

引用格式: 马翠梅, 戴尔阜, 刘乙辰, 等. 中国煤炭开采和矿后活动甲烷逃逸排放研究[J]. 资源科学, 2020, 42(2): 311-322. [Ma C M, Dai E F, Liu Y C, et al. Methane fugitive emissions from coal mining and post-mining activities in China[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 311-322.] DOI: 10.18402/resci.2020.02.10

中国煤炭开采和矿后活动甲烷逃逸排放研究

马翠梅¹, 戴尔阜^{2,3}, 刘乙辰¹, 王亚慧², 王芳⁴

(1. 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心, 北京 100035; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室 拉萨高原生态系统研究站, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 甲烷(CH₄)是仅次于二氧化碳(CO₂)的一类重要温室气体, 煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放是中国最大的CH₄排放源。为编制高质量的国家温室气体清单以及制定针对性的控制温室气体排放措施, 有必要对中国煤炭开采和矿后活动不同排放源的CH₄逃逸开展系统研究。根据《IPCC 2006年国家温室气体清单指南》方法, 对中国煤炭逃逸关键排放源井工煤矿开采和矿后活动采用本国特征排放因子法, 其他排放源采用缺省排放因子法, 计算了2010—2016年中国煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放量, 分析了上述期间的排放趋势及排放构成, 并开展了同其他国家隐含排放因子的对比分析。结果显示: ①不考虑回收利用量时, 2010—2016年中国煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放量先升后降, 2010年排放量为2525万t, 2013年达到峰值2716万t, 之后缓慢下降到2016年的2269万t, 最大的排放环节为井工开采, 研究期年平均占比为83%。②2010—2016年CH₄回收利用量年均上升17%, 2016年回收利用量占总排放量的27%, 扣除回收利用量后净排放量峰值年份前移到2011年。③不同国家本地化隐含排放因子差距较大, 中国在主要产煤大国中处于中等偏下水平, 与波兰相当, 低于德国、俄罗斯和美国, 位于IPCC缺省值下限。④从排放源范围、方法选择和排放因子等方面来看, 中国煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放清单在非附件I国家中属于领先水平, 但同附件I国家相比还存在一定差距。建议未来进一步提升计算范围的完整性, 加强活动水平数据收集, 以及深入开展中国特征排放因子研究, 同时从管理和技术方面加强对煤矿瓦斯的回收利用水平。

关键词: 井工煤矿; 露天煤矿; 煤炭开采; 矿后活动; 温室气体清单; 本国特征排放因子; 逃逸排放; 甲烷

DOI: 10.18402/resci.2020.02.10

1 引言

CH₄是一类重要的温室气体, 自工业化时代以来大气中CH₄浓度上升速度较快, 已从1750年的722 ppb增长到2011年的1803 ppb, 上升了150%^[1]。第四次和第五次IPCC评估报告均认为, 工业化时期以来大气CH₄浓度增加所产生的辐射强迫在所有温室气体中仅次于CO₂^[1,2], 因此近年来CH₄的排放和控制引发了国际社会高度关注^[3-5]。根据美国环保署估算, 2005年全球CH₄排放量高达68亿t CO₂

当量(CO₂eq), 占温室气体排放总量的16%, 预计未来排放增速还将进一步加快; 在所有排放领域中农业活动和能源活动排放位居前两位, 分别占全球总量的45%和36%; 从排放分布来看中国是最大的排放国家, 占全球总量的13%(图1)^[1]。2019年6月发布的《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》^[6]显示, 2014年中国CH₄排放量占温室气体排放总量的10%, 能源活动是第一部门, 占CH₄排放总量的45%。

收稿日期: 2019-06-11 修订日期: 2019-12-24

基金项目: 中国准备第三次气候变化国家信息通报能力建设项目(00088737); 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20020202)。

作者简介: 马翠梅, 女, 安徽蒙城人, 副研究员, 主要从事应对气候变化政策以及国家和地方温室气体排放研究。E-mail: ma cm@ncsc.org.cn

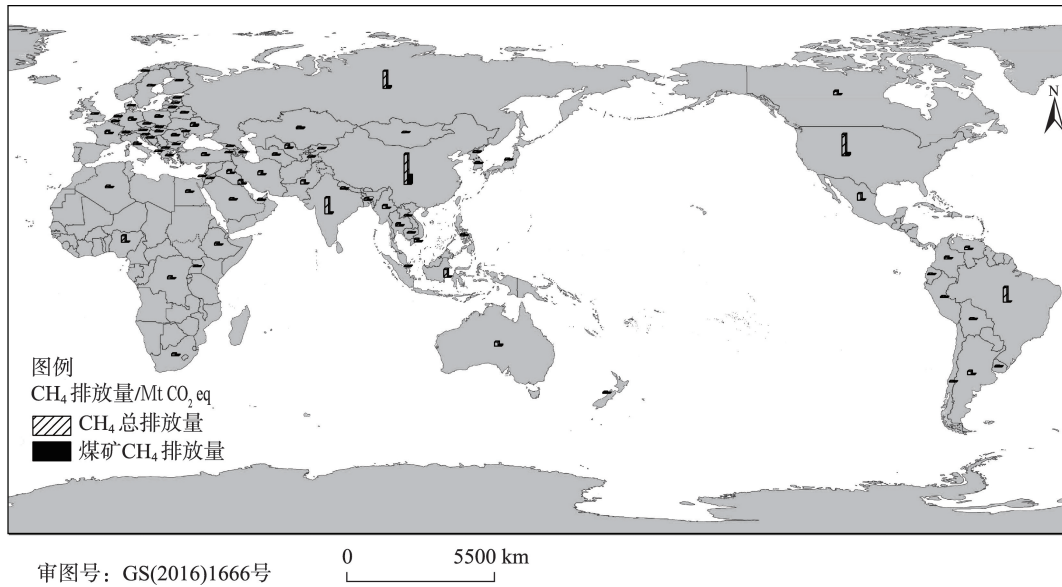


图1 全球总CH₄排放及煤炭开采和矿后活动CH₄排放分布图

Figure 1 Global distribution of total CH₄ and CH₄ from coal mining and post-mining activities by country

长期以来,煤炭在中国一次能源生产和消费构成中一直占70%左右^[7,8]。2016年,中国煤炭产量高达全球总产量的40%以上,位居世界首位^[9]。煤炭开采、洗选和运输等过程会导致赋存在煤层中的瓦斯(主要成分包括CH₄和CO₂等)释放到大气,引起大量的温室气体排放。中国是世界第一大煤炭开采和矿后活动CH₄排放国家(图1),2005年其排放量占全球的49%^[3];2014年,中国煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放量高达4.4亿t CO₂ eq,占能源活动CH₄排放的85%、全国CH₄排放总量的38%、全国温室气体排放总量的3.6%,相当于2014年法国或意大利的国家温室气体排放总量^[6,10,11]。已有的少量中国煤炭开采和矿后活动CH₄排放相关研究存在计算范围不全,如仅聚焦于某一排放环节^[12],方法相对粗略陈旧^[13-17]以及排放因子较少采用本国特征值^[12-14,16-18]等问题,也缺少对最近年度的排放量计算与分析,难以有效支撑减排决策以及满足未来履约需求。

