非煤矿山地下开采碳排放核算系统研究*

冯俊[1],党帅珂[2],任高峰[2,3],葛永翔[2,3,4],张露伟[2],张聪瑞[2,3],李吉民[1],曹泽伟[2]

(1.武钢资源集团程潮矿业有限公司, 湖北 鄂州市 436051;
2.武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;
3.关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070;
4.武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:我国矿山开采普遍存在着碳排放强度大、能源粗放式消耗的问题,且目前对于矿山开采仍处于碳排放理论层面的核算,缺少对矿山生产过程中碳排放整体统一的管理分析。针对地下开采碳核算现状,梳理总结现有核算方法,采用全生命周期评价法与碳排放系数法,并结合矿山生产管理数据和工艺设备等参数构建了碳排放预测与实测模型。基于此,采用MVC软件架构模式搭建地下矿山开采碳排放核算系统平台,并按照生产数据录入、预测模型计算、实测模型计算、数据对比核算、碳视角分析、基础数据管理等6个主模块进行功能分解与界面设计。通过对程潮铁矿进行实例应用得出,除提升、通风等大功率高耗能工艺设备外,运输、支护以及风动钻孔设备等均为重点排碳点,且预测数据与实测值的误差小于10%,符合精度要求,表明所构建的系统可有效实现地下矿山开采碳排放的预测与数据分析。研究结果对矿山后续减碳工作具有指导意义。

关键词:地下开采;碳排放核算模型;碳核算平台;生命周期评价法;碳排放系数法

中图分类号:TD803 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)02-0226-09

Research on Carbon Emission Accounting System of Non-Coal Mine Underground Mining

FENG Jun[1], *DANG Shuaike*[2], *REN Gaofeng*[2,3], *GE Yongxiang*[2,3,4],
ZHANG Luwei[2], *ZHANG Congrui*[2,3], *LI Jimin*[1], *CAO Zewei*[2]

(1.Wugang Resources Group Chengchao Mining Co., Ltd., Ezhou, Hubei 436051, China;
2.School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;
3.Key Laboratory of Green Utilization of Critical Non-metallic Mineral Resources, Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430070, China;
4.School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: China's mining industry generally has the problems of high carbon emission intensity and extensive energy consumption. At present, mining is still in the theoretical level of carbon emission accounting, and there is a lack of unified management and analysis of carbon emission in the process of mining production. In view of the current situation of carbon accounting in underground mining, the existing accounting methods were summarized, and the carbon emission prediction and measurement model was constructed by using the whole life cycle assessment method and the carbon emission coefficient method, combined with the mine production management data and process equipment and other parameters. Based on this, the MVC software architecture model was used to build a system platform of carbon emission accounting for underground mining, and the function decomposition and interface design were carried out according to the six main modules of production data entry, prediction model calculation, measured model calculation, data comparison accounting, carbon perspective analysis and basic data management. Through the example application of Chengchao Iron Mine, it is concluded that in addition to high-power and high-energy-consuming process equipment such as lifting and ventilation, transportation, support and pneumatic drilling equipment are all key carbon emission points, and the error between the predicted data and the measured value is less than 10%, which meets the accuracy requirements. It shows that the constructed system can effectively realize the prediction and data analysis of carbon emissions from underground mining. The research results have guiding significance for the

* **收稿日期**:2024-07-10
作者简介:冯俊(1972—),男,湖北鄂州人,工程师,主要从事采矿生产管理及工艺技术研究工作。E-mail:496468854@qq.com
通信作者:葛永翔(1995—),男,甘肃张掖人,博士,助理研究员,从事采矿工程、岩土工程等方面的工作。E-mail:gyxwhut@163.com

subsequent carbon reduction work of the mine.

Key words: Underground mining, Carbon emissions accounting model, Carbon accounting platform, Life cycle assessment method, Carbon emission coefficient method

0 引言

矿业作为我国重要的经济支撑产业,其碳排放量占据了我国碳排放总量的5%以上,随着双碳战略的实施,各行各业积极开展"碳达峰"行动[1],低碳化生产是目前矿业发展的主基调之一[2]。以地下矿山为例,我国地下矿山的碳排放强度大、浪费严重。对于矿山生产,现有研究只有针对理论层面的碳排放核算,缺少对矿山实际生产过程中的碳排放管理与核算,导致地下矿山的降碳形势依旧严峻。

目前,国内外学者针对地下矿山的碳排放核算开展了大量的研究,并形成了多种碳排放核算模型。NORGATE等[3]对金属矿山开采和选矿进行了生命周期评估,发现装载和运输对开采和加工的温室气体排放总量贡献最大。杨博宇等[4]结合IPCC提供的碳排放系数法,构建了露天矿山的碳排放核算模型,并以平朔矿区为例,核算其在2011—2015年度的直接与间接碳排放量。REN等[5]基于IPCC推荐的"自上而下"的碳排放核算方法,提出了金属地下矿山采矿阶段温室气体排放预测模型,根据矿山的采矿初步设计来预测地下矿山采矿阶段的温室气体排放量。

