

# 基于全生命周期的煤炭碳排放清单计算与不确定性分析

高俊莲<sup>1,3</sup> 徐向阳<sup>2,3</sup> 郑凤琴<sup>2,3</sup> 霍 冉<sup>2,3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京市海淀区, 100083;

2. 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京市海淀区, 100083;

3. 中国矿业大学(北京)资源与环境政策研究中心, 北京市海淀区, 100083)

**摘 要** 2017 年全国将启动统一碳市场, 对温室气体排放清单的研究能为温室气体排放趋势分析、重要不确定性源的识别、份额的分配和减排方案的设计提供现实依据和技术支持。煤炭作为我国温室气体排放主要贡献者, 对其进行相关研究具有重要现实意义。但目前国内外缺少对行业排放清单的研究, 尤其是煤炭全生命周期的研究。根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》中温室气体排放的核算方法, 运用蒙特卡罗模拟, 计算了煤炭生命周期各环节的碳排放及其生命周期排放清单, 并对温室气体排放的不确定性进行分析。在结果分析的基础上, 对煤炭全生命周期中各个环节提出相关建议。

**关键词** 碳排放清单 蒙特卡罗模拟 不确定性

**中图分类号** TD—9 **文献标识码** A

## Coal carbon emission inventory calculation and uncertainties analysis based on lifecycle analysis

Gao Junlian<sup>1,3</sup>, Xu Xiangyang<sup>2,3</sup>, Zheng Fengqin<sup>2,3</sup>, Huo Ran<sup>2,3</sup>

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, Haidian, Beijing 100083, China;

2. School of Management, China University of Mining and Technology, Beijing, Haidian, Beijing 100083, China;

3. Resources and Environment Policy Research Center, China University of Mining and Technology, Beijing, Haidian, Beijing 100083, China)

**Abstract** China will launch a unified national carbon market in 2017, GHG emissions inventory for greenhouse gas emissions trends analysis, identification of important carbon sources of uncertainty, share distribution and emission reduction program design play important roles in providing realistic basis and technical support. As one of the main contributors of greenhouse gas emissions, coal has important practical significance for its research. However, there is lack of research on industrial emission inventories, especially based on the whole coal lifecycle. Based on the method of accounting for greenhouse gas emissions in the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Monte Carlo simulation was used to calculate the carbon emission in each phase of coal lifecycle and analyze uncertainties of the greenhouse gas emission. Based on the analysis of results, this paper puts forward some suggestions on the whole lifecycle of coal.

**Key words** carbon emission inventory, Monte Carlo method, uncertainty

化石能源由于燃烧过程带来的大量二氧化碳排放, 成为了气候变化领域讨论的焦点。根据国际能

源展望 2016 (IEO2016) 的参考情景, 全球能源相关的二氧化碳排放 2012 年为 323 亿 t, 2020 年

**引用格式:** 高俊莲, 徐向阳, 郑凤琴等. 基于全生命周期的煤炭碳排放清单计算与不确定性分析 [J]. 中国煤炭, 2017, 43 (6): 22—26.

Gao Junlian, Xu Xiangyang, Zheng Fengqin, et al. Coal carbon emission inventory calculation and uncertainties analysis based on lifecycle analysis [J]. China Coal, 2017, 43 (6): 22—26.

及 2040 年将分别会提高到 356 亿 t 和 432 亿 t。最近几十年以来，化石燃料燃烧贡献了二氧化碳排放总量的 90%。煤炭作为碳排放强度最高的化石燃料，在 2012 年占我国化石燃料二氧化碳排放总量的四分之三，2014 年煤炭消费无增长的情况下，我国二氧化碳排放相比 2013 年仅仅增长了 0.9%，年均增长达到近十年最低值。以上说明了煤炭在我国二氧化碳排放清单中的主要贡献，对煤炭相关领域的碳排放进行研究，对我国应对气候变化、减少碳排放等具有重要意义。