因此,为编制高质量的国家温室气体清单以及制定针对性的控制CH₄排放措施,有必要开展系统的煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放研究。《联合国气候变化框架公约》^[19](以下简称《公约》)规定各缔约方采用政府间气候变化专门委员会(IPCC)制定的国家温室气体清单指南计算和报告各自的排放和吸收量,也即国家温室气体清单。本文通过梳理

IPCC国家温室气体清单指南要求,对比分析世界主要产煤国清单编制实践,根据中国各排放源的实际排放情况以及数据可获得性,确定煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放计算方法,并据此计算得出2010—2016年排放量,最后针对目前存在问题以及未来履约报告要求提出几点建议。

2 IPCC指南及其他国家煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放计算方法介绍

为满足国际履约报告要求以及同其他国家清单结果可比,本节汇总分析了IPCC国家温室气体清单指南中煤炭开采和矿后活动温室气体排放的排放源界定、各环节排放计算方法,以及其他产煤大国的排放计算现状,以期为确定中国煤炭开采和矿后活动CH₄排放计算方法提供参考。

2.1 IPCC国家温室气体清单指南计算方法

为规范国家温室气体清单编制,IPCC制定了一系列清单编制指南^[20-24],其中包括煤炭开采和矿后活动的温室气体排放计算。总体来说,系列指南在科学性、完整性和准确性等方面是逐步完善的。根据《公约》相关要求,目前《公约》附件I国家需要按照《IPCC 2006年国家温室气体清单指南》(以下简称《IPCC 2006指南》)、非附件I国家按照《IPCC国家温室气体清单(1996年修订版)》(以下简称《IPCC 1996指南》)和《IPCC 2000国家温室气体清

2020年2月

单优良做法指南和不确定性管理》(以下简称《IPCC 好的做法指南 2000》)编制和报告国家温室气体清单^[25,26],自 2024 年起所有《公约》缔约方均需采用《IPCC 2006 指南》^[27]。为尽可能准确反映中国实际排放情况、提前做好指南过渡的技术准备,中国最新履约报告已充分借鉴《IPCC 2006 指南》编制国家温室气体清单。

《IPCC 2006 指南》按照排放环节将煤炭开采和矿后活动划分为煤炭开采过程、矿后活动、低温氧化、非控制燃烧以及废弃矿井等 5 类排放源(图 2),其中开采过程排放指采掘活动扰动、破碎煤层导致赋存煤层气通过地下煤矿的通风和抽放系统释放;开采过程并不能完全释放煤炭中的温室气体,另有少量气体从采出煤体的后处理过程,如煤炭加工处理、储存以及运输逃逸到大气,该部分称为矿后活动排放;低温氧化指煤炭暴露到空气中部分被氧化产生温室气体;当低温氧化产生的热量聚积到一定程度可能引起煤炭燃烧,该部分称为非控制燃烧排放;煤炭开采停止后,废弃矿井依然会通过自然或人为通道继续释放温室气体,此部分为废弃矿井排放。另外,由于煤层气中 CH₄ 含量较高,是一种优质的清洁能源,部分 CH₄ 会通过煤矿的抽放系统回收利用,回收部分应从煤矿开采和矿后活动逃逸排放量中扣除。

上述 5 类排放源中,由于国内外关于低温氧化和非控制燃烧 2 个环节的研究和实测较少,《IPCC 2006 指南》以方法不成熟为由未提供温室气体排放计算方法。对于煤炭开采、矿后活动和废弃矿井 3 个环节,给出了排放量较大的 CH₄ 气体计算方法及

缺省排放因子。另外,由于露天煤矿废弃矿井 CH₄ 排放量相对较低,指南也未给出计算方法。因此,《IPCC 2006 指南》仅提供了井工煤矿的煤炭开采、矿后活动和废弃矿井环节,以及露天煤矿的煤炭开采和矿后活动环节 CH₄ 逃逸排放计算方法以及相应的缺省排放因子(表 1)。

(1)煤炭开采和矿后活动 2 个环节 CH₄ 排放的计算公式均为:

$$Em_{CH_4} = Pro_{coal} \times EF_{CH_4} \times \rho_{CH_4} - Re_{CH_4} \quad (1)$$

式中: Em_{CH_4} 为 CH₄ 排放量; Pro_{coal} 为原煤产量; EF_{CH_4} 为 CH₄ 排放因子(单位为: Mm³CH₄/t 原煤); ρ_{CH_4} 为 CH₄ 密度; Re_{CH_4} 为 CH₄ 回收利用量。其中, CH₄ 排放因子采用缺省值时为层级 1(以下简称 T1)方法,采用本国特征值时为高层级的层级 2 方法(以下简称 T2)。高层级的层级 3 方法(以下简称 T3)为各矿井实测 CH₄ 排放量加总法。公式(1)既适用于井工煤矿,也适用于露天煤矿。

(2)废弃矿井 CH₄ 排放的计算公式为:

$$Em_{CH_4,aban} = Num_{well} \times Prob_{CH_4} \times EF_{CH_4,aban} \times \rho_{CH_4} \quad (2)$$

式中: $Em_{CH_4,aban}$ 为废弃矿井 CH₄ 排放量; Num_{well} 为尚未水淹矿井数量; $Prob_{CH_4}$ 为瓦斯矿井比例; $EF_{CH_4,aban}$ 为矿井排放因子(Mm³CH₄/个)。为计算废弃矿井 CH₄ 排放需收集各个时段内关闭且未被水淹的矿井个数,以及其中瓦斯矿井的比例和每个(组)瓦斯矿井甲烷的排放因子,矿井关闭时间间隔和矿井排放因子采用指南缺省值时为 T1 方法,采用比缺省值更短的时间间隔以及本国特征的矿井排放因子时为 T2 方法。T3 为废弃矿井排放加总法,计算过程较

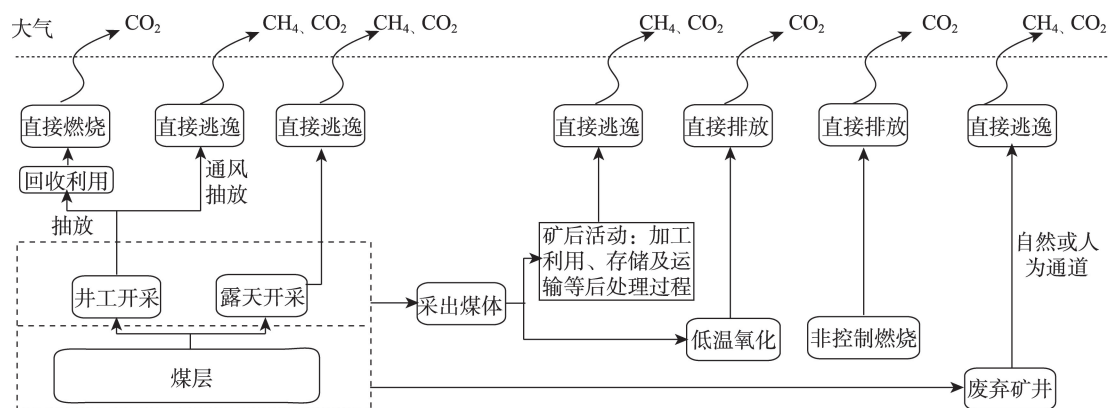


图 2 煤炭开采和矿后活动温室气体排放示意图

Figure 2 Greenhouse gas emissions from coal mining and post-mining activities

表1 《IPCC 2006指南》煤炭开采和矿后活动排放源计算方法

Table 1 Summary of calculation methods for the sources of coal mining and post-mining activities in IPCC 2006

