



高寒生态脆弱区露天矿山碳排放核算模型研究

李国清 白斌 李桂奇 关凯 侯杰 林春平

Research on carbon emission accounting model for open-pit mines in alpine ecologically fragile areas

LI Guoqing, BAI Bin, LI Guiqi, GUAN Kai, HOU Jie, LIN Chunping

引用本文:

李国清, 白斌, 李桂奇, 关凯, 侯杰, 林春平. 高寒生态脆弱区露天矿山碳排放核算模型研究[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(3): 430–440. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.07.07.003

LI Guoqing, BAI Bin, LI Guiqi, GUAN Kai, HOU Jie, LIN Chunping. Research on carbon emission accounting model for open-pit mines in alpine ecologically fragile areas[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(3): 430–440. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.07.07.003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.07.07.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金属矿山井巷建设工程碳排放智能测算方法

Intelligent carbon emission assessment method for metal mine shaft construction projects

工程科学学报. 2024, 46(6): 1024 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.09.11.002>

装配式钢结构办公建筑全生命周期碳排放计算方法研究与应用

Research and application of carbon emission calculation methods for the whole life cycle of assembled steel structure office buildings

工程科学学报. 2024, 46(10): 1899 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.11.28.003>

非煤露天矿山岩质边坡稳定性评价标准探讨

Discussion on the stability evaluation standard of a rock slope in a noncoal open-pit mine

工程科学学报. 2022, 44(5): 876 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.02.01.001>

公路工程建设阶段全生命周期碳排放智能估算方法

Intelligent assessment method of life-cycle carbon emission during the highway construction phase

工程科学学报. 2023, 45(12): 2173 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.10.21.001>

归一化植被指数 (NDVI) 在草原露天煤矿区的适用性分析

Applicability analysis of normalized difference vegetative index (NDVI) in grassland open-pit coal mine

工程科学学报. 2023, 45(1): 54 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.08.03.002>

基于LMDISTIRPAT模型的中国钢铁行业碳达峰路径研究

Carbon peak path of the Chinese iron and steel industry based on the LMDISTIRPAT model

工程科学学报. 2023, 45(6): 1034 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.04.25.002>

高寒生态脆弱区露天矿山碳排放核算模型研究

李国清^{1,2)}, 白 斌^{1,2)}, 李桂奇³⁾, 关 凯³⁾, 侯 杰^{1,2)}✉, 林春平⁴⁾

1) 北京科技大学资源与安全工程学院, 北京 100083 2) 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083 3) 东北大学岩石破裂与失稳研究所, 沈阳 110819 4) 西藏巨龙铜业有限公司, 拉萨 850200

✉通信作者, E-mail: houjie@ustb.edu.cn

摘 要 为了准确掌握高寒生态脆弱区露天矿山的碳排放量, 亟需建立一套体系完整、科学可行的核算方法, 全面量化矿山生产作业的直接碳排放和生态扰动所导致的间接碳排放。通过分析高寒生态脆弱区露天矿山的碳循环机制, 基于生命周期理论界定了露天矿山开采活动的碳排放核算边界, 通过梳理矿山开采、运输、选矿和辅助等环节的直接和间接碳排放过程, 厘清了高寒生态脆弱区露天矿山的碳源、碳汇结构, 编制了矿山的碳排放源清单。在此基础上, 充分考虑矿山开采活动对高寒生态脆弱区的扰动, 以及高海拔对矿山设备的能耗影响, 构建了基于露天矿山生产环节及矿区碳汇变化的碳排放核算模型。以西藏某露天金属矿山为工程背景开展模型应用, 计算出该矿 2023 年的碳排放总量为 $1.76295 \cdot 10^5 \text{ t CO}_2$, 为高寒生态脆弱区露天矿山开采活动的碳排放核算提供了理论依据。

关键词 高寒生态脆弱区; 露天矿山; 碳排放核算; 碳汇; 碳循环机制

分类号 TD804

Research on carbon emission accounting model for open-pit mines in alpine ecologically fragile areas

LI Guoqing^{1,2)}, BAI Bin^{1,2)}, LI Guiqi³⁾, GUAN Kai³⁾, HOU Jie^{1,2)}✉, LIN Chunping⁴⁾

1) School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Beijing 100083, China

3) Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110819, China

4) Tibet Julong Copper Company Limited, Lasa 850200, China

✉Corresponding author, E-mail: houjie@ustb.edu.cn

ABSTRACT To accurately measure carbon emissions from open-pit mines in alpine ecologically fragile areas, a rigorous and comprehensive accounting method is essential. This method must account for both direct emissions from mining operations and indirect emissions from ecological disturbances. The unique challenges of high-altitude environments require a sophisticated carbon accounting approach that tracks emissions from both mining activities and their broader ecological impacts on carbon sinks and sources. This study begins by examining the carbon cycle mechanisms unique to open-pit mines in these fragile regions, characterized by high altitudes, low temperatures, and delicate ecosystems susceptible to disturbances. Leveraging life cycle theory, we define the accounting boundaries to encompass all stages of the mining life cycle, namely extraction, transportation, beneficiation, and auxiliary processes. A key aspect of this research is the meticulous examination of direct and indirect carbon emissions across various mining stages. The energy-intensive nature of mining, along with the substantial transportation requirements over challenging terrains, significantly contributes to the carbon footprint. Additionally, beneficiation processes involving the separation and refinement of raw materials are highly energy-consuming,

收稿日期: 2024-07-07

基金项目: “十四五”国家重点研发计划资助项目(2022YFC2903905); 国家自然科学基金资助项目(52074022)

increasing indirect emissions. By mapping these processes and analyzing their carbon emission contributions, we enhance the understanding of the carbon cycle's impact owing to high-altitude mining. The study also elucidates the structure of carbon sources and sinks within these fragile ecosystems. We compile a detailed carbon emission source inventory for open-pit mines, providing a comprehensive reference for emission sources and natural carbon sinks, such as soil and vegetation, potentially compromised by mining activities. This inventory is instrumental in developing a more precise accounting model. We have developed a carbon emission accounting model that integrates mining production stages with changes in carbon sinks owing to mining-induced disturbances. This model specifically accounts for the increased energy consumption of mining equipment at high altitudes, leading to higher carbon emissions owing to reduced operational efficiency. The model offers a nuanced estimate of total emissions by incorporating these factors. The model was validated using a case study of an open-pit metal mine in Tibet, a region renowned for its alpine ecology and environmental fragility. Applying the model revealed total carbon emissions of 1.76295×10^5 t CO₂ for 2023, reflecting the combined direct and indirect impacts of mining on the ecosystem. This case study demonstrates the model's effectiveness and underscores the considerable carbon footprint of mining in alpine regions. This research provides a theoretical foundation for carbon emission accounting and management in high-altitude, ecologically sensitive mining areas. It presents a detailed and scientifically rigorous accounting method supporting sustainable mining practices. The findings and model offer practical insights for industry stakeholders and a data-driven framework for policymakers aiming to reduce the environmental footprint of mining in vulnerable ecosystems. This study paves the way for sustainable resource extraction in ecologically sensitive zones, supporting efforts to minimize the carbon footprint of mining operations in high altitudes.