目前我国关于温室气体排放清单的相关研究比较多，但尚未出版每年的碳排放估算清单，而且研究大多集中在城市层面，对分行业的温室气体排放研究较少。师华定等的研究提出了我国电力行业温室气体清单编制方法的基本原则，建立符合我国国情的电力行业温室气体清单编制方法体系框架；郑爽在研究中提出了煤层甲烷类温室气体排放清单的编制方法。目前基于生命周期对我国煤炭行业的温室气体排放清单的研究较为缺乏，根据公开文献来看，在排放清单的不确定性上也涉及很少。清单的不确定性分析是完整温室清单的基本组成之一，也是清单数据正确性和完整性的保证。基于此，为了系统全面地估算煤炭产业链温室气体排放，本文建立了基于煤炭全生命周期碳排放清单，并运用蒙特卡罗模拟的方法对其不确定性进行了分析。

1 研究方法

本文在核算煤炭行业温室气体及对计算结果进行不确定性分析时，主要参考的是《IPCC 国家温室气体清单编制指南》和《IPCC 国家温室气体清单优良做法指南和不确定性管理》中的“排放因子乘以活动水平数据”的计算方法，并对其进行蒙特卡罗模拟计算。该指南体系已被许多国家采用，是一套相对完整的温室气体排放理论、排放量估算方法及流程。

2 我国煤炭行业温室气体排放清单研究

煤炭的全生命周期为开采、洗选、运输、转化

和利用。根据碳元素守恒，考虑到数据的可获取性，本文以 2011 年为例，通过计算煤炭开采、运输和利用过程的温室气体排放，估算了煤炭整个生命周期的温室气体排放清单，并对该温室气体排放清单的不确定性进行了分析，以期可以使我国煤炭行业温室气体排放清单数据更加准确，能为其他行业温室气体排放清单的编制以及不确定性分析提供借鉴意义，并能为温室气体排放趋势分析、重要不确定性源的识别、排放的总量控制、份额的分配和减排方案的设计提供现实依据和技术支持。

2.1 煤炭开采环节的温室气体排放

煤炭形成的地质过程会产生甲烷排放，直到在煤炭开采中一些残留在煤层中的瓦斯被释放出来。2011 年我国煤炭开采量为 38.88 亿 t，其中井工开采量为 25.45 亿 t，露天开采量为 13.43 亿 t。《IPCC 国家温室气体清单优良做法指南和不确定性管理》规定，煤炭产量登记吨位有 5% 的误差，因此将井工开采量和露天开采量设置为三角分布，以开采量+5% 为最大值，开采量-5% 为最小值，查到的开采量为最可能值。井工开采的高、中、低瓦斯矿全球平均的甲烷排放系数分别为 16.75 kg/t、12.06 kg/t 和 6.7 kg/t。露天开采的高、中、低瓦斯矿全球平均的甲烷排放系数分别为 2.0 kg/t、1.2 kg/t 和 0.3 kg/t。其排放相关参数如表 1 所示，将其分别设置为三角分布。

煤炭开采环节甲烷的总排放量计算公式为：

$$\text{甲烷总排放量} = \sum_i A_i \times EF_i \times GWP \quad (1)$$

式中： $A_i$ ——第  $i$  种开采方式的活动水平；  
 $EF_i$ ——第  $i$  种运输方式的排放因子；  
 $GWP$ ——温室气体的全球增温潜势，其中二氧化碳的全球增温潜势值为 1，甲烷的全球增温潜势值为 21，一氧化二氮的全球增温潜势值为 275。

利用 Crystal Ball 软件进行 4000 次蒙特卡罗仿真计算可得到煤炭开采环节甲烷的总排放量为 8526.67 万 t，95% 的置信区间为（4783.05，12502.50）。

表 1 煤炭开采环节甲烷排放相关参数

	活动水平/万 t			排放因子/kg · t <sup>-1</sup>		
	最可能值	最大值	最小值	最可能值	最大值	最小值
井工开采	254502.74	267227.88	241777.60	12.06	16.75	6.70
露天开采	134321.23	141037.29	127605.17	8.04	13.40	2.01

2.2 煤炭运输环节的温室气体排放

我国煤炭的运输主要依靠铁路、公路和水路。在我国铁路煤炭运输中，铁路机车主要有内燃机车和电力机车，分别消耗燃料油和电力。电力是二次能源消耗，因此计算中只考虑内燃机车，其燃油基本以柴油为主。公路煤炭运输中，一般用 20 t 及以上中重型卡车进行运输，几乎 100% 为柴油车。煤炭水路运输，从游艇到大型远洋货船，也主要是由柴油发动机驱动。