排放源	详细描述	排放气体	CH ₄ 排放计算方法	CH ₄ 缺省排放因子	
井工 煤矿	井工 开采	通过通风和抽放系统带到大气的煤层气,可视为点源	CH ₄ 和CO ₂	三个层级方法:全球平均排放因子法(T1)、国家或煤田特征排放因子法(T2)和矿井实测法(T3)	矿井深度<200 m,缺省因子10 m ³ /t 400 m≥矿井深度≥200 m,缺省因子18 m ³ /t 矿井深度>400 m,缺省因子25 m ³ /t
	矿后 活动	煤炭开采后,从矿井带到地面,以及接下来的加工、存储和运输过程逃逸的温室气体	CH ₄ 和CO ₂	两个层级方法:全球平均排放因子法(T1)和国家或煤田特征排放因子法(T2)	矿井深度<200 m,缺省因子0.9 m ³ /t 400 m≥矿井深度≥200 m,缺省因子2.5 m ³ /t 矿井深度>400 m,缺省因子4.0 m ³ /t
	废弃 矿井	废弃的井工煤矿逸散的温室气体排放	CH ₄ 和CO ₂	两个层级方法:全球平均排放因子法(T1)、国家特征排放因子法(T2)和矿井加总法(T3)	按关闭年份距离清单年份的时间间隔计,详见指南第2卷第4章表4.1.6
露天 煤矿	露天 开采	采掘过程中由于煤和相关地层的破坏、以及采场底面等泄漏的温室气体,分散在露天矿的各处,可视为面源	CH ₄ 和CO ₂	两个层级方法:全球平均排放因子法(T1)和国家或煤田特征排放因子法(T2)	表土深度<25 m,缺省因子0.3 m ³ /t 50 m≥表土深度≥25 m,缺省因子1.2 m ³ /t 表土深度>50 m,缺省因子2.0 m ³ /t 如缺少表土深度数据,推荐采用1.2 m ³ /t
	矿后 活动	煤炭开采后的加工、存储和运输过程逃逸的温室气体	CH ₄ 和CO ₂	两个层级方法:全球平均排放因子法(T1)和国家或煤田特征排放因子法(T2)	表土深度<25 m,缺省因子0 m ³ /t 50 m≥表土深度≥25 m,缺省因子0.1 m ³ /t 表土深度>50 m,缺省因子0.2 m ³ /t 如缺少表土深度数据,推荐采用0.1 m ³ /t

注:未提供CO₂排放的计算方法和缺省排放因子;CH₄密度取20℃、1个大气压下的0.67 kg/m³。

为复杂,包括创建含气废弃矿数据库、识别影响CH₄排放的关键参数(水淹状态、密封还是通风、废弃年数)、开发矿井或煤田特征排放速率衰减曲线或相关模型、通过现场实测数据验证数学模型以及计算CH₄排放量等步骤。各排放源最终采用的计算方法需根据排放量大小、是否是关键源以及本国的数据可获得性确定。

2.2 国际产煤大国CH₄排放量计算方法

除中国外,2017年全球排名前10的产煤大国依次为印度、美国、澳大利亚、印度尼西亚、俄罗斯、南非、德国、波兰和哈萨克斯坦,上述9个国家产量之和占全球的46%,与中国煤炭产量相当^[9]。主要产煤大国最新的国家温室气体清单报告^[28-33]和国家信息通报^[34]/两年更新报告显示^[35,36](表2),9个产煤大国基本都遵循了《IPCC 2006指南》,但附件I国家清单范围较为完整,计算了所有排放环节,开展了本地化排放因子调研或者排放量实测工作,排放量较大的环节采用了高层级的T2或T3方法;非附件I国家清单相对粗略、简单,哈萨克斯坦国家履约报告无法区分清单范围及各环节计算方法,印度、印度尼西亚和南非3个国家各有部分排放环节未覆盖,印度尼西亚采用的为低层级计算方法,未开展本地化排放因子调研或实测。总体而言,附件I国家煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放清单在计算范围、

方法选择和因子实测等方面优于非附件I国家。

3 中国煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放计算方法与数据来源

3.1 计算方法

结合IPCC清单指南和其他产煤大国清单编制经验,本文完全采用《IPCC 2006指南》提供的相对成熟的煤炭开采、矿后活动和废弃矿井3个环节的CH₄排放计算方法,开展中国煤炭开采和矿后活动CH₄排放研究。此外,中国95%左右煤炭产量来自井工煤矿,露天煤矿所占比重较低,且露天开采的煤炭多为低瓦斯煤田的褐煤,温室气体含量较低,其矿后活动排放可忽略不计,因此本文最终确定的计算范围为中国井工煤矿煤炭开采、矿后活动和废弃矿井以及露天煤矿开采环节CH₄逃逸排放。

国家温室气体清单关键类别分析结果显示,井工煤矿的开采以及矿后活动2个环节是中国清单的关键类别^[37]。按照IPCC清单指南要求,关键类别由于排放量较大或者对排放趋势的影响较大,需采用较高级别方法编制,也即采用本国化排放因子的T2及以上层级方法,从而确保清单结果更加准确、接近本地实际。考虑到基础数据的可获得性,本文对中国2010—2016年煤矿开采各环节的CH₄排放进行了估算,最终确定关键类别井工煤矿的开采和矿后活动采用中国本国化排放因子的T2方法,计算公

表2 主要产煤大国煤炭开采和矿后活动各环节CH₄逃逸排放计算方法Table 2 Calculation methods for CH₄ fugitive emissions from coal mining and post-mining activities in major coal-producing countries

		井工煤矿			露天煤矿		遵循的指南
		开采	矿后	废弃	开采	矿后	
附件1国家	美国	T3	T2	T3	T2	T2	《IPCC 2006 指南》
	澳大利亚	T3	T2	T2/T3	T2/T3	IE	
	俄罗斯	T2	T2	NO	T2	T1	
	德国	T3	T2	T3	T2	NO	
	波兰	T3	T1	T1	T1	T1	
非附件1国家	印度	T2/T3	T2	NE	T2/T3	T2	《IPCC 2006 指南》
	印度尼西亚	NO	NO	NO	T1	NE	
	南非	T2	T2	NE	T2	T2	
	哈萨克斯坦			T2/T3			

