中国科学: 地球科学 2018 年 第 48 卷 第 7 期: 878 ~ 887
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

中国二氧化碳排放数据核算

刘竹[1,2,3], 关大博[3*], 魏伟[4†]

1. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084;
2. Belfer center for science and international affairs, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA;
3. Tyndall Centre for Climate Change Research and School of International Development, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, UK;
4. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210
* 通讯作者, E-mail: dabo.guan@uea.ac.uk
† 通讯作者, E-mail: weiwei@sari.ac.cn

收稿日期: 2017-01-09; 收修改稿日期: 2017-09-25; 接受日期: 2018-01-09; 网络版发表日期: 2018-06-14
科技部重点研发计划项目(编号: 2016YFA0602604)、国家自然科学基金项目(批准号: 41501605、41629501)和中国科学院战略先导专项项目(编号: XDA05010000、XDA05020000、XDA05030000、XDA05040000)资助

摘要 中国已成为世界上最大的化石能源消费国和CO_2排放国, 准确估计中国CO_2排放量对中国制定国家减排政策和全球应对气候变化行动至关重要. 自2011年开始中外20多个研究机构组成的联合研究团队开展了中国CO_2排放数据的核算工作, 系统量化了中国能源消费CO_2排放的不确定性, 并根据实测排放因子构建了中国碳排放清单. 研究结果表明, 由于中国原煤的灰分含量较高(2012年原煤平均灰分含量约27%), 同年份煤质热值和含碳量显著低于国际平均水平, 中国原煤热值与含碳量比联合国统计建议值低40%, 灰分含量比国际平均水平高15%, 国际碳排放数据库普遍高估中国CO_2排放总量10%以上. 其研究结果认为中国CO_2排放量在2000~2013年间比国际组织相关估计少106亿吨, 此修正量大于中国同期陆地总的碳汇吸收总量(95亿吨CO_2), 是京都议定书框架下具有强制减排义务的西方发达国家自1994年以来实际减排量的近百倍. 该研究的主要成果发表后受到广泛关注, 同时该研究提供的相关数据已被中国官方参考用于中国第三次气候变化国家信息通报的编制中, 为中国低碳发展提供数据支持.

关键词 碳排放估算, 能源消费数据, 中国

1 CO_2核算研究背景和中国国情

人类活动排放以CO_2为主的温室气体造成的全球气候变化是人类社会发展的巨大挑战. 为应对气候变化和实现可持续发展, 世界各国协作自20世纪末开始制定了《京都议定书》、《巴黎协定》等一系列全球性的减排协议. 能源活动(主要指化石能源消费和水泥生产)是最主要的CO_2人类活动排放源, 其排放量占人类活动温室气体排放总量的80%(Solomon, 2007). 因此, 准确可靠的能源活动CO_2排放数据是减排政策和目标制定的基准, 对碳排放和减排的相关研究和政策制定至关重要. 而中国作为世界上最大的发展中国家,

中文引用格式: 刘竹, 关大博, 魏伟. 2018. 中国二氧化碳排放数据核算. 中国科学: 地球科学, 48: 878–887, doi: 10.1360/N072017-00009
英文引用格式: Liu Z, Guan D B, Wei W. 2018. Carbon emission accounting in China (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 48: 878–887, doi: 10.1360/N072017-00009

© 2018 《中国科学》杂志社

2007~2009年左右成为世界上最大的化石能源消费国和CO_2排放国(Guan等, 2009), 并且CO_2排放量持续快速增长, 在2007~2012年间中国对全球碳排放增长的贡献超过50%, 当前中国的化石能源和水泥生产的CO_2排放量占全球的25%左右.

另一方面, 中国的国家体量、经济和工业地位也决定了中国将在气候变化的国际行动中发挥重要作用. 中国政府将应对气候变化和开展可持续发展作为国家战略, 制定了在2030年碳排放强度(单位GDP碳排放量)比2005年降低60%的相对减排指标(国家发展和改革委员会, 2016), 并承诺在2030年左右实现CO_2排放总量的峰值(http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2014/11/11/us-china-joint-announcement-climate-change).

中国是当前世界上最大的化石能源生产国、消费国和CO_2排放国, 与世界上其他国家相比, 中国的能源消费和CO_2排放具有一系列典型特点:

(1) 中国的能源结构和消费量变化快、CO_2排放量总量大, 2002~2014年间增长迅速, 2014年后增长速度变缓. 2002~2013年内化石能源消费量保持着5%以上的高速增长, 使得中国2000年以后的CO_2排放量猛增, 当前中国的碳排放量是2000年左右排放总量的近3倍. 中国目前超过美国成为碳排放总量第一的国家, 目前中国碳排放总量已经超过美国总量的50%(Le Quéré等, 2015).

(2) 中国的能源消费量以煤为主, 燃烧效率差异显著. 煤炭消费量占化石燃料消费量的70%(国家统计局, 2015). 工业和火力发电用煤是最大的能源消费部门(Shan等, 2016a), 而中国的燃煤锅炉类型和技术水平多样且差异极大, 例如中国超大型钢铁厂和发电厂的燃煤锅炉燃烧效率(氧化率水平)已经达到世界顶级(氧化率近100%, 接近完全氧化), 但与此同时, 中国的工业用煤占总用煤量的40%(国家统计局, 2015), 各企业特别是中小企业的锅炉燃烧效率较低, 多样化的工业生产过程导致了燃烧效率参差不齐. 与之相比较, 西方发达国家例如美国的化石燃料以石油为主, 品质相对稳定, 并且西方国家由于主要制造业都已转移至发展中国家, 其90%以上的燃煤都被用于火力发电, 效率高且稳定(美国氧化率平均为98%)(Boden等, 2015).

