doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.019
引用格式：陈伯洲，胡建华，齐顺山 . 高寒高海拔地区露天矿开采的碳排放核算研究[J]. 矿冶，2026，35(1)：147-153.
CHEN Bozhou, HU Jianhua, QI Shunshan. Carbon emission accounting of open-pit mining in high-altitude and cold regions[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 147-153.

高寒高海拔地区露天矿开采的碳排放核算研究

陈伯洲[1] 胡建华[1] 齐顺山[2]
（1. 福州大学 紫金地质与矿业学院，福州 350108；
2. 山东华联矿业股份有限公司，山东 沂源 256119）

摘 要：高耗能、高排放的矿山行业是实现节能减排与碳中和目标的重要环节之一，传统碳排放模型低估温度和海拔对高寒高海拔地区露天矿开采的碳排放影响。以西藏巨龙铜矿为例，采用IPCC清单因子法重新构建考虑温度和海拔的碳排放响应模型，核算了高寒高海拔地区露天矿开采的碳排放指标。结果表明：主要直接碳排放源为自卸汽车，自卸汽车的柴油消耗量最大达12 580 kg·h^{-1}，其小时碳排放量最大达38 996 kg·h^{-1}，超其他设备综合碳排放量；温度和海拔对露天矿山的机械功率影响明显，矿山机械发动机功率下降49%，温度修正系数在冬季可达到1.06。基于开采特征，提出了优化自卸汽车，调整运输路线和铲车比等方法来减少碳排放的管理路径。精确核算高寒高海拔地区露天矿开采的碳排放有利于完善全国的碳排放核算模型，助力国家碳减排政策制定。

关键词：碳排放；矿山机械；巨龙铜矿；高寒高海拔；核算模型
中图分类号：X511；TD7 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854(2026)01-0147-07

Carbon emission accounting of open-pit mining in high-altitude and cold regions

CHEN Bozhou[1] HU Jianhua[1] QI Shunshan[2]
(1. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Shandong Hualian Mining Co. Ltd., Yiyuan 256119, Shandong, China)

Abstract: The high-energy-consuming and high-emission mining industry is one of the important links in achieving the goals of energy conservation, emission reduction and carbon neutrality. Traditional carbon emission models underestimate the impact of temperature and altitude on carbon emissions from open-pit mining in high-cold and high-altitude areas. Taking the Julong Copper Mine in Xizang as an example, the IPCC inventory factor method was used to reconstruct the carbon emission response model considering temperature and altitude, and the carbon emission indicators of open-pit mining in high-cold and high-altitude areas were calculated. The results indicate that dump trucks are the primary source of direct carbon emissions, with a maximum diesel consumption of 12 580 kg·h^{-1} and an hourly carbon emission of up to 38 996 kg·h^{-1}, exceeding the combined emissions of other equipment. Temperature and altitude significantly affect the mechanical power of mining equipment, with engine power declining by 49% and a temperature correction factor reaching 1.06 in winter. Based on the mining characteristics, management strategies such as optimizing dump trucks, adjusting transportation routes, and modifying the loader-to-truck ratio are proposed to reduce carbon emissions. Accurately accounting for carbon emissions from open-pit mining in high-altitude and cold regions contributes to refining national carbon emission accounting models and supports the formulation of national carbon reduction policies.

Key words: carbon emissions; mining machinery; Julong copper mine; high altitude and cold weather; accounting model

收稿日期：2025-06-21
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52274182)；福州大学2023年省级大学生创新创业训练计划项目(S202310386110)
第一作者：陈伯洲，本科生，从事矿床学、碳源汇研究工作。E-mail：3408034515@qq.com
通信作者：胡建华，博士，教授；E-mail：hujh21@fzu.edu.cn

全球变暖已成为21世纪最严峻的环境挑战之一，对生态系统、社会经济和人类健康构成严重威胁。自2009年以来，中国一直是世界上最大的CO_2排放国。为积极应对气候变化、承担大国责任，中国于2020年9月在第七十五届联合国大会上郑重承诺：力争于2030年前实现CO_2排放达峰，并在2060年前实现碳中和[1]。实现“双碳”目标的关键基础是建立科学、准确的碳排放核算体系，这不仅是推动经济绿色转型的根本前提，也是我国深度参与全球气候治理、履行国际承诺的重要支撑[2]。