注:“IE”表示计算在其他排放源,如澳大利亚露天煤矿的矿后活动计算在露天开采环节;“NO”表示没有发生排放,如俄罗斯的废弃矿井全部水淹,德国露天煤矿全部用于坑口电厂;“NE”表示该环节存在排放,由于数据无法获得等原因没有计算。

式详见式(1),非关键类别井工煤矿的废弃矿井和露天开采采用IPCC缺省值的T1方法,计算公式分别详见式(2)和式(1)。

3.2 数据来源

3.2.1 井工煤矿开采

井工开采原煤产量由全国原煤产量扣减露天原煤产量得出,2010—2016年全国原煤产量数据来源为国家统计局^[38],2010、2012和2014年全国露天煤矿原煤产量为省级能源活动温室气体清单中各省露天原煤产量数据加总值,2011、2013、2015和2016年全国露天原煤产量通过内插和外推法获得,详见式(3)–(6):

$$Pro_{surface,2011} = (Pro_{surface,2010} + Pro_{surface,2012})/2 \quad (3)$$

$$Pro_{surface,2013} = (Pro_{surface,2012} + Pro_{surface,2014})/2 \quad (4)$$

$$Pro_{surface,2015} = Pro_{surface,2014} + (Pro_{surface,2014} - Pro_{surface,2012})/2 \quad (5)$$

$$Pro_{surface,2016} = Pro_{surface,2014} + (Pro_{surface,2014} - Pro_{surface,2012}) \quad (6)$$

式中: $Pro_{surface,2010}$ 、 $Pro_{surface,2011}$ 、 $Pro_{surface,2012}$ 、 $Pro_{surface,2013}$ 、 $Pro_{surface,2014}$ 、 $Pro_{surface,2015}$ 和 $Pro_{surface,2016}$ 分别为2010—2016年露天煤矿原煤产量。2010—

2016年中国CH₄回收利用量来自煤矿瓦斯防治部际协调领导小组第八到十四次会议发布数据^①。

关于CH₄逃逸排放因子,中国煤监部门出于安全考虑要求煤矿定期进行的瓦斯等级鉴定^[39,40]中的矿井CH₄相对涌出量(m³/t)和鉴定月原煤产量(t)等信息,能够有效反映井工煤矿在开采过程中的CH₄排放情况。中国井工煤矿开采环节的CH₄实测平均排放因子计算式为:

$$EF_{CH_4} = \sum(Q_{CH_4,i} \times Pro_{underground,i}) / \sum Pro_{underground,i} \quad (7)$$

式中: $Q_{CH_4,i}$ 为第*i*个矿井CH₄相对涌出量; $Pro_{underground,i}$ 为第*i*个矿井的原煤产量。本文所统计的矿井数量高达10874个,分布于全国26个产煤省(区、市)和新疆生产建设兵团,覆盖范围广泛、全面,能够充分反映中国的整体平均状况,对于本国化排放因子而言代表性较强^[41]。由于数据的可获取性,本文仅计算了2011年井工煤矿开采环节的CH₄排放因子,鉴于相邻年份煤炭产地、煤层特点较为接近,相应地CH₄排放因子也相差不大,因此本文中2010—2016年井工煤矿开采环节CH₄排放因子均采用2011年因子结果。CH₄密度按标准状况(1个标准大气压,20摄氏度)下0.67 kg/m³计。

3.2.2 井工煤矿矿后活动

高瓦斯、瓦斯突出以及低瓦斯矿井比重来自煤

① <http://www.cqvip.com/read/read.aspx?id=38503776;> http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2012-01/30/content_999836.htm;
<https://xian.qq.com/a/20130228/000002.htm;> http://www.nea.gov.cn/2014-01/28/c_133080152.htm;
http://www.nea.gov.cn/2015-02/12/c_133990724.htm; <http://www.mkaq.org/html/2016/01/30/351522.shtml;>
http://www.sxkeda.com/html/xwdt_98_4825.html

监部门统计数据^[41]。关于CH₄排放因子,中国在开展第二次国家信息通报研究过程中对中国高瓦斯和突出矿井的矿后活动CH₄含量进行过专题研究,得出了井工煤矿的矿后活动CH₄排放与煤的挥发分含量关系:随着煤变质程度的提高(即挥发分减小),煤的矿后活动CH₄含量显著增大^[15]。2010—2016年高瓦斯和突出矿井矿后活动CH₄排放因子根据国家统计局历年原煤煤种统计数据,结合国标《中国煤炭分类》(GB/T 5751-2009)中界定的不同煤种所对应的挥发分含量,对照可得中国高瓦斯和突出矿井的矿后活动CH₄含量约为3 m³/t。

对于瓦斯矿井,按照《矿井瓦斯涌出量预测方法》(AQ 1018-2006)行业标准,矿后活动CH₄含量可按式(8)计算得出:

$$w_c = 10.385e^{-7.207/w_0} \quad (8)$$

式中: w_c 为煤的矿后活动CH₄含量(m³/t); w_0 为煤层的原始CH₄含量(m³/t),一般为1~5 m³/t^[15],本文取其平均值3 m³/t,代入式(8)计算得出煤的矿后活动CH₄含量为0.94 m³/t。因此,2010—2016年瓦斯矿井矿后活动CH₄排放因子确定为0.94 m³/t。其他参数来源,如井工煤矿原煤产量和CH₄密度同井工煤矿开采环节。

3.2.3 井工煤矿废弃矿井

2010—2016年全国废弃矿井数量由国家能源局提供。2011年全国不同类型瓦斯矿井比重来自煤监部门统计数据^[41],鉴于数据稀缺且该比重相对较为稳定,因此2010—2016年均采用2011年数据。由于井工煤矿的废弃矿井为非关键类别且实测成本较大,因此排放因子采用《IPCC 2006指南》缺省值,CH₄密度取值同井工煤矿开采环节。

3.2.4 露天开采

2010—2016年露天原煤产量数据来源同井工煤矿开采环节。由于露天开采为非关键类别,目前国内也未开展过相关实测研究,因此排放因子采用《IPCC 2006指南》缺省值。另外,露天煤矿CH₄含量低,CH₄在开采过程中直接逸散到大气中,一般无回收利用量^[15]。