KEY WORDS alpine ecologically fragile areas; open-pit mines; carbon emission accounting; carbon sink loss; carbon cycle mechanism

中国作为碳排放大国,为统筹推进各行业低碳、绿色协同发展,提出了“双碳”目标和碳排放权交易等一系列政策性措施^[1-3]。矿山企业长久以来被视为劳动密集型的资源性行业,具有高能耗、高排放、高污染的特点,矿山碳排放问题也受到了越来越多的研究学者和工业界的关注^[4-5],科学准确核算矿石开采过程的碳排放,有效控制矿山企业的碳排放,推动矿山企业的低碳转型成为中国实现“双碳”目标的重要环节^[6]。

在矿山碳排放核算的理论研究方面,国内外学者开展了以 IPCC 清单因子法、生命周期法等为代表的核算方法研究,建立考虑矿山开采过程中柴油、电力等能源消耗为主的碳排放计量模型。在实际应用方面,张振芳等、王晓琳、杨博宇和才庆祥等^[7-10]基于 IPCC 清单因子法对露天煤矿开采的碳排放源进行分析,并建立了碳排放计量模型,核算了平朔矿区开采的碳排放量,发现燃油是露天煤矿区主要的碳排放源,占矿区总碳排放的 51.18%;Bharathan 等^[11]对加拿大四个省的典型地下矿山运输环节燃料生命周期的 CO₂ 排放量进行计算和比较,得出电力运输并不总是产生最低的碳排放;李本正等^[12]基于生命周期的思想,以滕州市金达煤矿五二矿区为例,界定了全机械化采煤方式的碳排放边界,建立了煤炭开采的碳排放核算模型(B-R 模型),分析核算结果发现割煤环节和煤炭运输产生的碳排放量最大,为其他煤矿的碳排放量计

算提供了依据。

目前关于矿山行业的碳排放核算研究大多集中于生产活动消耗能源造成的温室气体排放,对生产活动对矿区生态系统扰动造成的间接碳排放研究较少。在矿产资源开采活动过程中,除了消耗炸药、电能、化石能源等大量造成碳排放外,矿产资源的开发对生态脆弱区的“植被-土壤碳库”造成了强烈的扰动,如植被破坏、土地挖损等导致陆地生态系统的碳汇损失,严重影响了矿区的碳排放^[13-14]。

因此,厘清矿山的碳排放源和碳汇,建立科学准确的碳排放核算模型,是确定矿山开采碳排放的关键。本研究立足于高寒生态脆弱区露天矿山的生产活动,从矿产资源开发生命周期角度出发,全面分析了各生产环节不同碳排放源造成的碳排放,以及矿山开采活动对矿区植被、土壤、大气碳库扰动造成的间接碳排放,构建考虑碳汇损失的露天矿山开采活动的碳排放核算模型,该模型特别考虑了高海拔、生态脆弱的特殊环境因素对矿山碳排放的影响,并以西藏某大型露天矿山为案例进行了碳排放量核算,该模型不仅为量化露天金属矿山的碳排放提供了理论方法,也为矿山制定针对性的减排策略提供了科学依据。

1 露天矿山碳排放机制

1.1 矿区碳循环系统

青藏高原拥有我国海拔最高、面积最大的天

然草地,其碳储量约占全国草地生态系统的 48.1%,高原生态系统对维持区域生态系统碳动态平衡扮演了极为重要的角色^[15].由于高寒生态脆弱区的气候严酷、环境恶劣、生态系统也极其脆弱,对于外界的扰动反应非常敏感.在采矿前未受扰动 的情况下,高寒生态脆弱区生态系统中的大气碳库、植被碳库和土壤碳库彼此迁移转化,生态系统的碳循环趋于平衡稳定状态^[16].由于露天矿山开采活动,打破了矿区的生态系统原始的平衡状态,矿区的碳源、复垦增加的碳汇和矿区的生态系统相互影响,重新构成了矿区的碳循环系统^[17],如图 1 所示.

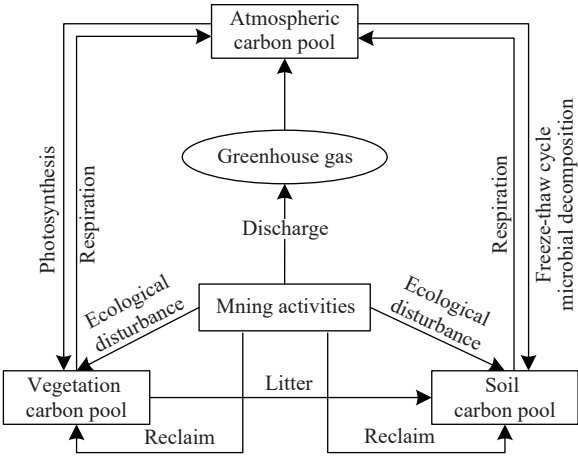


图 1 矿区碳循环系统
Fig.1 Carbon cycle systems in mining areas

在矿区的高原生态系统中,地上植被、土壤碳库与大气碳库之间有着复杂的碳循环过程.由于寒区的高海拔、低气温特点,高寒草甸等植物通常

具有极高的根茎比,植被的光合作用吸收大气中的 CO_2 ,可以较长时间地储存于地下根系和土壤中,同时植物通过呼吸作用将 CO_2 释放到大气中,且植被凋落物在腐殖质的作用下以有机碳的形式进入土壤,寒区土壤由于冻融循环和微生物分解释放 CO_2 ,这一系列过程使得土壤、植物和大气碳库相互交融,构成了寒区生态系统的碳循环^[18-19].然而,矿石开采活动的生产环节消耗大量的化石燃料、电能等能源,产生大量碳排放和废弃物直接排放到自然环境中,对区域内大气、植被、土壤碳库的循环产生巨大影响.除此之外,土地的挖损、压占等行为对地表植被、冻土性质等造成一系列破坏,导致矿区生态系统的碳汇损失,影响生态系统的碳循环^[20-21].因此,为降低矿山开采对高寒生态脆弱区的生态扰动,矿山可采取复垦等措施,积极恢复和提升矿区的碳汇功能.

1.2 碳排放核算边界

露天矿山的生产运营涉及诸多环节,是一个复杂的系统工程^[22].基于矿石产品的全生命周期^[23]分析,从矿石的开采至矿石经选矿处理成为精矿的过程,消耗了大量的燃料、电能等能源,同时对矿区的高原草地、土壤等造成了严重破坏,是造成露天矿山碳排放的主要原因.因此,将高寒生态脆弱区露天矿山的碳排放核算聚焦于矿石采选环节产生的直接和间接碳排放,如图 2 所示.