2011 年我国铁路运煤量为 22.7 亿 t，铁路煤炭平均运距为 645 km，因此，铁路煤炭的周转量为 14643.177 亿 t·km，其中，内燃机车占 53.6%，电力机车占 46.4%，由此得出，内燃机

车煤炭周转量为 7848.74 亿 t·km。铁路运输中内燃机车耗油 26.8 kg/万 t·km，所以铁路运输消耗柴油量为 2103463.10 t。2011 年我国煤炭公路货运量为 3.5 亿 t，公路煤炭平均运距为 250 km，因此，公路煤炭的周转量为 875 亿 t·km。公路运输耗油量 600 kg/万 t·km，所以公路运输消耗柴油量为 525 万 t。2011 年我国煤炭水路货运量为 6.5 亿 t，水路煤炭平均运距为 1768.75 km，因此，水路煤炭的周转量为 11496.88 亿 t·km。水路运输耗油量 21.5 kg/万 t·km，所以水路运输消耗柴油量为 247.18 万 t。各种温室气体的排放因子采用 IPCC（2006）中的缺省值，如表 2 所示。

表 2 煤炭运输环节活动水平和排放因子参数

	柴油活动水平/t			二氧化碳排放因子/kg·t <sup>-1</sup>		
	最可能值	最小值	最大值	缺省值	最小值	最大值
铁路运输	2103463.09	1998289.94	2208636.24	3211.92	3146.90	3242.26
公路运输	5250000	4987500	5512500	3211.92	3146.90	3242.26
水路运输	2471828.13	2348236.72	2595419.53	3211.92	3146.90	3242.26
	甲烷排放因子/kg·t <sup>-1</sup>			一氧化氮排放因子/kg·t <sup>-1</sup>		
	缺省值	最小值	最大值	缺省值	最小值	最大值
铁路运输	0.18	0.07	0.45	1.24	0.62	3.72
公路运输	0.17	0.07	0.41	0.17	0.06	0.52
水路运输	0.30	0.15	0.46	0.09	0.05	0.21

根据 IPCC（2007）的推荐，煤炭运输环节耗油甲烷排放量的计算公式为：

$$E = \sum_i \sum_j A_i \times EF_{ij} \times GWP_{ij} \quad (2)$$

式中：E——煤炭温室气体排放量；

A<sub>i</sub>——第 i 种燃料的活动水平；

EF<sub>ij</sub>——第 i 种燃料第 j 种温室气体的排放因子；

GWP<sub>ij</sub>——第 i 种燃料第 j 种温室气体的全球增温潜势。

利用 Crystal Ball 软件进行 4000 次蒙特卡罗模拟可得到煤炭运输环节的温室气体排放量，结果如表 3 所示。

2.3 煤炭利用环节的温室气体排放

在煤炭温室气体排放清单中，煤炭燃烧是温室气体的主要来源，根据排放因子的可获得性，煤炭消费环节的温室气体排放核算过程中采用了《IPCC 国家温室气体清单编制指南》推荐的参考方法和国家统计局公布的最新排放系数。将统计年鉴

提供的数据作为三角分布中的最可能值，+5% 上限值作为最大值，-5% 下限值作为最小值。煤炭各活动水平数据如表 4 所示。

表 3 煤炭运输环节各种温室气体排放当量值 万 t

	二氧化碳 排放总量	甲烷 排放总量	氧化亚氮 排放总量	总排放量
计算值	3142.88	5.28	168.25	3328.35
最小值	2989.98	2.55	69.17	3096.73
最大值	3300.89	8.09	297.38	3574.06

表 4 2011 年我国煤炭消费数据的三角分布 万 t

	原煤	洗精煤	型煤	焦炭	其他洗煤
最可能值	346799.81	49101.65	1019.20	38163.29	11962.94
最小值	329459.82	46646.57	968.24	36255.13	11364.79
最大值	364139.80	51556.73	1070.16	40071.45	12561.09

根据 IPCC（2006）建议，本文温室气体排放因子采用中国工程院所提供的排放因子作为计算的依据，具体数据如表 5 所示。

表 5 煤炭各排放因子

kg/t

	二氧化碳排放因子			甲烷排放因子			氧化亚氮排放因子		
	缺省值	最小值	最大值	缺省值	最小值	最大值	缺省值	最小值	最大值
原煤	2.009	1.9086	2.10945	20.908	19.86	21.953	31.362	29.794	32.93
洗精煤	2.531	2.4045	2.65755	26.344	25.03	27.661	39.516	37.54	41.492
其他洗煤	1.004	0.9538	1.0542	10.454	9.93	10.977	15.681	14.897	16.465
型煤	1.689	1.6046	1.77345	17.584	16.70	18.463	26.376	25.057	27.695
焦炭	3.044	2.8918	3.1962	28.435	27.01	29.857	42.653	40.52	44.786