(3) 中国作为发展中国家统计基础相对薄弱, 统计系统尤其是能源统计尚不完备. 比如, 中国的能源消费总量从生产端角度的消费量统计(利用产量和进出口量估算消费量)与消费端的消费量统计在煤等重要能源类型中差异达15%以上. 而2000~2013年间, 中国能源统计年鉴中各省加总的能源消费量也比国家报告的能源消费总量高20%(Guan等, 2012), 体现出当前统计体系的不完善并存在较大的系统误差.

中国能源和碳排放系统的特点决定了中国当前的碳排放核算仍然存在很大的不确定性. 作为京都议定书的缔约国中国政府发布了1994年和2005年国家温室气体排放清单(国家发展和改革委员会, 2004, 2013)(2005年的排放量仅占现今排放量的一半), 而2005年后的排放数据则多半由国际相关组织发布, 如美国橡树岭国家实验室CO_2分析中心(CDIAC)(Boden等, 2015), 全球排放数据库(EDGAR)(Olivier等, 2013), 世界银行(World Bank)、美国能源情报署(EIA)(EIA, 2016)和国际能源署(IEA)(IEA, 2013). 不同国际机构估算结果之间有很大差异, 2011年差异高达23.85%(图1). 由图1可知, 各研究机构对中国时间序列的碳排放总量在2006年后的估算差异显著, 国际机构对中国排放的估算普遍较高. 这些国际机构大多依据政府间气候变化专门委员会(IPCC)方法(Eggleston等, 2006; Houghton等, 1997)和能源统计数据进行估算, 由于IPCC所建立的方法学和排放因子是基于20世纪90年代左右西方国家工业系统的经验和统计数据设计, 其经验因子和数值并不适用于中国实际情况. 近年来, 国际政治、舆论和学术圈频繁报道中国碳排放问题并引起学术界和公众的广泛关注, 然而, 这些结论主要由西方国家科研及政府机构发布, 基础数据不透明, 核算方法和参数多依赖于西方标准, 对中国排放的估计本身也存在较高的不确定性(图1). 从全球可持续发展及中国战略的角度, 急需开展公开透明的中国碳排放核算工作.

2 CO_2排放量核算方法

国家CO_2排放量核算是实施减排措施、制定国家减排战略并进行国际核查和评估的基础. 然而, CO_2本身并不属于大气污染物, 在国际上并没有通用的检测体系. 为此, 以IPCC等为主的国际机构制定了通过含碳的化石能源消费量和能源本身的碳含量估算国家CO_2排放量的方法(Eggleston等, 2006), 并被全世界广泛使用, 如式(1)所示.

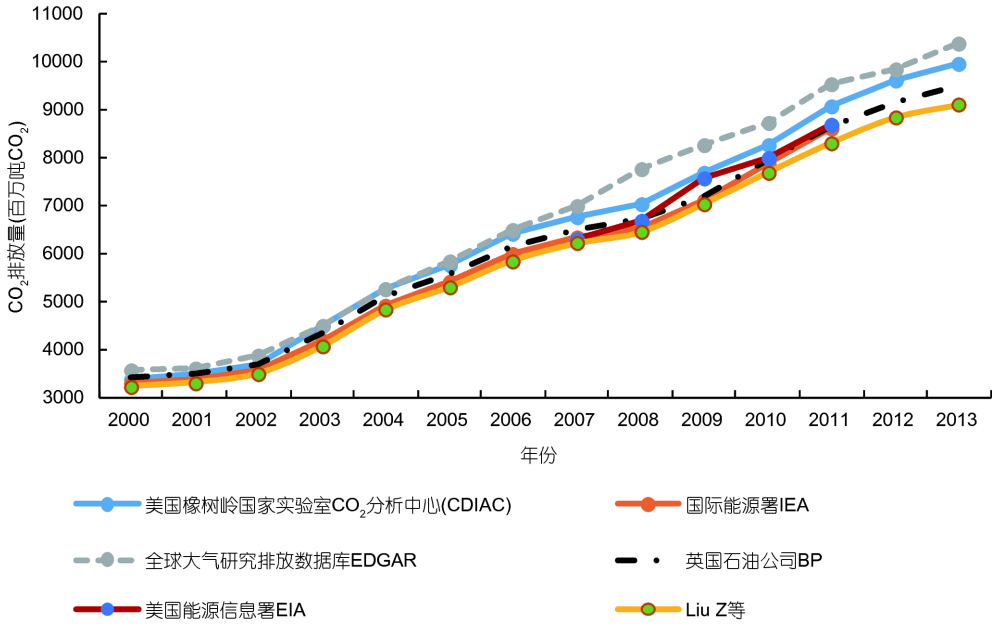

图 1　不同研究机构估算排放量对比图

数据来源: 美国橡树岭国家实验室CO_2分析中心CDIAC(CDIAC, 2015), 国际能源署IEA(IEA, 2015), 全球大气研究排放数据库EDGAR(European Commission, 2015), 英国石油公司BP(BP statistical review of world energy, 2014, http://www.usaee.org/usaee2013/submissions/presentations/SR%202013%20US%20events.pdf), 美国能源信息署EIA(EIA, 2016), Liu Z等(2015). 国际能源署IEA(表观消费法)的数据不包括水泥生产过程的CO_2排放

$$\begin{aligned}&\text{化石能源碳排放量}\\&=\text{活动数据（能源消费量）}\times\text{碳排放因子}\\&\text{(能源中的碳含量)}.\end{aligned}\tag{1}$$