1.3 碳排放过程

以露天开采的方式进行矿产资源开发时,随着开采境界的扩大、开采深度的增加,以及不同生产环节能源的消耗和转化均会直接或间接的产生

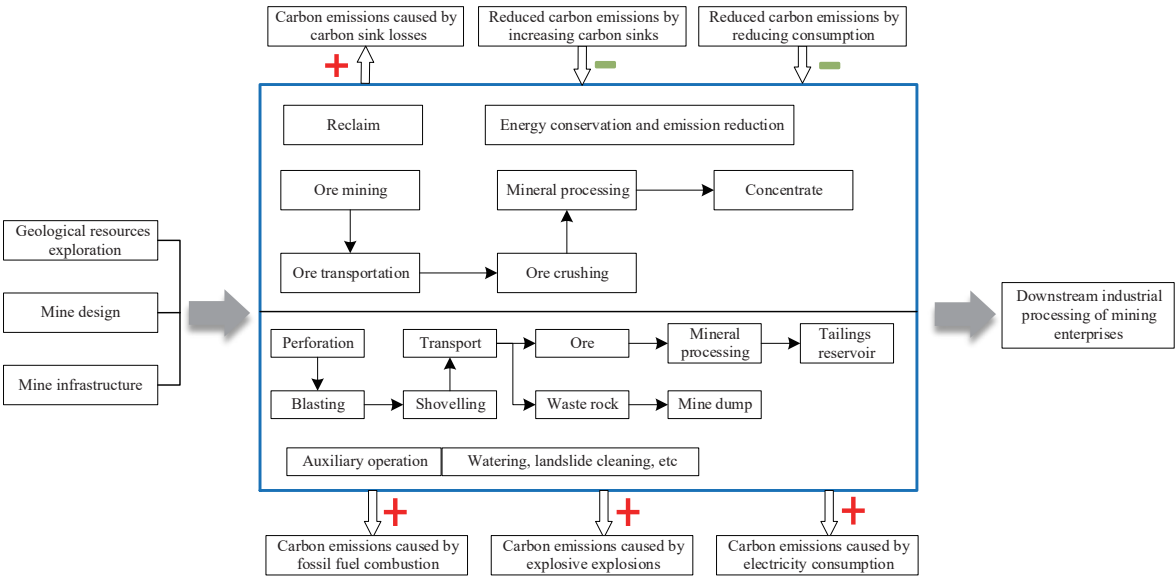


图 2 碳排放核算边界
Fig.2 Carbon emission accounting boundary

碳排放。露天矿的碳排放过程主要涉及矿石的开采环节、运输环节、选矿环节和辅助环节。进一步精细化分析露天矿的生产作业流程,可将其划分

为穿孔、爆破、采装、运输、破碎、选矿、辅助等环节,各生产环节涉及的主要设备和碳排放源如图3所示。

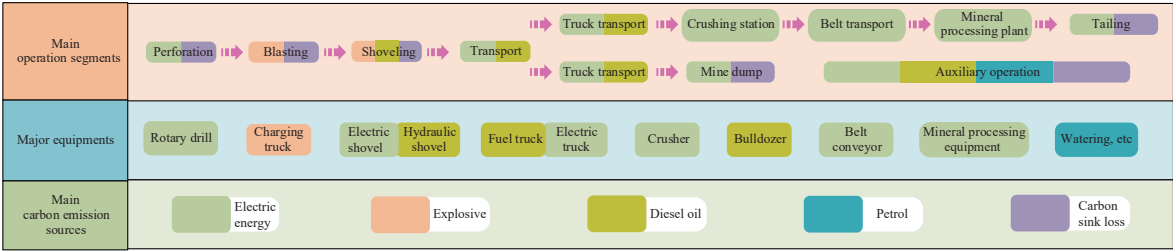


图3 露天矿山碳排放过程

Fig.3 Carbon emission processes of open-pit metal mines

露天矿山的碳排放源通常分为直接排放源与间接排放源,将矿山生产活动中产生的碳排放称为直接碳排放源;而为满足采矿作业而产生,但被其他企业所控制的排放叫做间接的碳排放源,如净购入电力,或是由于矿区生态碳汇损失产生的间接碳排放。基于对露天矿山生产过程的碳排放进行分析,编制了露天矿山开采活动的碳排放源清单如表1所示。

由碳排放源清单可得,露天矿山碳排放主要来源于四个方面:①燃料消耗引起的碳排放,如柴油、汽油等;②爆破环节炸药发生化学反应释放温室气体;③电能消耗引起的碳排放;④开采活动造成碳汇损失引起的间接碳排放。

2 露天矿山碳排放核算模型

2.1 总量计算模型

矿山开采活动的碳排放核算不仅包含矿石开采活动碳源的核算,还应对矿区的碳汇情况进行综合的定性分析与量化,露天矿山开采碳排放核

算模型为:

$$E = F_{ck} + F_{bp} + F_{cz} + F_{ps} + F_{ys} + F_{xk} + F_{fz} + F_{cs} - F_{mc} \quad (1)$$

式中, F_{ck} 为穿孔环节的碳排放量, t ; F_{bp} 为爆破环节的碳排放量, t ; F_{cz} 为采装环节的碳排放量, t ; F_{ps} 为破碎环节的碳排放量, t ; F_{ys} 为运输环节的碳排放量, t ; F_{xk} 为选矿环节的碳排放量, t ; F_{fz} 为辅助环节的碳排放量, t ; F_{cs} 为碳汇损失量, t ; F_{mc} 为人工复垦增加的固碳量, t 。

F_{ck} 、 F_{bp} 、 F_{cz} 、 F_{ps} 、 F_{ys} 、 F_{xk} 、 F_{fz} 、 F_{cs} 、 F_{mc} 的核算公式为:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i \cdot EF_i \quad (2)$$

式中, F_i 为表示某个生产环节第 i 种碳排放源的消耗量; EF_i 为表示某个生产环节第 i 种碳排放源的碳排放因子。

2.2 生产环节碳排放核算

随着露天矿山的机械化、智能化发展,矿山逐渐转变为以设备为主体的生产模式,但矿山设备

表1 露天矿山开采活动碳排放源清单

Table 1 Inventory of carbon emission sources in open-pit mining

Production processes	Major equipment	Direct carbon emission sources	Indirect carbon emission sources
Perforation	Rotary drill	—	Electric energy, carbon sink loss
Blasting	Charging truck	Diesel oil, explosive	Carbon sink loss
Shoveling	Electric shovel, hydraulic shovel	Diesel oil	Electric energy, carbon sink loss
Transport	Electric truck, fuel truck	Diesel oil	Electric energy
	Belt conveyor	—	Electric energy
Crushing	Crusher	—	Electric energy
Mineral processing	Ball mill, flotation machine	—	Electric energy
Tailings reservoir	Thickener, centrifugal pump	—	Electric energy, carbon sink loss
Auxiliary operation	Land leveler, sprinkler truck	Petrol, diesel oil	Electric energy, carbon sink loss

的运行易受外界环境因素干扰, 为降低高海拔对设备能耗核算的准确性, 在模型构建时考虑了海拔对设备燃油消耗量的影响系数 μ , 如图 4 所示, 海拔每升高 1000 m, 设备的燃油消耗量会增加 4% 左右^[24-25].

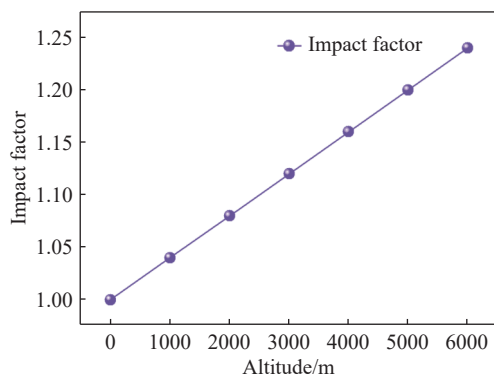


图 4 海拔高度对设备燃油消耗量的影响

Fig.4 Altitude influence on equipment fuel consumption

(1) 穿孔环节碳排放量.

