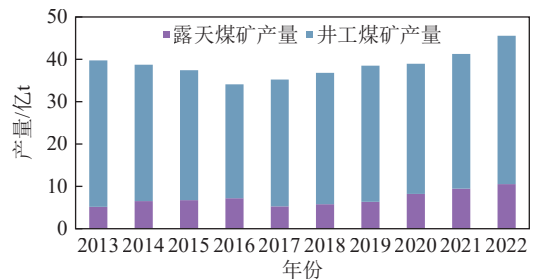


图 3 我国近年露天煤矿产量及占比

Fig.3 Output and Proportion of Open-pit

大量的温室气体逸散不仅会增加额外的经济支出, 还会对环境造成很大的影响, 进而促进温室效应。取目前全国杨树的固碳平均值, 一棵杨树年均固碳能

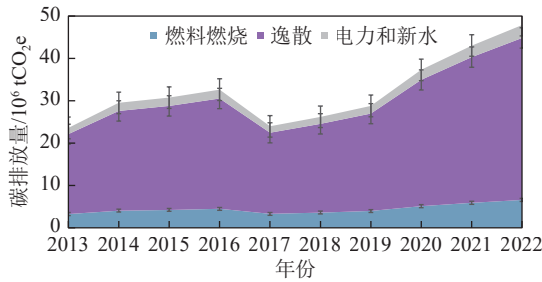


图 4 我国近年露天煤矿碳排放量

Fig.4 Carbon emissions from open-pit coal mines in China in recent years coal mines in China in recent years

力为  $61.92 \text{ kg}^{[28]}$ 。根据前文全国露天煤矿温室气体的年平均核算结果与杨树的固碳能力相结合进行计算,可以得出我国露天煤矿年开采煤炭所造成的温室气体排放量相当于  $5.23 (\pm 1.24) \times 10^8$  颗杨树 1 年的固碳量 (图 5)。若按照集约栽培的杨树林换算,每年温室气体排放量相当于  $113.83 (\pm 27.00)$  万公顷杨树林 1 年的固碳量<sup>[29]</sup>。目前碳排放交易市场的碳排放交易价格已经超过了 70 元/t,若按照目前的开采方法和工艺,全国每年会产生超过 23 亿元的额外经济支出。

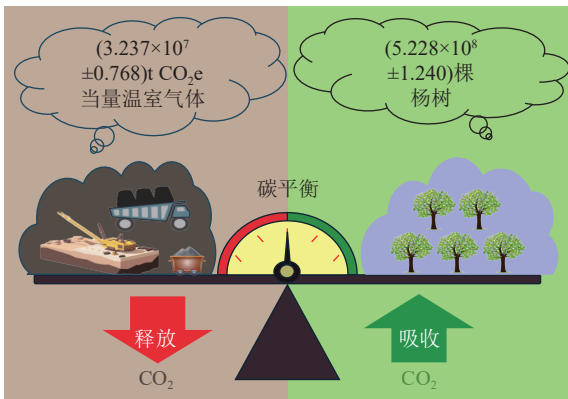


图 5 温室气体排放量的年平均值和森林年均固碳吸收能力换算比较

Fig.5 Comparison chart of annual average greenhouse gas emissions versus annual average carbon sequestration capacity of forests

2021 年内蒙古自治区露天煤矿的产量占全国露天煤矿产量的 62.5%, 达到了 61 259 万 t/a<sup>[26]</sup>。按照上文的核算结果, 2021 年内蒙古自治区露天煤矿开采所产生的碳排放量为  $2.78 \times 10^7 \text{ tCO}_2\text{e}$ , 相当于  $4.48 \times 10^8$  颗树木 1 a 的固碳量, 约等于 97 万公顷的杨树林 1 a 的固碳量。同时, 内蒙古自治区当年会产生超过 19 亿元的额外经济支出。

因此, 减少煤炭露天开采所造成的碳排放极为重要, 不仅可以减弱温室效应, 进一步完成减污降碳、协同增效的目标, 还能产生可观的经济效益。而其中逸

散环节所产生的碳排放量又是露天矿区的主要碳排放量, 因此如何在煤炭生产过程中进行  $\text{CH}_4$  逸散的回收和再利用是目前需要着重努力的目标, 其具有非巨大的减碳潜能和空间。