由于碳排放因子跟能源燃料的质量、属性以及燃烧时的效率有关, 碳排放因子又可以进一步分解为

$$\begin{aligned}&\text{碳排放因子}\\&=\text{燃料热值}\times\text{单位热值碳含量}\\&\times\text{氧化率水平(燃烧效率)}.\end{aligned}\tag{2}$$

从而, 化石能源碳排放可以通过式(3)估算.

$$\begin{aligned}\text{化石能源碳排放量}=&\text{活动数据}\times\text{燃料热值}\\&\times\text{单位热值碳含量}\\&\times\text{氧化率水平}.\end{aligned}\tag{3}$$

水泥生产过程的CO_2排放核算的原理与化石能源消费碳排放类似, 如式(4)所示:

$$\begin{aligned}\text{工业过程碳排放量}=&\text{活动数据(工业产品产量)}\\&\times\text{碳排放因子}.\end{aligned}\tag{4}$$

从计算公式中可知, CO_2排放估算量的不确定性主要来自于两方面, 即活动水平数据(能源消费量、工业产品产量)和碳排放因子. 针对这两个方面, 由哈佛大学、中国科学院等多个国际研究机构的研究人员自2011年起在中国科学院战略先导专项“应对气候变化碳收支认证及相关科学问题”等多个科研基金支持下开展基于实测的中国碳排放核算工作. 该研究工作通过生产端数据重新核算了中国能源消费量, 并且实测了中国化石燃料燃烧和水泥生产过程的排放因子. 其实测研究针对中国当前的能源和碳排放特点, 采集中国各种能源样品20000余组, 分析15000余组, 样品数量代表中国化石能源消耗量的95%以上. 以不确定性最高的煤的CO_2排放量核算为例, 具体过程步骤如下.

2.1　通过生产端数据重新核算能源消费量

由先前讨论可知, 中国自身报告的能源消费量存在相当的系统误差, 包括统计口径(规模以上和规模以下企业的能源消费量)不明确以及不同出处的能源消费总量不一致的问题. 为此, 本研究从生产端重新核算能源消费量(表观能源消费核算方法), 如式(5)所示.

$$\begin{aligned}&\text{当年表观能源消费量}\\&=\text{当年本地一次能源生产量}\\&+\text{当年一次能源进口量}\\&-\text{当年一次能源出口量}\\&-\text{当年能源库存量}.\end{aligned}\tag{5}$$

利用生产端数据的表观能源消费量算法与IPCC的参考方法[1)]在能源消费总量数值上是相同的, 但其核心目的和本质并不相同. 以煤为例, 本研究从生产端采用表观消费量算法的核心目的是为了将不同煤种、煤质和来源的煤的产量和排放因子加权平均, 从而得到国家平均的排放因子(与不同煤种的消费量和消费结构对应). 这一算法是目前较为完善的考虑了包括进口煤种和本地生产煤种煤质差异的碳排放核算方法. 而IPCC方法中的参考方法是在分部门能源消费数据不全的情况下, 对区域总体能源消费量的简化估计, IPCC方法中, 无论是参考方法还是部门方法, 都不能很好的解决由于不同种类的煤消费结构的变化导致国家总体的排放因子变化的问题. 而采用实测方法通过测试不同煤矿的煤质碳含量和煤产量, 可以较好的估计国家当年的总体排放因子, 将能源消费量和具体的排放因子对应起来.

相对于目前多数方法从消费端核算能源消费量, 从生产端计算能源消费量可提高数据的准确度和可靠性, 其原因在于: (1) 经过数年中小煤矿整改关停, 年产量在3万吨以下的小煤矿已经全部关停, 目前全国运作的近5000个煤矿绝大多数已归为国有, 其产量的统计相对于全国成千上万种消费端而言更为可靠, 并有相应健全的数据追踪系统. (2) 表观消费量方法只核算一次能源(原煤、石油、天然气)和直接进口用于燃烧的焦炭等, 这样避免了在能源多次转化、洗选等过程中产生的漏算和重复计算. (3) 由于燃烧锅炉等消费端通常将不同来源和排放因子(如进口和本地生产的)煤等混合在一起燃烧, 而国家尺度上的能源消费由于众多消费端的技术效率和燃料来源多种多样, 其实际的平均排放因子难以估计. 从消费端仅能利用专家估计的排放因子平均值估算碳排放总量, 而生产端则可以根据不同煤种的产量和对应的排放因子加权得到总体煤消费量的加权平均排放因子. 从而可以结合实测的煤种核算出国家总体能源消费的碳排放量.

2.2　通过两套基于煤矿实测的煤质样本数据核算不同煤质煤种的碳排放因子

据相关统计中国目前有煤矿近5000个, 分布于全国24个煤矿基地的100余个主要矿区(State Administration of Coal Mine Safety, 2013), 本研究收集了全国范围内覆盖所有煤矿基地和矿区的4243个煤矿的产量、储量、运营及开采数据(图2), 同时中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”项目调查、实测了覆盖全部矿区类型的602组煤矿样点. 其采样点的煤矿覆盖中国16种主要的煤质类型, 采样点和调研的煤矿产量代表全国99%(2012年)的煤产量.

