



金属矿山井巷建设工程碳排放智能测算方法

乔兰 邓乃夫 马世纪 李庆文 宋林波 张庆龙

Intelligent carbon emission assessment method for metal mine shaft construction projects

QIAO Lan, DENG Naifu, MA Shiji, LI Qingwen, SONG Linbo, ZHANG Qinglong

引用本文:

乔兰, 邓乃夫, 马世纪, 李庆文, 宋林波, 张庆龙. 金属矿山井巷建设工程碳排放智能测算方法[J]. *工程科学学报*, 2024, 46(6): 1024–1040. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2023.09.11.002

QIAO Lan, DENG Naifu, MA Shiji, LI Qingwen, SONG Linbo, ZHANG Qinglong. Intelligent carbon emission assessment method for metal mine shaft construction projects[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(6): 1024–1040. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2023.09.11.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.09.11.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地下金属矿山采掘作业计划优化模型

Optimization model of mining operation scheduling for underground metal mines

工程科学学报. 2017, 39(3): 342 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.03.004>

金属矿深部开采现状与发展战略

Current status and development strategy of metal mines

工程科学学报. 2019, 41(4): 417 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.04.001>

中国钢铁行业超低排放之路

Research of ultra-low emission technologies of the iron and steel industry in China

工程科学学报. 2021, 43(1): 1 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.06.18.003>

影响烧结工艺过程NO_x排放质量浓度的主要因素解析

Analysis of main factors affecting NO_x emissions in sintering process

工程科学学报. 2017, 39(5): 693 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.05.007>

机动车来源多环芳烃及其衍生物的排放特征研究进展

Research progress of emission characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives of vehicle exhaust

工程科学学报. 2021, 43(1): 10 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.08.10.002>

生物质锅炉氮氧化物排放控制技术研究进展

Overview of advances in emission control technologies for nitric oxides from biomass boilers

工程科学学报. 2019, 41(1): 1 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.01.001>

金属矿山井巷建设工程碳排放智能测算方法

乔 兰^{1,2)}, 邓乃夫^{1,2)}, 马世纪^{1,2)}, 李庆文^{1,2)}✉, 宋林波^{1,2)}, 张庆龙^{1,2)}

1) 北京科技大学城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083 2) 绿色低碳冶炼与资源综合利用联合实验室, 北京 100083
✉通信作者, E-mail: qingwenli@ustb.edu.cn

摘 要 深入研究金属矿山井巷建设工程的预算定额编制特点, 提出基于矿山建设直接系统和辅助系统的双路径碳排放测算架构和计量模型, 以实现井巷工程建设期全流程智能碳排放测算统计、碳排放路径分析及碳排放大户筛分等功能。结合现场工段施工台班表, 深度分析多级剖分下各层级最小单元过程的物质名录清单, 总结归纳金属矿山井巷建设工程特有的碳排放因子数据库。利用 MySQL 关系型数据库形式搭建金属矿山井巷工程十大碳排放基础数据表, 同时各数据库由唯一标识码进行标记。最后, 利用 MATLAB app designer 为十大基础数据表建立高效的索引调度机制, 并利用整合的双路径碳排放计量模型对金属矿山井巷建设工程开展精细化碳排放测算分析。案例结果显示, 本方法能够为金属矿山井巷建设工程在施工前期提供细粒度碳测算分析数据, 为后续施工组织设计、低碳技术部署提供具体的数据依托。

关键词 矿山井巷工程; 金属矿山; 碳排放测算; 碳排放因子; 碳排放数据库
分类号 TD-05

Intelligent carbon emission assessment method for metal mine shaft construction projects

QIAO Lan^{1,2)}, DENG Naifu^{1,2)}, MA Shiji^{1,2)}, LI Qingwen^{1,2)}✉, SONG Linbo^{1,2)}, ZHANG Qinglong^{1,2)}

1) Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) Jianlong Group & USTB Joint Laboratory for Green Low-Carbon Smelting and Integrated Utilization of Resources, Beijing 100083, China
✉Corresponding author, E-mail: qingwenli@ustb.edu.cn

ABSTRACT The metal mining industry is the second-largest carbon emitter in China, followed by the power industry. The metal mining industry is closely intertwined with six major industries that prioritize emission reduction, including steel, nonferrous metals, and building materials. The construction of mine shafts and drifts plays a pivotal role in the initial development and construction of the metallurgical mining industry, and its carbon emissions are integral to the advancement of the industry under the “dual carbon” strategy. This study delves into the distinctive characteristics of budget quota preparation for metal mine shaft and drift construction projects during the construction period. This study proposes a carbon emission assessment framework and model based on the dual assessment path of direct and auxiliary systems. Carbon emissions from ten key projects and seven auxiliary projects are calculated at each level within each carbon assessment path. Furthermore, a comprehensive analysis of the list of substances in the smallest unit processes at various levels is conducted through multilevel dissection. This analysis culminates in the development of a carbon emission factor database specific to the mine shaft and drift construction projects, which is achieved by searching and analyzing global lists of carbon emission substances across different industries. Based on the carbon emission assessment framework presented in this study, the fundamental data for the top ten carbon emissions in metal mine shaft and drift construction projects are established using the MySQL

收稿日期: 2023–09–11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52374113, 52274107, 52204091); 中央高校优秀青年团队培育资助项目 (FRF-EYIT-23-01); 北京市科技新星计划资助项目 (20230484242)

database, with each database labeled by a unique identifier. Subsequently, an efficient indexing and scheduling mechanism is implemented for the top ten basic data tables using the MATLAB App Designer. This mechanism facilitates the application of a comprehensive dual-path carbon emission measurement model for detailed carbon emission calculation and analysis of metal mine shaft and drift construction projects. Case analysis reveals that, in main shaft construction, the primary carbon emitters are associated with the use of cement, macadam, and electrically driven equipment, accounting for approximately 70%–80% of carbon emissions. From an emission source perspective, major carbon emitters result from material usage, generating approximately two to three times the carbon emissions of machinery energy consumption. From an emission pathway perspective, major carbon emitters are predominantly concentrated in the shaft body construction phase, constituting approximately 92% of carbon emissions within this segment of the main shaft project. Further analysis indicates that electricity consumption is the primary source of carbon emissions from machinery and equipment, representing approximately one-fourth to one-third of the total carbon emissions. By contrast, cement consumption serves as the principal source of carbon emissions from material use, accounting for approximately one-fifth to one-fourth of the total carbon emissions. Accordingly, energy-saving and emission-reduction techniques should prioritize the optimization of the material preparation process, such as cement, and the utilization of electrically driven equipment. The outcomes of this study can provide methodological foundation and data support for detailed carbon assessment and concrete implementation of low carbon emission-reduction policies for mine shaft and drift construction projects in China.

KEY WORDS mining shaft and drift engineering; metal mine; carbon emission assessment; carbon emission factors; carbon emission database

自2020年我国提出“30·60”双碳目标后,国务院发布了《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》作为我国“1+N”政策框架的顶层设计指导,强调能源、钢铁、有色金属、石化化工、建材、交通、建筑等N个行业需加快建设其领域内的碳达峰实施方案,推动产业化结构升级。其中能源、钢铁、有色金属、石化化工、建材等行业与我国的采掘业息息相关,也造就了采掘业在我国的碳排放中仅次于电力工业^[1]。间接说明了国民经济的发展高度依赖矿产资源的大量开采与利用,因而,采掘业是我国“双碳”战略背景下节能减碳的重要一环。其中,金属矿资源作为矿产资源的重要组成部分,其开采活动的碳排放在我国碳排总量中占据着较大比重^[2]。相比于露天采矿,金属矿地下开采涉及到诸如井巷开拓、运输提升、围岩支护、充填等众多工艺流程^[3]。这些施工流程不仅加剧了采矿活动的碳排放强度,并且也极大提高了金属矿开采全流程中碳足迹溯源和碳排放测算的难度。而金属矿开采活动的碳足迹分析和碳排放测算,是评估我国金属矿采掘业碳排放现状、溯源碳排大户、分析节能降碳潜力、设计碳达峰和碳中和实施方案的重要基础数据,同时也是推进绿色矿山建设、实现低碳矿山生产、加快矿山行业制定碳排放权配额智能政策的基石。

目前国内外针对金属矿山采矿活动的碳足迹和碳排放研究主要集中在个别类型矿体上,例如,

澳大利亚学者 Norgate 和 Haque^[4] 分析了铁矿石、铝土矿以及铜矿石开采过程中的碳排放量,依据各项采掘工艺(例如钻孔、爆破、通风、排水、运输等)的特点,总计归纳了铁矿石、铝土矿和铜矿石的单位能源消耗以及对应的碳排放量。Memary 等^[5] 同样分析了澳大利亚自1940年到2008年间的铜矿石在开采冶炼中的碳排放量,发现其碳排放量大致在 $2.8 \sim 8.5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。Haque 等^[6] 则分析对比了铜矿石、金矿石和铀矿石开采过程中的碳排放量,结果显示金矿和铀矿的采掘碳排放远高于铜矿石,大致是铜矿石的6~8倍。针对不同矿石间的采掘碳排放差异,Ekman Nilsson 等^[7] 深入分析了铜矿石和锌矿石在采掘工艺及流程上的差异,发现矿石的品味和运输方式会极大影响碳排放的异同。Farjana 等^[8] 从铝土矿的采掘到氧化铝的生产、熔炼与铸造四个步骤,利用全生命周期评估方法分别估算了电解铝生产不同阶段的碳排放量,结果表明铝土矿的开采过程碳排放量较低,侧面说明了成熟的开采工艺能够大幅减少矿山采矿的碳排放量。学者 Gan 和 Griffin^[9] 分析了铁矿石在开采和选矿阶段的碳排放差异,结果显示其碳排放介于 $210 \sim 280 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{t}^{-1}$, 同时研究结果也肯定了矿石品位是导致采掘碳排放差异的决定性因素之一。

上述研究表明,当前的金属矿山采掘工程的碳排放测算研究的尚处在较为初级的阶段,对碳排放路径的精细化程度较低,仅能大致确定导致碳

排强度差异的因素, 缺少对不同碳排个体和碳排路径的有效测算体系. 究其原因, 首先是因为我国缺乏针对金属矿采掘业的基础碳排放数据库, 往往只能依据开采过程中已消耗的能源量来核算碳排放量, 难以实现矿山开采活动碳排放量的提前核算, 进而针对性优化设计采矿方案. 现有的国内外碳排放数据库, 诸如 GaBi、欧洲生命周期数据网络(LCDN)平台、瑞士 Ecoinvent 数据库、中国生命周期基础数据库(CLCD)等, 其结构均是基于全行业普适性而设计的^[10-14], 未能考虑金属矿地下开采时多层次、模块化、时序性的行业特征. 同时, 矿山行业碳排放权配额政策设计的关键环节之一是明确各环节涉及的碳排放基础数据, 而缺乏科学可靠的碳排放基础数据库, 政府将难以制定出合理的配额方案和分配政策^[15-16]. 对于矿山企业而言, 缺乏可靠的碳排放数据驱动, 同样难以开展对应的减碳节能路径设计工作, 不利于矿山行业实现碳达峰、碳中和的战略目标^[1]. 其次, 现有的碳排放测算模型大多基于“自上而下”或“自下而上”的测算逻辑^[1]. “自上而下”方法主要利用随机前沿分析^[17]或者数据包络分析^[18]手段, 对矿山行业的节能减排策略进行主动评估, 分析不同减碳技术和策略对当前矿山工程的减排效力. 该方法一般建立在对现有矿山工程有比较详尽的碳测算数据基础上, 从而实现对减碳目标和减排政策的制定优化, 但其无法实现精细化的碳排路径回溯和碳排大户定位. “自下而上”方法主要是根据矿山行业进行结构性划分^[19], 通过分析不同结构的构成组分, 结合碳排放基础数据, 实现对矿山工程碳排放的逐级叠加计算, 这种方法能够实现更精细化的碳排路径分析, 辅助具体降碳节能措施的实施与开展.