煤炭利用环节温室气体排放总量的计算公式为：

$$E = \sum_i \sum_j A_i \times EF_{ij} \times GWP_{ij} \tag{3}$$

式中： $E$ ——煤炭温室气体排放量；  
 $A_i$ ——第  $i$  种煤的活动水平；  
 $EF_{ij}$ ——第  $i$  种煤第  $j$  种温室气体的排放因子；  
 $GWP_{ij}$ ——第  $i$  种煤第  $j$  种温室气体的全球增温潜势。

利用 Crystal Ball 软件进行 4000 次仿真计算可得到煤炭消费环节的温室气体排放量，结果如表 6 所示。

表 6 煤炭消费环节各种温室气体排放当量值 万 t

	二氧化碳 排放总量	甲烷 排放总量	氧化亚氮 排放总量	总排 放量
计算值	951467.08	205.24	403022.78	1356723.59
最小值	884349.76	190.65	375227.33	1266139.84
最大值	1023140.33	220.12	434125.40	1442211.43

2.4 煤炭行业温室气体排放总量

我国煤炭行业温室气体排放总量等于煤炭开采环节、煤炭运输环节和煤炭利用环节所产生的温室气体总和，具体结果如图 1 所示。

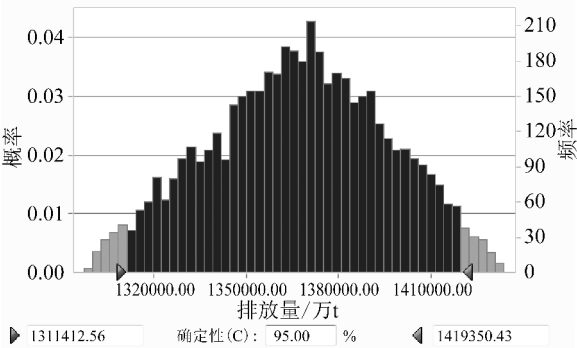


图 1 煤炭行业温室气体总排放量模拟频率视图

由上述模拟结果可以看出，2011 年我国煤炭行业温室气体总排放量为 1367186.72 万 t，95% 的基于全生命周期的煤炭碳排放清单计算与不确定性分析

置信区间为（1297537.98，1433468.58）。

3 不确定性分析

不确定性估算是一个完整排放清单的基本要素之一。在清单编制过程中，活动水平的确定及排放因子的测算等存在着诸多不确定因素，通过进行不确定性分析可以为确定未来改进清单准确性的优先努力方向提供帮助并指导有关方法学选择的决策。IPCC 制定的《国家温室气体清单优良做法指南和不确定性管理》统一了各国编制清单中对不确定性量化的方法。

本文利用 Bootstrap 方法，对各源类别温室气体排放量的不确定性进行了分析。在对每组模型输入自展抽样时，抽样分布为代表该源类别模型输入的概率分布模型。每次抽取 4000 个随机样本，计算其平均值。重复 4000 次，得到 4000 个代表该模型输入的平均值，这 4000 个平均值描述了该模型输入（排放因子和活动水平）的不确定性分布。不确定性上限为（97.5 分位数－平均值）/平均值×100%，下限为（2.5 分位数－平均值）/平均值×100%，其结果如表 7 所示。

由表 7 可知，煤炭开采环节温室气体清单的不确定性较大，其绝对值大于 40%，主要原因是输入排放因子的不确定性较大及活动水平的不确定性，其传播至开采环节的温室气体总排放量，导致该环节的温室气体清单不确定性偏大。

虽然煤炭运输环节的甲烷和氧化亚氮排放量的不确定性很大，但煤炭运输环节温室气体总排放量的不确定性较低，主要是因为煤炭运输环节甲烷与氧化亚氮的排放量较小，对总体的不确定性影响较小。

由该计算结果可知，我国 2011 年煤炭温室气体排放清单总的不确定性为（－5.09%，4.85%），不确定性较低，表明该煤炭温室气体清单可较准确地反映我国 2011 年煤炭温室气体排放情况。



