

井工矿的碳排放核算研究

邵梦瑶, 金诗玉, 代婧雯, 蒋玉作

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年4月15日; 录用日期: 2024年5月17日; 发布日期: 2024年6月26日

摘要

中央经济工作会议强调, 要积极稳妥推进碳达峰碳中和, 加快推进生态文明建设和绿色低碳发展。我国能源结构以煤炭为主, 煤炭开采带来的碳排放是造成我国采矿业碳排放的主要因素之一, 且化石能源的消耗在未来较长一段时间内, 都将成为我国二氧化碳排放的主要来源, 实现碳达峰、碳中和有助于推进我国的绿色低碳循环发展。理清煤炭开采过程中的碳排放来源, 是推动碳达峰、碳中和的前提和基础。本文通过查阅国内外文献总结出井工矿碳排放核算的流程, 确定井工矿碳排放计算的碳排放边界, 根据《IPCC国家温室气体清单编制指南》确定了井工矿生产流程中的排放源, 并对井工矿煤炭开采过程及矿区居民生活中的碳足迹进行分析, 基于排放因子法建立井工矿的碳排放核算基本模型, 并考虑降尘用水消耗, 煤层氧化和土地用途改变带来的碳排放等完善碳排放核算模型, 使煤炭开采流程所产生的碳排放量具体化, 有助于煤炭开采过程减排措施的提出, 对井工矿的低碳发展提供一定的指导意义。

关键词

井工矿, 煤炭开采, 碳排放

Study on Carbon Emission Accounting of Mine

Mengyao Shao, Shiyu Jin, Jingwen Dai, Yuzuo Jiang

School of Earth and Environment, Anhui University of Science & Technology, Huainan Anhui

Received: Apr. 15th, 2024; accepted: May 17th, 2024; published: Jun. 26th, 2024

Abstract

The Central Economic Work Conference stressed that it is necessary to actively and steadily promote carbon peak carbon neutrality, and accelerate the construction of ecological civilization and green and low-carbon development. China's energy structure is dominated by coal, and carbon

emissions caused by coal mining are one of the main factors causing carbon emissions in China's mining industry, and the consumption of fossil energy will become the main source of carbon dioxide emissions in the future for a long period of time, to achieve carbon peak, carbon neutrality will help promote China's green low-carbon cycle development. Clarifying the sources of carbon emissions in the process of coal mining is the premise and basis for promoting carbon peak and carbon neutrality. This paper summarizes the process of carbon emission accounting for mining and mining by consulting domestic and foreign literature, determines the carbon emission boundary of carbon emission calculation for mining and mining, and determines the emission sources in the production process of mining and mining according to the IPCC National Greenhouse Gas Inventory Preparation Guide. In addition, the carbon footprint in the coal mining process and the life of mining residents was analyzed, and the basic carbon emission accounting model was established based on the emission factor method. The carbon emission accounting model was improved considering the carbon emission caused by water consumption, coal seam oxidation and land use change, etc., so as to concretify the carbon emission generated by the coal mining process. It is helpful to put forward the emission reduction measures in the coal mining process and provide certain guiding significance for the low-carbon development of mining industry.

Keywords

Mining, Coal Mining, Carbon Emission

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭资源从开采到使用包含一系列复杂的流程,这一过程对矿区的生态系统造成了强烈的破坏性扰动,导致矿区的土壤-植被生态系统受到严重破坏,储存在土壤和植被的碳元素通过地球生物化学循环被排放到大气中,从而产生了大量的碳排放。

中国作为最大发展中国家,其陆地生态系统的固碳量远小于同时期人为碳排放量,因此掌握碳排放特征,制定精准的碳减排政策和低碳发展策略,对实现“双碳”目标至关重要[1]。我国能源结构以煤炭为主,煤炭开采所带来的碳排放是造成我国采矿业碳排放的一个主要因素[2],且在今后相当长一段时间内,我国二氧化碳排放的主要来源将是化石能源的消耗[3]。因此,这就决定了我国要实现碳排放精细化核算,了解不同排放源的排放特征,制定针对性的碳减排措施,才是实现中国“双碳”目标的关键。