通过对煤的净热值、含碳量、灰分、硫分、有机分以及水分的测定, 研究团队系统地估算了中国在各种类型的煤产量加权条件下的国家平均排放因子, 由于中国的煤炭消费有10%来自于进口(2012年), 本研究还通过海关数据和国际能源署、联合国统计署的相关统计首次对进口煤的煤质和煤消费量进行了加权. 国家平均排放因子的核算公式简单表示为式(6).

$$\begin{aligned}&\text{国家平均排放因子}=\sum(\text{特定煤种的消费量}\\&\times\text{特点煤种的排放因子})\\&/\text{总消费量}.\end{aligned}\tag{6}$$

为保证研究的可靠性, 本研究采用两套独立样本(4243个煤矿数据和602个矿点采样数据), 通过计算在1km×1km地理位置范围内两套独立样本的排放因子的标准差来评价研究的可靠性和一致性, 其结果表明两套独立样本中有104个样本位于相同的1km×1km地理栅格中, 其排放因子的不确定性(2倍标准差)为7.4%, 远小于目前大多数关于中国碳排放的不确定性估计(10~20%), 显示了本研究较高的可靠性和一致性.

2.3　通过水泥熟料的产量统计和工厂实地样点测定核算水泥生产过程的排放因子

水泥熟料生产会分解碳酸钙和碳酸镁释放CO_2,

1) IPCC推荐的碳排放核算方法中有参考方法和部门方法两类, 参考方法是过国家能源消费总量来估算二氧化碳排放量, 其能源消费总量为能源生产量、进出口和库存量的差值. 部门方法是根据分部门的能源消费量分别核算分部门的二氧化碳排放量, 加总后获得国家整体的碳排放量.

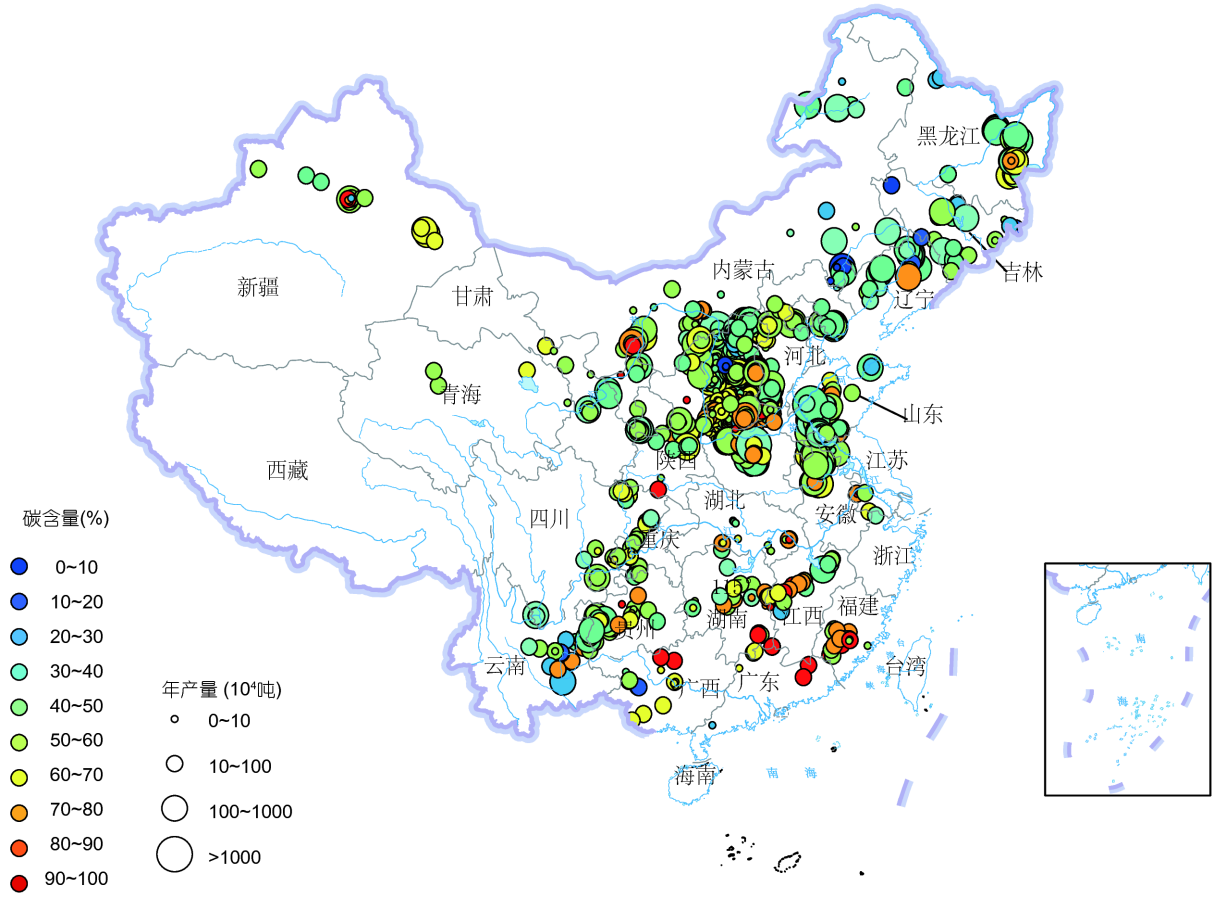

图 2　4243个煤矿样点的产量和对应产煤的含碳量

源数据采用自Liu Z等(2015)

因此水泥熟料产量是估算水泥生产过程碳排放的直接数据，中国科学院地理科学与资源研究所沈镭研究员领导的研究团队开展了全国范围内的水泥统计数据调查以及大样本的水泥生产线的实测，获得了详尽的水泥生产过程的碳排放因子及相关系数，本研究直接引用其结果，相关论文见参考文献(Shen等, 2014; 沈镭等, 2016).