由此可见, 当前在金属矿山采掘工程的碳排放测算重点在于构建结构合理的碳排放基础数据库以及制定合理的碳排放测算模型. 本文特别针对冶金工业中金属矿山井巷建设工程, 开展其建设期全流程碳排放智能测算研究, 经过细致的碳足迹筛选, 构建金属矿山井巷建设工程专用的碳排放基础数据库, 并类比工程定额计价统计方法, 建立双路径碳排放测算模型, 最后利用 MATLAB app designer 建立碳排放测算软件平台, 将碳排放基础数据库与测算模型有机结合, 实现对金属矿山井巷建设工程的碳排放智能评估和碳排关键路径分析.

1 金属矿山井巷建设工程碳排放测算建模

1.1 工程结构性划分与模型测算边界确定

本文研究的井巷建设工程碳排放测算方法主要参考《冶金矿山井巷工程预算定额》^[20], 该定额适用于冶金矿山井巷的新建、扩建和改建工程, 用以辅助编制冶金矿山井巷工程的概算指标、投资估算指标、施工图预算定额等工程计价定额标准. 《冶金矿山井巷工程预算定额》中将井巷工程的预算定额分为直接费用和辅助费用两个部分, 其中直接费用包含竖井、斜井及斜巷、斜坡道、平峒平巷、天井及溜井、交叉点、马头门、峒室、支护、铺轨、堵水注浆、井筒装备制造、沟槽等其他掘进铺砌工程, 辅助费用则涵盖了提升、排水、通风、运输、照明、机电和其他等七大辅助系统^[21-22]. 而矿石的采掘、装载、运输等采矿活动将计入总图运输工程中, 不纳入井巷建设工程的计价^[23]. 可以见得, 《冶金矿山井巷工程预算定额》的计价范围仅涵盖了井巷等地下构筑物的新建、扩建和改建部分, 将实质性的采矿活动剥离出来, 统一计入总图运输工程中, 其目的是为了尽可能保证工程计价的准确性, 减少交叉计价的风险.

参照《冶金矿山井巷工程预算定额》的计价定额标准, 本文为金属矿山井巷建设工程的碳排放测算设立了两条测算路径, 如图 1 所示, 分为直接系统工程(对应定额中的直接费用)和辅助系统工程(对应定额中的辅助费用). 其中, 浅蓝色区域为金属矿山井巷建设工程的碳排放测算直接系统, 其包含各级主干工程(蓝色底)以及其下划分出的各级分部工程(浅绿色底)和分项工程(涵盖材料(黄色底)和机械设备(橙色底)). 同时图 1 中的浅灰色区域为辅助系统的碳排放测算路径, 包含四个施工工期以及各阶段对应的七大辅助工程.

直接系统根据“自下而上”的结构性划分, 最上级为十大主干工程, 分别为: 竖井工程, 斜井与斜巷工程, 斜坡道工程, 平峒平巷工程, 天井与溜井工程, 交叉点、马头门及峒室工程, 其他掘进砌筑工程, 铺轨工程, 堵水注浆工程, 砼、砂浆及钢、木、砼制品制作工程. 不同主干工程同样基于《冶金矿山井巷工程预算定额》进行分部工程划分, 如竖井工程则根据施工顺序和作业类型继续划分为圆形竖井井颈掘进、圆形竖井壁座掘进、圆形竖井井筒掘进(普通爆破)、圆形竖井井筒掘进(光面爆破)、圆形竖井井筒刷大等三十七项分部工程. 在各分部工程下则精细化涵盖了所采用的材料用

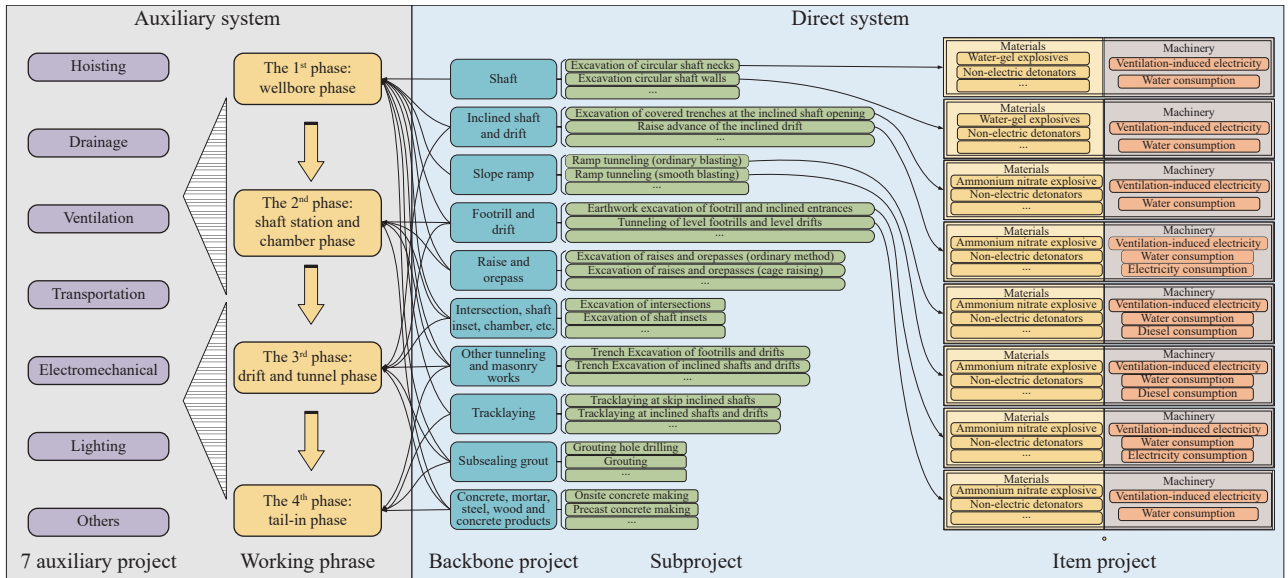


图1 金属矿山巷道建设工程碳排放测算结构划分示意图

Fig.1 Illustration of the structural breakdown for assessing carbon emissions during the construction of metal mine shafts and drifts

量和机械设备用能情况,如水胶炸弹、非电雷管、风耗、水耗等。

图1 左边灰色区域即为辅助系统工程的测算路径,该测算路径有两种划分方式,一种是依据辅助系统类别划分为提升、排水、通风、运输、照明、机电和其他等七大辅助系统,但这七大辅助系统是贯穿整个矿山巷道建设工程,在实际测算时不易进行拆分,因此,《冶金矿山井巷工程预算定额》还根据施工阶段将辅助系统的修建分为井筒期(一期)、井底车场巷道及硐室期(二期)、巷道期(三期)和尾工期(四期)。而根据施工阶段划分的辅助工程则更好分级统计其下各单位工程、分部工程和分项工程所涵盖的子项,进而“自下而上”进行累加统计。

1.2 碳排放测算建模架构

矿山井巷建设工程的碳排放测算建模思路整体上是基于“自下而上”的架构,但由于井巷工程涉及直接系统和辅助系统的修建,两个系统同步进行,施工过程复杂,为了避免交叉测算,须分别对两个系统建立不同的测算路径。

对于直接系统而言,其测算建模主要依据“分项-分部-主干”工程“自下而上”的层级将直接系统工程的施工阶段划分为相互独立且具有统一碳排放量化方式的单元过程。而辅助系统同样需要基于“分项-分部-单位-各施工阶段”工程“自下而上”的施工时序对辅助系统工程的作业进行独立划分。同时,两个系统会共用一套碳排放物质清单和碳排放因子数据库,以保证测算模型的高效性和统一性。本文提出的金属矿山井巷建设工程

全流程碳排放测算架构如图2所示,其具体测算流程如下:

(1)参考《冶金矿山井巷工程预算定额》对工程结构的划分规则,将直接系统工程和辅助系统工程进行工程分类和层级梳理解构,其中直接系统工程的最上层是根据工程类别分类的,辅助系统工程最上层依据施工工期分类的。两个系统工程的最下层均为包含最小工程单元下的基本物质名录,即分项工程中的基础材料和机械设备。

(2)根据测算边界依次分析各单元过程中的物资名录清单,确定金属矿山井巷建设工程使用的所有材料和机械设备清单。

(3)对比确认的物质名录清单和碳排放数据库中的物质名录,通过物质名录类别判断是否对物质名录进行能耗追溯,若物质名录为机械设备,则需在碳排放数据库中溯源不同型号机械设备能耗信息,再结合实际工程量和定额数据进行碳排放测算;若物质名录为材料,则无须进行能耗追溯,可直接结合实际工程量和定额数据进行碳排放测算。

(4)统计测算各物质名录的碳排放量,依据工程结构划分“自下而上”汇总碳排放量,其中,辅助系统工程汇总的各阶段碳排放量还需依据定额标准规定的辅助系统摊销表转化为七大辅助工程的碳排放量。