当前，我国能源结构仍以煤炭为主，煤炭消费已成为CO_2排放的主要来源[3]。矿山行业作为典型的高耗能、高排放领域，其节能减排进程对实现“双碳”目标具有决定性影响[4]。相比井下开采，露天开采因其作业规模大、运输距离长、重型设备使用密集等特点，通常伴随更为显著的碳排放问题[5,6]。研究显示，在铁矿、铝土矿及煤矿等露天开采活动中，仅矿物装载与运输环节的能耗就占总能耗的41%~66%，相应产生的温室气体排放占比亦达37%~54%[6]。因此，系统识别露天矿山的主要碳排放源，构建精确的碳排放核算模型，深入分析不同开采环节与设备的排放特征，是制定与优化矿山碳减排策略的科学基础[7,8]。

近年来，国内外学者围绕露天矿碳排放核算开展了诸多有益探索。部分研究聚焦于关键排放环节的识别与核算方法改进，如刘福明等[9]对比不同运输模式，发现卡车运输的单位能耗可达带式输送机的4~12倍；杨博宇等[10]基于《2006年IPCC国家温室气体清单指南》，构建了针对山西平朔露天煤矿的碳排放核算模型，并据此提出环节减排建议。然而，现有研究多集中于一般气候与地理条件下的矿区，对高寒、高海拔等特殊环境关注不足，往往忽略温度与海拔对矿山设备运行效率及燃料消耗的显著影响。研究表明，高海拔地区空气稀薄、氧含量低，易导致内燃机燃烧不充分、功率下降、油耗上升，继而大幅增加单位作业的碳排放强度[11]。若沿用常规核算模型，将严重低估该类地区露天矿的真实排放水平，阻碍减排政策的精准制定与实施。

为弥补上述研究空白，本文以西藏巨龙铜矿为例，依据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》2019年修订版（IPCC，2006），系统收集矿山直接与间接碳排放源数据，并针对高寒高海拔环境特征，引入温度与海拔修正因子，重构碳排放响应模型。该修正模型能够更真实地反映极端环境对露天开采碳排放的影响机制，有助于提升全国碳排放核算体系的完整性、区域适应性与政策针对性，同时为高海拔地区矿山企业的绿色转型与低碳运营提供科学依据与实践参考[12]。

1 高寒高海拔地区露天矿开采碳排放核算

IPCC清单因子法，亦称排放系数法，是联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的、国际公认的温室气体排放核算指南。在最新IPCC指南（2019年修订版）中，该方法覆盖能源、工业过程与产品使用、农林及其他土地利用、废弃物四大部门的碳排放核算，其核心计算公式为：碳排放量=活动数据×排放因子。应用IPCC清单因子法核算矿山碳排放时，首先需系统识别并分类矿山的碳排放源，梳理形成碳排放清单，进而建立核算模型。通过统计各类排放源的活动数据，并依据IPCC指南选取相应的排放因子，即可计算得出矿山碳排放总量。

1.1 露天矿区开采过程中的主要碳排放源

依据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》，露天矿的碳排放源可分为直接排放源与间接排放源。

1.1.1 直接碳排放源

主要来源于矿山机械的化石燃料消耗。在采矿、选矿过程中，矿用自卸卡车、装载机、平路机等设备消耗大量柴油等燃料。燃油消耗不仅是露天开采的主要成本构成，也是其最核心的直接碳排放来源。

1.1.2 间接碳排放源

主要产生于矿山开采过程中的电力及水资源消耗所隐含的碳排放。其中，电力消耗是露天开采最主要的间接碳排放源。研究区矿场的用电设备主要包括发电车、电缆卷收车、高压清洗车等。因此，在核算露天采矿碳排放时，必须将电力消耗产生的间接排放纳入考量。

1.2 核算模型

温室气体直接排放量按公式（1）计算：

$$E=\sum_i M_i \times EF_i \qquad (1)$$

式中，M_i为第i类能源的消耗量（本研究主要核算柴油）；EF_i为第i类能源的碳排放因子。直接碳排放因子采用《2006年IPCC国家温室气体清单指南》规定的缺省值，详见表1。

