

doi: 10.11799/ce201907030

# 露天煤矿温室气体核算模型构建及减排策略研究

周游<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司安全分院, 北京 100013;

2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究总院), 北京 100013)

**摘要:** 针对露天煤炭开采能源消耗大、温室气体排放高的特点, 对露天煤矿进行碳排放量的核算, 从而清晰认识露天煤炭开采的碳排放源, 并为露天煤矿的节能减排工作提供数据支撑。文章在识别其排放源的基础上进行了温室气体核算模型的构建, 并以哈尔乌素露天煤矿能源消耗情况为基础, 进行了温室气体排放的计算分析和研究。最后结合露天煤矿特点, 对其减排策略给出了政策建议。

**关键词:** 露天煤矿; 温室气体; 核算模型; 减排策略

**中图分类号:** X752      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1671-0959(2019)07-0138-04

## Study on Greenhouse Gas Accounting Model and Emission Reduction Strategy for Open-pit Coal Mines

ZHOU You<sup>1,2</sup>

(1. Mine Safety Technology Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristics of high energy consumption and high greenhouse gas emissions of open-pit coal mines, carbon emission accounting is carried out for open-pit coal mines, so as to clearly understand the source of carbon emissions and provide data support for energy saving and emission reduction in open-pit coal mines. In this paper, the open pit coal mine is taken as the research object, and the greenhouse gas accounting model is constructed on the basis of identifying its emission sources. Then, based on the energy consumption of Haerwusu Open-pit Coal Mine, the calculation and analysis of greenhouse gas emissions are carried out. At last, according to the characteristics of open-pit coal mine, the policy suggestions for its emission reduction strategies are given.

**Keywords:** open-pit coal mines; greenhouse gas; accounting model; emission reduction strategy

气候变化已经越来越得到各国政府、学术界以及普通公众的强烈关注, 温室气体排放量大量增加, 全球气候变暖和极端天气频发使得气候变化成为目前全球关注的重大环境问题之一。1992年《联合国气候变化框架公约》的发布标志着针对气候变化的国际响应正式成型。工业是我国的重点用能和排放单位, 具有能耗高、排放大的特征。我国政府将工业作为控制温室气体排放、应对气候变化的重要领域。控制工业领域的温室气体排放、促进绿色低碳工业发展始终是我国政府的主要目标。而与其他发达国家不同的是, 我国的能源消费结构中, 化石能

源尤其是煤炭占据很大比例。

根据《BP世界能源统计年鉴2018》报告中的数据显示, 煤炭在我国一次能源消费结构中的占比超过了60.4%, 位居世界首位。随着社会对碳减排问题的持续关注, 由煤炭消费引发的温室气体排放问题不容忽视, 煤炭行业的节能减排也越来越受到重视。近年来, 我国煤炭工业的绿色发展取得了积极的进展, 然而针对煤炭行业温室气体的研究依旧较为局限。对于煤炭行业进行碳排放量的核算, 可以使得行业对其排放来源, 特别是排放量较大、值得重点关注的排放源认识更加清晰, 进而为煤炭行

收稿日期: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(71703168); 基于局部均衡理论的碳市场社会经济影响及多政策协同效应研究

作者简介: 周游(1986—), 男, 重庆人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向露天采矿工程及资源开发与规划, E-mail: 81905778@qq.com。

引用格式: 周游. 露天煤矿温室气体核算模型构建及减排策略研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(7): 138-141.