穿孔环节的碳排放集中在主要的穿孔设备上, 主要代表设备为牙轮钻机, 其消耗能源以电能为主, 该环节的碳排放量核算公式如下:

$$F_{ck} = F_{ck_elec} \cdot EF_{elec} = \sum_{i=1}^n \frac{L_{ck_i} P_{ck_i} \alpha_{ck_i}}{v_{ck_i}} \cdot EF_{elec} \quad (3)$$

式中, F_{ck_elec} 为穿孔环节的电能消耗量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; EF_{elec} 为电能的碳排放因子, L_{ck_i} 为穿孔设备的穿孔米数, m ; P_{ck_i} 为某穿孔设备的额定功率, kW ; α_{ck_i} 为某用电设备的有功功率系数; v_{ck_i} 为某设备的小时钻进米数, $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$.

(2) 爆破环节碳排放量.

爆破环节的碳排放主要集中在炸药爆炸产生的温室气体, 露天矿山使用的炸药类型主要为乳化炸药和铵油炸药, 为避免有毒气体的污染, 露天矿在炸药配置是加入了柴油、沥青等可燃剂以消耗炸药自身氧的富余量, 同时造成温室气体的排放, 该环节的碳排放量核算公式如下:

$$F_{bp} = BE_{zy} \cdot EF_{bp} \quad (4)$$

式中, BE_{zy} 为露天矿消耗炸药量, t ; EF_{bp} 为炸药可燃剂的排放因子.

(3) 采装环节碳排放量.

采装环节的碳排放主要来源于电铲和液压铲作业时消耗大量柴油和电能等能源. 根据不同能耗的采掘设备, 该环节的碳排放量核算公式如下:

$$F_{cz} = F_{cz_elec} \cdot EF_{elec} + F_{cz_cy} \cdot EF_{cy} \quad (5)$$

其中:

$$F_{cz_elec} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{elec_i} P_{elec_i} \beta_i}{V_{elec_i}},$$

$$F_{cz_cy} = \sum_{j=1}^n \frac{Q_{cy_j} P_{cy_j} \alpha_j}{V_{cy_j}} \cdot \mu \quad (6)$$

式中, F_{cz_elec} 为采装设备的用电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; F_{cz_cy} 为采装设备的柴油用量; Q_{cy_i} 、 Q_{elec_i} 为电铲、液压铲的工作量, m^3 ; V_{elec_i} 、 V_{cy_j} 为电铲、液压铲的小时工作能力, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; P_{elec_i} 、 P_{cy_i} 为电铲、液压铲的额定功率, kW ; α_j 为采装用电设备的有功功率系数; β_i 为采装用油设备的电油转换系数; μ 为海拔对设备燃油消耗量的影响系数. 其中, Q_{cy_i} 、 Q_{elec_i} 、 V_{elec_i} 、 V_{cy_j} 可通过矿山智能卡调系统或设备运行参数测算获得^[26-27].

(4) 运输环节碳排放量.

运输环节主要分为移动式运输和固定式运输, 移动式运输设备主要为燃油矿卡和电动卡车, 固定式运输设备主要是带式输送机, 其碳排放主要来源为电能、柴油的使用所造成的, 该环节的碳排放量核算公式如下:

$$F_{ys} = F_{yd} + F_{gd} \quad (7)$$

式中, F_{yd} 为移动式运输的碳排放量, t ; F_{gd} 为固定式运输的碳排放量, t .

① 移动式运输的碳排放量为:

$$F_{yd} = F_{kc_cy} \cdot EF_{cy} + F_{kc_elec} \cdot EF_{elec} \quad (8)$$

卡车的电能消耗量为:

$$F_{kc_elec} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{elec_i} \cdot L_{elec_i} \cdot Q_{elec_i}}{V_{elec_i} \cdot v_{elec_i}} \quad (9)$$

卡车的柴油消耗量为:

$$F_{kc_cy} = \sum_{j=1}^n \frac{P_{cy_j} \cdot L_{cy_j} \cdot Q_{cy_j}}{V_{cy_j} \cdot v_{cy_j}} \cdot \mu \quad (10)$$

式中, F_{kc_cy} 为燃油卡车的柴油消耗量, t ; F_{kc_elec} 为电动卡车的电能消耗量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; Q_{cy_j} 、 Q_{elec_i} 为卡年总运输量, t ; V_{cy_j} 、 V_{elec_i} 为卡车额定载重量, t ; L_{cy_j} 、 L_{elec_i} 为油卡、电卡的平均运距, m ; v_{cy_j} 、 v_{elec_i} 为油卡、电卡的平均速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; P_{cy_j} 、 P_{elec_i} 为油卡、电卡的额定功率, kW ; μ 为海拔对设备燃油消耗量的影响系数. 其中, L_{cy_j} 、 L_{elec_i} 、 v_{cy_j} 、 v_{elec_i} 可通过矿山智能卡调系统或设备运行参数测算获得^[26-27].

② 固定式运输的碳排放量:

$$F_{gd} = F_{pd_elec} \cdot EF_{elec} = \frac{Q_{pd} \cdot P_{pd}}{V_{pd}} \cdot EF_{elec} \quad (11)$$

式中, F_{gd} 为固定式运输的碳排放量, t CO_2 ; F_{pd_elec}

为带式输送机消耗的电能, $\text{kW}\cdot\text{h}$; Q_{pd} 为带式输送机的总运输量, t ; P_{pd} 为皮带机的额定功率; V_{pd} 为带式输送机的运输能力, $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$.

(5) 破碎环节碳排放量.

破碎环节的碳排放集中在破碎机消耗电能所造成的间接碳排放, 该环节的碳排放量核算公式如下:

$$F_{\text{ps}} = F_{\text{ps_elec}} \cdot \text{EF}_{\text{elec}} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{\text{ps}} \cdot P_{\text{ps}}}{V_{\text{ps}}} \cdot \text{EF}_{\text{elec}} \quad (12)$$

式中, F_{ps} 为破碎环节产生的碳排放量, t ; Q_{ps} 为破碎机的总处理量, t ; V_{ps} 为破碎机的单位时间工作能力, $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$; P_{ps} 破碎机的额定功率, kW .

(6) 选矿环节碳排放量.

选矿环节的碳排放集中在大量的选矿设备, 尾矿处理环节与选矿环节联系紧密, 且两个环节主要能耗为电能, 所以将尾矿处理消耗的电能归到选矿环节电耗, 则该环节的碳排放量核算公式如下:

$$F_{\text{xk}} = F_{\text{xk_elec}} \cdot \text{EF}_{\text{elec}} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{\text{xk}} \cdot P_{\text{xk}-i}}{V_{\text{xk}-i}} \cdot \text{EF}_{\text{elec}} \quad (13)$$

式中, $F_{\text{xk_elec}}$ 为选矿环节的电能消耗量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; Q_{xk} 为选矿处理量, t ; $V_{\text{xk}-i}$ 为第 i 选矿设备的小时工作能力, $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$; $P_{\text{xk}-i}$ 为第 i 种类型设备的额定功率, kW .

(7) 辅助环节碳排放量.