研究区矿山机械的柴油消耗量依据设备已知参数进行推算[13]。温室气体间接排放量按公式（2）计算：

表1 直接产生温室气体的能源消耗活动水平

Table 1 Levels of energy-consuming activities that directly generate greenhouse gases

能源名称	平均低位发热量/(kJ·kg^{-1})	折标准煤系数	单位热值含碳量(TC·TJ^{-1})	碳氧化率	二氧化碳排放系数(kgCO$_2$·kg^{-1})
汽油	43 124	1.471 4	18.9	0.98	2.928 7
柴油	42 705	1.457 1	20.2	0.98	3.099 8
燃料油	41 816	1.428 6	21.1	0.98	3.170 5

$$E_{ele}=\sum D\times EF_{ele} \quad (2)$$

式中，D为核算期内的露天矿耗电量，数据通过设备参数换算获得；EF_{ele}为电网平均CO_2排放因子。

由于西藏巨龙铜矿所在的西藏自治区未纳入区域电网覆盖范围，因此采用2023年全国电网平均排放因子，取值为0.608 kg·(kWh)$^{-1}$[13]。

1.3 数据获取与误差校正

高海拔地区空气稀薄，大气压力低，导致进入内燃机气缸的氧气含量不足。这会降低压缩终点的压力与温度，致使发动机燃烧效率下降、功率衰减、油耗增加，从而显著影响碳排放的核算精度[14]。因此，为构建更精确的高寒高海拔地区碳排放模型，必须对海拔与温度因素进行校正。鉴于柴油动力是当前露天矿山的主流动力源，本研究以柴油发动机组为例进行校正[13,15]。

1.3.1 海拔因素功率校正

柴油机性能受大气压力变化影响显著。研究表明，大气压力每降低10 kPa，柴油机功率下降幅度在2.3%~16.7%[16]。海拔因素影响下的油耗校正公式如式(3)所示：

$$Q_T'=\frac{PQ_p}{\delta_1} \quad (3)$$

式中，Q_T'为经海拔修正后的每小时油耗，kg·h^{-1}；δ_1为海拔修正系数；Q_P为燃油消耗率，kg·(h·kW)$^{-1}$，低海拔地区柴油机组平均燃油消耗率取0.15 kg·(h·kW)$^{-1}$[14,16]；P为柴油机组功率，kW。

研究区西藏巨龙矿场平均海拔4 750 m，大气压力下降约45 kPa，对应功率下降约49%。因此，本研究δ_1取值为0.49。

1.3.2 温度因素功率校正

温度变化同样影响柴油机性能。研究表明，在海拔4 km处，环境温度从−20 ℃升至30 ℃会导致柴油机功率累计下降约7%，平均每升高10 ℃，功率下降1.1%~1.5%[17]。温度因素影响下的油耗校正公式如式(4)所示：

$$Q_T=\frac{Q_T'}{\delta_{2i}} \quad (4)$$

式中，Q_T为经温度修正后的每小时油耗，kg·h^{-1}；δ_{2i}为温度修正系数(i=1，2，3)。研究区西藏巨龙矿场位于墨竹工卡县，全年气温在−23~30 ℃波动。

本研究根据季节设定典型工作环境温度：春秋季(3~5月，9~11月)为15 ℃，夏季(6~8月)为25 ℃，冬季(12~2月)为−20 ℃。据此，δ_{21}(春秋季)取1.02，δ_{22}(夏季)取0.98，δ_{23}(冬季)取1.06。

此外，参考《关于进一步规范煤矿劳动用工促进煤矿安全生产的指导意见》(国家矿山安全监察局，2020年)，并考虑露天采矿作业的安全性与强度，模型设定矿山作业遵循每日8小时工作制，且在此期间所有机械均处于正常运行状态。

