

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

肖志雄¹,李伟²

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430000;

2. 武汉理正工程科技有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要:针对目前我国石灰石矿山开采环节碳排放核算机制尚不清晰、碳排放核算模型缺失的现状,基于生命周期评价的理论,探究石灰石矿山各生产工艺的系统边界,识别温室气体排放源,揭示矿石开采—采矿工艺实施—采矿设备运行—碳排放源消耗—碳排放的溯源机制,构建石灰石开采全工艺流程的碳排放核算模型。以马头山矿为例,分析矿山能源和碳排放的消耗结构。结果表明:爆破工艺造成的能源消耗最高,达到710.7572 GJ/kt;运输工艺产生的碳排放占主导地位,达到70%。节能减排决策模型计算结果表明,当能源价格为200 CNY/tce时,电机节能、高效空压机、节能驾驶、能耗监测与统计分析技术经济合理。

关键词:石灰石矿山;生命周期评价;节能减排技术决策;碳排放核算

0 引言

我国是世界上最大的水泥生产国,2021年水泥产量达到23.63亿t,约占全球总量的55%。水泥产业在提供主要建筑材料的同时,也成为了重要的温室气体排放源,2020年排放了11.12亿t温室气体,约占我国工业生产总碳排放当量的10.17%^[1-2]。为应对气候变化危机,达成“碳达峰”“碳中和”目标,政府开始大力推广碳排放权交易制度,这必将导致水泥产业生产成本显著上升,为此,水泥企业必须寻求更高效、更全面的节能减排路径^[3-4]。

碳排放核算是分析碳排放溯源结构的基础,也是提供针对性节能减排措施的前提。目前通用的温室气体核算方法为排放因子法^[5],可分为三类:首先是根据IPCC发布的《国家温室气体清单指南》,建立了用于核算水泥生产过程中为生产熟料而煅烧碳酸盐产生的温室气体排放模型;其次是基于世界资源研究所和世界可持续发展工商理事会于2001年颁布的《温室气体议定书》,考虑了煅烧碳酸盐过程中的运营边界和组织边界;最后参考世界可持续发展工商理事会2001年发布的水泥可持续性倡议行动(CSD),在IPCC的基础上提出间接排放因子的概念,计算了生料制备、熟料煅烧和水泥粉磨等主要工艺流程中的间接温室气体排放因子^[6-7],提供的核算方法包括直接排放和间接排放。在此基础上,中国

建筑材料科学研究总院和国家发展与改革委员会陆续推出了适用于中国水泥工业的碳排放核算方法和碳排放因子。

但目前研究尚存在两点不足:一是水泥四大生产流程中,生料制备、熟料煅烧和水泥粉磨过程的碳排放核算方法已经成熟,但缺乏适用于矿山生产过程的碳排放核算方法;二是针对水泥工业生产过程中使用新型节能减排技术的研究,在宏观角度上评估技术的推广成本和效益潜力的方法较为成熟,但缺乏矿山决策各项节能减排技术的节能减排效果和经济合理性的微观层面分析方法。

为填补石灰石矿山生产过程中温室气体排放核算模型和节能减排技术决策模型的空白,本文旨在综合分析石灰石矿山的共同生产规律,圈定石灰石矿山碳排放核算边界,构建以设备性能参数、开采设计参数、碳排放源排放因子为输入数据的石灰石矿山碳排放核算输入数据清单,并基于生命周期评价理论^[8],识别各工艺的温室气体排放源,揭示矿石开采—采矿工艺实施—采矿设备运行—碳排放源消耗—碳排放溯源机制,构建石灰石开采全工艺流程的碳排放核算模型。实现石灰石矿山碳排放的精确量化溯源^[9-10]。基于盈亏平衡分析法,建立石灰石开采节能降碳技术决策模型,收集石灰石矿山适用的节能减碳技术,精细化评估各工艺环节节能降碳技术应用后的降碳潜力,构建节能技术应用成本和减碳节约成本的盈亏平衡分析模型。以数据包络分