3　主要研究结论

(1) 中国全国产量加权平均后的燃煤质量较差, 实际煤质热值、含碳量排放因子远低于国际平均值. 中国产的16种煤的平均热值(20.95PJ Mt^{-1})及各煤质产量加权后的热值(20.6PJ Mt^{-1})远低于IPCC清单指南中的缺省值. 单位热值碳含量(26.59tC TJ^{-1}, 或产量加权后26.32tC TJ^{-1})与IPCC缺省值接近，煤的平均氧化率(92%)低于IPCC推荐值(98~100%).

实测中国产原煤的燃烧(低位)热值的直方图如图3所示，其平均值为20.95PJ Mt^{-1}(90%置信区间的上下限13.64~28.26PJ Mt^{-1})，与之相比较，联合国统计署推荐的煤热值为29.3PJ Mt^{-1}, IPCC推荐值根据煤种不同，其主要为28.2PJ Mt^{-1}(炼焦烟煤)、26.7PJ Mt^{-1}(无烟煤)和25.8PJ Mt^{-1}(一般烟煤). 根据表1可知, 实测得到的中国原煤热值远小于世界上其他主要产煤国家，并且低于国际数据库的平均值.

基于实测的中国煤种单位热值含碳量直方图(图4)显示，中国单位热值煤的含碳量平均值26.59tC TJ^{-1}与IPCC推荐值25.8tC TJ^{-1}的差异在2%以内，这一结果表明中国产原煤与世界其他国家煤并无本质上的属性差异, 而其热值差异是由于煤质中杂质较多, 造成煤质

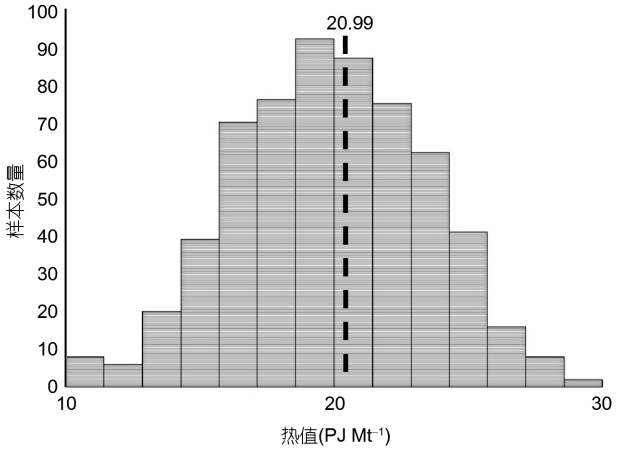

图 3　基于实测样本的中国煤质热值直方图

源数据采用自Liu Z等(2015)

的含碳量低. 本研究实测了中国煤质的灰分含量, 其结果佐证了这一推断. 602组实测煤样数据表明, 中国煤质的灰分含量为26.91%, 而与之相对应的美国国家地质调查局提供的美国全国煤样数据的平均值为14%.

(2) 中国燃煤的燃烧技术类型多样, 平均燃烧效率低, 氧化率低于国际数据库推荐值. IPCC以西方发达国家经验和技术水平为基准, 其煤炭90%用于火力发电燃烧, 火力发电具有较高的燃烧效率和氧化系数(接近100%). 然而根据中国能源统计年鉴, 2012年中国的煤炭使用仅有40%作为火力发电使用, 其余大部分用于各类工业锅炉燃料, 由于中国工业技术水平多样, 且不同行业不同地区燃烧技术和锅炉规模差异巨大, 利用2012年中国第二次气候变化信息通报中的调查数据(相关数据也被用作于2008年中国第二次气候变化国家信息通报中的温室气体排放清单)综合调查135种主要燃烧技术后加权得到中国平均的燃煤氧化系数为92%[2)], 与IPCC推荐的98%差异明显. 油品和天然气的氧化系数经核算与IPCC推荐值无明显差异.

与国际数据库的氧化率水平对比(表2)可知, 国际数据库在碳排放核算中普遍高估中国燃煤的氧化率水平.

(3) 中国的水泥品质与其他国家的水泥品质显著不同, 由于较低的水泥熟料比, 中国水泥排放因子比IPCC推荐值低近45%. IPCC1996年清单指南基于波特兰水泥测算出水泥熟料比为95%, 而由于中国国家统计年鉴未直接公布水泥熟料产量, 国际碳排放数据库采用水泥产量和IPCC默认的水泥熟料比来估算中国

表 1　中国与其他主要产煤国家及国际机构的全球煤热值对比[a)]

国家	煤热值(GJ t^{-1})	国家	煤热值(GJ t^{-1})
中国(本研究实测值)	20.95	意大利	27.33
中国(联合国报告数据值)	21.4	日本	25.91
联合国原煤推荐值	29.3	荷兰	25.39
IPCC炼焦原煤	28.2	新西兰	28.30
IPCC无烟煤	26.7	挪威	28.10
IPCC一般烟煤	25.8	巴基斯坦	29.10
IPCC次烟煤	18.9	俄罗斯	25.07
IPCC褐煤	11.9	西班牙	24.13
阿根廷	30.15	瑞典	28.86
巴西	30.54	瑞士	28.10
加拿大	28.30	土耳其	27.04
法国	27.05	英国	25.70
德国	26.65	美国	26.07
匈牙利	29.70	乌拉圭	29.31
印度	26.70		

2) 气候变化第二次国家信息通报中使用的中国煤燃烧的平均氧化率为94%, 本研究从煤的生产端估算消费量, 计算氧化率时要考虑1~2%(根据实测)的运输过程中的煤总量损失, 因此选择92%作为中国煤燃烧的平均氧化率.