4 结果与分析

4.1 中国煤炭开采和矿后活动CH₄排放变化趋势

煤炭开采和矿后活动产生的部分煤层气中CH₄浓度较高,被用作能源等用途回收利用,没有直接

排放到大气中,因此扣除该部分后为实际排放到大气中的CH₄净排放。以下分别对回收利用前产生的排放量、回收用量及净排放量进行分析。

4.1.1 回收利用前产生的CH₄排放

2010—2016年中国煤炭开采和矿后活动过程中逸散的CH₄排放量如图3所示。总体来说,2010—2013年排放量缓慢上升,2013年达到峰值,之后逐年下降,这与中国原煤产量变化趋势相一致。由于储量大以及成本低等原因,煤炭一直在中国能源消费总量中占主导地位。相较于其他能源品种,单位热值燃料燃烧后煤炭产生的空气污染物及温室气体排放量均为最高,为了缓解资源环境压力,降低温室气体排放,“十二五”初期中国开始提出调整优化能源结构,提高非化石能源消费比重政策^[42]。随后,2013年国务院印发的《大气污染防治行动计划》明确提出到2017年煤炭占能源消费总量比重降低到65%以下,京津冀、长三角、珠三角等区域力争实现煤炭消费总量负增长,耗煤项目要实行煤炭减量替代^[43]。2016年发布的《十三五规划纲要》中进一步提出到2020年煤炭占能源消费总量比重下降到58%以下^[44]。在国家宏观政策引导下,中国原煤产量于2013年达到历史峰值,之后有所回落。

从排放环节来看,井工开采一直是最大的CH₄排放源,占煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸总排放量的83%左右;其次是井工煤炭的矿后活动环节,占总排放量的13%左右;露天开采和井工煤炭的废弃矿井环节分别占总排放量的3%和1%,井工开采和矿后活动排放在中国煤炭开采和矿后活动中占支配性地位。10个产煤大国中(图4),除南非和哈萨

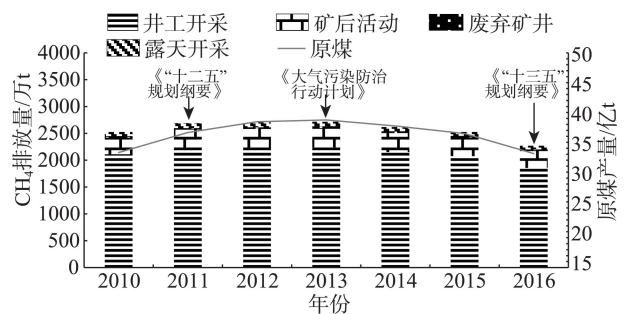
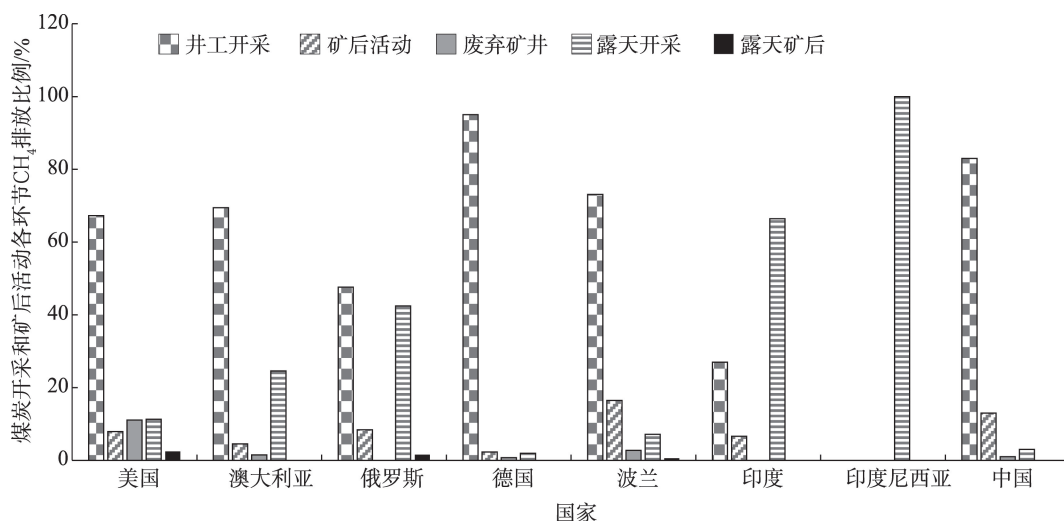


图3 2010—2016年中国煤炭开采和矿后活动各环节CH₄排放量及原煤产量

Figure 3 CH₄ fugitive emissions from coal mining and post-mining activities and the production of raw coal in China, 2010-2016

2020年2月

图4 主要产煤大国煤炭开采和矿后活动各环节CH₄排放比例对比Figure 4 Comparison of CH₄ fugitive emissions from coal mining and post-mining activities in major coal-producing countries

克斯坦具体数据不详外,井工开采排放占比最高的为德国,比重高达95%,中国、波兰、澳大利亚和美国依次降低,但均超过65%,这主要是由于上述国家以井工煤矿为主;印度尼西亚和印度露天开采环节排放比重分别高达100%和66%,俄罗斯井工开采和露天开采排放比重相当。另外,由于中国井工煤矿中含瓦斯比例高,高瓦斯和瓦斯突出矿井占30%左右^[41],同时中国井工煤矿采选一体化水平不高,因此井工煤矿的矿后活动排放所占比重较高,远高于德国、美国、澳大利亚,仅略低于波兰。

4.1.2 回收利用率及净排放

除安全因素外,煤层气热值与天然气相当,常被用作清洁能源,因此对其回收和重视程度也在不断提升。从20世纪90年代开始,随着中国煤炭工业的不断发展,以及对煤炭行业的CH₄排放是造成温室效应的重要因素之一认识的提升,煤矿瓦斯的抽采利用量也呈逐年增长的趋势^[45](图5)。煤矿瓦斯防治部际协调领导小组发布的数据显示,CH₄回收利用率由2010年的23.8%增加到2016年的26.6%,年均回收利用率上升17%,回收利用率占总排放量比重由2010年的9%逐步增加到2016年的27%,增速较快,但与2016年美国回收量占总排放量的32%相比仍有一定的上升空间^[33]。扣除回收利用率后,中国煤炭开采和矿后活动CH₄净排放量最大年份为2011年,约为2330万t,之后逐年下

降,2011—2016年年均下降率为6.5%。与扣除回收利用率前的下降率相比,扣除回收利用率后的CH₄净排放量下降速率明显加快(图5)。

4.2 隐含排放因子国际对比

隐含排放因子为单位综合活动水平的温室气体排放量,一般通过底层排放因子加权获得,如吨标煤能源消费的CO₂排放等,国际上一般采用隐含排放因子校核实测法结果。另外,如果实测样本量足够大,隐含排放因子还可用于更新IPCC缺省值。为进一步对比分析各国排放因子实测结果,本文收集、计算了煤炭开采和矿后活动各环节CH₄隐含排放因子(表3),计算方法为CH₄总排放量除以煤炭

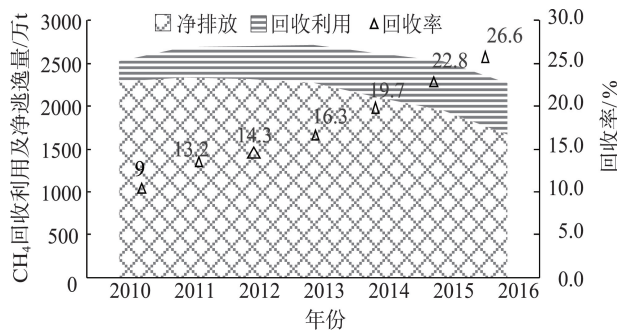
图5 2010—2016年中国煤矿瓦斯回收利用率及煤炭开采和矿后活动CH₄净排放量Figure 5 Recovery amount of coal mine gas and net CH₄ emissions from coal mining and post-mining activities in China (ten thousand tons), 2010-2016