辅助环节的碳排放主要集中在辅助设备, 其消耗能源以柴油和电能为主, 该环节的碳排放量核算公式如下:

$$F_{\text{fz}} = F_{\text{fz_elec}} \cdot \text{EF}_{\text{elec}} + F_{\text{fz_cy}} \cdot \mu \cdot \text{EF}_{\text{cy}} + F_{\text{fz_qy}} \cdot \mu \cdot \text{EF}_{\text{qy}} \quad (14)$$

式中, $F_{\text{fz_elec}}$ 为辅助环节的电力消耗量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; $F_{\text{fz_cy}}$ 为辅助环节的柴油消耗量, t ; $F_{\text{fz_qy}}$ 为辅助环节的汽油消耗量, t ; EF_{cy} 为柴油的碳排放因子; EF_{qy} 为汽油的碳排放因子; μ 为海拔对设备燃油消耗量的影响系数.

2.3 碳汇变化量核算

(1) 碳汇损失量.

高寒生态脆弱区的陆地生态系统中碳汇主要由植被和土壤的碳汇构成, 但是由于恶劣的环境导致其植被生长缓慢, 植被和土壤的自恢复能力较弱. 由于矿石开采活动对生态脆弱区原地貌林地、草地、耕地等固碳能力较强的植被移除后导致固碳能力丧失, 由碳汇型用地转变为碳源型用地, 并且对土壤的挖损、压占破坏了土壤的理化性质, 造成了矿区土壤碳库和植被碳库的碳汇损失, 其损失量核算公式如下:

$$F_{\text{cs}} = V_{\text{cs}} \cdot A + \text{SOC}_i \cdot A \quad (15)$$

式中, A 为采矿活动占用的土地面积(采场、排土场、尾矿库等); V_{cs} 为植被的单位面积年固碳能力, $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; SOC_i 为土壤剖面的有机碳密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$. 其中, SOC_i 可通过国家生态科学数据中心和文献中的公开数据中获取^[28-29].

① 植被碳汇损失量.

$$F_{\text{v}} = V_{\text{cs}} \cdot A = \sum_{i=1}^F Q_{\text{fi}} \varphi_{\text{CO}_2} \cdot A = \sum_{i=1}^F \text{NEP}_i \cdot A \quad (16)$$

式中, F 为占用的林地的林种数; Q_{fi} 为第 i 种的净初级生产力 (NPP), $(\text{g C})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; φ_{CO_2} 固定系数, 即单位净初级生产量能够固定的 CO_2 量; NEP 为植被净碳固定能力, $(\text{g C})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. 其中, NPP 、 NEP 可通过国家生态科学数据中心和文献中的公开数据中获取^[30-32].

② 土壤碳汇损失量.

$$F_{\text{s}} = \text{SOC}_i \cdot A = \rho_i \times C_i \times \frac{H_i}{100} \cdot A \quad (17)$$

式中, ρ_i 为土壤容重, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; C_i 为土壤有机碳浓度, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; H_i 为土层厚度, cm .

(2) 碳汇增加量

矿区采取了“边生产, 边复垦”的绿色生产方式, 通过修复受损的土地和植被, 可以恢复和提升矿区生态系统的固碳能力. 其恢复增加的碳汇量核算公式如下:

$$F_{\text{mc}} = V_{\text{mc}} \times S_{\text{m}} + \text{SOC}_{\text{mc}} \times S_{\text{m}} \quad (18)$$

式中, S_{m} 为复垦恢复植被的面积; V_{mc} 为复垦种类植被的单位面积年固碳能力, $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; SOC_{mc} 为复垦土壤剖面的有机碳密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

3 模型应用

3.1 矿区概况

西藏某大型露天矿山的生产规模为 $150 \text{ kt}\cdot\text{d}^{-1}$ ($45000 \text{ kt}\cdot\text{a}^{-1}$), 服务年限 21 a, 采用“汽车+半移动式(固定式)破碎站+胶带输送机联合运输”方案, 主要产品为铜精矿, 目前开采区域的平均海拔为 5000 m. 为克服艰难生产环境, 该矿山开展了大量智能化改造, 已建成智能卡车调度系统、设备健康监测系统、综合管控平台等, 不仅大幅提高了矿山的生产效率, 而且为矿山的碳排放核算提供了基础数据支持. 通过矿山的智能卡车调度等系统的数据统计查得, 穿孔设备牙轮钻机的单台穿孔能力为 $12600 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 单位能耗为 $27.55 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$, 炮孔直径为 310 mm, 深度为 16.5 m, 炸药单耗为

$0.57\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$, 破碎站的破碎机采用电能驱动方式, 破碎能力为 $5000\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$, 各工艺环节涉及的其他主要设备参数详见表 2 和表 3. 在节能减排方面, 该矿山利用运输胶带的长距离、高海拔落差等特点, 在带式输送机下行安装了电能回馈系统, 将矿石下山的势能转化为电能并反馈给矿山内部电网, 实现了设备自发电的节能效果. 另外, 该矿山还在矿区厂房屋顶建设了光伏发电系统, 充分利用高原地区充足的太阳能进行发电.

3.2 碳汇计算

由于模型应用的矿山地处西藏, 该地区具有

表 2 采装设备性能参数

Table 2 Shoveling equipment performance parameters

Equipment type	Bucket capacity/ m^3	Energy consumption type	Unit efficiency
WK-35	35	Electric energy	$0.75\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$
Hitachi 890	5	Diesel oil	$0.17\text{ L}\cdot\text{m}^{-3}$
Volvo 950	5.5	Diesel oil	$0.24\text{ L}\cdot\text{m}^{-3}$

表 3 运输设备性能参数

Table 3 Transportation equipment performance parameters

Equipment type	Energy consumption type	Rated volume/ m^3	Hourly efficiency/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	Ton-kilometer energy consumption
NTE260	Diesel oil	75.33	153	$0.11\text{ L}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$
NTE240	Diesel oil	75.33	153	$0.11\text{ L}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$
TR100	Diesel oil	31.34	55	$0.19\text{ L}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$
徐工110	Electric energy	31.34	64	$0.13\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$
电动矿车	Electric energy	28.62	45	$0.13\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$

表 4 矿山服务年限内碳汇损失总量

Table 4 Total amount of carbon sink loss during the service life of the mine

Number	Site	Total damaged area/ hm^2	Vegetation type	Soil carbon density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	Loss of soil carbon sink/ (t CO_2)	Loss of vegetation carbon sink/ (t CO_2)
1	Open-pit mining area	503.57	Moss, cushion-shaped herbs, or small shrubs	12.2	61435.54	416.30
2	Mining industrial sites	47.53	Alpine meadow	12.2	5798.66	39.29
3	Mineral processing industrial site	74.52	Alpine meadow	14.6	10879.92	61.61
4	Tailings pond	643.89	Farmland and grassland	15.2	97871.28	532.30
5	Waste disposal site	793.39	Moss, cushion-shaped herbs, or small shrubs	12.2	96793.58	655.90
6	Topsoil storage yard	41.91	Alpine meadow	12.2	5113.02	34.65
7	Supporting engineering	273.35	Watered land, natural grassland, and inland mudflat	20.7	56583.45	225.98
8	Other temporary production sites	33.83			7002.81	27.97
Total		2411.99	—	—	341478.26	1993.99
Total loss/ (t CO_2)		—	—	—	343472.25	
Annual average loss/ (t CO_2)		—	—	—	16355.82	

高寒生态脆弱区的环境特征, 因此进行碳汇计算时需考虑该地区特殊的自然条件和碳汇现状, 从文献公开数据中可知相同海拔环境条件下, 不同区域的土壤碳密度^[28-29]和植被净生态生产力^[30-32]基本一致, 在进行矿区的碳汇计算时, 植被净初级生产力(NPP)为 $120.21\text{ (g C)}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 植被净碳固定能力(NEP)为 $82.67\text{ (g C)}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 土壤碳密度见表 4. 将矿山服务年限内碳汇损失总量均摊至每年, 得到矿山的年度碳汇损失量, 核算结果见表 4.