综上，以西藏巨龙铜矿为研究对象，高寒高海拔地区露天矿单台机械的日柴油消耗量数学模型可由公式(5)表达：

$$G_i=\frac{8Q_p}{1-\delta_i\delta_{2i}} \quad (5)$$

式中，G_i为第i种机械的日柴油消耗量，kg。

2 结果和讨论

2.1 海拔影响下的碳排放变化

经海拔因素修正后，露天矿开采各类设备的单机小时油耗变化如图1所示。

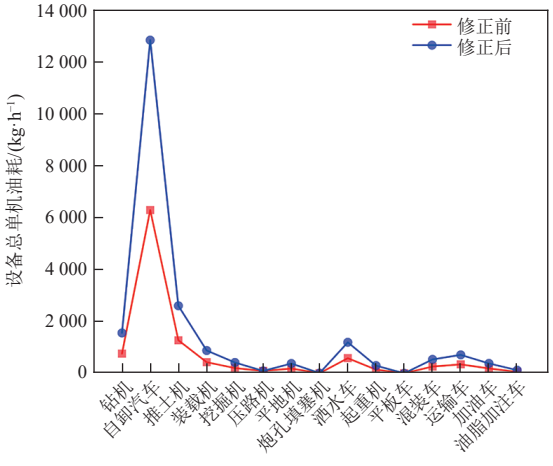


图1 设备总单机油耗变化

Fig. 1 Changes in total fuel consumption per unit of equipment

根据设备类型，对西藏巨龙铜矿开采过程中所用机械进行分类。对比各类机械的柴油消耗量可知，自卸汽车的油耗最高，达12 580 kg·h^{-1}。钻机、推土机和洒水车的油耗也处于较高水平，分别为1 555、2 601和1 198 kg·h^{-1}。而炮孔填塞机、压路机及平板车等设备的油耗总体较低，其中平板车的油耗极低，可忽略不计。

结合实地调研与文献分析，自卸汽车的高油耗与其在露天矿开采中承担的关键任务密切相关。如图2所示，自卸汽车主要负责开采后矿石与废渣的转运。由于高寒高海拔地区道路地形复杂，相较于平原矿区，其运输作业需要更大的设备马力和更多的车辆投入[18,19]。然而，大量自卸汽车在提升作业效率的同时，也成为了碳排放的主要源头。如图3(a)、图3(b)所示，自卸汽车的小时碳排放量高达38 996 kg·h^{-1}，远高于其他设备，占总排放量的57.7%，是高寒高海拔露天矿开采的最大直接碳排放源。因此，合理配置自卸汽车数量并优化其发动机性能，是降低该环节碳排放的关键手段。此外，巨龙铜矿的铲车比为0.83，显著高于安太堡露天煤矿的0.49（图2）。研究表明，优化铲车比有助于提升整体设备效率，从而部分抵消高海拔环境导致的发动机功率损失[18]。