表 7 煤炭温室气体排放不确定性分析

环节	温室气体类型	平均值/万 t	2.5%分位点/万 t	97.5%分位点/万 t	不确定性/%
煤炭开采	甲烷	8526.67	4783.05	12502.50	(-43.90, 46.63)
	开采总排放	8526.67	4783.05	12502.50	(-43.90, 46.63)
煤炭运输	二氧化碳	3142.88	2989.98	3300.88	(-4.87, 5.03)
	甲烷	5.28	2.55	8.10	(-51.72, 53.18)
	氧化亚氮	168.25	69.17	297.38	(-58.89, 76.75)
	运输总排放	3328.35	3096.73	3574.06	(-6.96, 7.38)
煤炭利用	二氧化碳	951467.08	899598.69	1007308.23	(-5.45, 5.87)
	甲烷	205.24	193.92	216.80	(-5.52, 5.63)
	氧化亚氮	403022.78	381611.06	427324.76	(-5.31, 6.03)
	利用总排放	1356723.59	1286040.00	1422731.59	(-5.21, 4.87)
温室气体总排放		1367186.72	1297537.98	1433468.58	(-5.09, 4.85)

4 结语

本文研究的煤炭温室气体排放清单，是指一定时期内（通常为一年）记录和报告一国范围内因煤炭开采、运输和利用环节而产生的二氧化碳、甲烷和氮氧化物排放的详细列表。以 2011 年我国煤炭开采、运输和利用等环节的数据为基础，利用蒙特卡罗技术编制了我国煤炭温室气体排放清单，并进行了不确定性分析。

（1）矿井瓦斯的排放和煤层气开采是造成采选环节温室效应气体排放的最主要原因。提高矿井瓦斯综合利用率是减少温室效应气体排放的主要途径，严格控制高瓦斯矿井、瓦斯突出矿井煤炭生产，不仅是实现煤炭去产能的重要手段，更有助于减少煤炭开发的碳排放。

（2）在煤炭清单编制过程中，煤炭开采环节温室气体排放的不确定性范围为（-43.90，46.63），煤炭运输环节温室气体排放的不确定性范围（-6.96，7.38），煤炭利用环节温室气体排放的不确定性范围（-5.21，4.87），说明煤炭开采环节的不确定性较高，主要来源于排放因子和活动水平的不确定，加强对煤炭开采环节温室气体数据的收集是增强排放清单准确性的关键。

（3）煤炭的利用环节是煤炭全生命周期中温室气体排放最大的环节，占整个生命周期的 99%，煤炭利用过程中不同的煤种意味着碳排放水平不同。因此，应提高对优质煤的开发利用，提高利用过程中煤炭使用效率。

（4）考虑到数据的可获得性，在煤炭开采环节未

能考虑由于煤炭开采后复垦带来的土地利用变化引起的碳排放量变化，主要体现在森林和其他木质生物质生物量碳贮量变化，今后应加强对煤炭开采过程中土地利用变化带来的温室气体效应的计算和统计。

参考文献：

[1] Bala G. Digesting 400 ppm for global mean CO<sub>2</sub> concentration [J]. Current Science, 2013 (11)

[2] 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 (5)

[3] 王小辉, 陈报章, 张慧芳. 省级碳清单不确定性分析——基于陕西省 2000—2012 年碳排放测算 [J]. 干旱区资源与环境, 2015 (7)

[4] 孙振清, 汪国军, 陈亚男. 基于能源平衡表的碳排放清单核算不确定性分析 [J]. 生态经济 (中文版), 2015 (7)

[5] 王雅捷, 何永. 基于碳排放清单编制的低碳城市规划技术方法研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2015 (6)

[6] 师华定, 齐永青, 梁海超等. 电力行业温室气体排放核算方法体系研究 [J]. 气候变化研究进展, 2010 (1)

[7] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012

[8] 铁道部统计中心. 中华人民共和国铁道部 2011 年铁道统计公报 [J]. 中国铁路, 2012 (4)

作者简介：高俊莲（1985—），女，博士，中国矿业大学（北京）地球科学与测绘工程学院博士后，资源与环境政策研究中心技术负责人，主要从事能源系统建模研究。

（责任编辑 宋潇潇）