3.3 碳排放核算及结果分析

(1) 排放总量核算.

根据矿山 2023 年各项生产作业涉及的设备、生产设备的性能参数等数据, 参考《矿山企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》及 IPCC 指南中提供的碳排放因子^[33-34], 并且结合西藏自治区生态环境厅提供的电力碳排放因子, 对矿山碳排放总量进行核算, 核算结果如表 5 和图 5 所示, 可以直观看选出选矿环节占比最大, 为排放总量

表 5 2023 年矿山开采碳排放量

Table 5 Carbon emissions from Julong copper mining in 2023

Number	Production processes	Emission type	Emission amount/(t CO ₂)	Proportion/%
1	Perforation	Indirect emission	1211.30	0.69
2	Blasting	Direct emission	3686.85	2.09
3	Shovelling	Direct/Indirect emission	7762.29	4.40
4	Truck transportation	Direct/Indirect emission	48279.29	25.80
	Belt transportation	Indirect emission	-2926.08	
5	Crushing	Indirect emission	672.15	0.38
6	Mineral processing	Indirect emission	99824.35	56.57
7	Auxiliary operation	Direct/Indirect emission	1429.70	0.81
8	Carbon sink loss	Indirect emission	16355.82	9.27
Total carbon emission		Direct/Indirect emission	17.6295×10 ⁴	100

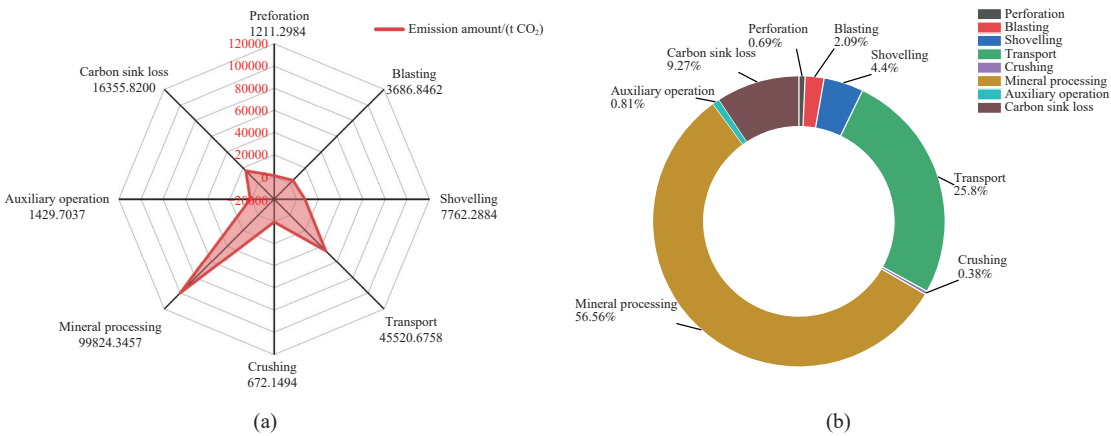


图 5 不同开采环节碳排放量。(a) 各生产环节碳排放雷达图; (b) 各生产环节碳排放占比

Fig.5 Carbon emission ratio of different mining processes: (a) carbon emission radar charts for each production process; (b) proportion of carbon emissions in each production process

的 56.57%, 其次是运输环节排放量, 达到排放总量的 25.80%。其中, 胶带运输环节的碳排放量为 -2926.08 t CO₂, 是由于该矿山建设了运输胶带和光伏发电系统, 据统计这两套发电系统 2023 年的累计输出电量约 3310 万 kW·h, 实现的碳减排量为 2926 t CO₂。

(2) 能源碳排放分析。

通过对该矿山 2023 年矿石开采活动能源消耗进行统计分析可知, 主要碳排放来源为消耗炸药、汽油、柴油和电能, 如图 6 所示电能、柴油是造成的碳排放量最主要因素, 其造成的碳排放量占比分别为碳排放总量的 62.77% 和 34.63%。

(3) 不同维度碳排放量流动分析。

基于生产环节、能源类型、排放类型三个维度进行分析, 如图 7 所示, 从矿山生产环节上看, 选矿环节的碳排放占比最大, 其次是运输环节的碳排放, 碳排放最小的是穿孔环节的碳排放; 从碳排

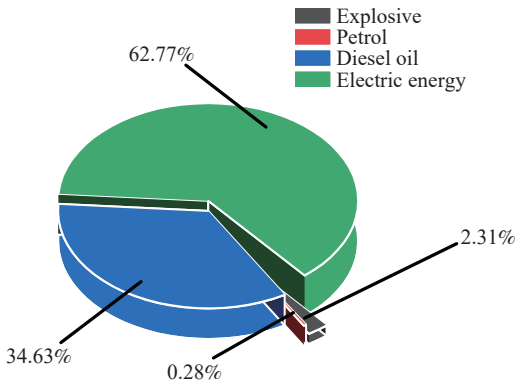


图 6 不同能耗类型碳排放占比

Fig.6 Carbon emission ratio of different types of energy consumption

放来源上看, 电能造成的碳排放达到 60% 以上, 柴油产生碳排放为 30% 左右, 汽油造成的碳排放不足 1%; 从碳排放类型上看, 露天矿山开采的碳排放由直接碳排放和间接碳排放构成, 其中柴油、汽油、炸药造成的直接碳排放量约为 40%, 电能和碳