析算法为核心,构建不同决策单元组成的最优生产前沿面,获取矿山应用节能减碳设计的最优决策。并基于所建立的石灰石矿山碳排放核算模型和节能降碳技术决策模型,以宣城石灰石矿为生产实例,核算宣城石灰石矿的能源消耗和各工艺碳排放,结合各采选工艺及设备的碳排放核算结果,精细化评估各工艺环节节能减碳技术应用后的减碳潜力,决策节能减碳技术的应用方案。

1 研究模型

1.1 石灰石矿山碳排放核算模型

在石灰石矿山生产阶段,目前国内大部分矿山仍然沿用相对传统的间断开采工艺,即自卸卡车运送石料到山下固定破碎站进行破碎的方式。此种开采方式主要的作业流程为在生产台阶上穿孔爆破后产生石料堆,挖掘机将石料堆中的石料装载至自卸卡车,经过自卸卡车运输至破碎站,破碎机将石料破碎后通过固定式长皮带输送机运送至原料堆场^[10]。基于以上分析,确定穿孔、爆破、采装、运输、破碎五大露天开采工艺为生命周期的系统边界^[11-12],如图1所示。

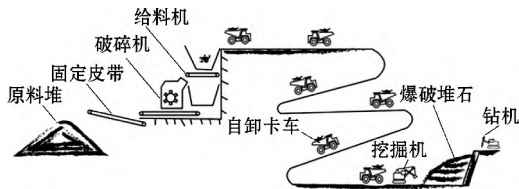


图1 露天矿山生产系统边界

通过系统边界分析,识别石灰石矿山各工艺存在的直接和间接两种碳排放源,直接排放主要是使用化石燃料和工业炸药产生的碳排放^[13],间接排放则是消耗的电能和化石燃料在其制备过程中造成的碳排放^[14]。由于矿山生产过程中碳排放源种类较多,并且排放温室气体的设备种类不一,所以将矿山生产过程中各类温室气体排放源的排放因子数据转换为统一的当量单位,是核算系统能够准确核算的重要准备工作。根据碳排放源的分类,需要确定化石燃料、电能以及工业炸药的碳排放因子。为此,生态环境部发布了相关的温室气体排放因子,见表1。

表1 石灰石矿山各因素的碳排放因子

硝酸炸药/ (t CO ₂ eq/t)	柴油/ (t CO ₂ eq/t)	汽油/ (t CO ₂ eq/t)	电能/ (t CO ₂ /MWh)
0.1768	3.20	3.02	0.9014

1.1.1 穿孔工作

穿孔工作是按照爆破设计参数,在采场矿岩内钻凿爆破孔,装入炸药进行爆破,以便后续的采装、运输等工作。石灰石矿山穿孔工作采用潜孔和牙轮钻机,存在柴油和电能两种耗能形式。穿孔工作产生的能耗取决于台阶高度、炮孔深度、炮孔单孔控制面积、钻机功率、钻机钻孔速度和内燃机将燃料转化为输出功率的效率。当矿山的穿孔设备型号已知,根据矿山矿岩的岩石力学参数,采用工程类比法,得到穿孔设备的凿岩速度,当设备参数已知时,石灰石矿山穿孔工作产生的温室气体排放可由式(1)计算:

$$E_1 = \frac{E_f \cdot \omega \cdot l \cdot V \cdot P_1}{\theta_1 \cdot M \cdot v_1 \cdot H} = \frac{EF_e \cdot l \cdot V \cdot P_1}{1000 \cdot \theta_1 \cdot M \cdot v_1 \cdot H} \quad (1)$$