#### 2.4 提升露天煤矿温室气体减排效能的建议

1) 推广使用更经济有效的减排技术。露天煤矿生产过程中, 燃料的燃烧和煤炭的逸散会不可避免的产生大量的温室气体, 为了实现煤炭开采行业的碳减排目标, 主要可通过包括调整能源结构、提高能效、 $\text{CO}_2$  捕集与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 及利用等的方式控制碳排放量。然而, 鉴于我国当前以化石能源为主的能源结构在短期内难以发生根本性转变, 且 CCS 技术的成本仍然较高的问题, 对于露天煤矿而言, 短期内最为可行的减排手段仍然是提高能效, 通过减少生产过程中的能源消耗, 从而降低温室气体的排放量。虽然低能耗磨碎技术、短流程选矿技术以及智能化选矿技术等一系列低碳选矿技术的应用能够在一定程度上实现选煤厂低碳绿色发展<sup>[30]</sup>, 但是放眼整个露天煤矿, 仍应积极寻求并应用成本效益高的节能减排技术, 以有效减少因能源消耗而产生的温室气体排放问题。

2) 增加生产环节外的碳汇能力。“煤炭减损开采+浅层采空区  $\text{CO}_2$  封存”一体化技术是实现西部煤炭绿色低碳技术攻关的重要方向<sup>[31]</sup>。尽管目前 CCS 技术的推广利用仍存在阻碍, 但是该技术依然存在一些可行性较高的方式来从碳汇的角度进行减碳。林业碳汇是指通过植物的光合作用将大气中的  $\text{CO}_2$  化为有机物, 并将其固定在植被或土壤中, 从而降低大气中该温室气体的体积分数。碳汇不仅包括林业碳汇, 还涵盖了海洋、草原和农业等多种形式的碳汇, 所有能够从大气中清除温室气体的过程均可被归类为碳汇。因此, 鼓励企业参与荒山植树造林或土地复垦, 以增加碳汇容量, 以此作为减少碳排放量的有效途径。

3) 完善更为有效的碳资产管理模式。可以运用市场化手段, 鼓励绿色矿山“开发式”建设<sup>[32]</sup>, 完善碳交易规则。为了应对国家启动的全国统一碳市场, 尽管露天开采行业尚未被纳入首批交易行业之中, 但该类企业亟需提前做好准备, 提高自身应对碳市场的综合能力。为此, 企业首先应当详细核算减排成本, 明确减排成本与碳市场价格之间的关系, 从而在自主减排与购买碳配额之间寻找最优决策点。与此同时, 鉴于当前露天煤矿开采企业在碳资产管理方面相较于钢铁、电力等传统高耗能行业仍存在一定差距, 建议从集团层面着手建立碳资产管理平台。通过该平台,

企业能够实现 CO<sub>2</sub> 排放的核算、上报、统计、分析及交易等过程,及时掌握碳资产规模与排放趋势等关键信息,为企业的节能减排工作提供坚实的数据支持与决策依据<sup>[33]</sup>。

### 3 结 论

1) 内蒙古某露天煤矿 2021 年碳排放量共计 1 538 178.60 tCO<sub>2</sub>e, 即每生产 1 t 原煤排放 CO<sub>2</sub> 当量 0.05 tCO<sub>2</sub>e。其中,逸散过程中的碳排放量占比最大,达到了 79.92%,主要以煤炭开采和矿后活动导致的 CH<sub>4</sub> 逸散过程中的碳排放为主,而煤炭开采环节则又是煤炭开采和矿后活动逸散碳排放中的最大占比,达到了二者的 78.49%,除此之外,化石燃料燃烧的碳排放量占总碳排放量的 13.71%;电力和水力碳排放量占比则最少,占比 6.37%。

2) 我国露天煤矿温室气体排放量核算结果表明,露天煤矿年平均碳排放量为  $(3.24 \pm 0.77) \times 10^7$  tCO<sub>2</sub>e, 相当于  $(5.23 \pm 1.24) \times 10^8$  颗树木 1 年的固碳量,按照集约栽培的杨树林换算为  $(113.83 \pm 27.00)$  万公顷杨树林 1 a 的固碳量。同时,按照目前的开采方法和工艺,全国每年会产生超过 23 亿元的额外经济支出,并且随着露天煤矿开采量的增加而逐年增大。