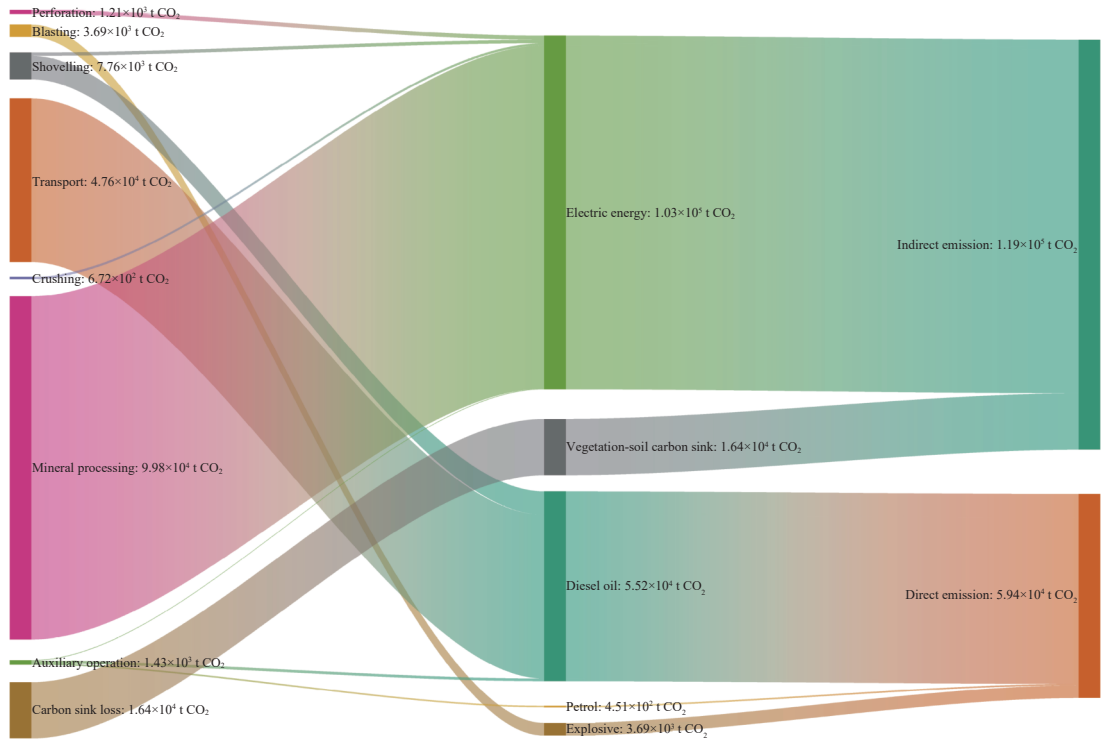


图 7 露天矿山开采活动碳排放量流动统计

Fig.7 Direction of carbon emissions from open-pit mining

汇损失造成的间接碳排放量约为 60%。

3.4 讨论

通过将模型应用于高寒生态脆弱区露天金属矿山碳排放进行核算,详细评估了矿山不同生产环节的碳排放情况,核算结果揭示了矿山开采、运输、选矿等生产过程中碳排放的主要来源和分布特点,对矿山的指导意义如下。

(1)量化评估矿山碳排放水平。

通过碳排放核算模型的应用,可识别和量化矿山生产过程中的直接和间接碳排放源,并基于核算结果分析出矿山碳排放的主要致因,揭示了高寒生态脆弱区露天矿山碳排放的独特性,量化评估了矿山的碳排放水平,为矿山的碳排放管理提供数据支持。

(2)加强矿山碳排放管理与排放数据应用。

高寒生态脆弱区的自然环境对外部干扰极为敏感,大量的碳排放不仅对全球气候变化产生影响,还进一步加剧生态脆弱区的生态退化问题,因此,高寒生态脆弱区矿山的碳排放管理需要结合政府的生态保护要求,加强碳排放的精细化管控,避免因违规处罚增加矿山的生产运营成本。

(3)推动矿山低碳转型与可持续发展。

矿山企业可根据碳排放核算结果的多维分析,制定具有针对性的碳减排策略,包括优化生产

系统、提高矿山智能化程度、改造设备节能、使用清洁能源、生态恢复增加碳汇、实施碳捕集与封存技术等。

4 结论

(1)本文基于高寒生态脆弱区露天矿山生产活动,根据矿石产品的生命周期将露天矿山的碳排放核算范围确定为矿石的采选阶段,针对高寒及生态脆弱的特点,厘清了核算范围内露天矿山生产环节碳排放过程的碳源/碳汇,构建了露天矿山的碳排放核算模型,以西藏某大型露天矿山为例进行了模型应用。

(2)本文立足于高寒生态脆弱区的高海拔、植被生长周期长、自我恢复能力弱等环境特点,将矿山开采对生态扰动造成的植被-土壤碳汇损失造成的碳排放纳入核算范围,量化了露天矿山开采对高寒生态脆弱区的生态扰动,并引入海拔高度对矿山设备能耗的影响系数,提高了高寒生态脆弱区露天矿山的碳排放核算的准确性。

(3)本文通过分析采矿前后矿区生态系统的碳循环系统,总结出矿山开采活动导致矿区生态系统植被-土壤的碳汇损失过程,基于对矿山开采、运输、破碎、选矿等环节的主要作业、设备和能耗分析,构建了矿山碳排放清单,并发现矿山的