李珊珊、袁亮从生命周期视角研究了我国煤炭工业从开采、运输、加工转换、消费利用各阶段碳排放量情况进行了碳排放的测算[4]。本文基于现有研究系统梳理了井工矿碳排放核算的相关方法,总结并完善了各类方法的核算模型、优缺点和适用范围并探讨了煤炭碳排放核算方法的发展方向,并根据研究目标选择了相应核算方法,提供了科学参考。

2. 确定碳排放边界

碳排放边界是指碳排放的核算范围[5],碳排放主要是指和 CH_4 等其他温室气体的排放,其可能包括某个区域、某个群体或者是某个生物体的 CO_2 排放量,因此是温室气体排放的一个简称。在国际上,IPCC 在第四次报告中对碳排放的估算方法进行了系统而全面的研究,对于化石燃料特别是其煤炭开采过程中造成的碳排放量,提出了具体可操作的估算方法,即三层次估算方法。温室气体主要包括 CO_2 , N_2O ,

CH₄等,为了统一计算碳排放,一般通过温室效应换算将CH₄和N₂O等气体的排放量转化为CO₂当量来进行计算。

3. 碳排放源的分析

按IPCC清单报告规定,排放源可分为直接排放源、能源间接排放源和其他间接排放源,但其漏掉了煤炭开采过程的部分碳排放源,如水消耗、煤层氧化等过程,现如今的《IPCC国家温室气体清单编制指南》以下简称(“IPCC清单报告”)和现有研究给出了井工矿碳排放源识别的基本准则。该核算结果并不能准确地反映井工矿真实的碳排放水平,综合考虑IPCC报告、相关文献和煤炭开发实际过程基础上,地下开采煤矿的碳排放源主要分为三类:能源消耗引起的碳排放、煤炭开采过程中的逸散排放、消耗电能隐含的CO₂间接排放[6]。

3.1. 化石燃料燃烧产生的CO₂直接排放

燃烧化石燃料的过程中,大量的二氧化碳被释放到大气中。二氧化碳是一种温室气体,它能够吸收地球表面向外辐射的热量,从而导致地球温度上升。这种温室效应直接影响了全球气候的变化,如更多的极端天气事件和海平面上升。然而,二氧化碳排放不仅仅对气候产生影响,还对空气质量带来了挑战。二氧化碳排放过多会导致空气污染,影响大气的稳定性,加剧雾霾和酸雨等问题的发生。开采过程中产生的瓦斯被广泛应用于燃气灶具、供暖设备以及工业生产中的燃料。煤炭开采过程中产生的瓦斯也可以用作自身燃料使用,这一部分产生的二氧化碳排放量也应计入化石燃料燃烧排放,瓦斯作为一种清洁能源,对环境的影响较小。相比于传统的煤炭燃料,瓦斯燃烧产生的二氧化碳和有害气体排放较少,对大气污染的贡献也较小。

3.2. 煤炭开采导致的逃逸排放

井工矿煤炭开采的排放逃逸是指在由于煤层和岩石的暴露、破碎导致煤炭开采过程中原本固封在煤层中的瓦斯释放到大气的过程。因此,温室气体排放总量的计算中应当包括由瓦斯涌出而导致的CH₄排放。由于煤炭开采的排放逃逸量不可忽略,因此可以采用实测法对其进行计算。即井工矿在煤炭开采过程中采用火炬燃烧法或催化氧化法将瓦斯回收再利用或销毁瓦斯气体,需要扣减相应的销毁量和回收利用量,避免由于重复计算而导致的计算结果的误差较大。

3.3. 消耗电能隐含的CO₂间接排放

煤炭开采的间接排放是指煤炭开采过程中由于电能消耗间接产生的碳排放。煤炭开采的过程复杂,涉及到较多的生产工艺并且设备繁多,整个开采过程的电能消耗较大并且电能的生产和消耗过程往往会产生大量的温室气体。因此,在进行碳排放量核算时应当包含煤炭开采全生命周期消耗电能所产生的温室气体排放量[7]。消耗电能产生的碳排放量的具体计算方法为消耗的电能是数量与其相应的碳排放因子的乘积。

4. 构建碳排放核算模型

对井工矿煤炭开采过程中的碳排放量进行分析以及总结后,确定矿区的碳排放量的核算模型如下:

$$E_{i_1} = B_E + W_E + R_E + Y_E + F_E \quad (1)$$

式(1)中, E_{i_1} ——井工矿总碳排放量;

B_E ——井工矿消耗电能引起的碳排放量;