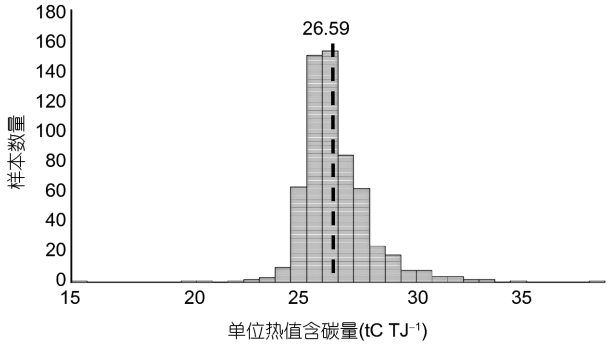

图 4　基于实测样本的中国煤质单位热值含碳量直方图

源数据采用自Liu Z等(2015)

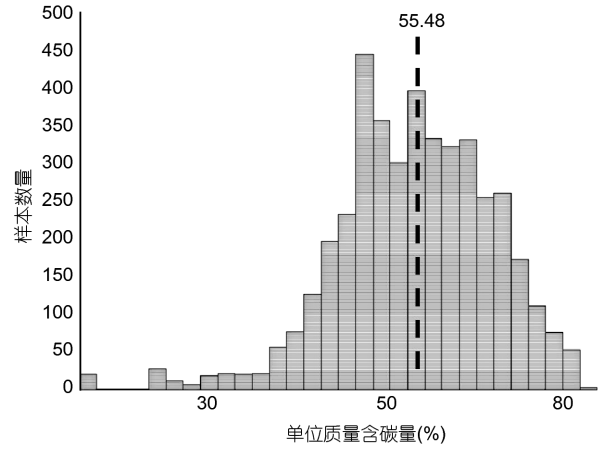

图 5　基于实测样本的中国煤质单位质量含碳量直方图

源数据采用自Liu Z等(2015)

的水泥熟料产量. 本研究发现, 中国水泥属性与其他国家的显著不同, 根据统计资料核算以及中国289条水泥生产线(覆盖所有水泥生产类型)1377组样品的测试表明, 中国水泥熟料比仅为62%, 中国水泥熟料的统计资料表明中国熟料比为58%(2012年, 该值年际变化较大), 因此本研究采用实测的水泥熟料比核算得到中国水泥生产过程的排放量, 其相关研究内容已独立发表在国际同行评议学术期刊(Shen等, 2014).

(4) 通过表观消费量数据显示中国2000~2013年间官方统计(以2014年的能源统计年鉴为准)的能源消费量被低估了10%. 从生产端重新核算能源消费量后, 本研究发现重新核算的能源消费量比国家统计局2014年官方公布的能源消费量高10%(2000~2013年间), 比各省加总的能源消费量低4%. 需要强调的是, 中国国家统计局2015年出版的《中国能源统计年鉴2015》(国家统计局, 2015)对中国能源消费数据进行了大幅度上调, 其上调后的能源消费量与先前的各省加总的能源消费量相同, 从而直接支持了本研究关于2014年以前国家尺度能源消费量被低估的结论, 国家统计局对能源消费数据的上调也直接支持了从生产端核算能源消费量比直接采用消费端数据可靠的结论.

综合考虑了含碳量、热值和氧化率后, 本研究认为中国煤的总体排放因子应比根据联合国推荐值计算的推荐缺省值和IPCC的原煤主要煤种排放因子低40%左右, 油品排放因子与IPCC值无差异, 天然气排放因子比IPCC值略高, 如表3所示.

4　讨论与结语

本研究本着“可核算、可报告、可核正”的原则在国家多个部委支持下开展了基于实测的中国碳排放核算. 其研究结果和相关数据完全公开, 取得了一些关于中国能源和排放系统的重要结论, 并对中国碳排放清

表 2　中国燃煤氧化率的国际数据库对比

研究机构	氧化率(%)
本研究核算值	92
中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报(国家发展和改革委员会, 2013)	94
美国橡树岭国家实验室CO_2分析中心CDIAC(CDIAC, 2015)	98
欧盟全球排放数据库EDGAR(European Commission, 2015)	100
英国石油公司BP(BP, 2014)	100
世界银行World Bank(World Bank, 2016)	100
国际能源署IEA(IEA, 2015)	98
美国能源情报署EIA(EIA, 2016)	100

表 3　本研究实测因子与国际相关统计因子对比

		热值含量(PJ mt^{-1})	碳含量(tC TJ^{-1})	氧化率(%)	最终排放因子(tCO_2 t^{-1})
原煤	联合国UN统计年鉴中国值	20.91	未说明	未说明	未说明
	联合国UN统计年鉴全球均值	29.30	未说明	未说明	未说明
	IPCC炼焦烟煤	28.20	25.80	98.00	2.61
	IPCC无烟煤	26.70	26.80	98.00	2.57
	IPCC一般烟煤	25.80	25.80	98.00	2.39
	IPCC次烟煤	18.90	26.20	98.00	1.78
	IPCC褐煤	11.90	27.60	98.00	1.18
	本研究实测值	20.60	26.32	0.92	1.83
原油	IPCC 原油	42.30	20.00	0.99	3.07
	相关研究测量原油	42.62	20.08	0.98	3.08
天然气	IPCC天然气	3.44	15.30	0.99	1.91
	相关研究实测值天然气	3.89	15.32	0.99	2.17
水泥生产	IPCC1996年报告				0.50
	IPCC2006年报告				0.39
	相关研究实测(根据沈镭等, 2016)				0.35~0.39

单进行了关键性的补充和更新.