表3 主要产煤大国煤炭开采和矿后活动各环节CH₄国别隐含排放因子Table 3 CH₄ implied emission factors of coal mining and post-mining activities in major coal-producing countries (m³/t)

国家或地区		井工煤矿			露天煤矿	
		开采	矿后	废弃	开采	矿后
附件I国家	美国	14.91	1.25	2.48	0.94	0.21
	澳大利亚	8.33	0.54	0.18	0.73	—
	俄罗斯	17.94	2.96	—	5.54	0.19
	德国	35.76	0.87	0.28	0.01	—
	波兰	11.12	—	—	—	—
非附件I国家	印度	4.92	1.21	—	1.18	0.15
	印度尼西亚	—	—	—	—	—
	南非	0.77	0.18	—	0	0
IPCC 2006 缺省值		10~25	0.9~4		0.3~2	0~0.2

注：“—”表示该排放环节未计算或采用的为缺省排放因子。

产量,其中排放量既包括实际排放量,也包括回收利用量。结果表明,由于煤层深度、成煤条件各异,不同国家的隐含排放因子相差较大,以井工开采为例,隐含排放因子分布在0.77~35.76 m³/t之间,远超缺省排放因子10~25 m³/t范围。因此,如果一国煤炭开采和矿后活动CH₄排放量较大,采取IPCC缺省值或者其他国家排放因子的计算结果可能同本国实际排放量偏差较大,为获得准确排放量结果应开展本国化特征因子研究。

中国井工煤矿的开采和矿后活动两个环节的本国化特征隐含排放因子分别为10 m³/t和1.6 m³/t,均处于《IPCC 2006 指南》缺省值10~25 m³/t和0.9~4 m³/t下限左右。与其他主要产煤大国相比,中国井工开采隐含排放因子处于中等偏下水平,高于澳大利亚、印度和南非,低于美国、俄罗斯、德国和波兰;矿后活动隐含排放因子仅低于俄罗斯,高于其他所有产煤大国。另外,特别需要指出的是,中国矿井瓦斯等级鉴定是出于煤矿安全的需要,根据等级鉴定结果开展矿井瓦斯管理,从而预防瓦斯事故、保障职工生命安全,因此按照瓦斯等级鉴定的相关管理办法,需要选择在矿井绝对瓦斯涌出量最大的月份测量^[39,40]。也就是说,根据矿井瓦斯等级鉴定结果计算得出的井工开采CH₄排放因子为一年中的最大值,其他月份瓦斯绝对涌出量一定小于等于鉴定结果,中国井工开采实际排放因子极有可能进一步低于10 m³/t。考虑到井工开采排放量占煤炭开采和矿后活动CH₄排放量的80%以上,为进一步提高数据准确度需增加对矿井其他月份的实测样本数量。

5 结论和建议

5.1 结论

本文采用《IPCC 2006 指南》方法,对中国煤炭逃逸关键排放源井工煤矿开采和矿后活动排放源采用本国特征排放因子法,其他排放源采用缺省排放因子法,计算了2010—2016年中国煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放量,分析了上述期间的排放趋势及排放构成,开展了同其他国家隐含排放因子的对比分析。主要结论如下:

(1)2010—2016年中国煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放量先升后降,最大的排放环节为井工开采。2010年CH₄逃逸排放量为2525万t,考虑到资源环境压力,从2011年开始中国大力调整能源结构,降低煤炭消费比重,从而倒逼煤炭产量于2013年达到峰值,相应地CH₄逃逸排放量也达到峰值2716万t,之后回落到2016年的2269万t。研究期内井工开采、矿后活动、露天开采和废弃矿井环节排放占总排放比重分别为83%、13%、3%和1%,由于井工煤矿瓦斯含量高以及采选一体化水平低,中国井工开采和矿后活动排放比重在产煤大国中位于较高水平。

(2)2010—2016年中国煤炭开采和矿后活动CH₄回收利用量逐年攀升,扣除回收利用量后CH₄净排放量峰值年份前移到2011年。矿井瓦斯是煤矿生产过程中的主要不安全因素,另外瓦斯中的CH₄还是一种优质的清洁能源,有较高的资源利用价值,因此对其回收利用的重视程度不断提升。2010—2016年CH₄回收利用量年均上升17.0%,回

2020年2月

收利用量占总排放量的比重由9.4%上升到26.6%,扣除回收利用量后实际排放到大气中的净CH₄排放量进一步降低。

(3)不同国家本地化隐含排放因子差距较大,中国井工开采实际排放因子可能进一步低于本文研究结果。主要产煤大国的井工开采隐含排放因子范围为0.77~35.76 m³/t,IPCC缺省排放因子范围为10~25 m³/t,中国井工开采隐含排放因子位于IPCC缺省值下限,与其他主要产煤大国相比处于中等偏下水平。本文中国井工开采CH₄排放因子来自于矿井瓦斯等级鉴定,该鉴定需要选择在矿井绝对瓦斯涌出量最大月份测量,因此根据鉴定结果计算得出的排放因子可能高于实际的全年平均值。

(4)从排放源范围、方法选择和排放因子等方面来看,中国煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放清单在非附件I国家中属于领先水平,但同附件I国家相比还存在一定差距。附件I国家均计算了煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放各环节,关键排放源全部采用高层级方法,排放因子采用的本国特征值,非附件I国家很多忽略排放量较低环节如废弃矿井及露天煤矿矿后活动环节,部分非附件I国家还采用IPCC缺省值粗略估算排放量。

5.2 建议

结合目前存在的问题,本文对进一步完善中国煤炭开采和矿后活动CH₄逃逸排放计算提出以下建议:

(1)进一步提升计算范围的完整性。一是未来需新增《IPCC 2006指南》已经提供方法学的露天煤矿矿后活动排放环节计算,二是针对《2006 IPCC 国家温室气体清单指南的2019修订版》最新增补的煤炭地质勘探钻孔后的温室气体逃逸排放、井工及露天煤矿开采过程的CO₂逃逸排放和废弃露天煤矿的温室气体逃逸排放^[46],需提前做好前期研究和技术储备工作。

(2)加强活动水平数据收集。关于中国原煤产量,国家统计局仅提供了总量数据,未详细区分井工矿和露天矿,行业统计仅给出各主要露天煤矿开采企业的煤炭产量,而无全口径数据;关于中国废弃矿井数量,目前关闭时间间隔的划分还较为粗略。因此需加强中国相关统计数据的收集能力,扩大统计数据覆盖面。

(3)深入开展特征排放因子研究。由于中国煤炭开采和矿后活动温室气体排放量大,不同年份矿井开采情况不一,为准确估计温室气体逃逸排放量,需要定期对中国特征因子尤其是井工煤矿的开采和矿后活动因子进行更新。其中井工开采可结合目前的全国瓦斯等级鉴定工作,进一步研究提高样本的代表性,从而更为真实、准确反映中国煤炭开采及矿后活动温室气体的实际排放情况。