(5)分析碳排放测算结果,统计关键碳排路径并溯源不同层级的碳排大户。

1.3 碳排放测算模型开发

依据1.2节提供的碳排放测算建模架构,本文

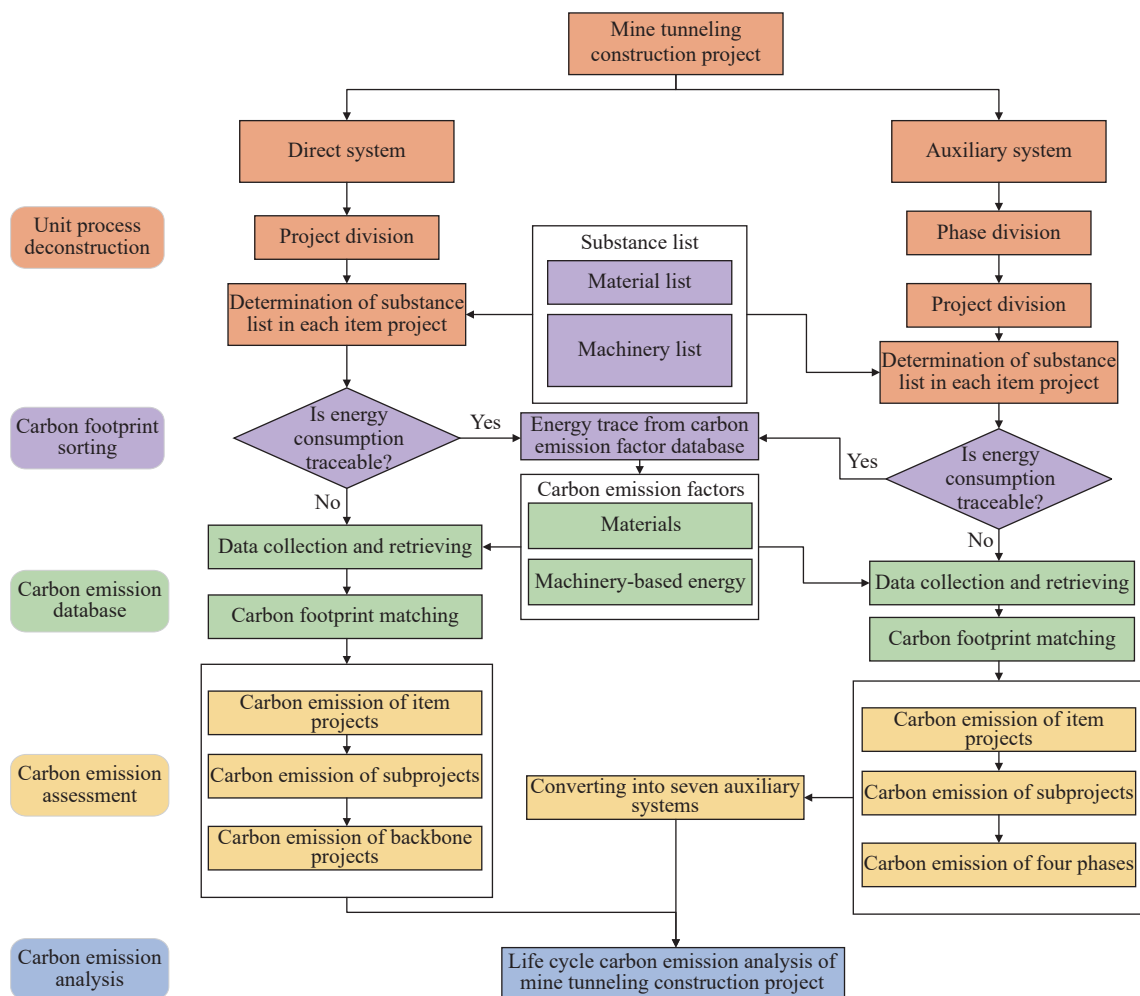


图 2 金属矿山井巷建设工程全流程碳排放测算架构总览

Fig.2 Life-cycle carbon emission assessment architecture of the mine shaft and drift construction project

采用“自下而上”的统计方法对金属矿山井巷建设工程全流程碳排放测算进行建模, 碳排放测算模型的参数如表 1 所示。

本文的碳排放测算模型分为直接系统和辅助系统两条测算路径, 根据图 1 可知, 测算的最小单元为分项工程中的材料和机械设备。而图 2 可知, 两条测算路径的材料和机械设备物质清单是共用的, 因此, 在最小单元过程的碳排放测算中, 二者的测算模型是相同的, 这一方面是为了简化建模, 提高测算效率, 另一方面是为了在现场实际应用中减少不同物质清单的采集工作量。

1.3.1 材料的碳排放测算模型

因此, 对于直接系统和辅助系统工程最小单元过程下所使用材料的碳排放而言, 其测算模型可分别写作:

$$C_{ijk}^{\text{material}} = \sum_{m=1}^M f_m X_{ijk}^m \quad (1)$$

$$C_{uvw}^{\text{material}} = \sum_{m=1}^M f_m X_{uvw}^m \quad (2)$$

式 (1) 表示直接系统下第 i 个主干工程的第 j 个分部工程的第 k 个分项工程所用的 M 种材料碳排放之和; 式 (2) 则为辅助系统下第 u 个工期的第 v 个单位工程的第 w 个分部工程的第 t 个分项工程所有的 M 种材料碳排放之和。

1.3.2 机械设备的碳排放测算模型

由图 2 可知, 最小单元过程下所使用机械设备的碳排放需要进行能耗追溯, 然而, 不同矿山设备厂商和设备型号众多, 不易统计或容易漏计, 且测算效率较低。在实际金属矿山井巷工程中, 矿下使用的机械设备动力源头一般分为三类: 电力、化石燃料(柴油为主)和风力。其中电力驱动的机械设备如电动铲斗装岩机、电动耙斗装岩机等; 矿下使用化石燃料驱动的机械设备非常少, 极个别调度绞车或慢调绞车会采用柴油驱动; 风力驱动的机械设备一般是矿用设备主力之一, 如气腿式凿岩

表 1 测算模型参数定义

Table 1 Parameter definition of the assessment model

Parameter	Definition
i	Index of the backbone project in the direct system ($i=1,2, \dots, 10$)
j	Index of subprojects in each backbone project ($j=1,2, \dots, J$)
k	Index of item project in each subproject from the direct system ($k=1,2, \dots, K$)
u	Index of the working phase in the auxiliary system ($u=1,2,3,4$)
v	Index of the unit project in each working phase ($v=1,2, \dots, V$)
w	Index of subprojects in each unit project from the auxiliary system ($w=1,2, \dots, W$)
t	Index of the item project in each subproject from the auxiliary system ($t=1,2, \dots, T$)
C_{all}	Overall carbon emissions in metal mine shafts and drift construction projects
C_{direct}	Carbon emissions in the direct system
$C_{auxiliary}$	Carbon emissions in the auxiliary system
C_i	Carbon emissions in the i backbone project of the direct system
C_{ij}	Carbon emissions in the j subproject of the i backbone project
C_{ijk}	Carbon emissions in the k item project of the j subproject of the i backbone project
C_u	Carbon emissions in the u working phase of the auxiliary system
C_{uv}	Carbon emissions in the v unit project of the u unit project
C_{uvw}	Carbon emissions in the w subproject of the v unit project of the u working phase
C_{uvwt}	Carbon emissions in the t item project of the w subproject of the v unit project of the u working phase
$C_{auxiliary}^d$	Carbon emissions in each of the seven auxiliary system projects; $d=1,2, \dots, 7$ representing hoisting, drainage, ventilation, transportation, lighting, electromechanical, and others
$C_{ijk}^{material}$	Carbon emissions from all materials used in C_{ijk}
$C_{ijk}^{machinery}$	Carbon emissions from all machinery used in C_{ijk}
$C_{uvwt}^{material}$	Carbon emissions from all materials used in C_{uvwt}
$C_{uvwt}^{machinery}$	Carbon emissions from all machinery used in C_{uvwt}
m	Type of materials ($m=1,2, \dots, M$)
l	Type of machinery ($l=1,2, \dots, L$)
f_m	Carbon emission factor of the m type of material
f_n	Carbon emission factor of the n type of energy; $n=1,2,3,4$ representing the air, electricity, water, and fuel consumption, respectively
Z_n^l	Unit consumption of the n type of energy used in the l type of machinery
X_{ijk}^m	Consumption quota of the m type of material in the k item project of the j subproject of the i backbone project
X_{uvwt}^m	Consumption quota of the m type of material in the t item project of the w subproject of the v unit project of the u working phase
Y_{ijk}^l	Consumption quota of the l type of machinery in the k item project of the j subproject of the i backbone project
Y_{uvwt}^l	Consumption quota of the l type of machinery in the t item project of the w subproject of the v unit project of the u working phase
α_u^d	Apportion ratio of the u working phase in the d auxiliary system project

机, 气动抓岩机等, 此外, 矿下通风需求也会使用大量压风机和通风机. 除了上述使用的动力之外, 还会存在水耗, 即部分设备会有水补给需求, 例如注浆泵, 水钻机等.

依据上述提到的金属矿山井巷建设工程的机械设备动力源头分类, 《冶金矿山井巷工程预算定额》为了简化预算编制流程, 将机械设备的动力源头分为四类, 即电耗、风耗、水耗和油耗. 本文的

碳排放测算借鉴该定额对机械设备动力源的划分逻辑, 建立了直接系统工程和辅助系统工程最小单元过程下机械设备的碳排放测算模型如下:

$$C_{ijk}^{machinery} = \sum_{n=1}^4 \sum_{l=1}^L f_n Z_n^l Y_{ijk}^l \quad (3)$$

$$C_{uvwt}^{machinery} = \sum_{n=1}^4 \sum_{l=1}^L f_n Z_n^l Y_{uvwt}^l \quad (4)$$

式 (3) 表示直接系统下第 i 个主干工程的第 j 个分部工程的第 k 个分项工程所用的 L 种机械设备碳排放之和; 式 (4) 则为辅助系统下第 u 个工期的第 v 个单位工程的第 w 个分部工程的第 t 个分项工程所用的 L 种机械设备碳排放之和. 在《冶金矿山井巷工程预算定额》中, 提供了每个分项工程中的机械设备总电耗、风耗、水耗和柴油消耗. 因此, 采用式 (3) 和 (4) 对机械设备碳排放进行测算的优势在于, 不需要具体统计矿下每一种机械设备型号和数量, 而仅需知道所使用的风机和水泵的型号和数量. 这能够极大降低碳排放测算所需数据的统计难度, 便于矿山井巷工程碳排放标准数据库的统一.