学者们针对数字化碳核算、管理系统也开展了大量研究与示范应用[6]。ZHANG等[7]通过比较优选碳排放的会计准则及其计算方法,提出了基于5G共享智能的碳排放能耗评估框架。QIAN等[8]考虑碳排放的时空分布规划,并应用多种数字技术对室内环境设备能耗等进行监测和评估,形成一种基于数字孪生管理平台的低干预碳足迹核算系统。王长军等[9]提出数字科技创新引领物流业绿色低碳转型理论模型,揭示了数字科技创新引领物流业绿色低碳转型的逻辑过程。

总体而言,现阶段针对地下矿山开采阶段碳排放核算已有了一定的研究基础,但均体现在理论核算方面。建筑、制造和物流等行业的数字化碳管理系统都已经有了理论框架突破和实例应用[10],但由于矿山行业工程场景的特殊性与局限性,地下矿山开采碳排放缺少相关应用核算模型,仍未有相应的核算管理平台。因此,本文针对矿山生产阶段的碳排放预测模型,开发了地下矿山开采碳核算平台并应用于矿山,有助于加深管理者对施工现场碳排放变化规律的认知,为后续的减碳工作提供依据。

1 地下开采碳排放核算方法选取

目前较为广泛的碳排放核算方法是IPCC排放系数法[11]、投入产出分析[12]、Kaya恒等式[13]和生命周期评价[15]等,IPCC方法依赖于生产过程中消耗各种温室气体排放源的结果,但利用其对某一地下矿山的温室气体排放分析时仍存在较大困难,排放因子的确定直接决定了计算结果的准确性。投入产出法简单实用,但精度不是很高。Kaya恒等式是一种宏观上的核算框架,并不符合微观上对单个矿山的温室气体排放进行核算。生命周期评价法具有自下而上、科学性和可量化的优点,可以有效针对具体矿山工艺、设备进行核算,但生命周期评价法中影响评价还需进一步完善。进行碳排放核算时通常会多种方法组合使用,尽可能提高计算的准确性。本论文采用生命周期评价方法并结合排放系数法来预测核算地下矿山的碳排放量。

煤矿由于其矿产资源成因和地质条件不同,采矿方法也较为特殊,与其他矿山类型区别甚大,本文主要以非煤矿山为研究对象,包括金属和非金属地下矿山。地下矿山涉碳的环节包括地下开采的各个区域,各区域可划分为开拓、采准、切割和回采等环节,各个环节涵盖各开采工艺和设备。按照"自下而上"的方法理念[14],核算层级依次为碳排放区域、碳排放环节、碳排放工艺和碳排放设备。为了进一步量化和比较各采矿生产过程的碳排放值,选择使用"单位立方米矿岩"作为开采过程碳排放量的计算单位。

2 碳排放核算模型构建

2.1 系统边界分析

结合地下矿山调研分析,地下矿山开采与碳排放相关的工艺环节包括凿岩、爆破、采装、运输、破碎、通风、排水、支护和照明、提升等,由于充填方法多样复杂,暂不作考虑。以上工艺环节中碳排放源主要为爆破矿岩用的炸药、驱动设备的化石燃料和

电力以及支护所需的水泥物料。将实际涉及碳排放核算边界的环节按照各个层级划分,见表 1。

表 1 碳核算层级

Table 1 Carbon accounting level

碳排放环节	碳排放区域	排放工艺	排放源类型
开拓采准切割	开采中段区域	凿岩	设备
		采装	设备
		爆破	设备、炸药
		运输	设备
		支护	设备、水泥
		破碎	设备
公共环节	公共区域	通风、排水、压气、提升和照明	设备

结合表 1,目前将地下矿山开采按照工艺划分为十类,分别为凿岩、爆破、支护、通风、运输、提升、照明、排水、破碎和压气。其中破碎、照明、提升、通风和排水为公共分摊附属工艺。参照国家矿业企业温室气体排放指南,结合 IPCC 提供的核算范围三,选择电力、炸药、水泥和燃油 4 种能源物料作为矿山开采碳排放源。因此,地下矿山开采碳排放核算的边界如图 1 所示。

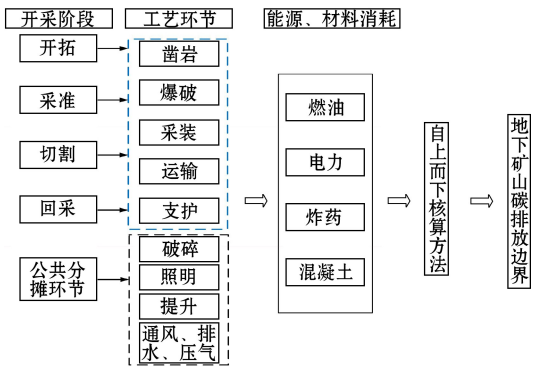


图 1 地下矿山开采碳排放核算边界

Fig.1 Carbon emission accounting boundary of underground mining

2.2 碳排放预测核算模型

2.2.1 凿岩工艺

地下矿山的凿岩工艺即是在开采工作面的岩石(或矿石)上钻凿炮孔的过程,通过凿岩设备在某一中段区域进行凿岩工作来实现该工艺。按其动力来源可将凿岩设备分为内燃式、电动式、气动式和液压式 4 类,对于钻凿单位立方米矿岩的气动、耗油和耗电设备的凿岩碳排放量计算模型如式(1)所示。

$$E_1^{\mathrm{dr}}=\sum_{j=0}^{j'}\frac{P_{\mathrm{dr}}^1\cdot N_j^1\cdot L_j^1\cdot E_{\mathrm{e}}}{v_{\mathrm{dr}}}+\sum_{j=0}^{j'}\frac{\rho\cdot\alpha\cdot N_j^2\cdot L_j^2\cdot E_{\mathrm{f}}}{v_{\mathrm{dr}}}+\sum_{j=0}^{j'}\frac{P_{\mathrm{dr}}^2\cdot N_j^3\cdot L_j^3\cdot E_{\mathrm{e}}}{v_{\mathrm{dr}}}\tag{1}$$