式中, E_1 为穿孔工作的温室气体排放,t CO₂ eq/a; E_f 为化石燃料的排放因子,t CO₂ eq/t; E_e 代表电力的排放因子,t CO₂/MWh; ω 为内燃机燃烧化石燃料转化为输出功率的转化率,t/kWh; l 为钻孔长度,m; V 为年采矿岩量,m³/a; P_1 为钻机的功率,kW; v_1 为钻机钻孔速度,m/h; θ_1 为钻机的时间利用系数,%; M 为单孔控制面积,m²; H 为台阶高度,m。

1.1.2 爆破工作

在石灰石矿山,矿岩松散工作一般采用台阶爆破的方式,以适于采掘设备的挖掘。爆破过程中产生的温室气体排放主要来自于工业炸药的消耗。台阶爆破消耗的炸药量可根据炸药单耗进行计算。在开采设计中,可以采用工程类比法,确定项目爆破矿岩过程中的炸药单耗。当炸药单耗已知,石灰石矿山爆破工艺产生的温室气体排放可由式(2)计算:

$$E_2 = \frac{E_{\text{exp}} \cdot V \cdot q}{1000} \quad (2)$$

式中, E_2 为爆破工作的温室气体排放,t CO₂ eq/a; E_{exp} 为炸药的排放因子,t CO₂ eq/t; q 为炸药单耗,kg/m³。

1.1.3 采装工作

采装工作是将爆破松碎的矿石从爆堆中采掘出来,装入到运输设备中。石灰石矿山将单斗挖掘机、液压挖掘机和装载机作为主要采装设备。单斗挖掘机和液压挖掘机的驱动方式有电力驱动式、内燃驱动式(柴油机)和复合驱动式。装载机是以铲斗在轮式自行设备前端进行铲装的装载设备。这种设备与单斗挖掘机和液压挖掘机相比,虽然生产能力较低,

但是重量轻、造价低、快速灵活、调度操作方便。装载机主要以柴油机驱动为主。当电铲功率、矿岩碎胀系数、单次采装消耗时间、电铲满斗系数、电铲装载能力已知时,石灰石矿山采装工艺产生的温室气体排放可用式(3)计算:

$$E_3 = \frac{E_f \cdot \omega \cdot P_2 \cdot \sigma \cdot V \cdot t_1}{\alpha_1 \cdot V_1 \cdot 3600} = \frac{E_e \cdot P_2 \cdot \sigma \cdot V \cdot t_1}{\alpha_1 \cdot V_1 \cdot 3600 \cdot 1000} \quad (2)$$

式中, E_3 为采装工作的温室气体排放,t CO₂ eq/a; P_2 为电铲的功率,kW; σ 为矿岩的碎胀系数,%; t_1 为电铲单次采装消耗时间,s; α_1 为电铲的满斗系数,%; V_1 为电铲的装载能力,m³。

1.1.4 运输工作

石灰石矿山运输工作有两方面,一方面是将剥离的废石运输到排土场,另一方面将矿石运输到水泥加工厂。自卸卡车、牵引电机车和皮带输送机是最主要的运输设备,根据矿床赋存条件、地形条件等因素的不同,采用一种或多种运输方式联合运输的方法。当平均车速、平均运距、载重等运输设计和设备参数已知时,石灰石矿山运输工艺产生的温室气体排放可以用式(4)计算:

$$E_4 = \frac{E_f \cdot \omega \cdot P_3 \cdot L_1 \cdot Q^a}{\alpha_2 \cdot Q_1 \cdot v_2} + \frac{E_e \cdot P_4 \cdot L_2 \cdot Q^a}{1000 \cdot \alpha_3 \cdot Q_2 \cdot v_3} + \frac{E_e \cdot P_5 \cdot Q^a}{1000 \cdot Q_3} \quad (4)$$