1.3.3 直接系统的碳排放测算模型

确定了分项工程下的材料和机械设备的碳排放量后, 直接系统和辅助系统即可基于“自下而上”的统计方法, 依层级逐项叠加对碳排放进行测算. 直接系统各层级的碳排放测算模型如下:

$$C_{ijk} = C_{ijk}^{\text{material}} + C_{ijk}^{\text{machinery}} \quad (5)$$

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^K C_{ijk} \quad (6)$$

$$C_i = \sum_{j=1}^J C_{ij} \quad (7)$$

$$C_{\text{direct}} = \sum_{i=1}^{10} C_i \quad (8)$$

式 (5)~(8) 分别为直接系统在分项工程, 分部工程, 主干工程以及总计的碳排放测算模型.

1.3.4 辅助系统的碳排放测算模型

同理可得辅助系统在分项工程, 分部工程, 单位工程, 各施工阶段和总计的碳排放测算模型如下:

$$C_{uvw} = C_{uvw}^{\text{material}} + C_{uvw}^{\text{machinery}} \quad (9)$$

$$C_{uw} = \sum_{t=1}^T C_{uvw} \quad (10)$$

$$C_{uv} = \sum_{w=1}^W C_{uw} \quad (11)$$

$$C_u = \sum_{v=1}^V C_{uv} \quad (12)$$

$$C_{\text{auxiliary}} = \sum_{u=1}^4 C_u \quad (13)$$

根据图 2 提供的碳排放测算架构可知, 辅助系统

的碳排放测算需将各阶段的碳排放测算量转化为提升、排水、通风、运输、照明、机电和其他等七大辅助工程的碳排放测算量. 《冶金矿山井巷工程预算定额》规定, 矿山七大辅助系统的具体碳排放量可根据冶金矿山井巷工程辅助系统摊销比例进行分项转化, 具体见式 (14), 其中摊销比例 α_u^d 可在《冶金矿山井巷工程预算定额》-辅助费中查表可知.

$$C_{\text{auxiliary}}^d = \sum_{u=1}^4 \alpha_u^d C_u \quad (14)$$

综上, 金属矿山井巷建设工程的总碳排放量为:

$$C_{\text{all}} = C_{\text{direct}} + C_{\text{auxiliary}} = C_{\text{direct}} + \sum_{d=1}^7 C_{\text{auxiliary}}^d \quad (15)$$

2 碳足迹分析和碳排放依托数据库构建

上节基于矿山计价定额标准建立了能够较为全面反映矿山井巷建设全貌的碳排放测算模型, 不难发现, 测算模型的高效运用离不开碳排放基础数据库的搭建. 由图 2 可知, 碳排放基础数据库包括材料和机械设备所使用能源燃料的碳排放因子数据以及不同层级的工程单元划分数据. 其中, 不同层级的单元划分可参照《冶金矿山井巷工程预算定额》改良得到, 碳排放因子数据则需要结合现场工程经验以及国内外碳排因子数据库进行筛分统计.

2.1 矿山井巷建设工程碳排放基础物质名录清单分析

碳排放基础数据库最关键的一环即为基础物质清单统计和碳排放因子筛分. 根据矿山井巷建设工程的碳排放测算边界和测算模型可知, 主要的碳排放物质清单可以分为材料和机械设备两大类. 因此, 须溯源不同分项工程中使用的材料及使用设备的能源类型清单, 分析并建立相应清单中物质名录的碳排放因子数据库.

2.1.1 材料碳排放因子数据分析

金属矿山井巷建设工程涉及到的材料较多, 一般可分为爆炸物、无机非金属材料、有机高分子材料、金属材料、复合材料五个类型. 目前全球的碳排放数据因子数据库基本来源于《IPCC 国家温室气体清单指南》, IPCC 也会根据不同国家地区提供的对应的碳排放因子数据库 EFDB (Emission factor database), 如欧盟版^[24]、美国环境保护局版^[25-26]、英国环境部版^[27]等. 我国目前尚无 IPCC 官方提供

的 EFDB, 只能从《省级温室气体排放清单指南(试行)》或各地省政府发布的碳排放清单等指南文件中进行摘录. 我国四川大学刘夏璐等^[28]曾在 2011 年结合我国不同行业特点提出了 CLCD, 但 CLCD 并非专门针对碳排放因子采集统计特点建立的, 其数据结构和数据类目与金属矿山井巷工程所用物质名录清单存在较大差异, 不适用于直接使用. 因此, 本文综合分析了国内外现有的碳排放核算标准及碳排放因子数据库资料, 结合矿山现场施工经验, 总结了《冶金矿山井巷工程预算定额》中主要的材料碳排放因子, 表 2 展示了矿山井巷建设工程所需的主要材料清单和碳排放因子数据. 值得注意的是, 由于材料的碳排放因子与材料的制备工艺、运输方式和加工方法息息相关, 不同矿山项目实质采用的材料碳排放因子均可能存在差异. 同时由于材料的生产加工工艺可能会逐年改进, 碳排放因子数据也可能逐年递减, 因此, 本文统计的材料碳排放因子来源于已有文献或地方政府推

表 2 金属矿山井巷建设工程主要材料的碳排放因子清单

Table 2 List of the carbon emission factors of major construction materials for metal mine shaft and drift engineering

ID	Carbon emission inventory	Unit of material	Carbon emission factor/ (kg CO ₂ eq)
1	Water-gel explosive	kg	0.1854 ^[29]
2	Ammonium nitrate explosive	kg	0.2629 ^[29]
3	Electric detonator	kg	7.95 ^[30]
4	Nonelectric detonator	kg	7.3 ^[31]
5	Plain detonator	kg	7.95 ^[30]
6	Blasting fuse	kg	5.8 ^[32]
7	Bus wires (for vertical shaft)	kg	5.8 ^[32]
8	Iron wires	kg	2.28 ^[31]
9	Hollow hexagonal steel	kg	2.34 ^[31]
10	Alloy steel bit	kg	2.05 ^[31]
11	Waterproof cover	kg	3.36 ^[33]
12	Wind	kw·h	0.02748 ^[34]
13	Water	m ³	12.32 ^[35]
14	Log	kg	1.819 ^[36]
15	Pitwood	m ³	878 ^[37]
16	Wood sleeper	m ³	878 ^[37]
17	Portland cement C32.5	kg	0.735 ^[31]
18	Rebar φ6 mm	kg	2.34 ^[31]
19	Round steel bar φ8 mm	kg	2.34 ^[31]
20	Steel wire strand φ15.24 mm	kg	2.375 ^[31]

表 2 (续)

Table 2 (Continued)

ID	Carbon emission inventory	Unit of material	Carbon emission factor/ (kg CO ₂ eq)
21	Rigging	kg	2.05 ^[31]
22	Angle steel 30 mm × 3 mm	kg	2.38 ^[31]
23	Flat steel -25 mm × 3 mm	kg	2.38 ^[31]
24	U-steel 10 [#]	kg	2.38 ^[31]
25	H-bar 18-24 [#]	kg	2.38 ^[31]
26	Manganese steel plate δ = 50 mm	kg	2.4 ^[31]
27	Steel rail 24-38 kg·m ⁻¹	kg	2.38 ^[31]
28	Fish plate	kg	2.2 ^[37]
29	Fishtail screw	kg	2.2 ^[37]
30	Iron chair	kg	2.19 ^[37]
31	Cast iron (anchor head)	kg	2.19 ^[37]
32	Cast iron (pad wedge)	kg	2.19 ^[37]
33	Sieved sand	kg	0.00251 ^[31]
34	Rubble	kg	0.00218 ^[31]
35	Macadam φ ≤ 10 mm	m ³	0.00218 ^[31]
36	Brick 240 mm × 115 mm × 53 mm	m ³	250 ^[31]
37	Accelerator	kg	0.5438 ^[38]
38	Resin-bonded mastic	kg	3.36 ^[33]
39	Antirust paint C53-1	kg	3.502 ^[39]
40	Red lead rust-proof paint F53-31	kg	6.4309 ^[40]
41	Synthesis of mixed paint	kg	6.55 ^[40]
42	Paint oil	kg	1.75 ^[41]
43	Rag	kg	2.51 ^[42]
44	Wire brush	kg	2.2 ^[37]
45	Steel wire cloth	kg	2.19 ^[37]
46	Charcoal	kg	0.18 ^[43]
47	Iron nail	kg	2.19 ^[37]
48	Welding electrode	kg	2.2 ^[37]
49	Manganese steel welding rod	kg	2.485 ^[44]
50	Drill rod	kg	2.05 ^[31]
51	Core barrel φ75 mm × 7 mm	kg	3.15 ^[31]
52	Core bit φ75 mm	kg	2.05 ^[31]
53	Nuts and washers	kg	2.2 ^[37]
54	Dowel	kg	2.05 ^[31]
55	Washer	kg	3.36 ^[33]
56	Embedded iron	kg	2.19 ^[37]
57	Nut bolt	kg	2.2 ^[37]
58	Resin cartridge	kg	72.65 ^[45]
59	Tray 8 mm	kg	2.19 ^[37]
60	Cement cartridge	kg	0.735 ^[31]

荐采用的统计数据作为金属矿山建设的一般情况进行分析. 在后续的分析中也会阐述这部分误差对于碳排大户的影响不会很大.

2.1.2 机械设备碳排放因子数据分析

根据本文前述可知, 矿用机械设备根据能源驱动形式可分为电耗、风耗、水耗和柴油消耗四类. 因此, 本文可将复杂的机械设备的碳排放因子统计工作转化为四种能耗的碳排放统计工作. 首先是电力驱动的机械设备碳排放, 其直接与电力消耗量相关, 根据我国发改委对我国六大区域电网的划分, 不同电网的电力生产碳排放会因为地域、天气、电力生产形式不同而存在一定差异. 因此, 本文暂时选用生态环境部在 2020 年提供的各区域电网的电力消耗碳排放因子作为本文电力驱动机械设备的碳排放因子^[1](如表 3), 此表可根据电网每年碳排放变化进行调整, 一般来说电网的碳排放因子会由于新型发电方法(如风能、抽水蓄能等)的普及和转型逐年递减, 因此在矿山井巷建设这类几乎完全依赖电力驱动的工程中, 机械设备的碳排放因子递减比例也可以大致作为机械设备的碳排放量递减比例.

