

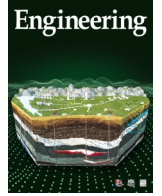


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Frontier Research on Carbon Neutrality—Review

面向碳中和的近实时碳排放量化技术

刘竹^{a,*}, 孙韬淳^a, 于颖^b, 柯丕煜^a, 邓铸^a, 鲁晨曦^a, 霍达^a, 丁香^c

^a Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^b Gillings School of Global Public Health, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC 27599, USA

^c College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 July 2021

Revised 2 November 2021

Accepted 27 December 2021

Available online 15 March 2022

关键词

碳中和

碳核算

碳排放监测

摘要

气候变化是21世纪人类和地球面临的重大环境威胁。全球人为温室气体排放是造成极端气候事件日益增多的主要原因之一。自前工业化阶段以来,二氧化碳(CO₂)累计排放量与累计升温呈线性关系,约占人为温室气体排放总量的80%。因此,准确可靠的碳排放数据是大多数减排政策制定和目标设定的基础和科学依据。目前,中国已明确制定了2030年前碳排放达到峰值、2060年前实现碳中和的宏伟目标。为实现更准确的碳排放监测,从而保证减排政策的持续实施和迭代完善,急需开发一个细粒度时空碳排放数据库。碳排放近实时监测不仅是国家重大需求,也是该学科前沿的科学问题。本文回顾了现有以年为基础的碳核算方法,重点介绍了最新开发的实时碳排放技术及其当前应用趋势。还提出一个可广泛使用的最新近实时碳排放核算技术框架。相关数据和方法的开发将为中国碳中和战略的相关政策制定提供强有力的数据支持。最后,本文对碳排放实时监测技术的未来发展进行了展望。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

近年来,全球人为温室气体排放总量已达到自开始测量以来的最高水平。这很可能是气候变化的主要驱动力[1]。温室气体排放清单一直是构建气候模型、制定国家减排政策和进行国际谈判的重要科学依据[2]。自20世纪末以来,为减缓气候变化并实现可持续发展目标,世界各国共同努力,提出了《京都议定书》《巴黎协定》等一系列全球减排协议[3]。以化石能源消费和水泥生产为基础的能源活动是人类活动的主要二氧化碳(CO₂)排放源,排放量约占人类活动温室气体排放总量的80%[4]。因此,

准确可靠的能源活动CO₂排放数据是制定减排政策和目标的基准,对于碳排放相关的科学研究和政策制定至关重要[3]。

作为世界上最大的发展中国家,中国在2007—2009年期间一直是最大的化石能源消费国和CO₂排放国[5]。中国的CO₂排放量虽然在2013年达到了平稳期,但仍然快速增长[6];中国仍然是世界上最大的能源消费国和CO₂排放国[7]。2018年后,中国碳排放年增长率连续两年超过2%[8–9],而全球碳排放年增长率仅为0.1%。因此,中国面临着来自国际社会的巨大减排压力。

鉴于中国快速增长的经济和庞大的工业部门,中国在

* Corresponding author.

E-mail address: zhuliu@tsinghua.edu.cn (Z. Liu).

2095-8099/© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2022, 14(7): 44–51

引用本文: Zhu Liu, Taochun Sun, Ying Yu, Piyu Ke, Zhu Deng, Chenxi Lu, Da Huo, Xiang Ding. Near-Real-Time Carbon Emission Accounting Technology Toward Carbon Neutrality. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.12.019>

应对气候变化的国际行动中发挥着关键作用。2005年，中国政府公布了政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的《1996年IPCC国家温室气体清单指南》[10]和《2006年IPCC国家温室气体清单指南》[11]。根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》的要求，中国向联合国提交了1994年和2005年的温室气体清单[12]。2015年以来，中国政府一直重视碳排放核算的统计工作。《国家中长期科学和技术发展规划纲要》[13]、《国民经济和社会发展规划第十二个五年规划》[14]、《“十二五”国家应对气候变化科技发展专项规划》[15]和《国家应对气候变化规划（2014—2020年）》[16]中已明确指出，中国应对气候变化统计工作有待加强，需要建立一个整合完整和统一统计数据的科学框架来客观体现中国积极应对气候变化所采取的行动。建立和完善温室气体排放统计制度既是中国有效履行国际义务的迫切需要，也是中国在应对气候变化国际谈判上赢得主动权的重要保障[17]。2016年，中国政府将应对气候变化和可持续发展作为国家战略，并制定了相对减排目标，使碳排放强度（单位国内生产总值碳排放）比2005年下降60%[18]。中国在2021年的“十四五”规划中设定了CO₂减排目标。2020年9月，在联合国气候变化大会上，习近平总书记明确表示，中国的CO₂排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和[19]。