式中:E_1^{dr} 代表钻凿单位立方米矿岩温室气体排放量,$\mathrm{t/m^3}$;j' 代表矿山具有明显岩石性质差异的岩体类型数;P_{dr}^1 代表凿岩设备工作时的额定(平均)功率,kW;N_j^1、N_j^2 和N_j^3 代表采用不同能耗类型(电动、柴油和气动式)凿岩设备钻凿单位立方米矿岩所需的钻凿炮孔个数;v_{dr} 代表凿岩设备的凿岩效率,m/h,按照设备情况有所不同;L_j^1、L_j^2 和L_j^3 代表凿岩设备掘进单位工程量的平均钻孔长度,$\mathrm{m/m^3}$;α 代表柴油凿岩设备的油耗,$\mathrm{m^3/h}$;E_{e} 代表电能的温室气体排放因子,$\mathrm{t/kW\cdot h}$;E_{f} 代表燃油的温室气体排放因子,t/kg;ρ 代表燃油密度,$\mathrm{kg/m^3}$;P_{dr}^2 代表气动凿岩机使用压气机的气动换算功率,kW。

2.2.2 爆破工艺

爆破工艺是通过装药设备装入炸药并引爆炸药来实现破岩的过程。可根据开采单位立方米矿岩的炸药消耗量来计算装药与爆破过程的碳排放,对不同爆破过程中单位立方米矿岩的温室气体排放量计算模型如式(2)和式(3)所示。

$$E_2^{\mathrm{ex}}=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{j'}\frac{Q_j^i\cdot E_{\mathrm{p}}}{1\,000}\tag{2}$$

$$E_2^{\mathrm{ch}}=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{j'}\frac{Q_j^i\cdot P_{\mathrm{ch}}\cdot E_{\mathrm{e}}}{v_{\mathrm{ch}}\cdot 1\,000}\tag{3}$$

式中:E_2^{ex} 代表爆破单位立方米岩体所产生的温室气体排放量,$\mathrm{t/m^3}$;E_2^{ch} 代表装药设备完成单位立方米岩体装药所产生的温室气体排放量,$\mathrm{t/m^3}$;i 代表矿山开采环节类型,1,2,3 分别代表开拓、采准和回采环节;Q_j^i 代表爆破单位体积同类型岩体的炸药单耗,$\mathrm{kg/m^3}$;P_{ch} 代表装药设备的运行功率,kW;v_{ch} 代表装药设备的装药速率,$\mathrm{kg/m^3}$;E_{p} 代表所采用的工业炸药的温室气体排放因子,t/t。

2.2.3 破碎工艺

目前常用的破碎方法主要为爆破法和机械破碎法,使用较广泛的为机械破碎法,采用非炸药岩石安全破碎器对矿岩进行机械式破碎,常用的设备主要有风镐、破碎台车、井下破碎机等。针对不同设备破碎单位立方米矿岩的碳排放量分别进行计算。

破碎台车主要是针对大块度岩块进行机械破岩,电动破碎台车和柴油破碎台车单位立方米矿岩的二次破碎碳排放模型如式(4)和式(5)所示。

$$E_3^{\mathrm{op}}=E_{\mathrm{e}}\cdot\left(\frac{P_{\mathrm{pc}}^1\cdot\varphi_{\mathrm{pc}}\cdot\gamma}{Q_{\mathrm{pc}}}\right)\tag{4}$$

$$E_3^{op}=E_f\cdot\left(\frac{\alpha'\cdot P_{pc}^2\cdot\varphi_{pc}\cdot\gamma}{Q_{pc}}\right) \tag{5}$$

在一般的地下矿山开采过程中,无论是无轨运输还是有轨运输,矿岩在各个中、分段运输完成后都到达井下或地表破碎点通过破碎机进行破岩,在这种方式下单位立方米矿岩的二次破碎碳排放模型如式(6)所示。

$$E_3^{op}=E_e\cdot\left(\frac{P_{pc}^3\cdot n\cdot\gamma}{Q_{pc}}\right) \tag{6}$$

式(4)至式(6)中:E_3^{op} 代表某类型破碎设备破碎单位立方米矿石所产生的温室气体排放,t/m³;γ 代表破碎矿岩物质的平均容重,t/m³;P_{pc}^1、P_{pc}^2 和 P_{pc}^3 分别代表电动破碎台车、柴油破碎台车和井下破碎机的功率,kW;φ_{pc} 代表单位体积矿岩的平均大块率;Q_{pc} 代表破碎设备的平均生产能力,t/h;n 代表某型号破碎设备的台数;α' 代表在破碎设备内燃机中将化石能源转化为输出功率时燃烧化石燃料的转化率,t/(kW·h)。