表 3 我国不同电网区域的电力生产碳排放因子清单^[1]

Table 3 List of carbon emission factors for electricity production in different power grid regions in China^[1]

Region	Carbon emission factors/ (t CO ₂ eq·MW·h ⁻¹)
Northern region of the power grid	0.9419
Northeastern region of the power grid	1.0826
Eastern region of the power grid	0.7921
Central region of the power grid	0.8587
Northwestern region of the power grid	0.8922
Southern region of the power grid	0.8042

风耗通常是矿山井巷建设中的消耗大户, 其主要驱动形式同样为电力消耗, 而不同型号的压风机及通风机其电力能耗也不同. 由于《冶金矿山井巷工程预算定额》会列出不同分项工程的风耗量, 因此只需确定不同风压机和通风机的耗电量即可利用表 3 对风耗碳排放量进行测算.

同理, 水耗的潜在碳排放驱动同样是电力, 不同分项工程下的水耗同样可以直接从《冶金矿山井巷工程预算定额》中获取, 因此只需确定不同抽水和供水设备的耗电量即可利用表 3 对水耗碳排放量进行测算.

柴油碳排放的受到不同内燃机型号、设备工

作环境等多方面因素影响, 即便是同型号内燃机也会在不同工况下产生不同的碳排, 而实时监测设备尾气测定碳排因子的方式在现场很难落实. 因此, 本文根据 Ozgen 和 Caserini^[46] 提供的柴油燃料碳排放因子 EF_{diesel} 核算方程进行换算(见式 (16)).

$$EF_{\text{diesel}} = \sum_{g=1}^2 DEF_g \cdot GWP \cdot W_{\text{diesel}} \quad (16)$$

其中, DEF_g 是柴油燃烧产生的不同碳产物的碳排放量, 其中 g 代表碳产物类型, 本文包含 CO_2 和 CH_4 两种, 可根据 IPCC 提供的柴油燃烧碳排放因子缺省值进行取值, 其中 CO_2 的碳排放因子缺省值为 $7.41 \times 10^{-2} \text{ tCO}_2\text{eq} \cdot \text{MJ}^{-1}$, CH_4 的碳排放因子缺省值为 $4.15 \times 10^{-3} \text{ tCO}_2\text{eq} \cdot \text{MJ}^{-1}$. GWP 是二氧化碳的全球增温潜势, 本文根据 IPCC 提供的统计数据取值为 1^[47]. W_{diesel} 是柴油的高位热值, 本文选用 LEE 等^[48] 统计的柴油驱动机械设备的碳排放因子, 即 $45.766 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. 因此, 根据式 (16) 可得本文采用的柴油碳排放因子为 $3.5812 \text{ tCO}_2\text{eq} \cdot \text{t}^{-1}$. 同样需要关注的是, 我国每隔一段时间均可能对碳排放因子缺省值、 GWP 和 W_{diesel} 进行修订, 主要原因是因为对于化石能源的开采、加工、运输方式同样会在“双碳”目标的驱使下逐年改进, 从而使得如柴油等化石能源的碳排放因子也会逐年降低, 由于碳排放因子计算法具有线性可加性, 因此, 柴油碳排放因子降低比例同样可以看作是柴油驱动的机械设备的碳排放因子降低比例.

2.2 矿山井巷建设工程碳排放基础数据库构建

获得碳排放清单及相应碳排放因子数据后, 本文参照《冶金矿山井巷工程预算定额》的规定, 利用 MySQL 语言搭建了“自下而上”的矿山井巷建设工程全生命周期碳排放基础数据库, 如图 3 所示, 碳排放基础数据库由直接系统(浅蓝色底)、辅助系统(浅灰色底)以及碳排放因子(浅橘色底)三部分组成, 其中包含直接系统主干工程数据表、直接系统分部工程数据表、直接系统分项工程数据表、辅助系统各施工工期数据表、辅助系统单位工程数据表、辅助系统分部工程数据表、辅助系统分项工程数据表、辅助系统周转材料摊销数据表、七大辅助工程摊销数据表、碳排放因子数据表十大数据表. 各数据表之间通过唯一标识码进行绝对索引, 以实现高效稳定的索引和调用.

在直接系统中, 主干工程数据表用以存储十大主干工程类别, 并由唯一标识码 DBID(Backbone project Identification of the direct system)进行标记.

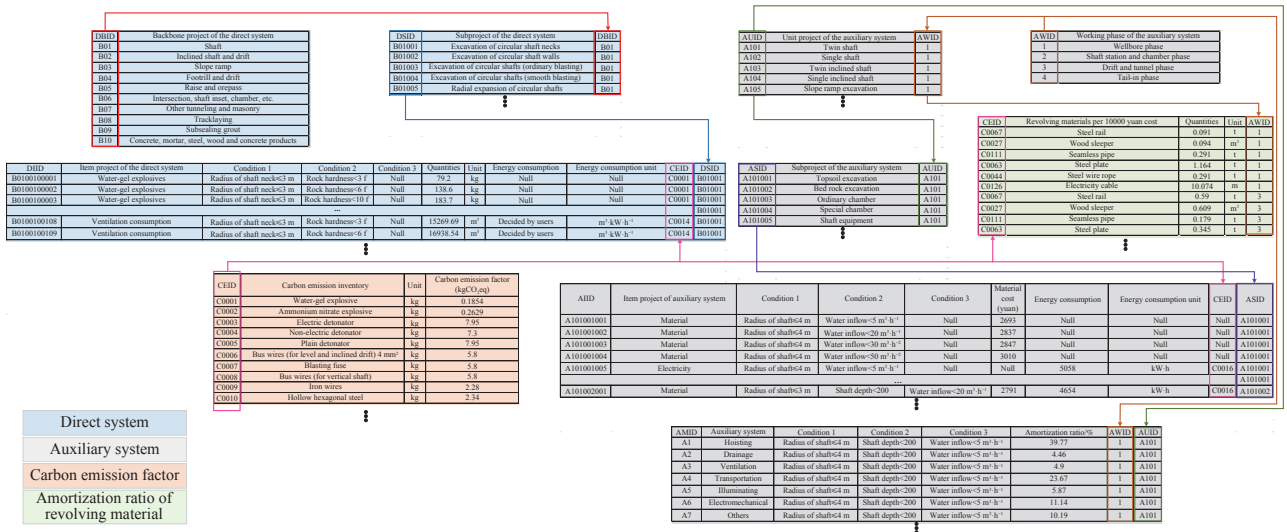


图3 碳排放基础数据库结构和索引关系

Fig.3 Structure and index relationship in the fundamental carbon emission database

分部工程数据表则用来存储各主干工程下的分部工程类目, 不同分部工程类目由 DSID (Subproject identification in the direct system) 进行标记, 同时主干工程表会经由 DBID 指向分部工程表, 用以索引关联不同主干工程下的分部工程. 进一步的, 分项工程数据表用来存储各分部工程下不同材料和机械设备能耗的工程量定额数据. 不同工程量由 DIID (Item project identification in the direct system) 进行标记, 同时分部工程表通过 DSID 指向分项工程表, 对各分部工程下的分项工程进行划分. 在分项工程数据表中, 涵盖了各工程的最小单元划分, 其通过不同条件区别对待不同的矿山井巷工程, 例如不同的竖井径口大小、不同的围岩硬度等. 在最小单元划分中, 测算模型会自主判断最小单元划分中的材料以及机械设备活动, 进而自主从碳排放因子数据表中以及 CEID (Carbon emission factor identification) 调用不同材料及能耗相关的碳排放因子数据进行计算.

同理, 在辅助系统中, 不同施工阶段、单位工程、分部工程以及分项工程分别由 AWID (Working phase identification of the auxiliary system)、AUID (Unit project identification in the auxiliary system)、ASID (Subproject identification in the auxiliary system) 和 AIID (Item project identification in the auxiliary system) 进行标注, 且各数据表会逐级指向索引下一层级数据表. 不同的是, 在辅助系统中, 其周转材料的使用在大部分场景下基本是相似的, 仅存在配比不同, 因此, 在分项工程表中仅给出了周转材料的费用, 再基于费用高低, 经由 ASID—AUID—AWID

索引到辅助系统周转材料摊销表 (浅绿色底), 查询不同施工阶段中的六大周转材料比例, 最后再基于 CEID 索引调用不同材料对应的碳排放因子进行测算. 在辅助系统测算结束后, 还可通过七大辅助系统摊销表 (图 3 中右下角的表) 进一步转化为提升、排水、通风、运输、照明、机电和其他等七大辅助系统工程 (AMID, Main project identification of the auxiliary system) 的碳排放量.

综上, 图 3 所示的碳排放基础数据库结构能较好契合本文的碳排放测算模型和测算架构, 提高碳排放测算的计算效率. 同时, 由数据表结构可知, 碳排放因子数据表能够在不影响其他九大数据库表正常运行的情况下进行实时更新, 方便后续数据升级.

3 碳排放智能测算软件平台

3.1 碳排放智能测算功能模块

基于上述建立的矿山井巷建设工程碳排放测算架构、碳排放测算模型以及碳排放基础数据库, 本文开发了一套碳排放智能测算软件平台, 首先利用 MySQL 搭建一套如图 3 所示的碳排放基础数据库, 再利用 MATLAB app designer 链接 MySQL 数据库实时获取碳排放基础数据信息, 并将碳排放测算模型编译融入智能测算软件平台中, 实现不同层级的碳排放智能测算、统计和分析. 如图 4~图 7 所示, 本文的碳排放智能测算软件平台涵盖四个基本功能模块, 分别是: 数据库录入模块、工程量配置模块、碳排放统计模块及碳排放分析模块.