对中国当前碳排放的分析表明，虽然中国的人均碳排放量已经超过全球平均水平，但人均累计碳排放量远低于发达国家，表明实现碳中和目标的难度比预期的要大。中国需要更好地布局和实施减排行动和政策，这对碳排放核算与监测数据的及时性和准确性提出了更高的要求。本文在现有碳排放核算方法的基础上，介绍了针对世界主要国家（排放主体）提出的实时碳排放技术。该技术实现了对中国和世界其他主要国家碳排放的近实时（日或小时尺度）精确排放进行核算，以做更全面的比较。这种及时准确的碳核算框架继承以往方法的优点，为实现碳中和目标提供了及时的数据支持。

表1 全球生产侧碳核算机构[21]

Research institute and database	Data source	Year range
Carbon ioxide Information Analysis Centre (CDIAC)	https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/	1951–2014
European Commission’s Joint Research Centre (JRC)/ Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL)		
Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR)	https://edgar.jrc.ec.europa.eu/	1970–2019
International Energy Agency (IEA)	https://www.iea.org/	1990–2018
U.S. Energy Information Administration (EIA)	https://www.eia.gov/	1949–2018
World Bank	https://data.worldbank.org/	1960–2018
United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)	https://unfccc.int/	1990–2019
World Resources Institute (WRI)	https://datasets.wri.org/	1990–2018

2. 碳核算方法与应用

2.1. 生产侧碳核算

国家CO₂排放核算是落实减排措施、制定国家减排战略、开展国际核查和评估的依据[3]。为此，IPCC等国际组织制定了一种根据含碳化石燃料的能耗和相应化石燃料本身的碳含量估算国家CO₂排放量的方法[20]，即通过活动数据和相应的排放系数来汇总碳排放量。此核算方法在世界范围内被广泛使用。具体而言，IPCC推荐的碳排放核算方法有两种：参考法和部门法。参考法通过国家的总能源消费量来估算CO₂排放量，总能源消费量为能源生产量、进口量、出口量与库存量之间的差。部门法根据各子部门的能源消费量计算各子部门的CO₂排放量，然后获得国家的总碳排放量[3]。因为IPCC推荐的计算方法使用一次能源数据核算碳排放（考虑一次能源转换、燃料清洗过程中的能量损失、燃料非能源使用等因素），而一次能源处于能源供应链的生产端，所以这种计算方法也被称为生产侧碳核算。表1列出了目前的生产侧碳核算机构。