对比了CDIAC、EDGAR等数据库(均采用IPCC推荐值)的估算结果, 本研究发现其估算结果与本研究基于实测的排放总量估算差异非常显著, 因此认为目前主流的大多数国际数据库对中国CO_2排放量的显著高估是真实存在的. 由于IPCC并未直接给予原煤排放因子的推荐值, 而给予了无烟煤、烟煤、炼焦烟煤、褐煤的排放因子. 通过对比国际数据库与中国自身排放数据可知, 国际数据库必然选择了排放因子较高的煤种进行对比, 其数值(热值)接近于IPCC炼焦煤推荐值(表1). 与IPCC推荐值类似的还有联合国统计署推荐的原煤热值(表1), 其值甚至比炼焦煤热值更高. 本文采用最接近原煤属性但热值较高的炼焦烟煤作为对比说明IPCC方法对中国排放的高估, 研究认为IPCC等国际组织显著高估中国煤质碳排放系数, 中国产的16种煤的平均热值比IPCC提供的炼焦煤热值低45%.

需注意的是,由于实测数据的局限性(实际调研开展于2012年), 本研究无法完全还原调研时间以前的煤质情况, 但从相关的研究中可以大概估算出煤质随时间变化对排放总量的影响. 中国由于近年来煤产量飙升后煤质有所下降, 根据中国上报给联合国的煤质数据, 中国原煤热值从1990年的21.43MJ kg^{-1}下降到2010年的20.9MJ kg^{-1}, 下降幅度为3%. 根据同行发表(Liu F等, 2015)的中国7657个燃煤机组的煤质实测数据表明, 中国原煤的热值从2005年的19MJ kg^{-1}下降到2010年的18.8MJ kg^{-1}, 下降幅度为2%. 本研究核算的原煤热值为20.6MJ kg^{-1}并用作之前所有年份的碳排放估算, 其不确定性范围(7.3%)基本上涵盖了文献所示的煤质变化值.

本研究是国家温室气体排放清单的重要补充和完善, 但本研究所探讨的能源消费和水泥生产过程的CO_2排放量与国家气候变化信息通报中的温室气体排放量并不具备直接可比性, 在数值上也有一定的差异, 究其原因, 主要有以下三点: (1) 系统边界不同: 本研究针对的是能源和水泥生产过程的碳排放, 目的是为了对比有相同系统边界的国际数据库. 国家清单需要核算甲烷、氮氧化物等多种温室气体, 并且需要包括如垃圾处理等多种过程的排放量. (2) 时空尺度不同: 本研究采用表观消费量算法, 包括国际航线中的外来邮轮和航班在中国的加油量等, 其时间上主要针对于近年(特别是2007年后中国成为排放量第一大国后)国际上对中国排放的估计, 其排放因子的调研时间为2011~2012年, 而国家清单的调研时间并未做明确说明, 部分调研时间跨度较长, 已无法用于最近的排放

清单对比. (3) 中国的能源统计数据包括燃料热值、能源消费量等在2005年后都已经过多次修正，能源燃烧的技术水平也相应的有所提高，由于实际研究的限制，本研究无法完全调研2005年时的技术水平和能源消费状况，用2012年的实际调研情况对2005年进行推测必然产生一定误差，这一情况在本研究中已做过专门说明并纳入不确定性分析中.

国家有关部门和研究人员在两次国家温室气体排放清单(1994年和2005年)的编制中做了大量工作，本研究的相关内容是直接基于这些工作展开的，并根据实测数据进行了更新和补充. 例如，本研究参考采纳了国家2005年清单中关于氧化因子的数据，在考虑到加工过程损失和实测数据修改后得到更新的国家氧化因子数据. 本研究受国家相关部委支持, 从国家尺度上实测了各种燃料的排放因子，所有的数据都以公开发表并上报给国家相关部门，目前国家部委正在采用本研究的数据编制国家2012年温室气体排放清单. 因此本研究本身即是国家温室气体排放研究工作的重要组成部分, 又是国家清单的必要补充和更新. 本研究提供的基础数据被国家发改委和国家应对气候变化战略研究和国际合作中心采纳于《中华人民共和国气候变化第三次初始信息通报》，用作制定中国CO_2排放量基准值的参考数据. 同时研究结论被300余家媒体报道并被美国科学院院士James Hasen(Hansen和Sato, 2016)、气候变化经济学之父Nicholas Stern(Green和Stern, 2017)等知名学者广泛引用，引起了广泛关注(Shan等, 2016a, 2016b; Liu等, 2016; Wang和Wei, 2016; Basu等, 2016; Mi等, 2016), 增加了中国在国家气候变化谈判中的话语权. 还需认识到, 中国能源和碳排放问题还很复杂，中国碳排放核算仍然存在较高的不确定性. 希望在后续的研究中，用更加公开、透明、翔实的碳排放数据推动中国低碳可持续发展.