数据库录入模块能够基于微软的开源数据库

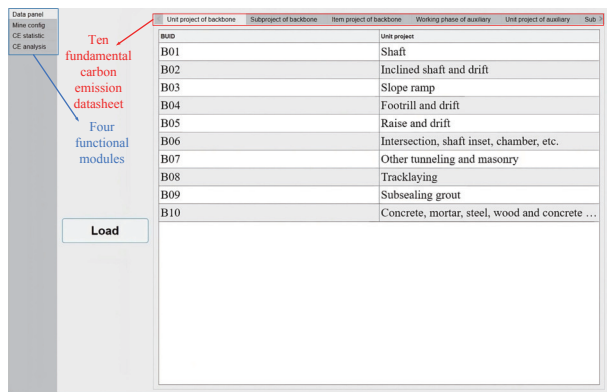


图 4 数据库录入模块

Fig.4 Data loading module

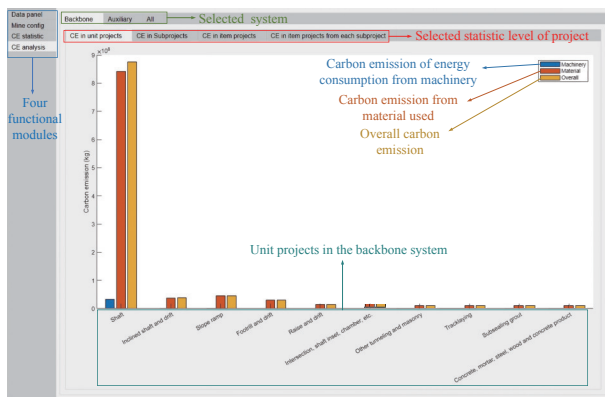


图 7 碳排放分析模块

Fig.7 Carbon emission analysis module

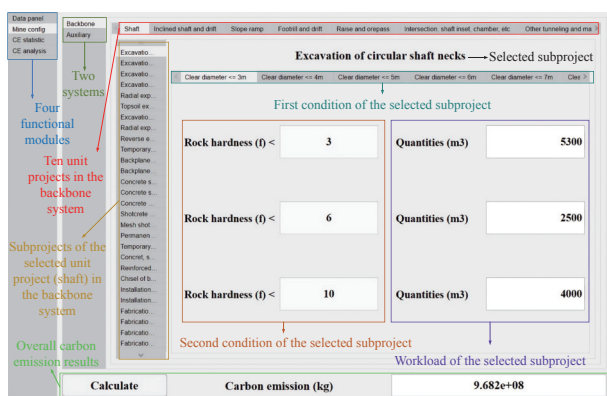


图 5 工程量参数配置模块

Fig.5 Project quantity configuration module

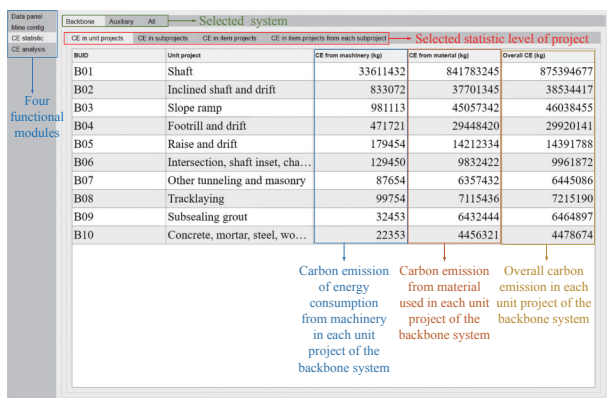


图 6 碳排放统计模块

Fig.6 Carbon emission statistics module

接口协议(ODBC)对不同绝对路径下的数据库进行读取导入,并将图3所示的十大碳排放基础数据表分别展示在不同板块的软件界面中,对数据进行浏览和排序等操作,此外,还可以根据实际项目需求导入所需的碳排放因子数据库,适配不同矿山项目上采用的新工艺、新材料和新能源.例如图4展示了基础数据表中的直接系统主干工程信息.工程量配置模块能够依据不同金属矿山井巷工程的特点,将矿山概预算指标提供的工程量数

据分别录入配置面板中,配置面板提供了丰富的矿山工程量数据录入选项,例如图5展示了在直接系统的竖井主干工程下,其圆形竖井井颈掘进分部工程的工程量配置界面,该配置界面能够满足0~8m井径以及3f~10f岩石硬度的圆形竖井井颈掘进工程的工程量录入需求,基本能够涵盖不同类型的矿山井巷建设工程.同时,工程量配置模块还能依据录入的工程量数据自动测算并展示当前整个金属矿山井巷工程的总碳排放量.

碳排放统计模块是智能测算软件的主体,其由碳排放测算模型驱动,能够“自下而上”对矿山井巷建设工程的直接系统和辅助系统各层级碳排放进行测算统计,实时展示不同划分层级下的碳排放量.此外,展示界面还能依据测算模型对机械设备和材料的碳排放量进行筛分统计.图6所示是碳排放统计模块中对直接系统下主干工程的碳排放统计结果.

碳排放分析模块是统计模块的进阶功能,其目的是为了利用图形分析手段更直观的展示统计数据,实现可视化不同施工阶段、主干(单位)工程、分部工程以及分项工程下的碳排放量.通过碳排放溯源剖分统计直方图能够清晰捕捉各层级的机械设备和材料碳排放量,同时能够自动抓取各层级的碳排放关键要素,锁定碳排放大户.图7展示的是碳排放分析模块中对直接系统下主干工程的碳排放柱状图分析结果,可以清晰的捕捉到碳排放大户主要集中的工程环节.

3.2 碳排放测算案例分析

本文基于上述开发的碳排放测算软件平台,针对辽宁省鞍山市千山区西鞍山铁矿的某段主竖井开展碳排放智能测算分析研究.该主井为箕斗井,主要负责矿、废石的提升,主井井筒为圆形断面,净直径6.8m,净断面36.3m²,景深1604m.井

筒共设 5 处开口, 均为单侧开口, 其中两处开口用于回风和基建初期出渣, 一处开口用于铺设皮带装载矿、废石, 井底开口则与粉矿回收系统连通, 用于清理粉矿。该段主竖井的基建工程量如表 4 所示, 表中 H 代表深度。

在本案例工程中, 约 90% 的设备能源驱动是气动, 同时井下通风降温是保障安全作业的关键。因此矿山的供气、通风及空压系统尤为重要。空压机的主要作用是将空气进行高效压缩, 提供高压、干燥的新鲜空气给工业设备使用, 如凿岩机、砼喷射机等。本段主竖井工程中采用了 3 台 SA160A 固定空压机, 2 台工作, 1 台应急, 同时配备了 8 台 PES720 移动空压机。空压机型号见表 5。由于空压机会在风压达到预设值停止工作, 因此本段竖井工程风压机的每日工作时长为 12 h。

该段主竖井工程采用的风机型号见表 6, 包含 5 台入风风机和 5 台回风风机, 所有风机均为轴流式风机, 且均配备交流变频电机并保持 24 h 开启, 其中除了 -1200 m 深度的回风风机由一台发动机驱动之外, 其余风机均配备两台发动机。所用风机均可提供 60% 的反转输送功率, 因此通风系统可采用反转措施提供反风, 同时, 每主扇风机均有相同型号和规格的备用电机 1 台。

除此之外, 矿下排水和部分机械设备的供水需求也依赖大量水泵的使用, 表 7 提供了本段主竖井工程使用的水泵型号。其中包括供水泵 3 台 (2 用 1 备)、多级潜水泵 8 台 (4 用 4 备)、离心泵 2 台 (1 用 1 备)、潜水泵 5 台 (4 用 1 备) 以及液下渣浆泵 2 台。

将表 4 至表 7 的所列数据分别输入碳排放智能测算软件平台中 (图 5 所示界面), 即可得到该段主竖井工程的碳排放量统计分析结果如图 8 所示。从排放源角度分析, 碳排放大户是材料使用产生的碳排放, 大约是机械设备能耗碳排放的 2~3 倍。从排放路径角度分析, 碳排放大户主要集中在井筒基建工程中, 大约占据该段主竖井工程碳排放的 92%。此外, 图 9 展示该主竖井工程在最小单元过程下的排行前 5 的物质名录碳排放结果, 可以发现, 该段主竖井建设中主要的碳排放源来自水泥、碎石以及电力消耗, 在不同分项工程中分别占据了 70%~80% 的碳排放量, 这分别对应了竖井工程支护系统和掘进、通风、排水等动力系统的碳排放。从碳排放大户的物质名录清单中可以发现, 由于水泥、碎石以及电力在碳排放中占据了绝对的主导地位, 因此碳排放因子统计数据的差异和轻微浮动并不会对整个碳排放大户拾取结果带

表 4 主竖井工程数量表

Table 4 Quantity table of the main shaft

No.	Subproject	Support		Length/m	Section/m ²		Quantity/m ³	
		Type	Thickness/mm		Excavation	Clear	Excavation quota	Support quota
1	Shaft neck A	Reinforced concrete	1200	42.5	66.44	36.30	2823.7	1281.0
2	Shaft neck B	Reinforced concrete	800	34.2	55.39	36.30	1894.3	652.9
3	Shaft crib	Reinforced concrete		2.8			217.6	77.7
4	Shaft body ($H < 400$ m)	Concrete/reinforced concrete	450	320.5	46.54	36.30	14916.1	3281.9
5	Shaft body ($400 \text{ m} < H < 600$ m)	Concrete/reinforced concrete	450	200	46.54	36.30	9308.0	2048.0
6	Shaft body ($600 \text{ m} < H < 1000$ m)	Concrete/reinforced concrete	450	400	46.54	36.30	18616.0	4096.0
7	Shaft body ($1000 \text{ m} < H < 1200$ m)	Concrete/reinforced concrete	450	18.5	46.54	36.30	861.0	189.4
8	Shaft body ($1000 \text{ m} < H < 1200$ m)	Anchor net + concrete/reinforced concrete	500	181.5	47.76	36.30	8668.4	2080.0
9	Shaft body ($1200 \text{ m} < H < 1500$ m)	Anchor net + concrete/reinforced concrete	500	218.5	47.76	36.30	10435.6	2504.0
10	Shaft body ($1200 \text{ m} < H < 1500$ m)	Anchor net + concrete/reinforced concrete	550	44	48.99	36.30	2155.6	558.4
11	Shaft body ($1500 \text{ m} < H < 1800$ m)	Anchor net + concrete/reinforced concrete	550	141.5	48.99	36.30	6932.1	1795.6
12	Shaft cap	Reinforced concrete	500				60.2	27.6
13	Horsehead (-1000 m)	Reinforced concrete	450	10	16.21	11.49	162.1	47.2
14	Horsehead (-1400 m)	Reinforced concrete	450	10	16.21	11.49	162.1	47.2
15	Horsehead (-1585 m)	Reinforced concrete	450	10	8.80	5.45	88.0	33.5

表 5 压气设备型号表

Table 5 List of air compressors

Type	Specifications and models	Working power/kW	Number
Fixed	SA160A	160	2 (1)
Mobile	PES720	132	8

表 6 通风设备型号表

Table 6 List of ventilators

Depth/m	Type	Specifications and models	Working power/kW	Number
-1000	Inlet air	DK62-12-No34	315 × 2	1 (1)
-1120	Inlet air	DK40-8- No25	200 × 2	1 (1)
1260	Inlet air	DK62-12- No34	315 × 2	1 (1)
1320	Inlet air	DK40-8-No25	200 × 2	1 (1)
-1400	Inlet air	DK40-8-No25	132 × 2	1 (1)
-1200	Return air	K45-4-No13	90	1 (1)
-1120	Return air	DK62-12-No38	630 × 2	2
-1320	Return air	DK62-12-No38	630 × 2	2