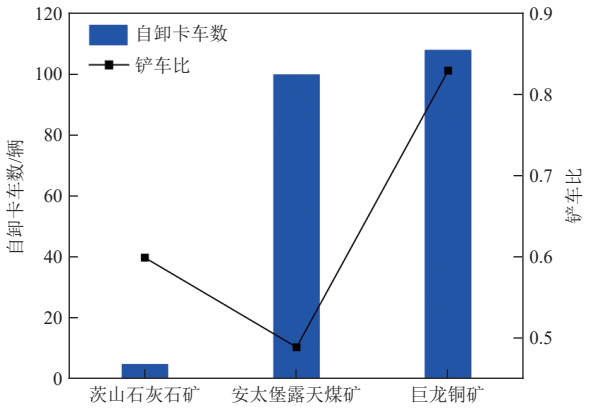


图2 各矿场自卸汽车数及铲车比

Fig. 2 Number of dump trucks and forklift ratio in each mine

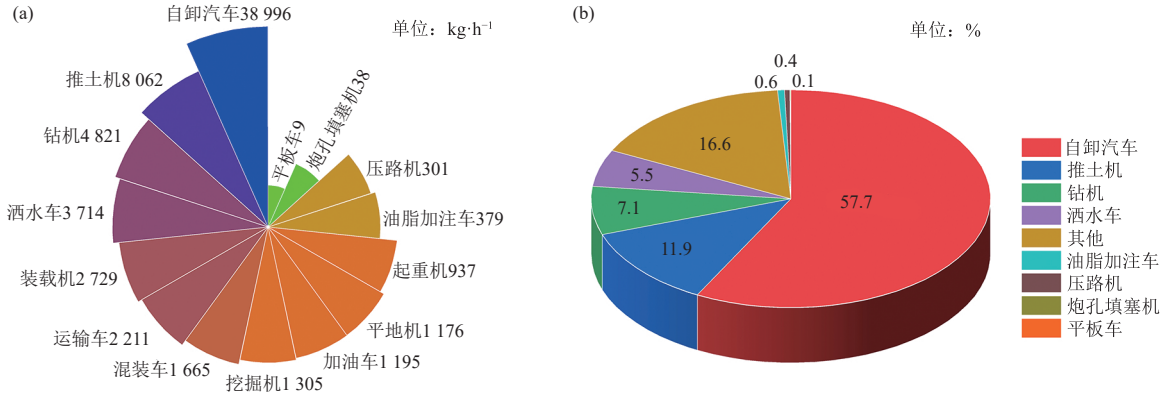


图3 设备小时碳排放量及占比

Fig. 3 Equipment hourly carbon emissions and proportion

钻机、推土机和洒水车的碳排放量处于第二梯队，分别为8 062、4 821和3 714 kg·h^{-1}，合计占总排放量的24.5%。而炮孔填塞机、压路机及平板车等设备的碳排放量总计仅占1.1%（图3(b)）。这主要由于钻机、推土机等设备使用频率高、作业强度大，导致其油耗及相应碳排放显著高于平板车等辅助设备。

2.2 温度影响下的碳排放变化

温度升高会严重影响柴油发动机组的功率，降低机组扭矩[16]。由于巨龙铜矿位于高寒高海拔地带，全年温度波动较大，最高温度与最低温度差达53 ℃。因此，温度因素对设备的影响不能忽视。

设备各季节总碳排放量及修正前后差如图4所示。除平板车外，夏季各设备的碳排放量较修正前普遍上升，平均增幅约2%。其中钻机的增幅最大，约为4%。春、秋两季温度相近，碳排放量较修正前略有降低，降幅大致相当。冬季气温远低于平原地区平均水平，碳排放量较春、秋季进一步下降。所有设备中，自卸汽车的碳排放总量受季节影响最为显著。夏季其碳排放总量达29 287 t，较未修正值增加约592 t；冬季则下降约1 637 t。这主要归因于自卸汽车数量庞大，且其发动机性能对温度变化敏感。因此，如何减缓高温对发动机的不利影响、减少夏季高温时段的作业频次，并合理利用冬季低温条件延长有效作业时间，是需要重点解决的问题[20]。具体措施可包括：夏季调整作业计划，增加傍晚与夜间作业时长，并适度降低自卸汽车等设备的工作强度；冬季则可在设

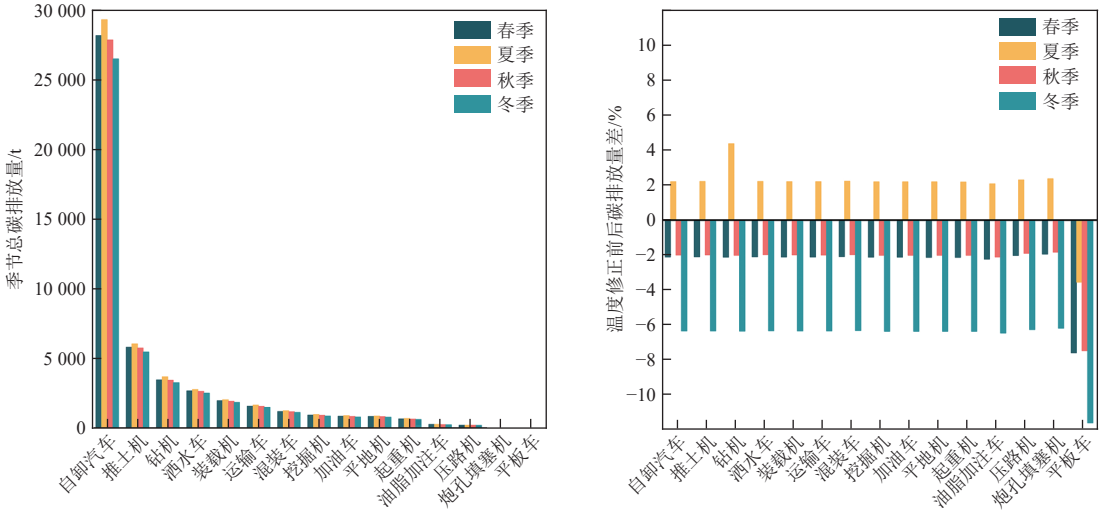


图4　设备各季节总碳排放量及修正前后差

Fig. 4　Total carbon emissions of equipment in each season and the difference before and after correction