参考文献

国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2004. 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报. 北京: 中国计划出版社

国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2013. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报. 北京: 中国计划出版社

国家统计局能源统计司. 2015. 中国能源统计年鉴2015. 北京: 中国统计出版社

沈镭, 赵建安, 王礼茂, 刘立涛, 王燕, 姚予龙, 耿元波, 高天明, 曹植. 2016. 中国水泥生产过程碳排放因子测算与评估. 科学通报, 61: 2926–2938

中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2016. 中华人民共和国政府2015强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献

Basu S, Bharat Miller J, Lehman S. 2016. Separation of biospheric and fossil fuel fluxes of CO_2 by atmospheric inversion of CO_2 and $^{14}CO_2$ measurements: Observation System Simulations. Atmos Chem Phys, 16: 5665–5683

Boden T A, Marland G, Andres R J. 2015. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO_2 Emissions. Tennessee, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy

British Petroleum. 2014. BP statistical review of world energy, https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html

Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). 2015. Fossil-fuel CO_2 emissions. http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/meth_reg.html

Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies. 2: 48–56

Olivier J G J, Bouwman A F, Van der Maas C W M, Berdowski J J M. 1994. Emission database for global atmospheric research (EDGAR). Environ Monitor Assess, 31: 93–106

Green F, Stern N. 2017. China's changing economy: Implications for its carbon dioxide emissions. Clim Policy, 17: 423–442

Guan D, Liu Z, Geng Y, Lindner S, Hubacek K. 2012. The gigatonne gap in China's carbon dioxide inventories. Nat Clim Change, 2: 672–675

Guan D, Peters G P, Weber C L, Hubacek K. 2009. Journey to world top emitter: An analysis of the driving forces of China's recent CO_2 emissions surge. Geophys Res Lett, 36: L04709

Hansen J, Sato M. 2016. Regional climate change and national responsibilities. Environ Res Lett, 11: 034009

Houghton J T, Meira Filho L G, Lim B. 1997. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015041434

International Energy Agency (IEA). 2013. CO_2 Emission from Fuel Combustion, http://www.iea.org/statistics/relateddatabases/co2emissionsfromfuelcombustion/

International Energy Agency (IEA). 2015. International energy statistics, https://www.eia.gov/beta/international/data/browser/#/?pa=00000000000000000000004&c=ruvvvvvfvtvnvv1urvvvvfvvvvvvfvvvou20evvvvvvvvvvnvvuvo&ct=0&tl_id=2-A&vs=INTL.2-7-AFG-MK.A&vo=0&v=H&end=2015

Le Quéré C, Moriarty R, Andrew R M, Canadell J G, Sitch S,

Korsbakken J I, Friedlingstein P, Peters G P, Andres R J, Boden T. 2015. Global carbon budget 2015. Earth System Sci Data, 7: 349–396

Liu F, Zhang Q, Tong D, Zheng B, Li M, Huo H, He K B. 2015. High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010. Atmos Chem Phys, 15: 13299–13317

Liu Y, Kuang Y, Huang N, Wu Z, Wang C. 2009. CO_2 emission from cement manufacturing and its driving forces in China. Int J Environ Pollut, 37: 369

Liu Z, Davis S J, Feng K, Hubacek K, Liang S, Anadon L D, Chen B, Liu J, Yan J, Guan D. 2016. Targeted opportunities to address the climate-trade dilemma in China. Nat Clim Change, 6: 201–206

Liu Z, Guan D, Wei W, Davis S J, Ciais P, Bai J, Peng S, Zhang Q, Hubacek K, Marland G, Andres R J, Crawford-Brown D, Lin J, Zhao H, Hong C, Boden T A, Feng K, Peters G P, Xi F, Liu J, Li Y, Zhao Y, Zeng N, He K. 2015. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. Nature, 524: 335–338

Mi Z, Zhang Y, Guan D, Shan Y, Liu Z, Cong R, Yuan X C, Wei Y M. 2016. Consumption-based emission accounting for Chinese cities. Appl Energ, 184: 1073–1081

National Bureau of Statistics of China-NBSC. 1990–2015. Chinese Energy Statistics Yearbook. Beijing: China Statistics

Olivier J G, Janssens-Maenhout G, Peters J A. 2013. Trends in Global CO_2 Emissions. 2013 Report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency

Shan Y, Guan D, Liu J, Liu Z, Liu J, Schroeder H, Chen Y, Shao S, Mi Z, Zhang Q. 2016a. CO_2 emissions inventory of Chinese cities. Atmos Chem Phys Discuss, 16: 1–26

Shan Y, Liu J, Liu Z, Xu X, Shao S, Wang P, Guan D. 2016b. New provincial CO_2 emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors. Appl Energ, 184: 742–750

Shen L, Gao T, Zhao J, Wang L, Wang L, Liu L, Chen F, Xue J. 2014. Factory-level measurements on CO_2 emission factors of cement production in China. Renew Sustain Energ Rev, 34: 337–349

Solomon S. 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Camrbidge: Cambridge University Press

State Administration of Coal Mine Safety. 2013. China Coal Industry Yearbook

United Nations. 2013. Energy Statistics Database. https://unstats.un.org/unsd/energy/edbase.htm

U.S. Energy Information Administration (EIA). 2016. International energy statistics, https://www.eia.gov/beta/international/data/browser/#/?pa=0000000000000000000004&c=ruvvvvvfvtvnvv1urvvvvfvvvvvvfvvvou20evvvvvvvvvvnvvuvo&ct=0&tl_id=2-A&vs=INTL.2-7-AFG-MK.A&vo=0&v=H&end=2015

Wang K, Wei Y M. 2016. Sources of energy productivity change in China during 1997–2012: A decomposition analysis based on the Luenberger productivity indicator. Energ Econ, 54: 50–59

World Bank. 2016. The Little Green Data Book 2016. World Bank Publ, 4: 1–235

(责任编委: 岳天祥)