此外,虽然自“十二五”以来中国着力调整能源消费结构,煤炭占能源消费总量的比重不断下降,但鉴于中国以煤为主的能源资源禀赋特点和保障能源安全的战略需要,未来一段时期内中国能源生产和消费仍将以煤为主^[47,48]。随着浅部煤炭资源的开采殆尽,深部开采势在必行,未来全国将有更多的煤矿转移至深部。一般来说,矿井的开采深度越深,则煤层的瓦斯含量越高,瓦斯涌出量也越大。因此,煤炭开采和矿后活动排放未来也仍将是中国温室气体排放的重要来源,应作为中国温室气体排放控制的重点领域。为有效控制温室气体排放,降低能源资源浪费和煤炭生产安全隐患,未来应进一步制定完善瓦斯抽采率、瓦斯利用率和瓦斯排放率等强制性标准,上调对煤矿开发利用项目的财政补贴额度,以及加大在低浓度瓦斯利用方面的科研力度,研发高效率利用低浓度瓦斯的技术^[45,49,50]。

参考文献(References):

- [1] IPCC. IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014 [R]. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [2] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007[R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [3] USEPA. Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2030[R]. Washington: Office of Atmospheric Programs Climate Change Division, U. S. Environmental Protection Agency, 2012.
- [4] Scot M M, Anna M M, Robert G D, et al. China's coal mine methane regulations have not curbed growing emissions[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1-8.
- [5] 宫健,崔育倩,谢文霞,等. 滨海湿地CH₄排放的研究进展[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 173-184. [Gong J, Cui Y Q, Xie W X, et al. Advances in research on methane emissions of coastal wetlands[J]. Resources Science, 2018, 40(1): 173-184.]

- [6] The People's Republic of China. Second Biennial Update Report on Climate Change[EB/OL]. (2019-06-25) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/documents/197666>.
- [7] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017. [National Bureau of Statistics. China Energy Statistical Yearbook 2017[M]. Beijing: China Statistical Press, 2017.]
- [8] 王成金, 王伟. 中国港口煤炭进出口格局演变及动力机制[J]. 资源科学, 2016, 38(4): 631-644. [Wang C J, Wang W. Development of import-export coal trade by port on mainland China: Spatial pattern, evolution and dynamics[J]. Resources Science, 2016, 38(4): 631-644.]
- [9] IEA. Key World Energy Statistics[R]. Paris: International Energy Agency, 2018.
- [10] France. National Inventory Report 2019[EB/OL]. (2019-04-02) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/documents/194422>.
- [11] The Institute for Environmental Protection and Research, Italy. National Inventory Report 2019[EB/OL]. (2019-04-05) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/documents/194933>.
- [12] 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(1): 103-106. [Cai Q X, Liu F M, Chen S Z. Calculation method of greenhouse gas emission in open pit coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 103-106.]
- [13] 郑爽. 我国煤层甲烷类温室气体排放及清单编制[J]. 中国煤炭, 2002, 28(5): 37-40. [Zheng S. Methane category Greenhouse Gas discharging in China's coal seam and its inventory drawing[J]. China Coal, 2002, 28(5): 37-40.]
- [14] 郑爽, 王佑安, 王震宇. 中国煤矿甲烷向大气排放量[J]. 煤矿安全, 2005, 36(2): 29-33. [Zheng S, Wang Y A, Wang Z Y. Amount of methane exhausting to atmosphere in coal mines of China[J]. Safety in Coal Mines, 2005, 36(2): 29-33.]
- [15] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2005年中国温室气体清单研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014. [Climate Change Response Division of National Development and Reform Commission. 2005 China Greenhouse Gas Inventory Study[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.]
- [16] 杨永均, 张绍良, 侯湖平. 煤炭开采的温室气体逸散排放估算研究[J]. 中国煤炭, 2014, 40(1): 114-117. [Yang Y J, Zhang S L, Hou H P. The research on the estimation of fugitive greenhouse gas emissions from coal mining[J]. China Coal, 2014, 40(1): 114-117.]
- [17] 李宏军, 胡予红. 中国煤矿甲烷对温室气体贡献量的初步评估[J]. 中国煤层气, 2008, 5(2): 15-17. [Li H J, Hu Y H. Preliminary evaluation on the contribution of CMM to greenhouse gas emissions in China[J]. China Coalbed Methane, 2008, 5(2): 15-17.]
- [18] 王贺礼, 吴亚芬, 范敏, 等. 江西煤炭开采和矿后活动甲烷逃逸排放研究[J]. 江西科学, 2013, 31(3): 321-325. [Wang H L, Wu Y F, Fan M, et al. Study on methane fugitive emissions from coal mining and handling of Jiangxi Province[J]. Jiangxi Science, 2013, 31(3): 321-325.]
- [19] United Nations. United Nations Framework Convention on Climate Change[EB/OL]. (1994-03-21) [2019-12-02]. https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf.
- [20] IPCC. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Kanagawa: The Institute for Global Environmental Strategies, 1996.
- [21] IPCC. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories[M]. Kanagawa: The Institute for Global Environmental Strategies, 2000.
- [22] IPCC. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry[M]. Kanagawa: The Institute for Global Environmental Strategies, 2003.
- [23] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Kanagawa: The Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [24] IPCC. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Wetlands[R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- [25] United Nations. Report of the Conference of the Parties on Its Eighth Session: Decision 17/CP. 8[EB/OL]. (2002-04-29) [2019-12-02]. <http://unfccc.int/resource/docs/cop8/07a02.pdf#page=2>.
- [26] United Nations. Report of the Conference of the Parties on Its Seventeenth Session: Decision 1/CP. 17[EB/OL]. (2011-04-29) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/eng/09a01.pdf#page=39>.
- [27] UNFCCC. Modalities, Procedures and Guidelines for the Transparency Framework for Action and Support Referred to in Article 13 of the Paris Agreement[EB/OL]. (2018-12-15) [2019-12-02]. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2018_3_add2_new_advance.pdf#page=18.
- [28] Department of the Environment and Energy, Australian Government. National Inventory Report 2016[EB/OL]. (2018-04-13) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/documents/65705>.
- [29] Federal Environment Agency, Germany. National Inventory Report 1990-2016[EB/OL]. (2018-04-13) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/documents/65712>.
- [30] The National Centre for Emissions Management, Poland. National Inventory Report 2018[EB/OL]. (2018-05-25) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/documents/65421>.
- [31] Russian Federation. National Inventory Report[EB/OL]. (2018-04-14) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/documents/65719>.
- [32] Department of Environmental Affairs, Republic of South Africa. GHG National Inventory Report 2000-2012[EB/OL]. (2018-2-