2.2.4 通风、排水、照明、压气和提升工艺

通风、排水等工艺不单独作用于某个中段,而是贯通地下的全矿域开采。针对这些工艺的碳排放计算,考虑通过计算工艺日耗电量与矿山日均开采量的比值,以此定义开采单位矿岩时由各工艺所引起的碳排放。排水、提升、压气和照明工艺亦是如此。通风、排水、照明、压气和提升等相关设备的开采单位矿岩的碳排放量可以通过式(7)计算。

$$E_{4,5,6,7,8}^{V}=\frac{(P_{ve}\cdot n_{ve}\cdot t_{ve}+P_{wt}\cdot n_{wt}\cdot t_{wt}+P_{li}\cdot n_{li}\cdot t_{li}+P_{ho}\cdot n_{ho}\cdot t_{ho}+P_{ac}\cdot n_{ac}\cdot t_{ac})}{L\cdot E_e} \tag{7}$$

式中:$E_{4,5,6,7,8}^{V}$ 代表开采单位立方米矿岩由通风、排水、照明、提升和压气所造成的温室气体排放量,t/m³;P_{ve},P_{wt},P_{li},P_{ho} 和 P_{ac} 分别代表某种类型通风、排水、照明、提升和压气设备的工作功率,kW;n_{ve},n_{wt},n_{li},n_{ho} 和 n_{ac} 分别代表的是通风、排水、照明、提升和压气运行设备的台数,台;t_{ve},t_{wt},t_{li},t_{ho} 和 t_{ac} 分别代表通风、排水、照明、提升和压气设备的日均工作时间,h;L 代表矿山日均出矿、废石的开采量,m³。

2.2.5 支护工艺

目前矿山使用最多的支护方式为喷射混凝土支护和锚杆支护。支护过程除了支护设备如喷浆台车和锚杆钻机的部分电力消耗会产生硫排放外,支护工艺最主要的碳排放来源之一是消耗水泥的间接碳排放。

(1)喷射混凝土支护。

当混凝土支护的相关参数和设备确定时,开采单位立方米矿岩的混凝土支护(含锚喷)产生的碳排放量通过式(8)计算。

$$E_8^{co}=\frac{(C-B)\cdot[d_1\cdot\beta+d_2\cdot(1-\beta)]\cdot E_c}{S} \tag{8}$$

式中:E_8^{co} 代表掘进巷道每剥离单位立方米岩体的喷射混凝土支护过程所产生的碳排放量,t/m³;C 代表巷道断面的平均周长,m;B 代表巷道断面的平均净宽,m;d_1,d_2 分别代表素喷、网喷的厚度,m;β 代表素喷在矿山巷道支护中的应用比例;E_c 代表混凝土拌合料的碳排放因子,t/m³;S 代表地下巷道的平均断面面积,m²。

以喷浆台车为例,在喷浆台车功率、喷浆速度和单位立方米岩体的混凝土消耗量已知的情况下,开采单位立方米矿岩时喷浆台车产生的碳排放量如式(9)至式(11)所示(以电动设备为例)。

$$E_8^{sp}=\frac{Q_1^{co}\cdot P_{sp}\cdot E_e}{v_{sp}}\ 或E_8^{sp}=\frac{Q_2^{co}\cdot P_{sp}\cdot E_e}{v_{sp}} \tag{9}$$

$$Q_1^{co}=\frac{(D^2-d^2)}{D^2} \tag{10}$$

$$Q_2^{co}=\frac{(C-B)\cdot[d_1\cdot\beta+d_2\cdot(1-\beta)]}{S} \tag{11}$$

式中:E_8^{sp} 代表掘进巷道剥离每单位立方米岩体的砌碹支护或喷射混凝土支护过程中喷浆台车所产生的碳排放量,t/m³;Q_1^{co} 代表掘进井筒剥离每单位立方米岩体的砌碹支护过程所需要的混凝土量,m³;Q_2^{co} 代表掘进巷道剥离每单位立方米岩体的喷射混凝土支护过程所需要的混凝土量,m³;P_{sp} 代表喷浆台车运行的功率,kW;V_{sp} 代表喷浆台车的喷浆速度,m³/h。

(2)锚杆支护。

锚杆(喷锚网)支护是指当巷道掘进后通过钻机设备向围岩中钻孔,将锚杆安设在锚杆孔内,对巷道围岩进行人工加固的过程。其涉及的排放源主要为锚杆钻机的电力消耗,以锚杆钻机为例,对应的碳排放预测模型如式(12)所示。

$$E_8^{bo}=\sum_{j=0}^{j'}\frac{P_{bo}\cdot a_j\cdot b_j\cdot E_e}{s_{bo}\cdot\eta_2} \tag{12}$$

式中:E_8^{bo} 代表锚固单位立方米矿岩的温室气体排放量,t/m³;P_{bo} 代表锚杆钻机工作时的额定(平均)功率,kW;a_j 代表采用锚杆支护单位长度某巷道的平均钻孔个数(单位长度巷道下锚杆行数乘列数);s_{bo} 代表穿孔设备的凿岩速度,m/h;b_j 代表安装某类型锚杆的平均钻孔长度,m/m³;η_2 代表锚杆钻机