来影响,可能在细节考量某几类材料或者能源消耗的碳排放量比选中,碳排放因子的差异会对碳排放分析结果带来显著影响。

进一步分析可知,机械设备的碳排放来源主要是电力为主,这主要是因为该段主竖井的基建工程主要依赖气动设备完成,而气动设备的驱动来源均为电力,此外,排水、供气、通风等设备的主要动力来源同样是电力,因此,电力消耗碳排放占整段主竖井的占比较大,约占到 1/4 ~ 1/3。在材料方面,碳排放主要集中在水泥的消耗上,这是由于水泥的制备过程非常复杂,需经过采石场开掘、碎石粉碎、研磨、煅烧、冷却等多个环节制备而成。因此,水泥的整体碳排放较大。综上分析可知,该段主竖井工程的节能减排重点,首先应该以节能材料为导向,特别是通过优化水泥、碎石等材料制备工艺,研发新型节能替代材料,达到降低碳排放的目的。

其次,电力驱动设备的碳排放也不容小觑,亟需优化对设备的应用数量、布局、以及改进动力系统,降低电力驱动设备的整体碳排放。

4 结论

(1) 本文根据矿山井巷工程定额计价模式,提出了金属矿山井巷建设工程的碳排放测算架构,将矿山井巷工程分为直接系统工程和辅助系统工程,分别为两条测算路径建立“自下而上”的碳排放测算模型,通过定额标准细化矿山井巷工程的碳排放测算结果。基于上述碳排放测算架构,运用 MySQL 语言建立了金属矿山井巷建设工程专用的碳排放基础数据库,数据库涵盖矿山井巷工程直接系统和辅助系统所需的十个碳排放测算基础数据表,分别记录不同金属矿山井巷建设工程各层级工程名录、碳排物质名录及碳排放因子清单。

(2) 本文基于 MATLAB 搭建了一个金属矿山井巷工程碳排放智能测算软件平台,将所提出的碳排放测算模型及碳排放基础数据库进行有机融合,实现更高效碳排放基础数据索引调用以及更精细化的碳排放测算结果。同时案例分析显示,该碳排放智能测算软件平台能依据碳排放测算结果,自动溯源碳排路径、锁定碳排大户,为矿山井巷建设工程的“双碳”战略目标提供可靠的数据支撑。

(3) 本文归纳总结了国内外碳排放清单和相应的碳排放因子研究成果,结合我国金属矿山井巷工程的建设特点和物质名录清单,汇总了矿山井巷建设工程全流程的碳排放物质名录清单和相应的碳排放因子数据。但由于碳排放因子会随着材料和能源的生产制备工艺改进不断变化,因此在本文搭建的金属矿山井巷工程碳排放智能测算软件平台中加入了自定义导入碳排放因子的功能,项目上可根据需求修改碳排放因子数据库,提高本平台在不同工程应用中的碳排放测算准确性。

表 7 供、排水设备型号表

Table 7 List of water supply and drainage equipment

Type	Specifications and models	Working power/kW	Number
Water supply	Water pump	IS100-80-160	15
	Multistage pump	DFS450-60 × 8	900
	Multistage pump	DFS450-95 × 12	2240
Water drainage	Centrifugal pump	D46-50×5(P)	75
	Submerged pump	6699 × 11	37
	Submerged pump	6699 × 3	9.2
	Slurry pump	65ZJL-A30	18.5

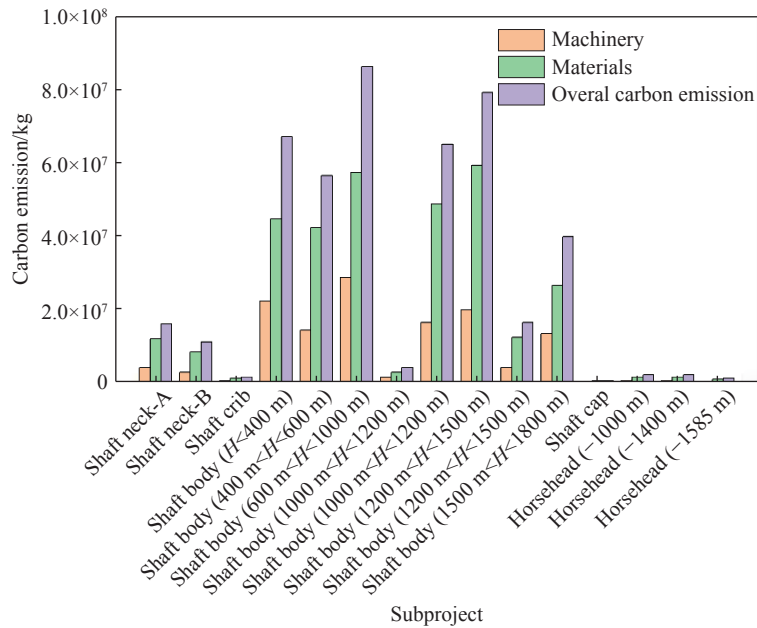


图8 案例主竖井工程各分部工程碳排放统计结果

Fig.8 Statistical results of the carbon emission of each subproject of the main shaft case

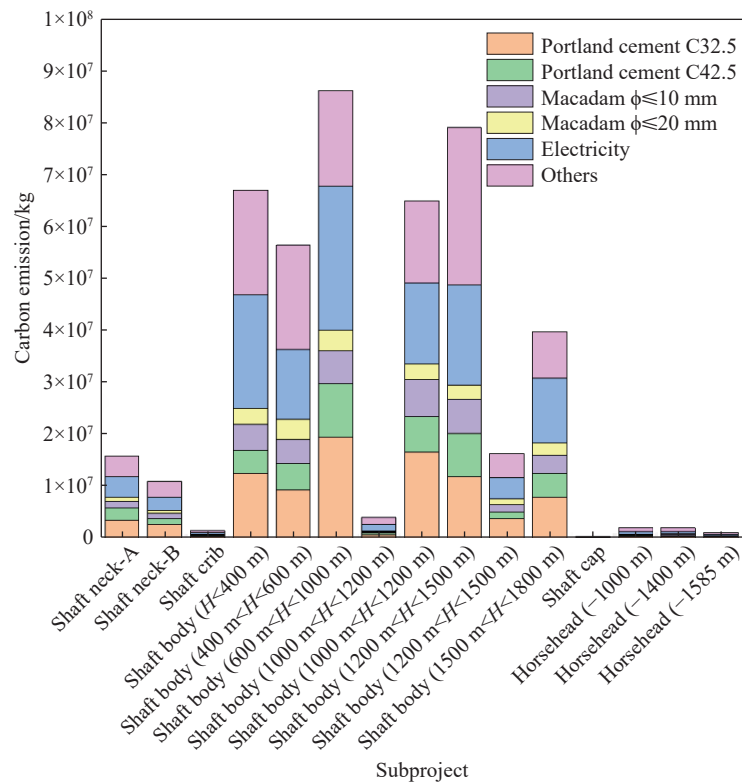


图9 案例主竖井工程各物质名录碳排放统计结果

Fig.9 Statistical results of the carbon emission of each substance in the main shaft case

(4) 本文搭建的碳排放测算架构、测算模型以及碳排放基础数据主要参考《冶金矿山井巷工程预算定额》的计价形式,然而现场矿山基建工程施工会由于不同地质环境、矿体赋存条件、矿体类型、施工组织和施工技术不同,与定额规定的标准工程量存在偏差.例如金矿的开采会倾向于采

用《黄金工业工程建设预算定额》,不同定额之间对工程结构的划分会存在一定差异;现场施工组织可能会影响实际使用的机械设备和材料工程量,而这部分须参考现场的结算和决算清单进行修正.因此,后续的研究会侧重于分析不同定额标准之间的异同,并考虑现场实际工程量清单、施工

组织设计和施工技术, 提出更具泛化性和适用性的矿山井巷工程碳排放测算方法. 此外, 本文仅开展了井巷工程的碳排放测算方法研究, 后续会继续完善诸如剥离工程、尾矿工程、运输工程等其他矿山工程的碳排放测算研究.