3) 本研究基于全生命周期方法构建了露天煤矿碳排放核算模型,为企业减排和政策制定提供了量化依据。当前模型在主要生产环节的核算具有较高精度,但对勘查、生态修复等非生产环节及外运煤炭的碳排放尚未完全纳入,未来将结合行业特点进一步完善核算体系。

### 参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2023(3): 12-29.  
National Bureau of Statistics. 2022 Statistical bulletin of the People's Republic of China on national economic and social development[J]. China Statistics, 2023(3): 12-29.
- [2] “十四五”矿山安全生产规划[J]. 安全生产与监督, 2022, (9): 38-48.  
'14th Five-Year' mine safety production planning [J]. Safety Production and Supervision, 2022 (9): 38-48.
- [3] 吴青. 考虑碳排放的我国矿业全要素生产率及其影响因素研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.  
WU Qing. Research on the total factor productivity of mining industry and its influencing factors considering carbon emissions [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [4] 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.
- [5] ARMSTRONG MCKAY D I, STAAL A, ABRAMS J F, et al. Exceeding 1.5 °C global warming could trigger multiple climate tipping points[J]. Science, 2022, 377(6611): 1170-1172.
- [6] 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]. 煤炭学报, 2024, 49(S2): 1143-1153.  
ZHENG Yurong, SUN Wenbin, DU Shouhang, et al. Review of carbon emission accounting methods in coal enterprise[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S2): 1143-1153.
- [7] 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.
- [8] 郭远超. 平朔东露天矿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.
- [9] VERNON R. International investment and international trade in the product cycle[J]. Quarterly Journal of Economics 1966, 80(2): 190-207.
- [10] 陈昊. 基于节能设计的建筑全生命周期碳排放分析[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022(10): 100-103.  
CHEN Hao. Analysis of carbon emissions in the whole life cycle of buildings based on energy saving design[J]. Chinese Science and Technology Journal Database (Full Text Edition) Engineering Technology, 2022(10): 100-103.
- [11] 康小平, 聂慧慧, 郜敏, 等. 电动汽车全生命周期碳排放[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(3): 976-984.  
KANG Xiaoping, NIE Huihui, GAO Min, et al. Research on carbon emission of electric vehicle in its life cycle[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(3): 976-984.
- [12] 王莉莉. 永煤集团煤炭矿区碳排放核算及减排对策研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.  
WANG Lili. Study on the carbon emissions accounting and reduction measures of Yongmei group coal mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [13] 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.  
ZHANG Zhenfang. Study on carbon emissions accounting and carbon emission reduction approach of surface coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [14] RUYSSENAARS P G, COENEN P W H G, RIENSTRA J D, et al. Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990-2018: National Inventory Report[R]. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2020.
- [15] The National Centre for Emissions Management. Inwentaryzacja gazów cieplarnianych dla lat 1988-2016: Raport syntetyczny wykonany na potrzeby Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu oraz Protokołu z Kioto[R]. Warsaw: The National Centre for Emissions Management, 2018.