R_E ——井工矿区消耗化石能源引起的碳排放量；

Y_E ——井工矿区溢散产生的碳排放量；

E_F ——井工矿区生活垃圾造成的碳排放量。

4.1. 电能消耗的碳排放量

井工矿区电能消耗引起的碳排放量是煤炭开采过程中的总耗电量与矿区的碳排放因子的乘积，其计算公式如下：

$$B_E = E_G + E_F \quad (2)$$

式(2)中， E_G ——井工矿区煤炭开采过程中的总耗电量；

E_F ——井工矿区的碳排放因子，查询国家电网的相关资料获得。

4.2. 水资源消耗的碳排放量

井工矿区的生产生活过程中消耗的水资源所造成的碳排放量是矿区所消耗的水资源总量与水资源的排放因子的乘积，其计算公式如下：

$$W_E = W_G + W_F \quad (3)$$

式(3)中， W_G ——矿区消耗的水资源总量；

W_F ——水资源的排放因子。

4.3. 能源消耗的碳排放量

井工煤矿开采过程中消耗能源所产生的温室气体的排放量可以通过计算排放当量，然后加总进行碳排放量的核算，其中温室气体主要包含 CO_2 、 CH_4 以及 NO_2 [8]。具体计算公式如下：

$$R_E = \sum_{i=1}^n R_{Ei} = \sum_{i=1}^n F_i \times \left(\sum_{j=1}^m E_{Fij} \alpha_j \right) \quad (4)$$

式(4)中， R_{Ei} ——某种燃料引起的排放量；

F_i ——第 i 种燃料的消耗量；

E_{Fij} ——第 i 种燃料第 j 种温室气体的排放因子；

α_j ——第 j 种温室气体的温室效应(GWP)。

4.4. 溢散产生的碳排放量

不同的井工矿区具有的地下溢散情况不同，造成的碳排放情况也可能不同。井工煤矿的溢散的排放核算方法主要分为 3 种，分别是矿井实测法、国家或煤田平均法以及全球平均法，这三种方法中最准确可靠的是矿井实测法。井工矿区逸散造成的碳排放量是利用矿井实测法对各个矿井实测得到的和涌出量，并将所有气体转化为当量。通过查阅各个煤矿的《环境影响报告书》获取到了本次研究的矿区和涌出量。具体计算公式如下：

$$Y_E = \alpha_{\text{CH}_4} Y_{\text{ECH}_4} + Y_{\text{ECO}_2} \quad (5)$$

其中， $Y_{\text{ECH}_4} = G(e_{\text{CH}_4})\rho - U_{\text{CH}_4}$ ， $e_{\text{CH}_4} = e_{\text{采中}} + e_{\text{采后}}$ 。

式(5)中， α_{CH_4} —— CH_4 的温室效应，该值为 23；

Y_{ECH_4} —— CH_4 的排放量；

- Y_{ECO_2} —— CO_2 的排放量;
- G —— 原煤开采量;
- e_{CH_4} —— 煤层气中排放因子;
- $e_{\text{采中}}$ —— 开采过程中的排放因子;
- $e_{\text{采后}}$ —— 开采后的排放因子;
- ρ —— CH_4 标准状况下的密度;
- U_{CH_4} —— 煤炭开采过程中瓦斯的利用量。

4.5. 生活垃圾产生的碳排放量

在生活过程中矿区居民产生大量的生活垃圾, 温室气体排放量是对这些垃圾进行处理时生成的, 其计算公式如下:

$$F_E = \sum_{i=1}^n Q_i \alpha \quad (6)$$

式(6)中, Q_i —— 井工矿区生活垃圾的产生量;

α —— 生活垃圾处理造成的碳排放量因子, 其中的取值为 $0.56 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$ 。

5. 确定碳排放因子

IPCC 清单报告是所有排放因子法的蓝本, 其基于活动数据和排放因子对区域温室气体排放量进行估算是目前广泛的煤炭企业碳排放核算方法。根据核算精度的不同, 排放清单给出参考法和部门法两种碳核算方法, 部门法立足于能源消耗数据进行碳排放核算, 而参考法则使用国家的能源供应和贸易数据进行碳排放估算且将非能源使用碳排放包括在内, 故将参考法的估算结果作为部门法核算结果的验证数据。