碳排放可分为化石能源碳排放和工业过程碳排放：

$$E_t = E_{ff} + E_{in} \quad (1)$$

式中， E_t 、 E_{ff} 和 E_{in} 分别表示总排放量、化石燃料排放量、工业过程排放量。

化石燃料排放量可使用式（2）进行计算：

$$E_{ff} = A \times F = E \times C \quad (2)$$

式中， A 、 E 、 F 和 C 分别表示燃料的活动数据、能耗、排放因子和含碳量。

鉴于燃料的排放因子、质量、性能和燃烧效率之间的关系，排放因子可进一步分解为：

$$F = H \times C_h \times O \quad (3)$$

式中， H 、 C_h 和 O 分别表示热值、单位热值含碳量和氧化率。

因此，化石燃料排放量可使用式（4）估算：

$$E_{ff} = A \times H \times C_h \times O \quad (4)$$

工业过程主要包括水泥生产，其排放量计算类似于化石燃料的排放量计算，如式（5）所示：

$$E_{in} = A \times F \quad (5)$$

根据计算公式可知，CO₂排放量估算的不确定性主要来自两方面：活动数据（能源消费或工业生产）和排放因子。

鉴于中国在全球碳排放中扮演的重要角色，有针对性地评估中国的碳排放至关重要。2011年，中国科学院启动“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”战略性先导科技专项。其中，“水泥生产能耗与排放”任务已形成中国能源使用与水泥生产综合数据库，可视化系统已构建。通过整合不同应用行业的数据，得到中国不同能源类型的消耗和氧化因子，从而得到中国不同能源类型的总CO₂排放量[17,22]。中国碳核算数据库（CEAD）团队使用在参考文献[22]中获得的碳排放因子，根据年度《中国能源统计年鉴》和省市级能源统计年鉴中的统计数据，计算并公布相应的碳排放清单[6,23]。Cai等[24]已系统地开发了一种自下而上的中国城市温室气体核算方法，可降低活动水平和排放因子的不确定性。该方法为中国高空间分辨率排放网格数据库（CHRED）清单，其空间分辨率为1 km。Xu等[25]采用自下而上的方法解释了1960—2017年的全球黑碳排放，并将更新的结果与其他现有清单[包括北京大学（PKU）-2020和EDGAR]以及其他排放清单相关工作（包括PKU-CO₂清单，该清单使用基于全球或国家层面编制的不同燃料类型的燃烧速率和排放因子的次国家分解法）进行了比较[26—30]。Wang等[31]和Liu等[32]根据IPCC指南编制了基于省级数据的排放清单[南京大学（NJU）-CO₂]。

2.2. 消费侧碳核算

明确碳排放责任是进行关于全球气候倡议的国际谈判

不可或缺的环节。发达国家可能利用其资本和技术优势，将CO₂排放量最高的污染行业转移至欠发达地区，从而减少其直接CO₂排放量，并将减排义务转移到欠发达地区。研究人员已提出一种基于消费的CO₂核算方法[考虑潜在“碳泄漏”（carbon leakage）]，以考虑消费活动产生的排放量并很好地代表不同国家的实际CO₂排放量。目前，基于消费的碳核算方法（也称碳足迹）已成为计算CO₂排放量的有效方法。具体而言，基于消费的碳核算主要包括过程分析（即生命周期评价）（表2）和投入产出（IO）分析。

生命周期评价法是一种“自下而上”的方法，旨在跟踪产品对环境的直接和间接影响[“从摇篮到坟墓”（from the cradle to the grave）]。生命周期评价法通过收集整个产品流程所涵盖的物质和活动产生的碳排放数据，可估算特定产品整个生命周期的碳排放量。基于此方法建立了许多碳足迹核算标准，以评价环境影响。

投入产出法是一种“自上而下”的方法，旨在通过投入产出表中反映的各个经济部门的投入与产出之间的依赖关系来衡量国家/地区或部门层面的CO₂排放量。一般情况下，消费者端的总碳排放量等于本地区直接碳排放量减去本地区输出产品至其他地区所产生的排放量，并增加其他地区因生产输入本地产品而产生的排放量[42]。许多研究基于投入产出法调查了国际贸易中的隐含碳排放。例如，Meng等[43]使用投入产出法分析了南南贸易增长对发展中国家碳排放的影响，结果表明，2004—2011年，碳排放有从中国向东南亚等欠发达地区转移的趋势。与中国相关的研究分析了2012年中国全球碳足迹的分布，结果发现，中国的国际碳足迹集中在长江三角洲、珠江三角洲和华北平原等传统制造中心。这些地区约占中国陆地面积的1%，但其碳足迹约占全球碳足迹的75% [44]。近年

表2 基于生命周期分析(LCA)的代表性碳足迹核算标准

Carbon footprint accounting standard	Institute of publication	Released year
Product-level		
Publicly Available Specification 2050 [33]	British Standard Institution (BSI)	2008
Greenhouse Gas Protocol [34]	World Resource Institute (WRI) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)	2011
ISO14067 [35]	International Organization for Standardization (ISO)	2013
Organization-level		
Greenhouse Gas Protocol [36]	WRI and WBCSD	2004
ISO 14064-1 [37–38]	ISO	2006, 2018
ISO 14069 [39]	ISO	2013
ISO 14072 [40]	ISO	2014
Comprehensive-level		
Publicly Available Specification 2060 [41]	BSI	2014