的凿岩效率,m/h。

2.2.6 运输工艺

地下矿山运输工艺是指从各个工作面将矿石(废石)运输到地表的过程。地下矿山主要的运输方式包括皮带运输、无轨运输和有轨运输。为了方便量化井下运输情况,假定运距和运输时间、车辆性能不影响车辆运行速度,在已知相关设备型号时,不同运输工艺设备中产生的温室气体排放采用式(13)至式(15)进行计算。

(1) 带式设备运输过程。

$$E_9^{co}=\frac{P_{co}\cdot E_e}{lv_{co}} \tag{13}$$

式中:E_9^{co} 代表带式运输机运输每单位立方米岩体时的碳排放量,t/m^3;P_{co} 代表带式输送机极其附属设备的总功率,kW;lv_{co} 代表带式输送机的运量,m^3/h。

(2) 无轨设备运输过程。

矿山开采过程通过以柴油、电动无轨设备与放矿设备等运输单位矿石温室气体排放计算公式见式(14),以柴油井下卡车为例:

$$E_9^{tr}=\frac{(1+\lambda)\cdot P_{tr}\cdot t_{tr}\cdot E_f}{2\cdot\infty\cdot V_{tr}\cdot K_1} \tag{14}$$

式中:E_9^{tr} 代表柴油无轨设备运输每单位立方米岩体时的碳排放量,t/m^3;P_{tr} 代表某类型的井下无轨运输设备的发动机额定功率,kW;λ 代表采装车辆空、重载时发动机的功率比值系数;t_{tr} 代表井下运输汽车从采场到溜井(放矿机)等的平均往返时间,s;E_f 代表柴油的碳排放因子,t/J;∞ 代表柴油内燃机燃烧转化效率,t/(kW·h);V_{tr} 代表矿山所用某类型井下运输汽车对应的斗容,m^3;K_1 代表装载设备载重利用系数,一般取 0.9。

(3) 有轨设备运输。

矿山开采过程中通过井下电机车运输的温室气体排放模型见式(15)。

$$E_9^{lo}=\frac{P_{lo}\cdot t_{lo}\cdot E_e}{V_{lo}\cdot K_{lo}\cdot n'} \tag{15}$$

式中:E_9^{lo} 代表井下电机车运输单位立方米矿岩的碳排放量,t/m^3;P_{lo} 代表井下电机车的发动机额定功率,kW;n' 代表井下电机车的车厢数目,台;t_{lo} 代表电机车的平均往返时间,h;V_{lo} 代表某类型电机车设备对应的斗容,m^3;K_{lo} 代表井下电机车的满斗系数。

2.3 碳排放实测模型

结合 IPCC 碳排放系数法,按照所确立的碳排放边界,参照各能源类型及其碳排放因子,进行地下矿山碳排放量实测,公式见式(16)。

$$E=\sum_{k=0}^{k'}\Delta_k\cdot EF_{\Delta_k} \tag{16}$$

式中:E 代表开采每立方米矿岩的碳排放量,t/m^3;k' 代表不同能源类型;Δ_k 代表不同能源的消耗量,t;EF_{Δ_k} 代表设备 Δ_k 消耗能源所对应的碳排放因子,t/t。

3 碳排放核算系统开发与应用

3.1 系统架构

系统的总体架构采用 MVC 软件架构模式,包括平台表示层、业务逻辑层和数据访问层[16]。其中,平台表示层位于三层中的最上层,用于显示和接收数据,为用户提供一种交互式操作的界面[17]。业务逻辑层位于三层中的中间层(DAL 与 USL 中间),用于实现地下矿山企业的碳排放核算管理,主要包括生产数据录入、核算模型计算、实测模型计算、对比校核管理、碳排放展示和基础数据管理。数据访问层也称为持久层,用于对平台各类基础信息和技术数据进行处理。平台总体架构如图 2 所示。

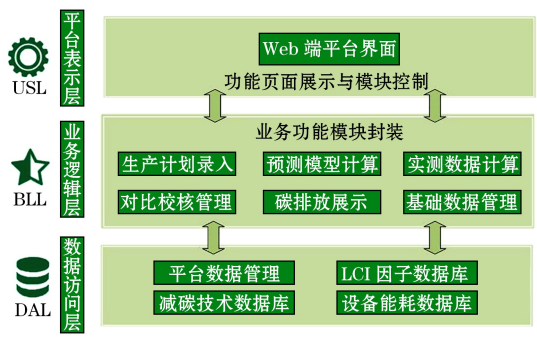


图 2 系统架构

Fig.2 System architecture

3.2 功能设计与实现

结合系统架构,应用所构建的预测模型与实测模型,根据实际业务逻辑层中的 6 个主要模块进行功能设计与实现,系统各模块的设计目标和具体功能介绍如图 3 所示。

基于以上功能设计,进一步构建地下矿山开采碳核算系统,如图 4 所示。在所展示的界面中,碳核算系统通过提供生产数据录入、预测/实测数据计算、碳视角可视化分析和数据对比校核等多重功能,为地下矿山开采不同时段、不同层级下碳排放情况进行精确核算与展示。