碳排放主要由柴油、汽油等燃料和炸药消耗产生的直接碳排放,及电能消耗和碳汇损失产生的间接碳排放构成。

参 考 文 献

- [1] Schmidt G. Climate models can't explain 2023's huge heat anomaly—We could be in uncharted territory. *Nature*, 2024, 627: 467
- [2] Cai J, Luo D N, Xiao S Y. Analysis of the impact of carbon emission trading on carbon emissions in pilot districts: Carbon emission volume and efficiency perspectives. *Syst Eng Theory Pract*, 2024, 44(9): 2838
(蔡俊, 骆丹娜, 萧莘玥. 碳排放权交易试点政策的减排效应分析—基于碳排放量和碳排放效率的视角. 系统工程理论与实践, 2024, 44(9): 2838)
- [3] Ma Y, Feng L Y. Analysis of the market effectiveness of pilot carbon emission trading markets in China. *Oper Res Manag Sci*, 2022, 31(8): 195
(马跃, 冯连勇. 中国试点碳排放权交易市场有效性分析. 运筹与管理, 2022, 31(8): 195)
- [4] Guo Q F, Xi X, Yang S T, et al. Technology strategies to achieve carbon peak and carbon neutrality for China's metal mines. *Int J Miner Metall Mater*, 2022, 29(4): 626
- [5] Xie H P, Ren S H, Xie Y C, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality. *J China Coal Soc*, 2021, 46(7): 2197
(谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197)
- [6] Wang Y, Wu A X, Yang J, et al. Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines. *Chin J Eng*, 2023, 45(8): 1281
(王勇, 吴爱祥, 杨军, 等. 深部金属矿开采关键理论技术进展与展望. 工程科学学报, 2023, 45(8): 1281)
- [7] Zhang Z F, Ji C S, Wang X L, et al. Study on calculation of carbon emission from underground coal mining. *Min Process Equip*, 2012, 40(10): 1
(张振芳, 姬长生, 王晓琳, 等. 地下开采煤矿碳排放量核算初探. 矿山机械, 2012, 40(10): 1)
- [8] Wang X L, Ji C S, Zhang Z F, et al. Analysis on the composition of carbon emission sources in coal mining areas based on carbon footprint. *Saf Coal Mines*, 2012, 43(4): 169
(王晓琳, 姬长生, 张振芳, 等. 基于碳足迹的煤炭矿区碳排放源构成分析. 煤矿安全, 2012, 43(4): 169)
- [9] Cai Q X, Liu F M, Chen S Z. Calculation method of greenhouse gas emission in open pit coal mines. *J China Coal Soc*, 2012, 37(1): 103
(才庆祥, 刘福明, 陈树召. 露天煤矿温室气体排放计算方法. 煤炭学报, 2012, 37(1): 103)
- [10] Yang B Y, Bai Z K, Zhang X R. Carbon emission from land damage area in large opencast coal mines: A case study of pingshuo mining area. *China Land Sci*, 2017, 31(6): 59
(杨博宇, 白中科, 张笑然. 特大型露天煤矿土地损毁碳排放研究—以平朔矿区为例. 中国土地科学, 2017, 31(6): 59)
- [11] Bharathan B, Sasmito A P, Ghoreishi-Madiseh S A. Analysis of energy consumption and carbon footprint from underground haulage with different power sources in typical Canadian mines. *J Clean Prod*, 2017, 166: 21
- [12] Li B Z, Shi Y K, Hao J, et al. Research on a carbon emission calculation model and method for an underground fully mechanized mining process. *Energies*, 2022, 15(8): 2871
- [13] Wang J M, Yang M, Liu B, et al. Carbon sources/sinks and emission reduction and sink enhancement in green mining. *J China Coal Soc*, 2024, 49(3): 1597
(王金满, 杨曼, 刘彪, 等. 绿色矿山建设碳源/汇与减排增汇研究进展. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1597)
- [14] An Y L, Bian Z F, Dai W T, et al. Analysis on the gas carbon source and carbon sink in coal mining: A case study of Jiawang, Xuzhou. *J China Univ Min Technol*, 2017, 46(2): 415
(安英莉, 卞正富, 戴文婷, 等. 煤炭开采形成的碳源/碳汇分析—以徐州贾汪矿区为例. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2): 415)
- [15] Huang Q, Chen X Y, Shi M M, et al. The spatial distribution and driving factors of carbon storage in the grassland ecosystems of the northern Tibetan Plateau. *J Resour Ecol*, 2023, 14(5): 893
- [16] Liu J C, Gao W C, Liu T Z, et al. A bibliometric analysis of the impact of ecological restoration on carbon sequestration in ecosystems. *Forests*, 2023, 14(7): 1442
- [17] Yang B Y, Bai Z K. Research advances and emission reduction measures in carbon source and sink of land ecosystems in coal mining area under the carbon neutrality. *China Min Mag*, 2021, 30(5): 1
(杨博宇, 白中科. 碳中和背景下煤矿区土地生态系统碳源/汇研究进展及其减排对策. 中国矿业, 2021, 30(5): 1)
- [18] Jiao K W, Liu Z H, Wang W J, et al. Carbon cycle responses to climate change across China's terrestrial ecosystem: Sensitivity and driving process. *Sci Total Environ*, 2024, 915: 170053
- [19] Liu J Y, Yu G R, Wang S Q, et al. A method of geo-information science for studying carbon cycle and its mechanism of terrestrial ecosystems. *Geogr Res*, 2003, 22(4): 397
(刘纪远, 于贵瑞, 王绍强, 等. 陆地生态系统碳循环及其机理研究的地球信息科学方法初探. 地理研究, 2003, 22(4): 397)
- [20] Huang Y, Wang Y J, Tian F, et al. Carbon disturbance effects in the vegetation-soil system caused by coal mining. *Resour Sci*, 2014, 36(4): 817
(黄翌, 汪云甲, 田丰, 等. 煤炭开采对植被-土壤系统扰动的碳效应研究. 资源科学, 2014, 36(4): 817)
- [21] Rastetter E B, Kling G W, Shaver G R, et al. Ecosystem recovery from disturbance is constrained by N cycle openness, vegetation-soil N distribution, form of N losses, and the balance between vegetation and soil-microbial processes. *Ecosystems*, 2021, 24(3): 667
- [22] Zhang R X, Mao S J, Zhao H Z, et al. Framework and structure

- design of system construction for intelligent open-pit mine. *Coal Sci Technol*, 2019, 47(10): 1
(张瑞新, 毛善君, 赵红泽, 等. 智慧露天矿山建设基本框架及体系设计. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 1)
- [23] Gao F, Zhou K P, Xiong X. Present situation and key problems of metal mineral resources exploitation in high altitude cold region of China. *Min Res Dev*, 2022, 42(10): 1
(高峰, 周科平, 熊信. 我国高海拔寒区金属矿产资源开采现状及关键问题. 矿业研究与开发, 2022, 42(10): 1)
- [24] Zhou H, Zhao H W, Feng Q, et al. Effects of environmental parameters on real-world NO_x emissions and fuel consumption for heavy-duty diesel trucks using an OBD approach // *SAE Technical Paper Series*. Warrendale, 2018: 01
- [25] Wang Y C, Feng X, Zhao H G, et al. Experimental study of CO₂ and pollutant emission at various altitudes: Inconsistent results and reason analysis. *Fuel*, 2022, 307: 121801
- [26] Zhang S, Lu C W, Jiang S, et al. An unmanned intelligent transportation scheduling system for open-pit mine vehicles based on 5G and big data. *IEEE Access*, 2020, 8: 135524
- [27] Wu L H, Canz M, Guevara, H, et al. Intelligent construction system and application scenario of large-scale open-pit mines overseas: Taking Las Bambas Copper Mine as example. *Metal Mine*, 2024: 1
(吴立活, Canz M, Guevara, H, 等. 海外大型露天矿山智能化建设体系与应用实践—以拉斯邦巴斯铜矿为例. 金属矿山, 2024: 1)
- [28] Fan Y, Liu S Q, Zhang S R, et al. Background organic carbon storage of topsoil and whole profile of soils from Tibet District and their spatial distribution. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26(9): 2834
(范宇, 刘世全, 张世熔, 等. 西藏地区土壤表层和全剖面背景有机碳库及其空间分布. 生态学报, 2006, 26(9): 2834)
- [29] Gao M R, Shi J P, Pan K. Soil type database of Tibet: A region-wide soil dataset based on the Second National Soil Survey. *China Sci Data*, 2017, 2(1): 85
(高美荣, 施建平, 潘恺. 西藏土种志—基于全国第二次土壤普查的数据集. 中国科学数据, 2017, 2(1): 85)
- [30] Wu D Q, Hou W, Sang H Y, et al. Analysis of spatio-temporal variation of vegetation carbon sources/sinks in Tibet and its impact factors. *Sci Surv Mapp*, 2022, 47(8): 105
(吴东清, 侯伟, 桑会勇, 等. 西藏植被碳源/汇时空变化特征及其影响因子分析. 测绘科学, 2022, 47(8): 105)
- [31] Wang T, Wang X Y, Liu D, et al. The current and future of terrestrial carbon balance over the Tibetan Plateau. *Sci Sin (Terrae)*, 2023, 53(7): 1506
(汪涛, 王晓昶, 刘丹, 等. 青藏高原碳汇现状及其未来趋势. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(7): 1506)
- [32] Wang Y Y, Xiao J F, Ma Y M, et al. Persistent and enhanced carbon sequestration capacity of alpine grasslands on Earth's Third Pole. *Sci Adv*, 2023, 9(20): eade6875
- [33] Ju L P, Zhu Y B. Study on the accounting method of greenhouse gas emission of ion absorbed rare earth enterprises in South China. *China Min Mag*, 2023, 32(8): 34
(鞠丽萍, 祝怡斌. 南方离子吸附型稀土企业温室气体排放核算方法研究. 中国矿业, 2023, 32(8): 34)
- [34] Rachid S, Taha Y, Benzaazoua M. Environmental evaluation of metals and minerals production based on a life cycle assessment approach: A systematic review. *Miner Eng*, 2023, 198: 108076