参 考 文 献

- [1] Zhong L. *Assessment for Life-cycle Carbon Emissions and Carbon Abatement Potential of China's Mining Industry* [Dissertation]. Dalian: Dongbei University of Finance and Economics, 2022
(钟磊. 中国采掘业碳排放核算及碳减排潜力评估——以辽宁省铁矿为例[学位论文]. 大连: 东北财经大学, 2022)
- [2] 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技术进展与展望. 工程科学学报, 2023, 45(8): 1281)
- [3] Cai M F, Xue D L, Ren F H. Current status and development strategy of metal mines. *Chin J Eng*, 2019, 41(4): 417
(蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略. 工程科学学报, 2019, 41(4): 417)
- [4] Norgate T, Haque N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *J Clean Prod*, 2010, 18(3): 266
- [5] Memary R, Giurco D, Mudd G, et al. Life cycle assessment: A time-series analysis of copper. *J Clean Prod*, 2012, 33: 97
- [6] Haque N, Norgate T. The greenhouse gas footprint of *in situ* leaching of uranium, gold and copper in Australia. *J Clean Prod*, 2014, 84: 382
- [7] Ekman Nilsson A, Macias Aragonés M, Arroyo Torralvo F, et al. A review of the carbon footprint of Cu and Zn production from primary and secondary sources. *Minerals*, 2017, 7(9): 168
- [8] Farjana S H, Huda N, Parvez Mahmud M A. Impacts of aluminum production: A cradle to gate investigation using life-cycle assessment. *Sci Total Environ*, 2019, 663: 958
- [9] Gan Y, Griffin W M. Analysis of life-cycle GHG emissions for iron ore mining and processing in China—Uncertainty and trends. *Resour Policy*, 2018, 58: 90
- [10] Liu J, Gao J W. Key problems and countermeasures of carbon emission accounting of transportation infrastructure. *Transp Energy Conserv Environ Prot*, 2021, 17(5): 4
(刘杰, 高嘉蔚. 交通基础设施碳排放核算关键问题及对策探索. 交通节能与环保, 2021, 17(5): 4)
- [11] Wang K, Zhang H Y, Lv F. Research on design cost management system of energy saving and emission reduction based on highway reconstruction and expansion. *Transp Energy Conserv Environ Prot*, 2020, 16(2): 67
(王珂, 张宏宇, 吕奋. 基于公路改扩建节能减排造价管理系统的研究. 交通节能与环保, 2020, 16(2): 67)
- [12] Du J, Luo J, Wang R, et al. The estimation and analysis of spatio-temporal change patterns of carbon functions in major grain producing area. *J Ecol Rural Environ*, 2019, 35(10): 1242
(杜江, 罗珺, 王锐, 等. 粮食主产区种植业碳功能测算与时空变化规律研究. 生态与农村环境学报, 2019, 35(10): 1242)
- [13] Song X L, Yang J X, Liu J R. Environmental benefits assessment of blast furnace slag recycling for green building materials based on LCA. *China Popul Resour Environ*, 2012, 22(4): 51
(宋小龙, 杨建新, 刘晶茹. 高炉渣资源化生产绿色建材的环境效益评估——基于生命周期的视角. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(4): 51)
- [14] Qiao L, Deng N F, Li Q W, et al. Intelligent measurement method of carbon emission throughout the life cycle of highway construction. *Chin J Eng*, 2023, 45(12): 2173
(乔兰, 邓乃夫, 李庆文, 等. 公路工程施工全生命周期碳排放智能测量方法. 工程科学学报, 2023, 45(12): 2173)
- [15] Xia X Q, Lu M Y, Guo L. Studying on the impact of carbon allowance allocation rules on manufacturing/remanufacturing under carbon trading. *Syst Eng Theory Pract*, 2022, 42(11): 3001
(夏西强, 路梦圆, 郭磊. 碳交易下碳配额分配方式对制造/再制造影响研究. 系统工程理论与实践, 2022, 42(11): 3001)
- [16] Liang W G, Zhao X L, Zhou L F, et al. Carbon emission benchmark in carbon trading market system: Application practice, research progress and prospect. *Res Environ Sci*, 2022, 35(10): 2244
(梁为纲, 赵晓丽, 周凌峰, 等. 碳交易市场体系中的碳排放基准线: 应用实践、研究进展与展望. 环境科学研究, 2022, 35(10): 2244)
- [17] Yang J, Qi C J. An empirical analysis of the relationship between agricultural trade and carbon emissions between China and regions along “the Belt and Road” initiative. *Chin J Agric Resour Reg Plan*, 2021, 42(1): 135
(杨桔, 祁春节. “一带一路”国家与中国农产品贸易与碳排放的关系实证分析. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 135)
- [18] Lan Z R, Sun Z Q. Research on the green productivity of China's light industry and the influencing factors under the constraints of carbon emissions—Based on the panel data of 16 Chinese light industry sectors. *China Popul Resour Environ*, 2020, 30(5): 58
(兰梓睿, 孙振清. 考虑碳排放的中国轻工产业绿色生产率及影响因素研究——基于轻工业 16 个细分行业面板数据. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(5): 58)
- [19] Zhang S Q, Li Y. Study on relationship between energy integration and low carbon development in coal mining area. *Coal Sci Technol*, 2015, 43(1): 138
(张士强, 李跃. 煤矿区能源集成与低碳发展关系研究. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 138)
- [20] Qin S. A discusses on calculation method of auxiliary cost of the shaft and lane engineering of metallurgical mine. *China Manganese Ind*, 2021, 39(5): 57
(覃诗. 探讨冶金矿山井巷工程辅助费的计取方法. 中国锰业, 2021, 39(5): 57)
- [21] Cai C G. Key points in the pre settlement examination of the

- roadway project in metallurgical mines. *World Nonferrous Met*, 2017(18): 18
(蔡晨光. 冶金矿山井巷工程预算审核中的难点要点. 世界有色金属, 2017(18): 18)
- [22] Qian C, Gao C, Xu C H, et al. Establishment and improvement of auxiliary cost quota of ramp of roadway engineering in metallurgical mines. *Mod Min*, 2019, 35(10): 99
(钱崇, 高超, 许朝华, 等. 冶金矿山井巷工程斜坡道辅助费定额的编制与完善. *现代矿业*, 2019, 35(10): 99)
- [23] Zhu C Y, Cao F X. Budget making of sinking and driving engineering. *Nonferrous Met Des*, 2016, 43(1): 61
(朱彩云, 曹凤仙. 矿山井巷工程预算编制. *有色金属设计*, 2016, 43(1): 61)
- [24] Vallack H W, Rypdal K. The global atmospheric pollution forum air pollutant emission inventory manual. version 6.0 May 2019 revision [J/OL]. *White Rose Research Online* (2019-05-15) [2023-09-11]. <https://eprints.whiterose.ac.uk/147218/>
- [25] Wu W Q, Wu A Q. Greenhouse gas inventory estimates mechanism in United States environmental protection agency(EPA). *Sci Manag*, 2012, 32(2): 11
(吴伟强, 吴安琪. 美国国家环保局(EPA)温室气体清单编制机制. *科学与管理*, 2012, 32(2): 11)
- [26] Zheng J. *Research on U. S. Greenhouse Gas Inventory Compilation System* [Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011
(郑洁. 美国温室气体清单编制机制研究[学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2011)
- [27] Lu L. Thoughts on perfecting China's carbon emission accounting system under the background of carbon neutrality. *Southwest Finance*, 2021(12): 15
(卢磊. 碳中和背景下完善我国碳排放核算体系的思考. *西南金融*, 2021(12): 15)
- [28] Liu X L, Wang H T, Chen J, et al. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database. *Acta Sci Circumstantiae*, 2010, 30(10): 2136
(刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2136)
- [29] Zhang Z F. *Study on Carbon Emissions Accounting and Carbon Emission Reduction Approach of Surface Coal Mine* [Dissertation]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013
(张振芳. 露天煤矿碳排放核算及碳减排途径研究[学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2013)
- [30] Gao F. *Research on Life Cycle Assessment and the Application in China Magnesium Industry* [Dissertation]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008
(高峰. 生命周期评价研究及其在中国镁工业中的应用[学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2008)
- [31] Ministry of Housing and Urban-Rural Development, People's Republic of China. GB/T51366—2019 *Standard for Building Carbon Emission Calculation*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019
(中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T51366—2019 建筑碳排放计算标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019)
- [32] Wang J B, Yue J P, Fan L J, et al. Carbon emission accounting of copper industry in China based on life cycle analysis // *Proceedings of Chinese Society for Environmental Sciences*. Xiamen, 2017: 898
(王俊博, 岳俊鹏, 樊礼军, 等. 基于生命周期分析的中国铜工业碳排放核算//中国环境科学学会科学与技术年会论文集. 厦门, 2017: 898)
- [33] Zhang X C. *Research on the Quantitative Analysis of Building Carbon Emissions and Assessment Methods for Low-Carbon Buildings and Structures* [Dissertation]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018
(张孝存. 建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究[学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018)
- [34] Li Q F, Duan H B, Xie M H, et al. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of a 40 MW wind farm with consideration of the infrastructure. *Renew Sustain Energy Rev*, 2021, 138: 110499
- [35] Chen B, He G X, Qi J, et al. Greenhouse gas inventory of a typical high-end industrial park in China. *Sci World J*, 2013, 2013: 717054
- [36] Zhou Y, Zheng L F, Zhou X N, et al. Carbon emission of timber production operating system based on industry standards. *J Beihua Univ (Nat Sci)*, 2014, 15(6): 815
(周媛, 郑丽凤, 周新年, 等. 基于行业标准的木材生产作业系统碳排放. *北华大学学报(自然科学版)*, 2014, 15(6): 815)
- [37] Cang Y J. *Study on Accounting Methods of Building Carbon Emission in Embodied Stage* [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018
(仓玉洁. 建筑物化阶段碳排放核算方法研究[学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018)
- [38] Ji J R, Zhang Q N, Zhou Z, et al. Thermodynamic characteristics and carbon emission analysis of carbonate calcination in cement raw meal. *Sichuan Cem*, 2023(4): 1
(季军荣, 张庆年, 周州, 等. 水泥生料中碳酸盐煅烧热力学特性及其碳排放分析. *四川水泥*, 2023(4): 1)
- [39] Zhao W X. *Study on Carbon Emission Accounting Model and Low-Carbon Path of Prefabricated Buildings in Physical and Chemical Stage* [Dissertation]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2022
(赵伟祥. 装配式建筑物化阶段碳排放核算模型与低碳化路径研究[学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2022)
- [40] Li J L. *Study on Carbon Emissions Calculation and Carbon Eduction Strategy of Urban Residential Life Cycle in Cold Areas* [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019
(李金潞. 寒冷地区城市住宅全生命周期碳排放测算及减碳策略研究[学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019)
- [41] Yue Q, Xu X R, Hillier J, et al. Mitigating greenhouse gas emissions in agriculture: From farm production to food

- consumption. *J Clean Prod*, 2017, 149: 1011
- [42] Zhou Y, Gan L J, Han F F. Accounting of express delivery carbon footprint based on life cycle assessment. *Logist Technol*, 2021, 40(6): 104
(周杨, 甘陆军, 韩方方. 基于生命周期评价的快递碳足迹核算. *物流技术*, 2021, 40(6): 104)
- [43] National Development and Reform Commission, People's Republic of China. *Guidelines for the Preparation of Provincial GHG Inventories (Trial)*. Beijing: General Office of the National Development and Reform Commission, 2011
(中华人民共和国国家发展改革委. 省级温室气体清单编制指南(试行). 北京: 国家发展改革委办公厅, 2011)
- [44] Ma Y Y, Hao Z, Wang Q Y. Analysis of body materials based on life cycle assessment. *Auto Eng*, 2019(1): 11
(马洋洋, 郝卓, 汪庆云. 基于生命周期评价的车身材料分析. *汽车工程师*, 2019(1): 11)
- [45] Wang L, Wan C, Liu Y, et al. Life cycle carbon emissions evaluation based on resin polyester. *Chem Enterp Manag*, 2019(25): 112
(王玲, 万超, 刘阳, 等. 基于树脂聚酯的生命周期碳排放评价. *化工管理*, 2019(25): 112)
- [46] Ozgen S, Caserini S. Methane emissions from small residential wood combustion appliances: Experimental emission factors and warming potential. *Atmos Environ*, 2018, 189: 164
- [47] Stocker T F, Dahe Q, Plattner G K. *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- [48] Lee U, Benavides P T, Wang M. *Life Cycle Analysis of Waste-to-Energy Pathways*. Lemont: Academic Press, 2020