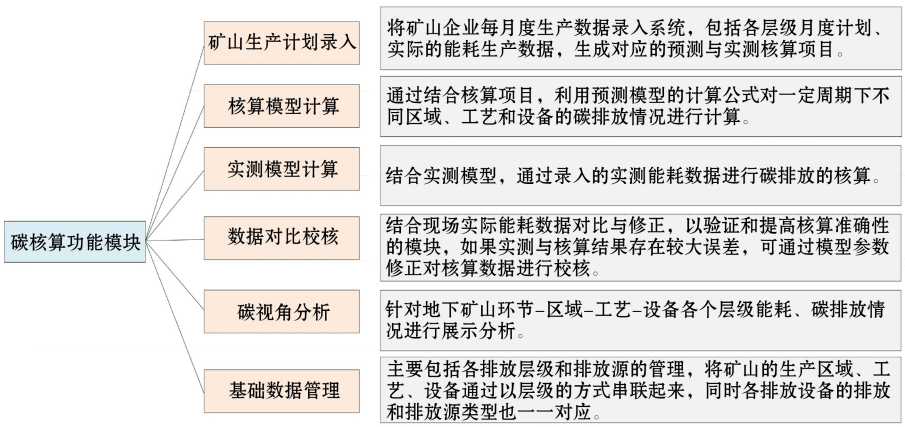


图 3　系统功能

Fig.3　System functions

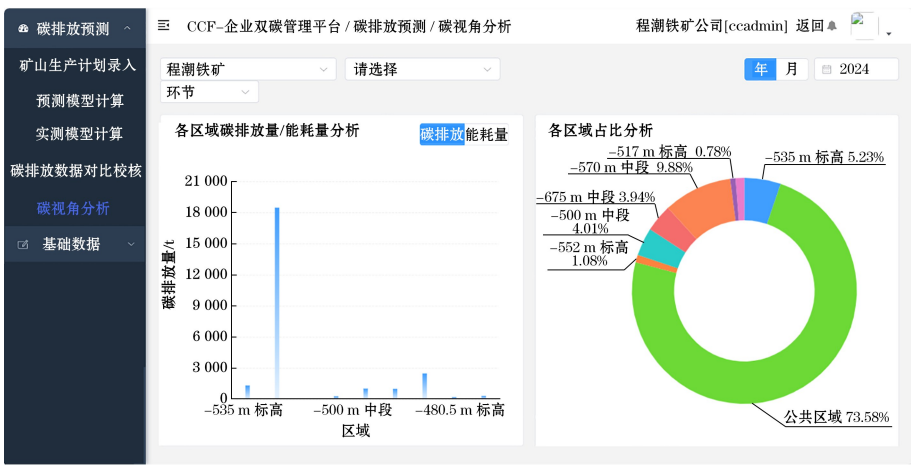


图 4　核算系统界面

Fig.4　Accounting system interface

3.3　核算应用分析

以湖北程潮铁矿为例进行应用分析，截至 2023 年，程潮铁矿的矿石年产量达到了 300 万 t，年总碳排放量为 171 945 t。选取 11 月开采生产数据、各区域开采情况、生产参数和设备参数，结合化石燃料、电能、炸药和水泥等碳排放源，选取 IPCC 提供的碳排放因子数据，利用预测模型针对不同区域、工艺与设备等不同层级进行排碳量计算。该矿山主要工艺设备参数见表 2。从碳视角出发，结合界面各层级碳排放数据，对程潮铁矿不同设备、工艺、环节和区域产生的碳排放量进行分析，结果如图 5 至图 8 所示。

表 2　矿山工艺设备参数

Table 2　Parameters of mine process equipment

工艺	设备与材料			生产参数项
	型号	数量	参数	
凿岩	中深孔台车 SIMBA1254	4	v_{dr}：120 m/h	N_j^1：0.08 个；L_j^1：16 m
凿岩	掘进台车	1	v_{dr}：110 m/h	N_j^1：0.08 个；L_j^1：16 m
凿岩	7655 风钻凿岩机	8	v_{dr}：78 m/h	N_j^3：3 个；L_j^3：3.2 m
爆破	爆破炸药		—	Q_j^3：2.26 kg/m³；Q_j^2：4.25 kg/m³；Q_j^1：5.37 kg/m³
爆破	装药台车(BCJR-2000)	1	v_{ch}：1 000 m³/h	—
爆破	装药器(BQF-100)	4	v_{ch}：400 m³/h	—
运输	铲运机 LH409E	8	V_{lo}：3.6 m³；K_1：0.9；λ：91%	t_{tr}：1.5 min
运输	电机车 14 t 矿用电机车	8	V_{lo}：6 m³；n'：9 台；K_{lo}：95%	t_{lo}：20 min