来, 气候变化正义日益受到关注。Mi等[45]采用环境扩展的多区域投入产出法(MRIO)计算了2012年中国30个地区的12个收入群体的家庭碳足迹, 并通过碳足迹和基尼系数分析了碳不平等。结果显示, 收入最高的5%群体贡献了17%的家庭碳足迹, 而收入最低的群体(约占样本的50%)仅贡献25%的家庭碳足迹。在新冠病毒肺炎(COVID-19)疫情暴发后, 采用投入产出法分析了疫情对碳排放的影响, 为现有研究提供了新视角。例如, 最近的一项研究表明, 与“无疫情”基线情景相比, 未来5年(2020—2024年)全球经济领域的碳排放量预计将下降3.9%~5.6%。由于全球经济通过供应链相互依存, 即使不采取封锁政策, 一个经济体对生产活动的限制也会导致其他国家的碳排放减少[46]。

2.3. 实时/近实时与就地碳核算

为满足对细粒度数据日益增长的需求, 实时/近实时核算方法及相关技术近年来受到越来越多的关注。多项研究利用排放连续监测系统(CEMS)和傅里叶变换光谱仪(FTS)等地面监测数据, 以及温室气体观测卫星(GOSAT)和对流层监测仪(TROPOMI)等遥感卫星数据, 分析了自然灾害和新冠病毒肺炎等大流行病对全球经济和温室气体排放的影响。例如, Doblas等[47]基于热带森林覆盖与碳排放之间的关系, 开发了基于哨兵1号(Sentinel-1)卫星实时监测以及碳排放与热带森林覆盖之间关系的森林砍伐预警系统(EWS), 数据精度为94.36%。该系统有望在未来帮助实时监测与土地变化相关的排放。此外, 现有研究通过监测热带雨林的碳排放, 实现了对森林火灾、非法采矿等森林破坏行为的近实时跟踪和预警[48–51]。

新冠病毒肺炎疫情的暴发, 对全球实时碳排放技术的发展提出了迫切需求。实时碳排放技术在疫情影响领域的研究价值逐渐得到学术界的重视和认可[52–57]。根据地面监测站采集的城市交通碳排放数据, Tian等[58]发现, 加拿大的碳排放量在2020年继续下降, 并在4月份达到最低值。Lian等[59]结合6个市级实时地面监测系统(CEMS)和贝叶斯方法, 测量了新冠病毒肺炎疫情期间巴黎的CO₂后排放量, 从而得到了因新冠病毒肺炎导致的第一轮和第二轮城市封锁期间的人为因素。CO₂减排量与2020年同期水平相关。Liu等[60]使用车载测量仪器实时跟踪新冠病毒肺炎疫情期间北京的碳排放。结果表明, 与疫情前相比, 新冠病毒肺炎疫情期间, 工作日和节假日的CO₂浓度分别减少了(41 ± 1.3) ppm (1 ppm = 1 mg·L⁻¹)和(26 ± 6.2) ppm, 工作日和节假日之间并不存在显著差

异。Turner等[61]使用传感器在美国旧金山湾区开展了实时大气观测。数据显示, 新冠病毒肺炎疫情期间, 人为因素碳排放减少了30%, 这可归因于交通量的减少(48%), 从而为本地车辆电气化奠定了科学基础。

遥感卫星数据和大气反演模型有助于进一步提高CO₂浓度的计算精度。基于TROPOMI卫星观测数据, Zheng等[62]估计了新冠病毒肺炎疫情期间中国各省碳排放的动态趋势。结果表明, 从2020年1月到4月, 中国的CO₂排放量与2019年同期相比减少了11.5%。随后, 由于经济复苏活动迅速开展, 碳排放又回到了疫情前水平。北京城市层面的研究表明, 疫情期间, 与封锁政策有关的人为CO₂排放呈下降趋势, 陆基傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)数据显示, 碳排放减少了14.2%。GOSAT卫星数据显示, 碳排放减少了15% [63]。Buchwitz等[64]利用轨道碳观测2号(OCO-2)卫星和GOSAT卫星的观测数据, 估算新冠病毒肺炎疫情期间中国华东地区的人为CO₂减排量。结果表明, 2020年3月和4月, CO₂减排量约为10%±10% [标准差(std.)]。但是, 数据显示, 不同月份之间的差异较大, 并且卫星数据集的分析结果存在显著差异, 表明目前的卫星数据质量无法达到实时观测所需的精度。