式中, E_4 为运输工作的温室气体排放,t CO₂ eq/a; P_3 为自卸卡车的功率,kW; P_4 为牵引电机车的功率,kW; P_5 为皮带输送机的功率,kW; L_1 为卡车运输距离,km; L_2 为电机车运输距离,km; Q^a 为矿山年采矿岩量,t/a; α_2 为卡车满斗系数,%; α_3 为牵引电机车满斗系数,%; Q_1 为卡车的单次运输能力,t; Q_2 为电机车的单次运输能力,t; Q_3 为皮带输送机单位时间的运输能力,t/h。 v_2 为自卸卡车的平均速度,km/h; v_3 为电机车的平均速度,km/h。

1.1.5 破碎工作

破碎工作可以满足运输设备、装载设备和初选设备对矿石块度的需求。根据破碎后产出矿岩的块度,破碎工作可以分为3个步骤:初碎、细碎和磨矿。其中细碎和磨矿主要是在选矿厂进行,在矿山生产中涉及的主要是初碎。石灰石矿山使用的初碎设备主要包括:颚式破碎机、旋回破碎机。当破碎机功率和生产能力已知时,石灰石矿山破碎工艺产生的温室

气体排放可由式(5)计算:

$$E_5 = \frac{E_e \cdot Q^a \cdot P_6}{1000 \cdot Q_4} \quad (5)$$

式中, E_5 为爆破工作的温室气体排放,t CO₂ eq/a; P_6 为破碎机的功率,kW; Q_4 为破碎机单位时间的生产能力,t/h。

1.2 节能降碳技术决策模型

为了提高企业层面节能减排潜力评估的准确性,将生命周期评价的方法与 ECSC 和 CACC 方法相结合,以考虑产能利用率。节能技术和减少碳排放的贡献可以分别由式(6)和式(7)估算:

$$ECM_{n,t} = \frac{EC_t^i}{EC^{CAP}} \cdot UECM_n^0 \cdot CAP_n^i \quad (6)$$

$$CEM_{n,t} = \frac{CE_t^i}{CE^{CAP}} \cdot UCEM_n^0 \cdot CAP_n^i \quad (7)$$

式中, $ECM_{n,t}$ 和 $CEM_{n,t}$ 分别是技术 n 在第 t 年减缓能源消耗和降低碳排放的潜力; EC_t^i 和 CE_t^i 是第 t 年采矿设备 i 现场发生的能源消耗和碳排放,可以通过 LCA 模型进行估算; EC^{CAP} 和 CE^{CAP} 分别是原始设计中的能耗消耗和碳排放量; $UECM_n^0$ 和 $UCEM_n^0$ 是技术 n 对节能减碳的单位贡献,可以从使用该技术的说明性示例中得出; CAP_n^i 是采矿设备 i 的装机容量,该技术 n 将部署到该设备上。

另一方面,一项技术的投资也取决于装机容量,节省单位能源或减少单位碳排放的相关成本可分别由式(8)和式(9)计算。

$$C_n^{ECM} = \left\{ \sum_t^{t_n} \left[\frac{\gamma \cdot UI \cdot CAP_n^i + \Delta OM_{n,t}}{(1+r)^t} \right] - P^c \cdot \sum_t^{t_n} CEM_{n,t} \right\} / \sum_t^{t_n} ECM_{n,t} \quad (8)$$

$$C_n^{CEM} = \left\{ \sum_t^{t_n} \left[\frac{\gamma \cdot UI \cdot CAP_n^i + \Delta OM_{n,t}}{(1+r)^t} \right] - P^E \cdot \sum_t^{t_n} ECM_{n,t} \right\} / \sum_t^{t_n} CEM_{n,t} \quad (9)$$