备耐受范围内合理增加作业强度与使用频次。

2.3　高寒高海拔地区露天矿开采碳排放核算修正模型

本研究聚焦高寒高海拔地区的特殊环境，重点探讨了极端气候条件下矿山设备性能变化对碳排放的影响。露天矿开采涉及多环节、多工种、多设备协同作业，设备使用频率与数量均维持在较高水平[20]。为此，在综合考虑海拔与温度双重限制因素后，对碳排放核算模型进行了修正，修正后的年总碳排放量计算公式如式(6)所示：

$$E_T = \frac{E}{\sum_{i=1}^{3} \delta_1 \delta_{2i}} + E_{ele} \tag{6}$$

式中，E_T为高寒高海拔地区露天矿开采的年总碳排放量，t。

修正前后年总碳排放量的对比如图5所示。修正后的年总碳排放量为215 095 t，约为未修正模型计算结果(53 018 t)的4.07倍。这一结果表明，修正后的模型能够更准确地反映高寒高海拔矿区的实际碳排放情况，有效填补了因极端环境导致设备碳排放变化而被忽略的核算空白。

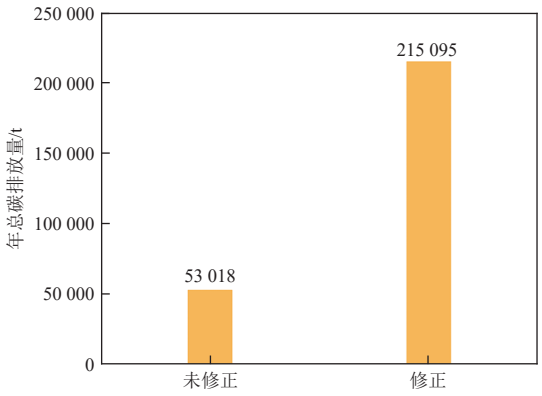


图5　修正前后高寒高海拔地区露天矿开采的碳排放

Fig. 5　Carbon emissions from open-pit mining in high-altitude and cold regions before and after correction

3　巨龙铜矿碳减排路径分析

紫金矿业作为西藏巨龙铜矿的控股企业，长期致力于建设绿色、智能矿山，大力推广清洁能源应用，目标是将该矿打造成为中国最低能耗、最低碳排放的超大型矿山之一。为实现此目标，并结合前文对矿山开采机械的碳排放数据分析，本文认为巨龙铜矿在开采过程中可通过以下几个方面实施碳减排措施。

3.1　自卸汽车控碳措施

自卸汽车是露天矿山岩矿运输不可或缺的核心设备，其动力主要来源于柴油。柴油燃烧过程会释放大量温室气体，对环境构成严峻挑战。前文研究证实，自卸汽车是巨龙铜矿最主要的碳排放源，其排放量占所有矿山机械碳排放总量的57.7%。因此，优化自卸汽车的能源结构是实现矿山碳减排的关键途径[21]。

目前，最具潜力的技术路径是以无人驾驶电动自卸卡车替代传统柴油卡车。电动卡车的优势在于零尾气排放、能量转换效率高、能耗低，且长期运营与维护成本更具经济性[21]。以巨龙铜矿为例，当前已投入12台无人电动矿车进行试运行，但仍有108台燃油自卸汽车在役。若全部替换为电动卡车，初步估算每日可减少碳排放约319 461.76 kg，减排效果显著。尽管金属矿山因作业面复杂、工况多变，无人电动卡车的规模化应用仍面临挑战，但随着电池技术的大型化与成本下降、无人驾驶技术的持续革新，其经

济性与适用性将不断增强。未来，随着更多车辆投入、运营数据积累、管理规范完善，无人电动卡车系统的整体效率、安全性与稳定性有望全面提升，从而在矿山行业发挥更大的环境与经济效益[20,22]。