业的节能减排工作和绿色发展提供数据支撑和量化基础。

露天开采作为煤炭开采的一种重要方式,具有能耗高、温室气体排放高的特点,是煤炭行业节能减排的重点之一。露天煤矿的开采,一方面要消耗大量能源,包括用作燃料和动力的煤炭、燃料油、电力等,这些能源的使用会带来较多的温室气体排放;另一方面,由于煤炭的天然特征,逸散、自燃等会带来额外的大量温室气体排放。国内已有学者对于露天的温室气体排放进行了研究。才庆祥等构建了露天煤矿由于能源消耗而导致  $\text{CO}_2$  排放的数学模型,初步探讨了露天煤矿  $\text{CO}_2$  排放的计量方法<sup>[1]</sup>;张振芳构建了基于生产环节的露天煤矿  $\text{CO}_2$  排放核算模型,并基于此以国内典型的露天煤矿(例如安家岭、伊敏何、黑岱沟、布沼坝等)的开采工艺和相关统计数据,分别分析了六种主流生产工艺的  $\text{CO}_2$  排放水平<sup>[2]</sup>。刘福明等运用全生命周期法计算了兖州煤电生产链的  $\text{CO}_2$  排放量计算模型,同时研究了由于能源消耗导致的露天矿  $\text{CO}_2$  排放量计算方法<sup>[3]</sup>。赵红泽等研究了我国大型露天煤矿拉铲倒堆工艺的  $\text{CO}_2$  排放,其结果显示了拉铲倒堆工艺在能源消耗和  $\text{CO}_2$  排放方面明显劣于单斗卡车工艺,但是在投资方面二者并没有明显差别<sup>[4]</sup>。

本文以露天煤矿为例,通过构建露天煤矿温室气体减排模型,研究露天煤矿温室气体排放源并进行实例分析同时对于露天煤矿的减排策略进行了初步研究。

## 1 露天煤矿主要温室气体排放源

$\text{CO}_2$  排放源一般可以根据排放种类不同分为直接排放源和间接排放源。直接排放源是指由于生产环节的能源使用而直接导致的  $\text{CO}_2$  排放;间接排放源则指的是在露天煤矿生产的辅助环节中产生的  $\text{CO}_2$  排放。目前国际上公认的六种温室气体分别为:  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ (甲烷)、 $\text{N}_2\text{O}$ (氧化亚氮)、 $\text{HFC}_s$ (氢氟碳化物)、 $\text{PFC}_s$ (全氟化碳)、 $\text{SF}_6$ (六氟化硫)。但目前在国际和我国学术界,在核算温室气体排放量时,主要计入三种,分别是  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ 。这三种温室气体在分别计算后,再根据各自的升温指数换算成  $\text{CO}_2$  排放量,最终加总后得到总的排放值。因此本文主要分析露天煤矿能够产生  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  这三种温室气体的环节,而对于露天煤矿可能出现的其他排放物,如  $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$  等,因为不属于常规温室气体的范畴,故本文不进行详细讨论。通过

对于露天煤矿生产流程的分析,露天煤矿的温室气体排放源主要来源可以分为以下几类:

1) 炸药。在我国大型露天煤矿的矿岩准备环节,爆破松碎法应用较多,使用炸药导致的温室气体排放,是露天煤矿特有的排放源。露天煤矿通常需要使用炸药进行爆破作业,在炸药过程中会产生大量的温室气体。一个千万吨级别的露天煤矿每年使用炸药导致的温室气体排放可以达到万吨以上。

2) 燃料油。柴油和汽油是露天煤矿最主要的两种燃料油,它们主要被用来作为设备的动力源。一般而言,柴油在露天煤矿中的应用较汽油更多,燃料油的燃烧过程会伴随大量的温室气体排放,其中主要是  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放,其中排放量最大的是  $\text{CO}_2$ ,其次为  $\text{CH}_4$ ,而  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量最低为保证温室气体统计的准确性,本文在统计燃油的温室气体排放时,将  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放均考虑在内。

3) 逸散和自燃。露天煤矿生产过程中还会发生逸散和自燃。在露天煤矿的开采过程中会使得煤层的原始状态遭到破坏,从而煤层中原本存在的  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  等温室气体会随之排放到空气中。除了逸散之外,由于露天煤矿的特性,煤层还可能会产生自燃,这是较为常见的一种自然灾害,煤炭和矸石会发生氧化反应进而产生  $\text{CO}_2$ ,因此逸散和自燃环节主要产生的温室气体为  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$ 。

4) 间接排放。露天煤矿生产过程中最主要的间接排放源来自于电力的使用。电力主要用于驱动露天煤矿各种大型设备,并且由于露天煤矿的电力多来自于火电,因此电力消耗大、 $\text{CO}_2$  排放高也是露天煤矿生产的主要特征。