式中, C_n^{ECM} 和 C_n^{CEM} 是采用技术 n 减轻能源消耗和碳排放的单位成本; t_n 是技术 n 的寿命; γ 是技术 n 在其生命周期内分散投资的系数,可以通过 $\gamma = r \cdot [1 - (1+r)^{-t_n}]$ 计算; r 是贴现率; UI_n 是技术 n 的单位投资,可以从示例中推导出来; $\Delta OM_{n,t}$ 是运行和维护技术 n 的额外成本; P^c 和 P^E 分别是碳和能源的价格。通过式(10)和式(11)使盈亏平衡分析能够确定技术的使用。

$$\Delta_n^E = C_n^{ECM} - P^E \quad (10)$$

$$\Delta_n^C = C_n^{CEM} - P^C \quad (11)$$

式中, Δ_n^E 和 Δ_n^C 是技术 n 的成本效益指标; 并且可以通过测试是否满足 $\Delta_n^E > 0$ 或 $\Delta_n^C > 0$ 来确定技术的采用。

最终, 通过积累这些具有成本效益的技术的贡献, 可以预测石灰石矿山在节能或减少碳排放方面的潜力。

2 模型应用及分析

2.1 温室气体排放核算

宣城石灰石矿马头山采区位于湖北省宣城市板桥镇, 矿山采用露天方法, 划分为黄牛山、马头山、胡咀山 3 个采区进行开采, 生产规模分别为 60 万 t/a、40 万 t/a、140 万 t/a, 采矿工艺包括: 穿孔、爆破、装载、运输, 各工艺环节涉及的材料及设备参数见表 2 至表 5。

表 2 宣城石灰石矿穿孔设备生产能力及设备性能参数

设备类型	设备型号	穿爆能力/(万 t/台年)	能源消耗
潜孔钻机	SWDB165	100~120	
柴油空压机	825XH		33 L/h
潜孔钻机	ROC460PC	80~100	
柴油空压机	XRHS836		36 kg/h

表 6 宣城石灰石矿能源消耗核算结果

工艺	设备	GJ/kt					
		黄牛山采区		胡咀山采区		马头山采区	
		采矿	剥岩	采矿	剥岩	采矿	剥岩
穿孔	空压机	35.021	35.021	45.846	42.026	45.846	42.026
爆破	工业炸药	710.757	710.757	710.757	710.757	710.757	710.757
装载	挖掘机	0.555	0.555	0.518	0.518	0.525	0.525
运输	卡车	362.895	75.603	62.357	62.357	62.357	62.357

表 7 宣城石灰石矿山碳排放核算结果

工艺	设备	t CO ₂ eq/kt					
		黄牛山采区		胡咀山采区		马头山采区	
		采矿	剥岩	采矿	剥岩	采矿	剥岩
穿孔	空压机	7.652	7.652	10.018	9.183	10.018	9.183
爆破	工业炸药	0.0304	0.0304	0.0304	0.0304	0.0304	0.0304
装载	挖掘机	1.8003	1.8003	1.6824	1.6824	1.7033	1.7033
运输	卡车	79.294	16.520	13.625	13.625	13.625	13.625

由表 6 可知, 在宣城石灰石矿各采区, 工业炸药导致的能源消耗均占主导地位(710.757 GJ/kt), 而电能和化石燃料导致的能源消耗(空压机、挖掘机、卡车)占比均小于工业炸药。黄牛山采区的卡车运输的消耗的能源远高于该采区的剥岩能耗, 同时也

表 3 宣城石灰石矿山爆破参数

台阶高度/m	炮孔深度/m	炮孔直径/mm	每米炮孔落矿量/m ³	炸药单耗/(kg/m ³)
14	15	120	12.6	0.45

表 4 宣城石灰石矿山装载设备生产能力及设备性能参数

设备型号	斗容/m ³	生产能力/(万 t/台年)	驱动类型	功率/kW
PC400-6	2.6	100	电	228
RH40-E	7	245	电	522
365CL	4	140	电	302

表 5 宣城石灰石矿运输设备生产能力及设备性能参数

设备型号	载重/t	平均运距/km	平均车速/(km/h)	驱动类型	功率/kW
240PM2	32	9.6(矿)/2(岩)	20	柴油机	309
RH40-E	45	1.6(矿)/1.6(岩)	20	柴油机	448