排放因子法是进行企业碳排放核算的核心和重点, 该方法的重点在于能源消耗数据和排放因子的获取, 其中能源消耗数据可从排放源普查和调查资料以及监测数据中获取[9], 而且活动数据获取的准确度和精度等要素都会影响碳排放核算的精度。排放因子可通过 IPCC 报告、学术文献等多种方式获取, 但由于能源类型、燃烧设备、燃烧技术、制作工艺等的差异, 不同能源的 CO_2 排放因子存在差别, 采用缺省值或区域平均水平排放因子会导致碳排放核算结果存在较大偏差。根据活动数据和排放因子获取方式的不同, 给定三个层级的煤炭开采碳排放核算策略, 从方法 1 到方法 3, 碳排放核算精度逐渐提升:

方法 1 采用 IPCC 提供的排放因子缺省值计算 CO_2 排放量, IPCC 给出适用于所有国家的各排放因子缺省值。该方法计算过程简单, 但不同能源的 IPCC 缺省排放因子在区域尺度存在一定程度的高估或低估, 采用此因子计算的碳排放量不精确, 准确性最低, 无法反应区域真实碳排放水平。

方法 2 碳排放核算根据活动水平数据和特定国家排放因子进行, 其中活动水平数据包括特定燃料品种、燃烧技术等, Liu 等根据对中国煤炭企业的实测数据对碳排放因子进行更新修正, 结果表明修订后的煤炭、天然气和石油排放因子与 IPCC 默认值的差异分别为 -40% 、 $+13\%$ 和 -1% , 反映了缺省因子存在区域误差。修正后的参数可较好的反映国家尺度上他排放特征, 但此参数仍忽略了实际生产设备和工艺下的碳氧化率, 无法从微观尺度上精确反映出碳排放特征。

方法 3 针对特定的煤炭企业的活动数据, 需要通过实测排放因子来进行排放量的核算, 是对方法 2 的进一步细化和升级, 可用于微观尺度碳排放特征核算。当对这些特定的煤炭企业进行碳排放核算, 可通过实测得到各能源真实的碳排放因子或各能源的热值、含碳量及各温室气体的全球增温潜势值通过对 IPCC 缺省值进行修正, 以使排放因子更能反映相应煤炭企业能源的真实水平[10]。

6. 井工煤矿碳排放计算方法

井工煤矿的碳排放源主要有化石燃料的燃烧碳排放、甲烷和二氧化碳的逸散碳排放、电力消耗产生碳排放、降尘用水消耗碳排放、非受控燃烧碳排放和土地用途改变导致的碳释放。化石燃料燃烧碳排放可由能耗数据和相应的排放因子计算得到。 CH_4 和 CO_2 逸散碳排放为井工煤矿最主要的碳排放源, 由原煤产量和各矿井的相对瓦斯涌出量计算得到。在实际煤炭开采过程中, 井工煤矿通过通风或抽放系统排出瓦斯气体以保障开采的安全、环保和实现减排的目的, 这些瓦斯气体将被回收利用或火炬燃烧或催化氧化处理后再排放到大气中或者直接释放到大气中。因此, 在实际计算中, 应对此部分碳排放增量或减量进行考虑。电力消耗碳排放也是一重要的碳排放源, 按照 IPCC 指南报告[11]仅需考虑输入电量消耗碳排放, 以输入电量与煤矿所在区域电网的排放系数相乘得到。水主要用于煤矿开发过程中除尘, 但当前多数研究遗漏了此部分碳排放量, 导致煤炭开采碳排放量被低估。煤矿和废料堆等的缓慢氧化和自燃也会带来额外的 CO_2 排放, 其中缓慢氧化的碳排放量常被遗漏, 该部分碳排放可由氧化物碳氧化率和含碳量计算得到。

综上所述, 对碳排放模型完善如下:

$$E = E_{\text{燃烧}} + E_{\text{CH}_4\text{逃逸}} + E_{\text{CO}_2\text{逃逸}} + E_{\text{火炬}} + E_{\text{催化氧化}} - E_{\text{CH}_4\text{利用}} + E_{\text{自燃}} + E_{\text{缓慢氧化}} + E_{\text{购入电}} + E_{\text{水}} + E_{\text{土地用途改变}} \quad (7)$$

式(7)中, E ——井工煤矿温室气体排放总量(tCO_2e);