（续表）

工艺	设备与材料			生产参数项
	型号	数量	参数	
支护	钢筋混凝土(水泥)消耗		—	C:11 m;B:3.8 m;d_1:0.08 m;β:95%;d_2:0.1 m
支护	锚杆钻机	6	s_{bo}:30 m/h	a_j:0.8 个;b_j:1.53 m
支护	喷浆台车 1050-wpc	1	v_{sp}:20 m^3/h	$V_{\frac{1}{2}}^{o}$:0.08 m^3
破碎	鄂式破碎机	2	Q_{pc}:260 t	—
提升	提升机	5	—	L:4 426 m^3
照明	照明灯		—	L:4 426 m^3
通风	新风井 FBCDZ-10-NO39	2	—	L:4 426 m^3
通风	西主扇 2K56-4NO30	1	—	L:4 426 m^3
通风	局扇(型号:FKZN№11/15)	8	—	L:4 426 m^3
排水	−430 水泵 DDM280-70	2	—	L:4 426 m^3
排水	−678 水泵 DDM360-75	1	—	L:4 426 m^3
压气	空压机	5	—	L:4 426 m^3

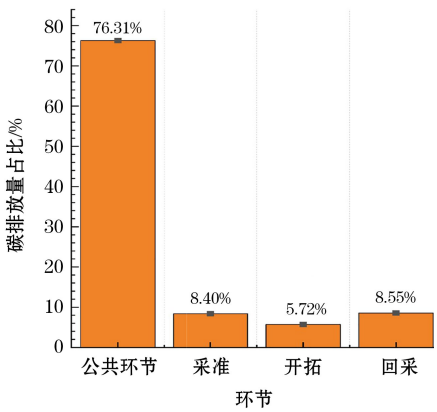


图 5 各开采环节碳排放占比

Fig.5 The proportion of carbon emissions in each mining link

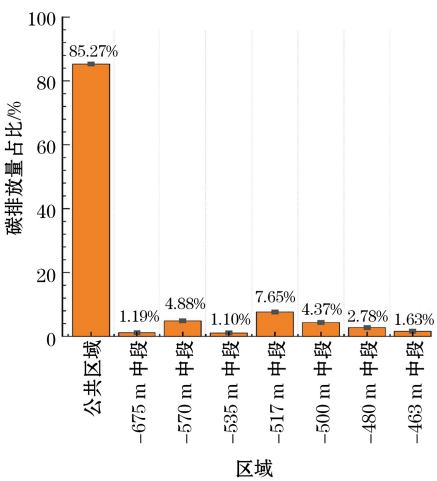


图 6 各开采区域碳排放占比

Fig.6 The proportion of carbon emissions in each mining area

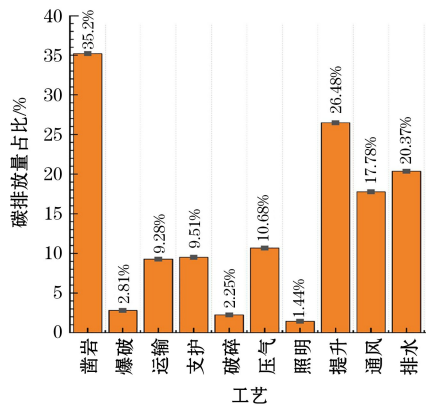


图 7 各工艺碳排放占比

Fig.7 The proportion of carbon emissions in each process

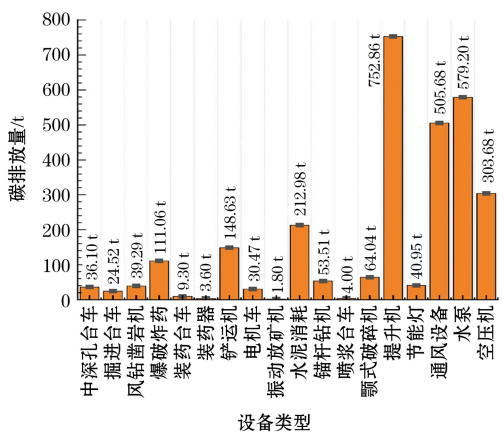


图 8 各开采设备和耗材碳排放量

Fig.8 Carbon emission analysis of each mining equipment and consumable

从图中可以看出,程潮矿山各层级之间的碳排放量存在明显差异。针对开采工艺,提升和排水的

碳排放量最高,占全过程的46.85%,此外,压气、支护和运输也都是重要排碳工艺。对于开采环节与开采区域,公共区域排碳能力远远高于其他环节与区域,由于回采环节的产矿量高于开拓与采准环节,回采环节相对于后两者会产生更高的碳排放量,但开拓与采准环节相较于回采需要大量的混凝土和锚杆进行巷道支护,因此某些处于开拓、采准环节的中段的总碳排放量高于回采中段。针对开采设备,除了大功率高耗能设备如提升、通风、排水和压气设备的排碳量很高之外,铲运机、水泥和炸药消耗也都是节能减碳关注的重点排碳对象。

结合实测模型计算得出各能源与整体碳排放量,与预测数据进行对比以验证模型的准确度,对比结果见表3。可以看出,预测模型各能源消耗与实测值的误差均小于10%,验证了预测模型的精确性,能够对矿山生产中碳排放量进行估算。

表3 11月碳排放量数据对比

Table 3 Comparison of carbon emission data in November

碳排放源	实测值/t	预测值/t
电力	2 394.00	2 475.74
炸药	68.01	71.75
燃油	8.02	8.65
水泥	217.00	212.98
合计	2 683.03	2 769.11