根据马头山矿各项生产工艺涉及的设备、生产设备的性能参数、能源消耗参数和计算所得的工业炸药、化石燃料、电能的排放因子, 对宣城石灰石矿的能源消耗和碳排放进行核算, 已将化石燃料、电能和炸药 3 种形式的物质转化为标煤当量, 使其标准化以便于比较, 核算结果见表 6、表 7。

高于其他采区的能源消耗, 这是由于黄牛山采区的矿石运距为 9.6 km, 远高于其他运距(黄牛山废石运距为 2 km, 而胡咀山、马头山的矿石和废石运距均为 1.6 km)。

由表 7 可知, 运输工艺是石灰石矿山的主要碳

排放源,占比70%,而爆破工艺的碳排放量占比较低,仅占总排放量的0.08%,这表明用于驱动穿孔设备的空压机和驱动汽车的柴油发动机所消耗的电能以及化石燃料是石灰石矿山的主要碳排放源,因此适当增加炸药单耗,同时增大孔网参数,减少大块率,可以有效提高采装效率,尤其是运输过程中的车辆满斗系数,提高运输效率,将有助降低矿山总体的碳排放。表6和表7中数据还表明,对于相同类型能源设备(如卡车),其消耗的能源与产生的碳排放呈正相关关系。而不同类型的能源之间,能源的消耗量与碳排放量之间并不存在正相关的关系(如炸药和化石燃料)。

2.2 节能减排技术决策

以碳排放模型的计算结果为基础,导入碳减排潜力精细化评估模型,分析8项国家发改委提供的节能减排技术在宣城石灰石矿应用的节能减排潜力,国家发改委提供的节能减排技术见表8。

表8 国家发改委提供的节能减排技术

序号	技术名称	预期应用
T1	基于三相采样与快速响应的电机节能技术	潜孔钻机
T2	两级喷油高效螺杆空气压缩机技术	空压机
T3	节能高效挖掘机势能回收技术	挖掘机
T4	车用燃油清洁增效	卡车
T5	清洁能源和新能源应用技术	卡车
T6	发动机智能冷却技术	卡车
T7	节能驾驶操作	卡车
T8	道路运输企业能耗监测与统计分析技术	卡车

根据国家发改委提供的各项技术的实际应用案例,首先对各项技术应用后的单位节能潜力和单位减碳潜力进行计算,计算结果见表9。

图2为矿山节能供给曲线,由图2可知,在不考虑相互作用的情况下,技术T1、T2、T7、T8的节能成本低于200 CNY/tce,其值分别为18 CNY/tce、79 CNY/tce、159 CNY/tce、186 CNY/tce,因此,在当前能源价格为200 CNY/tce时,只有这4项技术在经济上是合理的。

3 结论

本文基于生命周期评价方法,以石灰石矿山的设备参数、生产参数和温室气体排放因子为输入数据,构建了适用于石灰石矿山的温室气体排放核算

模型。并以马头山矿为例,根据所得的碳排放核算数据,输入节能减排技术决策模型,得出如下结论。

表9 节能减排技术应用的成本、节能潜力和减碳潜力

技术序号	单位成本	单位节能	单位减排
T1	0.5 kCNY/kW	0.1344 tce/(kW·a)	0.3150 tCO ₂ eq/(kW·a)
T2	2.08 kCNY/kW	1.3120 tce/(kW·a)	3.4640 tCO ₂ eq/(kW·a)
T3	0.2 kCNY/kt rock	0.0039 tce/ktrock	0.0084 tCO ₂ eq/ktrock
T4	0.0433 kCNY/t diesel	0.0056 tce/t diesel	0.0147 tCO ₂ eq/t diesel
T5	1270 kCNY/truck	5.8081 tce/(truck·a)	14.4791 tCO ₂ eq/(truck·a)
T6	10.258 kCNY/truck	1.9980 tce/(truck·a)	5.2750 tCO ₂ eq/truck·a
T7	0.3 kCNY/truck	2.6156 tce/truck·a	6.5195 tCO ₂ eq/(truck·a)
T8	3.125 kCNY/truck	0.9576 tce/(truck·a)	2.3875 tCO ₂ eq/(truck·a)