## 2 露天煤矿碳排放量核算

### 2.1 露天煤矿温室气体排放核算模型

根据露天煤矿温室气体排放源的分析,可以得到露天煤矿温室气体排放的计算公式,如式(1)。

$$E_{\text{total}} = E_{\text{fuel}} + E_{\text{ele}} + E_{\text{dis}} + E_{\text{comb}} \quad (1)$$

式中,  $E_{\text{total}}$  为露天煤矿总的温室气体排放量;  $E_{\text{fuel}}$  代表化石燃料燃烧导致的温室气体排放量;  $E_{\text{ele}}$  代表电力使用导致的温室气体排放量;  $E_{\text{comb}}$  代表露天煤矿自燃导致的温室气体排放量。

### 2.2 电力排放因子的选取

电力排放因子按照《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》(发改气候办2014[2920]号)<sup>[5]</sup>文中规定的方法进行核算,由于电力的排放因子参照各企业所在电网的排放因子

计算,各电网排放因子见表1。

表1 各电网的CO<sub>2</sub>排放因子 kg CO<sub>2</sub>/(kW·h)

| 电网名称   | 排放因子   |
|--------|--------|
| 华北区域电网 | 0.8843 |
| 东北区域电网 | 0.7769 |
| 华东区域电网 | 0.7035 |
| 华中区域电网 | 0.5257 |
| 西北区域电网 | 0.6671 |
| 南方区域电网 | 0.5271 |

从各电网的排放因子可以看出,华北区域电网的排放因子最高,其次为东北、华东地区。因此这些地区的企业电力消耗排放较高,导致同等耗电量情况下排放较华中、南方区域电网辖区内的企业排放量更高。为了能够更好的体现出企业在用电方面的效率,本文选取六大电网的排放因子的加权平均值,即0.6858kg CO<sub>2</sub>/(kW·h)作为电力统一的排放因子。

### 2.3 化石能源排放因子的选取

政府间气候变化专门委员会(IPCC)于2006年发布了《2006年IPCC国家温室气体清单指南》(以下简称《指南》),被国际公认为核算温室气体排放的权威指南,其中发布的碳排放因子至今仍被广泛使用。随后IPCC在2014年对于《指南》进行了增补,但针对传统化石能源排放因子的描述并未进行修正。因此,本文仍采用IPCC(2006)中的排放因子,其中主要包括CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O的排放量。见表2。

表2 露天煤矿主要能源的温室气体排放因子 t/t

| 燃料     | CO <sub>2</sub><br>排放因子 | CH <sub>4</sub> 排放<br>因子/×10 <sup>-4</sup> | N <sub>2</sub> O 排放<br>因子/×10 <sup>-4</sup> |
|--------|-------------------------|--|---|
| 汽油(车用) | 3.07                    | 1.3290                                     | 0.2658                                      |
| 柴油     | 3.19                    | 1.2900                                     | 0.2580                                      |
| 燃料油    | 3.13                    | 1.2120                                     | 0.2424                                      |
| 无烟煤    | 2.62                    | 0.2670                                     | 0.4005                                      |
| 褐煤     | 1.20                    | 0.1190                                     | 0.1785                                      |
| 天然气    | 2.69                    | 0.4800                                     | 0.0480                                      |

### 2.4 逸散排放的计算

露天煤矿逸散过程中主要产生CH<sub>4</sub>,可以参照IPCC2006中的计算方法,即:对于低水平的CH<sub>4</sub>排放因子,可以选取0.3m<sup>3</sup>/t;对于平均水平的CH<sub>4</sub>排放因子,可以选取m<sup>3</sup>/t;对于高水平的CH<sub>4</sub>排放因子,可以选取2.0m<sup>3</sup>/t。中国露天煤矿的CH<sub>4</sub>排放因子为:开采后0.1~0.5m<sup>3</sup>/t。