4 结论

(1) 采用生命周期评价方法并结合碳排放系数法预测地下矿山的碳排放量,以单位立方米矿石为计算单位,将IPCC核算范围作为碳排放核算边界,建立不同开采工艺设备的碳排放预测模型,同时应用碳排放系数法对地下矿山开采碳排放量进行实测核算。

(2) 基于各核算模型,系统平台通过生产数据录入、预测模型计算、实测模型计算、数据对比校核、碳视角分析、基础数据管理等6个主功能模块对地下矿山开采碳排放量核算系统进行了功能设计与界面实现。

(3) 以程潮铁矿为例进行应用分析,结果表明,除提升、通风等大功率高耗能工艺设备外,运输、支护以及风动钻孔设备等均属于需要重点控碳点,且预测模型整体计算结果与实测值的误差均小于10%,预测模型符合精度要求。

(4) 系统可有效实现对地下矿山开采碳排放量的核算与分析,有利于管理人员对地下开采现场碳排放规律进行更直观的了解,为后续的减碳作业提供依据。

参考文献(References):

[1] 代家玮.全球气候治理背景下人与自然生命共同体构建研究[D].兰州:兰州大学,2023.
DAI Jiawei. Research on the construction of the community of life for man and nature in the context of global climate governance[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2023.

[2] 董明,梁红娟.有色金属联合企业碳排放情景分析与碳达峰路径探讨[J].中国矿业,2023,32(10):40-46.
DONG Ming, LIANG Hongjuan. Analysis of carbon emission scenarios and discussion on carbon peak path for non-ferrous metal joint enterprises[J]. China Mining Magazine,2023,32(10):40-46.

[3] NORGATE T, HAQUE N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations[J]. Journal of Cleaner Production,2009,18(3):266-274.

[4] 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 Boyu, BAI Zhongke, ZHANG Xiaoran. 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.

[5] REN Gaofeng, WANG Wei, WU Wenbo, et al. Carbon emission prediction model for the underground mining stage of metal mines[J]. Sustainability,2023,15(17):12738.

[6] 李芸.基于"双碳"背景的碳管理服务平台数字化设计研究[J].绿色建筑,2023,15(4):117-119.
LI Yun. Research on the digital design of carbon management service platform based on the background of "double carbon"[J]. Green Building,2023,15(4):117-119.

[7] ZHANG Ailing, LI Sha, TAN Lin, et al. Intelligent measurement and monitoring of carbon emissions for 5G shared smart logistics[J]. Journal of Sensors, 2022(1):8223590.

[8] QIAN Yuchong, LENG Jiawei, WANG Haining, et al. Evaluating carbon emissions from the operation of historic dwellings in cities based on an intelligent management platform[J]. Sustainable Cities and Society,2024,100:105025.

[9] 王长军,庞森,李浩,等.基于区块链的建筑企业碳排放统计与管理平台应用[J].项目管理技术,2023,21(7):174-177.
WANG Changjun, PANG Sen, LI Hao, et al. Application of blockchain based carbon emission statistics and management for construction enterprises[J]. Project Management Technology,2023,21(7):174-177.

[10] 李涛,郦秀萍,上官方钦,等.中国钢铁行业数字化碳管理发展探讨[J].工程科学学报,2024,46(2):209-217.
LI Tao, LI Xiuping, SHANGGUAN Fangqin, et al. Advancing digital carbon management in China's steel industry[J]. Chinese Journal of Engineering,2024,46(2):209-217.

[11] EKAH B J, AKWAGIOBE J U, UDO S O, et al. A review on Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 1st to 6th report[J]. Physical Science International Journal, 2023,27(1):16-24.

[12] 钱志权,杨来科,蒋琴儿.全球价值链背景下中国出口增加值隐含碳测度与结构分解[J].亚太经济,2019(5):59-67+150-151.
QIAN Zhiquan, YANG Laike, JIANG Qiner. The measurement and structural decomposing analysis of China's value-added emission in export trade in the context of global value chain[J]. Asia-Pacific Economic Review,2019(5):59-67+150-151.

[13] 钟顺昌,焦怡萌,闫程莉,等.建设用地资源空间集聚对减污降碳协同的影响机制[J].地理学报,2024,79(3):688-711.
ZHONG Shunchang, JIAO Yimeng, YAN Chengli, et al. The impact mechanism of spatial agglomeration of construction land resources on the synergistic reduction of pollutants and CO_2[J]. Acta Geographica Sinica,2024,79(3):688-711.

[14] 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 Zhixiong, LI Wei. Research on carbon emission accounting model of limestone mine based on life cycle assessment method[J]. Mining Technology,2023,23(6):195-200.

[15] LIU Yang, REN Gaofeng, REN Sitong. Uncovering cleaner method for underground metal mining: enterprise-level assessment for current and future energy consumption and carbon emission from life-cycle perspective[J]. Minerals, 2021,11(11):1170.

[16] CHEN Xiaodong, YE Yuyao, WANG Fei, et al. The impact of digital economy on industrial carbon emission efficiency at the city level in China: Gravity movement trajectories and driving mechanisms[J]. Environmental Technology & Innovation,2024,33:103511.

[17] GOH Hock Ann, HO Chin Kuan, ABAS Fazly Salleh. Front-end deep learning web apps development and deployment: a review[J]. Applied Intelligence (Dordrecht, Netherlands),2022,53(12):21-23.