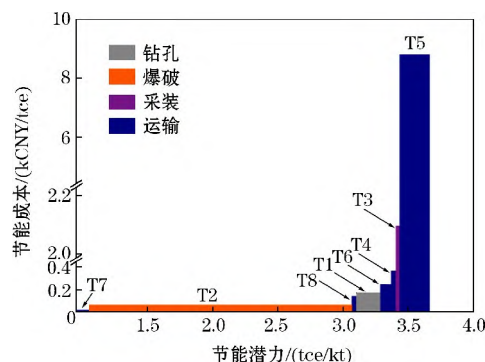


图2 矿山节能供给曲线

(1) 在宣城石灰石矿各采区,工业炸药导致的能源消耗均占主导地位(710.757 GJ/kt)。但运输工艺的碳排放达到70%,爆破工艺的碳排放量占比较低,仅占总排放量的0.08%,适当增加炸药单耗、孔网参数,提高车辆满斗系数,有助降低矿山总体的碳排放。

(2) 基于节能减碳潜力评估模型,输入碳排放核算数据,得到8项国家发改委提供的节能减排技术在宣城石灰石矿应用的节能减排潜力,技术T1、T2、T7、T8分别为18 CNY/tce、79 CNY/tce、159 CNY/tce、186 CNY/tce,当能源价格为200 CNY/tce时,这4项技术在经济上合理。这一结果可以指导矿山节能减排技术的应用决策。

参考文献:

- [1] 杨楠,李艳霞,赵盟,等.水泥熟料生产企业CO₂直接排放核算模型的建立[J].气候变化研究进展,2021,17(1):79-87.

- [2] WEI J X, CEN K, GENG Y B. China's cement demand and CO₂ emissions toward 2030: From the perspective of socio-economic, technology and population[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(7): 6409-6423.
- [3] WEI J X, CEN K, GENG Y B. Evaluation and mitigation of cement CO₂ emissions: Projection of emission scenarios toward 2030 in China and proposal of the roadmap to a low-carbon world by 2050[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2019, 24(2): 301-328.
- [4] LEI Y, ZHANG Q, NIELSEN C, et al. An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990 - 2020[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(1): 147-154.
- [5] LIU Z, GUAN D B, WEI W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. Nature, 2015, 524(7565): 335-338.
- [6] 魏丹青, 赵建安, 金迁致. 水泥生产碳排放测算的国内外方法比较及借鉴[J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1152-1159.
- [7] 汪澜. 水泥生产 CO₂ 排放量计算方法及评述[J]. 中国水泥, 2011(8): 52-55.
- [8] SHEN W G, CAO L, LI Q, et al. Quantifying CO₂ emissions from China's cement industry[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 1004-1012.
- [9] WEI J X, CEN K. A preliminary calculation of cement carbon dioxide in China from 1949 to 2050[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2019, 24(8): 1343-1362.
- [10] LIN B Q, ZHANG Z H. Carbon emissions in China's cement industry: A sector and policy analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58(5): 1387-1394.
- [11] 王微, 林剑艺, 崔胜辉, 等. 碳足迹分析方法研究综述[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(7): 71-78.
- [12] 石磊. 非金属露天矿山主要生产工艺及其特征分析[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2021(4): 192-193.
- [13] 陈为晶. 基于行业标准的水泥企业碳排放数据核算与分析[J]. 质量技术监督研究, 2017(3): 53-56.
- [14] 俞海勇, 杨辉, 张贺, 等. 水泥生命周期碳排放研究[J]. 四川建材, 2017, 43(1): 1-3.
- (收稿日期: 2023-02-22)