3.2 高寒高海拔环境影响控制措施

高寒高海拔的极端环境严重制约发动机的性能，无形中推高了设备碳排放。为提升发动机的高原适应性，当前研究主要围绕以下两方面展开：一是采用含氧燃料以改善燃烧效率。通过向柴油中添加酒精、丙酮等含氧化合物，可补偿高原缺氧导致的进气氧含量不足，从而提高发动机功率。例如，曹斯琦等[23]研究发现，使用聚甲氧基二丁醚（PODE）型含氧燃料的发动机动力性优于纯柴油。李晓然等[24]的研究也表明，掺混二乙二醇二甲醚（DGM）能显著提升发动机性能，并降低HC与CO排放。二是应用增压技术增加进气量。高原环境下进气氧分压下降易导致燃烧不充分、功率衰减。通过加装增压设备（如带放气阀增压器、可变截面涡轮等），可使进气密度恢复至近平原水平，从而提升功率、降低油耗。

因此，积极引入新型燃料与发动机增压技术，削弱高寒高海拔环境对机组功率的负面影响，是建设“数智赋能型”绿色矿山的重要技术支撑。

4 结论

1）以《2006年IPCC国家温室气体清单指南》2019年修订版为依据，结合西藏巨龙铜矿的区域特征，综合考虑高寒高海拔地区的温度与海拔因素，构建了适用于该类型矿区的碳排放核算修正模型，修正后的碳排放模型能够更真实地反映高寒高海拔地区露天矿开采的碳排放水平，有助于政府及相关机构制定更具针对性的资源战略与产业转型政策，同时对矿山企业推进绿色矿山建设具有实践指导与参考价值，为实现高寒高海拔露天矿碳排放的准确测算提供了方法支撑。

2）修正前后模型对比表明，传统核算方法严重低估了高寒高海拔露天矿的开采碳排放。经修正后，碳排放核算结果约为原模型的4.07倍，且呈现出显著的季节性差异，说明极端气候条件对矿区碳排放具有重要影响。

3）从装备升级、运输路线优化、车铲比调整等方面，系统提出了适用于高寒高海拔矿山的汽车运输环节减碳路径，为降低矿山直接碳排放提供了可操作的技术与管理方向。

参考文献

[1] 白斌，李国清，侯杰，等. 露天矿山碳排放核算方法研究综述[J]. 有色金属(矿山部分)，2025，77(2)：42-50.
BAI B, LI G Q, HOU J, et al. Review of carbon emission accounting methods for open-pit mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2025, 77(2): 42-50.

[2] WANG S, WU J, XIANG M, et al. Multi-objective optimisation model of a low-cost path to peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality in China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 912: 169386.

[3] 李国清，李学玉，侯杰，等. 矿山安全隐患辨识与预警大数据分析系统研发[J]. 金属矿山，2022(6)：129-137.
LI G Q, LI X Y, HOU J, et al. Development of big data analysis system for mine safety hazard identification and early warning[J]. Metal Mine, 2022(6): 129-137.

[4] 温廷新，戚磊，邵良杉. 露天矿运输卡车柴油消耗的外部影响模型[J]. 金属矿山，2015(6)：118-121.
WEN T X, QI L, SHAO L S. The external effects model of diesel consumption of transport trucks in open-pit mine[J]. Metal Mine, 2015(6): 118-121.

[5] 刘晨阳. 低碳目标下露天矿迈步式搭桥运输系统仿真与优化[D]. 徐州：中国矿业大学，2023.
LIU C Y. Simulation and optimization of step bypass transportation system of open pit mine under low carbon target[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[6] FENG Y, LIU Q, LI Y, et al. Energy efficiency and CO_2 emission comparison of alternative powertrain solutions for mining haul truck using integrated design and control optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 370: 133568.

[7] 肖志雄，李伟. 基于生命周期评价方法的石灰石矿山碳排放核算模型研究[J]. 采矿技术，2023，23(6)：195-200.
XIAO Z X, LI W. Research on carbon emission accounting model of limestone mines based on life cycle assessment method[J]. Mining Technology, 2023, 23(6): 195-200.

[8] JIANG Z, LYU P, YE L, et al. Green innovation transformation, economic sustainability and energy consumption during China's new normal stage[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273: 123044.

[9] 刘福明. 露天煤矿绿色开采工艺理论及其优选方法研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2015.
LIU F M. Research on green mining technology and optimization method for open-pit coal mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.

[10] 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[J]. 中国土地科学，2017，31(6)：59-69.