估算露天煤矿整个开采过程的CH<sub>4</sub>逸散排放如式(2):

$$S_{CH_4} = A_{CH_4} + B_{CH_4} \quad (2)$$

式中, $S_{CH_4}$ 表示总逸散CH<sub>4</sub>排放量; $A_{CH_4}$ 表示开采过程中的CH<sub>4</sub>排放量; $B_{CH_4}$ 表示开采后的CH<sub>4</sub>排放量。

其中:

$$A_{CH_4} = G \times \rho \times EF_A$$

$$B_{CH_4} = G \times \rho \times EF_B$$

式中, $G$ 为原煤总产量; $\rho$ 为CH<sub>4</sub>密度,一般取0.714kg/m<sup>3</sup>; $E_A$ 为开采过程中的CH<sub>4</sub>排放因子, $E_B$ 为开采后的CH<sub>4</sub>排放因子。

### 2.5 自燃温室气体排放量的计算

露天矿自燃主要是由于原煤或者煤矸石导致的,因此核算自燃的温室气体排放量主要核算原煤以及煤矸石中的碳含量。

发热量越大的煤中碳含量越高。不同种类的煤其碳含量有较大差别,根据碳含量可以测定碳排放因子,如式(3):

$$EF_{CO_2} = C \times \beta \times \frac{44}{12} \quad (3)$$

式中, $EF_{CO_2}$ 为由于自燃导致的温室气体排放; $C$ 为燃料中的碳含量; $\beta$ 为碳氧化因子。国内露天煤矿中主要燃料的碳含量以及根据式(2)计算得来的碳排放因子见表3。

表3 露天煤矿主要燃料的碳含量及碳排放因子

| 参数  | 碳含量/% | 碳排放因子/(t·t <sup>-1</sup> ) |
|-----|-------|----------------------------|
| 无烟煤 | 90~98 | 3.3~3.6                    |
| 烟煤  | 75~90 | 2.8~3.3                    |
| 褐煤  | 60~75 | 2.2~2.8                    |
| 泥炭  | 50~60 | 1.8~2.2                    |

## 3 实例研究——以哈尔乌素露天煤矿为例

哈尔乌素露天煤矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗(薛家湾镇)东部,属晋陕蒙交界地区,北邻黑岱沟露天煤矿。该矿是国家“十一五”重点建设煤矿之一,由中国神华能源股份有限公司出资建设,2008年1月4日,哈尔乌素露天煤矿正式成立。设计年产原煤20Mt,设计服务年限79a,2018年共开采原煤14.78Mt。

### 3.1 能源消耗导致的温室气体排放

2018年哈尔乌素露天煤矿能源消费量为:柴油39210.95t,汽油127.7t,电41798MW·h。能源消耗导致的温室气体排放见表4。

根据表4的计算,哈尔乌素露天煤矿2018年由能源消耗导致的CO<sub>2</sub>排放为155843.75t。

表 4 哈尔乌素露天煤矿 2018 年温室气体排放计算

| 能源类别                     | 电/(MW·h) | 汽油/t     | 柴油/t      | 合计        |
|--------------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| 能源消耗量                    | 41798    | 127.7    | 39120.9   |           |
| CO <sub>2</sub>          | 排放因子     | 0.6858   | 3.186     | 3.186     |
|                          | 排放量/t    | 28665.07 | 406.85    | 124639.19 |
| N <sub>2</sub> O         | 排放因子     |          | 0.000138  | 0.000168  |
|                          | 排放量/t    |          | 0.02      | 6.59      |
| CH <sub>4</sub>          | 排放因子     |          | 0.00142   | 0.000168  |
|                          | 排放量/t    |          | 0.18      | 6.57      |
| 当量 CO <sub>2</sub> 排放量/t | 28665.07 | 416.64   | 126762.04 | 155843.75 |

### 3.2 逸散导致的温室气体排放

由于哈尔乌素露天煤矿开采过程中,没有实测值衡量产生的 CH<sub>4</sub> 排放量,本文根据该矿的实际生产经营情况,并参考相关研究,认为其在开采过程中的 CH<sub>4</sub> 排放因子为 0.3m<sup>3</sup>/t,而在开采后的 CH<sub>4</sub> 排放因子则取较低水平,为 0.1m<sup>3</sup>/t,根据此计算其 2018 年的总逸散排放量为:

$$S_{CH_4} = 24.3 \times 14.78 \times 10^3 \times 0.714 \times (0.3 + 0.1) \\ = 102574t$$