2020年2月

- 22) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/documents/66115>.
- [33] United States Environmental Protection Agency. Inventory of U. S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2016[EB/OL]. (2018-04-12) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/documents/65674>.
- [34] Ministry of Environment Protection, Astana. Second National Communication[EB/OL]. (2009-06-04) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/documents/109622>.
- [35] Government of India. Second Biennial Update Report[EB/OL]. (2018-12-31) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/documents/192316>.
- [36] Republic of Indonesia. Second Biennial Update Report[EB/OL]. (2018-12-21) [2019-12-02]. <https://unfccc.int/documents/192165>.
- [37] 马翠梅, 于胜民, 李湘. 中国温室气体清单关键类别分析[J]. 中国能源, 2015, 37(12): 26-32. [Ma C M, Yu S M, Li X. Analysis of key categories of China's greenhouse gas inventories[J]. Energy of China, 2015, 37(12): 26-32.]
- [38] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴(2011-2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011-2017. [Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China Energy Statistical Yearbook (2011-2017) [M]. Beijing: China Statistical Press, 2011-2017.]
- [39] 公告公文. 关于印发《煤矿瓦斯等级鉴定暂行办法》的通知安监总煤装[2011]162号[J]. 国家安全生产监督管理总局国家煤矿安全监察局公告, 2011, (11): 35-42. [Announcement Official Document. Notice on printing and distributing the interim measures for the certification of coal mine gas grades (2011) No. 162 [J]. Announcement of the State Administration of Coal Mine Safety Administration, State Administration of Work Safety, 2011, (11): 35-42.]
- [40] 国家煤矿安全监察局, 国家能源局. 关于印发《煤矿瓦斯等级鉴定办法》的通知[EB/OL]. (2018-04-27) [2019-12-02]. https://www.chinacoal-safety.gov.cn/gk/tzgg/201805/t20180508_204465.shtml. [National Coal Mine Safety Administration, National Energy Administration. Notice on Printing and Issuing the 'Measures for the Identification of Coal Mine Gas Grades' [EB/OL]. (2018-04-27) [2019-12-02]. https://www.chinacoal-safety.gov.cn/gk/tzgg/201805/t20180508_204465.shtml.]
- [41] 国家煤矿安全监察局. 全国煤矿矿井瓦斯等级鉴定资料汇编(2011)[M]. 北京: 国家煤矿安全监察局, 2012. [National Coal Mine Safety Administration. Compilation of National Coal Mine Completion Grade Identification Data(2011)[M]. Beijing: National Coal Mine Safety Inspection Bureau, 2012.]
- [42] 国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[EB/OL]. (2011-03-16) [2019-12-02]. http://www.gov.cn/2011lh/content_1825838.htm. [The State Council. Outline of the 12th Five Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China[EB/OL]. (2011-03-16) [2019-12-02]. http://www.gov.cn/2011lh/content_1825838.htm.]
- [43] 国务院. 大气污染防治行动计划[EB/OL]. (2013-09-10) [2019-12-02]. http://www.gov.cn/zwgg/2013-09/12/content_2486773.htm. [The State Council. Atmospheric Pollution Prevention and Control Action Plan[EB/OL]. (2013-09-10) [2019-12-02]. http://www.gov.cn/zwgg/2013-09/12/content_2486773.htm.]
- [44] 国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[EB/OL]. (2016-03-17) [2019-12-02]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm. [The State Council. The 13th Five-year Plan Outline of the People's Republic of China for National Economic and Social Development[EB/OL]. (2016-03-17) [2019-12-02]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm.]
- [45] 徐东耀, 刘伟, 但海均, 等. 中国煤炭生产甲烷排放现状及对策研究[J]. 绿色科技, 2015, (6): 170-172. [Xu D Y, Liu W, Dan H J, et al. Emission situation of methane caused by coal in China and some countermeasures[J]. Journal of Green Science and Technology, 2015, (6): 170-172.]
- [46] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Kanagawa: The Institute for Global Environmental Strategies, 2019.
- [47] 王妍, 李京文. 我国煤炭消费现状与未来煤炭需求预测[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(3): 152-155. [Wang Y, Li J W. China's present situation of coal consumption and future coal demand forecast[J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(3): 152-155.]
- [48] 国务院. 能源中长期发展规划纲要(2004-2020年) [EB/OL]. (2005-06-30) [2019-12-02]. <http://www.doc88.com/p-163108310769.html>. [The State Council. The Outline of Medium and Long Term Energy Development Plan (2004-2020)[EB/OL]. (2005-06-30) [2019-12-02]. <http://www.doc88.com/p-163108310769.html>.]
- [49] 张跃新. 加大政策扶持力度, 提高瓦斯抽采利用率[J]. 能源技术与管理, 2015, 40(3): 13-15. [Zhang Y X. Increase policy support to improve the utilization rate of gas drainage[J]. Energy Technology and Management, 2015, 40(3): 13-15.]
- [50] 贺玲, 崔琦, 陈浩, 等. 基于CGE模型的中国煤炭产能政策优化[J]. 资源科学, 2019, 41(6): 1024-1034. [He L, Cui Q, Chen H, et al. Policy optimization of coal production capacity in China based on a computable general equilibrium model[J]. Resources Science, 2019, 41(6): 1024-1034.]

Methane fugitive emissions from coal mining and post-mining activities in China

MA Cuimei¹, DAI Erfu^{2,3}, LIU Yichen¹, WANG Yahui², WANG Fang⁴

(1. National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation, Beijing, 100035, China; 2. Lhasa Plateau Ecosystem Research Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Methane (CH₄) is a major greenhouse gas (GHG) after carbon dioxide (CO₂), and coal mining and post-mining activities are the largest sources of CH₄ fugitive emissions in China. It is of great significance for China to prepare high-quality national GHG inventory and formulate targeted GHG emission control measures through the systematic study of coal's fugitive emissions. Following *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, China's 2010-2016 CH₄ emissions from coal mining and post-mining activities were calculated by tier 2 method, that is, the country-specific emission factors, and other sources by tier 1 method, that is, the default emission factors. The trend and composition of CH₄ emissions, and implied emission factors were analyzed. The results show that CH₄ emissions from China's coal mining and post-mining activities rose first and then fell, reaching a peak in 2013, and the largest emission category was coal mining of underground mine, up to 83% of the total emissions when CH₄ recovery was not considered. The average annual increase of CH₄ recovery was 17%, the recovery rate was 27% in 2016, and the highest net emissions after deducting the recycling amount occurred in 2011. There was a large difference between the country-specific implied emission factors, and the country-specific implied emission factor of China was at the lower limit of the default values of the guidelines. The calculation of CH₄ fugitive emissions from coal mining and post-mining activities in China have reached advanced level in non-Annex I countries, but there were still some gaps in emission sources, calculation method, and country-specific emission factors compared with Annex I countries. It is recommended that in the future the integrity of the inventory should be improved, the collection of activity data should be strengthened, an in-depth research on characteristic emission factors should be conducted, and the management and technology level of CH₄ recycle from coal should be improved.

Key words: underground coal mine; surface coal mine; coal mining; post-mining activities; GHG inventory; country-specific emission factor; fugitive emissions; methane