- [16] CRESSWELL I, MURPHY H T. Australia state of the environment 2016: Biodiversity, independent report to the Australian Government Minister for the Environment and Energy[R]. Canberra: Australian Government Department of the Environment and Energy, 2017.
- [17] Environment and Climate Change Canada. National Inventory Report 1990-2011: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada Part III[R]. Ottawa: Environment and Climate Change Canada, 2013.
- [18] WILLIAMS D J, G RAHAM P, SHARMA S, et al. Reducing CO<sub>2</sub> emissions from Australia's electricity sector[C]. 5th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 2001: 1198-1202.
- [19] Department of Climate Change and Energy Efficiency. Australian National Greenhouse Accounts National Inventory Report 2008[R]. Canberra: Department of Climate Change and Energy Efficiency, 2010.
- [20] 宋然平, 朱晶晶, 侯萍等. 准确核算每一吨排放: 企业外购电力温室气体排放因子解析[M/OL]. 2013. [http://pdf.wri.org/analysis\\_of\\_emission\\_factors\\_for\\_purchased\\_electricity\\_in\\_china.pdf](http://pdf.wri.org/analysis_of_emission_factors_for_purchased_electricity_in_china.pdf).  
SONG Ranping, ZHU Jingjing, HOU Ping, et al. Getting Every Ton of Emissions Right: An Analysis of Emission Factors for Purchased Electricity in China[M/OL]. 2013. [http://pdf.wri.org/analysis\\_of\\_emission\\_factors\\_for\\_purchased\\_electricity\\_in\\_china.pdf](http://pdf.wri.org/analysis_of_emission_factors_for_purchased_electricity_in_china.pdf).
- [21] 马翠梅, 李士成, 葛全胜. 省级电网温室气体排放因子研究[J]. 资源科学, 2014, 36(5): 1005-1012.  
MA Cuimei, LI Shicheng, GE Quansheng. Greenhouse gas emission factors for grid electricity for chinese provinces[J]. Resources Science, 2014, 36(5): 1005-1012.
- [22] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 用能单位能源计量器具配备和管理通则: GB 17167—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of China. General principle for equipping and managing of the measuring instrument of energy in organization of energy using: GB 17167—2006[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [23] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 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, 109-114.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Requirements of the emissions accounting and reporting Part 11: Coal production enterprise: GB/T 32151.11—2018[S]. Beijing: China Standards Press, 2018, 109-114.
- [24] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中国 2008 年温室气体清单研究[M]. 北京: 中国计划出版社, 2014: 20-27.
- [25] 孙丽, 周铭, 虞斌. 煤制甲醇过程的碳排放核算及减排对策研究[J]. 化工环保, 2023, 43(4): 519-525.  
SUN Li, ZHOU Ming, YU Bin. Research on carbon emission accounting and emission reduction measures for coal to methanol processes[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2023, 43(4): 519-525.
- [26] 杨晓伟, 王妍, 刘欣, 等. 我国露天煤矿发展现状及展望[J]. 中国煤炭, 2023, 49(6): 126-133.  
YANG Xiaowei, WANG Yan, LIU Xin, et al. Present situation and prospect of the development of open-pit coal mine in China[J]. China Coal, 2023, 49(6): 126-133.
- [27] 杨井志. 露天采矿对环境的影响与对策[J]. 黑龙江科技信息, 2014(1): 21-21.  
YANG Jingzhi. The influence of open-pit mining on environment and its countermeasures[J]. Scientific and Technological Innovation, 2014 (1): 21.
- [28] 姬宏旺, 陈维强. 一棵树的碳汇能力有多大?[J]. 绿色中国, 2023(18): 74-75.  
JI Hongwang, CHEN Weiqiang. How powerful is a tree's carbon sink[J]. Green China, 2023(18): 74-75.
- [29] 郑世锴, 刘奉觉. 集约栽培的杨树人工林碳汇功能量化的探讨[J]. 林业科技通讯, 2015(11): 3-9.  
ZHENG Shikai, LIU Fengjue. Discussion on the quantification of carbon sink function of poplar plantation under intensive cultivation[J]. Forest Science and Technology, 2015(11): 3-9.
- [30] 沈政昌, 李仕亮, 史帅星, 等. 低碳选矿技术发展现状及发展策略研究[J]. 绿色矿山, 2023(1): 48-55.  
SHEN Zhengchang, LI Shiliang, SHI Shuaixing, et al. Development status and development strategy research of low carbon mineral processing technology[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 48-55.
- [31] 王双明, 寇海波, 申艳军, 等. 含煤岩系 CO<sub>2</sub> 突出对浅层 CO<sub>2</sub> 地质封存启示[J]. 绿色矿山, 2023(1): 33-47.  
WANG Shuangming, KOU Haibo, SHEN Yanjun, et al. Implications of CO<sub>2</sub> outburst from coal-bearing rock series for the CO<sub>2</sub> geological sequestration under shallow layers[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 33-47.
- [32] 武强, 刘宏磊, 曾一凡, 等. 我国绿色矿山建设现状与存在问题及对策建议[J]. 绿色矿山, 2023(1): 25-32.  
WU Qiang, LIU Honglei, ZENG Yifan, et al. Situation, challenges, and proposed strategies for green mine construction in China[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 25-32.
- [33] 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.