### 3.3 其他温室气体排放

哈尔乌素露天煤矿在生产过程中没有出现煤层自燃现象,因此自燃导致的温室气体排放忽略不计。且露天矿生产面无明显大面积植被,因此植被吸收 CO<sub>2</sub> 的量此处忽略不计。根据以上计算,哈尔乌素露天煤矿 2018 年温室气体排放量为:

$$E_{total} = 155843.75 + 102574.00 = 258417.75t$$

## 4 结论及政策建议

### 4.1 结论

论文详细分析了露天煤矿温室气体排放源的构成,即直接能源消耗带来的排放、电力消耗带来的排放、开采过程中和开采过程后逸散的排放、煤炭自燃导致的排放。参考 IPCC(2006) 中的排放因子和计算方法,建立了露天煤矿温室气体排放的计算模型。在上述计算模型的基础上,以哈尔乌素露天煤矿为例,详细计算了该煤矿 2018 年总的 CO<sub>2</sub> 排放量,结果发现 2018 年该煤矿排放 CO<sub>2</sub> 共计 258417.75t,其中能源消耗导致的排放约占 60%,开采过程中和过程后逸散导致的排放约占 40%。因此,对于露天煤矿而言,温室气体排放大多数是由于能源消耗所导致的,这也就意味着通过采用节能减排技术、改变能源消费结构等可以带来较大的减排效果。

### 4.2 政策建议

针对本文的研究结果,对于露天煤矿的温室气体减排提出以下政策建议:

1) 推广成本有效的减排技术。煤炭开采行业的碳减排主要有以下途径:调整能源结构、提高能效、CO<sub>2</sub> 捕集、封存与利用。从目前的情况来看,以化石能源为主的能源结构短期内不会发生根本改变;CO<sub>2</sub> 捕集、利用与封存当前成本过高。因此,对于露天煤矿而言,短期内减排的主要手段依然是提高能效,减少生产过程的能源使用,继而减少温室气体排放。露天煤矿需大力挖掘成本有效的节能减排技术,以减少能源消耗所带来的温室气体排放。

2) 详细核算企业减排成本。目前国家已经启动全国统一碳市场,虽然露天开采行业并未被纳入首批交易的行业,但是需要提前准备,提高企业应对碳市场的能力。对于企业而言,最重要的就是厘清自身的减排成本,找到减排成本与碳价之间的平衡关系,继而能够在自主减排和购买配额间找到最佳决策点。

3) 建立碳资产管理平台。目前露天煤矿开采企业的碳资产管理依旧较为粗放,与钢铁、电力等传统高耗能行业相比仍有较大差距。目前已有大部分央企建立了碳资产管理平台,通过平台进行 CO<sub>2</sub> 的核算、上报、统计、分析和交易等功能。建议露天煤矿企业可以从集团层面开展碳资产管理平台的建设,以便及时掌握碳资产规模、排放趋势等关键信息,为企业的节能减排更好的提供依据。

### 参考文献:

- [1] 才庆祥,刘福明,陈树召.露天煤矿温室气体排放计算方法[J].煤炭学报,2012(37):103-106.
- [2] 张振芳.露天煤矿碳排放核算即碳减排途径研究[D].徐州:中国矿业大学,2013.
- [3] 刘福明,才庆祥,陈树召,等.露天煤矿能源消耗引致温室气体排放量模型建构[J].中国矿业,2012(21):61-64.
- [4] 赵红泽,张瑞新,吴多晋,等.大型露天煤矿拉铲倒堆工艺低碳效益分析[A]//第二届中国能源科学家论坛论文集[C].徐州,2010.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南[EB/OL],2014. <http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201502/W020150209400115918542.pdf>.
- [6] 马忠海.中国几种主要能源温室气体排放系数的比较评价研究[D].北京:中国原子能研究院,2001(6):145-147.

(责任编辑 杨蛟洋)