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[J]. China Land Science, 2017, 31(6): 59-69.

[11] 贾坤樵，张岩，高志熊，等．发动机高原环境适应性难题及对应方案研究[J]. 内燃机与配件，2022(7): 12-15.
JIA K Q, ZHANG Y, GAO Z X, et al. Research on difficulties and solutions in engine plateau environment[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2022(7): 12-15.

[12] 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 Y R, WANG Y L, ZHANG F, 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.

[13] 朱剑利，白胜利，张桐瑞，等．基于燃煤电厂碳监测数据的碳核算误差分析及修正模型建立[J]. 矿冶，2025，34(1): 144-150.
ZHU J L, BAI S L, ZHANG T R, et al. Carbon accounting error analysis and correction model establishment based on carbon monitoring data of coal-fired power plants[J]. Mining and Metallurgy, 2025, 34(1): 144-150.

[14] 沈颖刚．高原环境下内燃机工作过程应用基础研究[D]. 天津：天津大学，2004.
SHEN Y G. A fundamental investigation on working processes of I.C.Engines on highland[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.

[15] 林水静，李玲．我国碳排放核算体系加速构建[N]. 中国能源报，2024-11-04(3).
LIN S J, LI L. Accelerating the construction of China's carbon emission accounting system[N]. China Energy News, 2024-11-04(3).

[16] 刘楠楠，杨晓松，楚敬龙，等．有色金属冶炼企业碳排放核算与减排策略[J]. 矿冶，2021, 30(3): 1-6.
LIU N N, YANG X S, CHU J L, et al. Carbon emission analysis and emission reduction strategy of nonferrous metal metallurgy[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(3): 1-6.

[17] 高荣刚．高原环境下大功率柴油机燃烧性能分析及功率恢复研究[D]. 北京：北京交通大学，2012.
GAO R G. Study on combustion performance and power recovery of high-power diesel engines under plateau environment[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

[18] 陈星明，宫兵．茨山石灰石矿铲—车优化配置[J]. 四川冶金，2002(5): 4-6.
CHEN X M, GONG B. Optimization of shovel-truck configuration in Cishan limestone mine[J]. Sichuan Metallurgy, 2002(5): 4-6.

[19] 赵雪峰，张超，杨海春．露天矿车铲匹配经济效益的比较分析[J]. 矿山机械，2010, 38(21): 44-47.
ZHAO X F, ZHANG C, YANG H C. Comparative analysis on economic benefit of truck-shovel matching at a strip mine[J]. Mining Equipment, 2010, 38(21): 44-47.

[20] 郑玥．紫金矿业绿色转型路径及对企业绩效的影响研究[D]. 南宁：广西大学，2024.
ZHENG Y. Research on Zijin Mining's green transformation path and its impact on enterprise performance[D]. Nanning: Guangxi University, 2024.

[21] 程晓青．高原低温环境对工程机械的影响及对策措施[J]. 青海科技，2002, 9(4): 30-34.
CHENG X Q. Influence of plateau low-temperature environment on construction machinery and countermeasures[J]. Qinghai Science and Technology, 2002, 9(4): 30-34.

[22] 胡达涛，习泳，马宁．无人驾驶电动自卸卡车在露天矿山的应用分析[J]. 有色设备，2024, 38(4): 21-26.
HU D T, XI Y, MA N. Application analysis of unmanned electric dump truck in open pit mine[J]. Nonferrous Equipment, 2024, 38(4): 21-26.

[23] 曹斯琦，刘宇强，支怀斌，等．聚甲氧基二丁基醚含氧燃料改善柴油机高原性能的试验研究[J]. 车用发动机，2020(5): 41-46.
CAO S Q, LIU Y Q, ZHI H B, et al. Improvement of diesel engine performance in plateau based on oxygenated fuel of polymethoxy dibutyl ether[J]. Vehicle Engine, 2020(5): 41-46.

[24] 李晓然，许世海，熊云，等．模拟高原条件下含氧燃料对发动机性能的影响[J]. 石油学报(石油加工)，2016，32(1): 215-220.
LI X R, XU S H, XIONG Y, et al. Effects of oxygenated fuel on diesel engine performance under the simulated condition of plateau area[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2016, 32(1): 215-220.