$E_{\text{燃烧}}$ ——化石燃料燃烧 CO_2 排放量(tCO_2);

$E_{\text{CH}_4\text{逃逸}}$ ——井工煤矿 CH_4 逃逸排放量(tCO_2e);

$E_{\text{CO}_2\text{逃逸}}$ ——井工煤矿 CO_2 逃逸排放量(tCO_2);

$E_{\text{火炬}}$ ——火炬燃烧 CO_2 排放量(tCO_2);

$E_{\text{催化氧化}}$ ——瓦斯催化氧化对应的 CO_2 排放量(tCO_2);

$E_{\text{CH}_4\text{利用}}$ —— CH_4 回收利用量(tCO_2e);

$E_{\text{自燃}}$ ——煤炭、煤矸石、废料堆自燃 CO_2 排放量(tCO_2);

$E_{\text{缓慢氧化}}$ ——煤炭、煤矸石缓慢氧化产生的 CO_2 排放量(tCO_2);

$E_{\text{购入电}}$ ——购入电力对应的 CO_2 排放量(tCO_2);

$E_{\text{水}}$ ——降尘用水对应的 CO_2 排放量(tCO_2);

$E_{\text{土地用途改变}}$ ——煤矿开采前后土地、植被固碳能力差值。

7. 结论

本文对井工矿碳排放进行核算, 并结合具体的实例对碳排放源的确定、构建碳排放核算模型、确定碳排放因子进行详细的分析和研究。然后, 运用碳排放计算公式来计算其总碳排放量。研究表明, 井工矿碳排放核算基于在确定碳排放边界的基础上, 分析碳排放的来源等。研究发现, 地下开采煤矿的碳排放源大致分为能耗产生的碳排放, 开采过程中的逸散排放、消耗水资源和电能引起的间接排放。构建碳排放的核算模型还需要考虑生活垃圾产生的碳排放量。

8. 展望

当前研究仍存在一些不足。因此, 未来研究可以重点关注以下几个方面:

(1) 加强机制的理论研究, 揭示碳排放形成的内在规律;

(2) 开展井工矿碳排放源对煤炭开采影响的定量研究, 为煤炭开采提供更为准确的指导;

(3) 为实现可持续发展, 合理利用资源, 将煤炭开采过程中产生的煤矸石等副产物加工再利用, 实现煤炭开采过程中废弃物的再利用化, 无害化, 减量化。

参考文献

- [1] 巢清尘. 世界格局变化下的中国碳中和之路[J]. 环境经济研究, 2022, 7(2): 1-10.
<https://doi.org/10.19511/j.cnki.jee.2022.02.001>
- [2] 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[J]. 煤矿安全, 2012, 43(4): 169-172.
<https://doi.org/10.13347/j.cnki.mkaq.2012.04.059>
- [3] 杨英明, 孙建东, 李全生. 我国能源结构优化研究现状及展望[J]. 煤炭工程, 2019, 51(2): 149-153.
- [4] 李姗姗, 袁亮. 煤炭工业全生命周期碳排放核算与影响因素[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2925-2935.
<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.CN23.0368>
- [5] 张优, 程明今, 刘雪薇. 中国煤炭铁路运输生命周期温室气体排放研究[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 601-611.
- [6] 齐璇璇, 黄蕊, 贾一越, 等. 煤炭资源型地区县域碳排放时空特征及驱动因素分析——以山西省为例[J/OL]. 华北水利水电大学学报(社会科学版), 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1429.c.20240318.1931.002.html>, 2024-04-10.
- [7] 严晓辉, 杨芊, 高丹, 等. 我国煤炭清洁高效转化发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 19-25.
- [8] 程豪. 碳排放怎么算——《2006年IPCC国家温室气体清单指南》[J]. 中国统计, 2014(11): 28-30.
- [9] Wang, H.Y., Wang, Y., Mi, H., Zang, J.B. and Wang, S.S. (2021) Analysis of Carbon Emission Energy Inventory from Refrigerant Production and Recycling Carbon Compensation. *Applied Sciences*, **12**, Article 1.
<https://doi.org/10.3390/app12010001>
- [10] 张振芳, 姬长生, 王晓琳, 孙金龙. 地下开采煤矿碳排放量核算初探[J]. 矿山机械, 2012, 40(10): 1-4.
- [11] IPCC (2006) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>