2.4. 现有碳核算方法比较

现有的三种碳核算方法各有利弊(表3)。其中, 生产侧碳核算方法计算简便, 并且渗透率较高。全球官方机构均采用生产侧碳核算方法测量碳排放。在弄清楚排放源的前提下, 这些碳核算数据适用于许多尺度, 并且通常可用于宏观、中观和微观研究。应当注意的是, 这种核算方法主要基于碳排放因子和能源统计资料。碳排放因子的不确定性使得验证计算结果的可靠性变得困难; 同时, 能源统计资料的发布通常存在很大的延迟(一年或更久), 并且一般只是以年为尺度。因此, 基于生产侧的碳核算方法在支持粒度更细的碳排放研究方面存在困难。消费侧碳核算方法也具有计算简便、渗透率高的优点, 但是该方法对数据质量要求较高, 因此, 计算结果存在更大的不确定性。另外, 产品活动数据的收集和投入产出表的发布存在一定的延迟, 而且时空分辨率比较低, 因此, 无法开展高精细粒度动态研究。尽管测得的结果更精确, 但需要对碳排放进行连续和高覆盖率监测。然而, 采用现有地面监测技术和遥感卫星技术难以实现具有成本效益的大规模跟踪。

3. 全球近实时碳排放系统

在世界各国采取气候行动并相继宣布碳中和计划的背

表3 现有核算方法比较

Carbon accounting methods	Input variables	Advantages	Limitations	Main applications
Production-side carbon accounting	Activity level data and emission factors	Easy calculation; high-cover applications adaptable to multi-scales (micro-, meso-, macro- scales)	Huge uncertainties of emission factors; time lag of more than one year; low spatiotemporal resolution; time & cost consuming is low due to very mature techniques	Mainstream climate change research and reports
Consumption-side carbon accounting	Production activity data and emission factors	Detailed calculation; high-cover applications adaptable to microscales	Huge statistical error; huge uncertainties of emission factors; results with low accuracy; low spatiotemporal resolution; time & cost consuming is low due to very mature techniques	Carbon footprint research of products
Process analysis method/ life cycle assessment	IO tables and carbon emission data	Easy calculation	Huge uncertainties of data quality; low continuity of data; time lag of more than one year; low spatiotemporal resolution; limited adaptable scale (only macroscale); time & cost consuming is possibly high due to complicated mathematics encountering multi-country analysis	Trade-embodied carbon (footprint) research
IO method	Air flow & CO ₂ concentration conversion factors	Results with high accuracy	High cost; low rate of application; time & cost consuming dependable on the specific research	Ecological degradation/disaster impacts research; COVID-19 impacts related research
Real-time/near-real-time and <i>in-situ</i> carbon accounting				

景下，有必要针对碳排放开展实时高频率监测，以了解碳排放的动态趋势，并及时可靠地评估各种气候政策带来的影响。目前的碳排放核算方法主要存在两个需要解决的技术问题：①碳排放数据集存在一年或更长的时间延迟；②没有每天或每小时的碳排放数据。基于碳中和的背景和高时空分辨率数据的要求，全球近实时碳排放系统根据行业活动水平数据，开发了一套实时碳排放核算方法。该方法可用来计算实时或近实时全球碳排放，并为主要国家和子行业生成一套全球每日碳排放数据集，从而解决上述技

术问题[65–66]。

实时碳排放系统构成了一套基于行业活动数据的碳排放核算方法（图1）。根据碳排放的来源，将全球各个国家的碳排放划分为六大类：电力、工业、居民消费、地面运输、航空和海运行业的碳排放。从碳排放的一般核算方法，可以推导出以下公式：

$$E_t = \sum_{\text{energy}} (A_{\text{energy}} \times F_{\text{energy}}) \quad (6)$$

式中， A_{energy} 和 F_{energy} 分别表示各个行业的活动数据和排

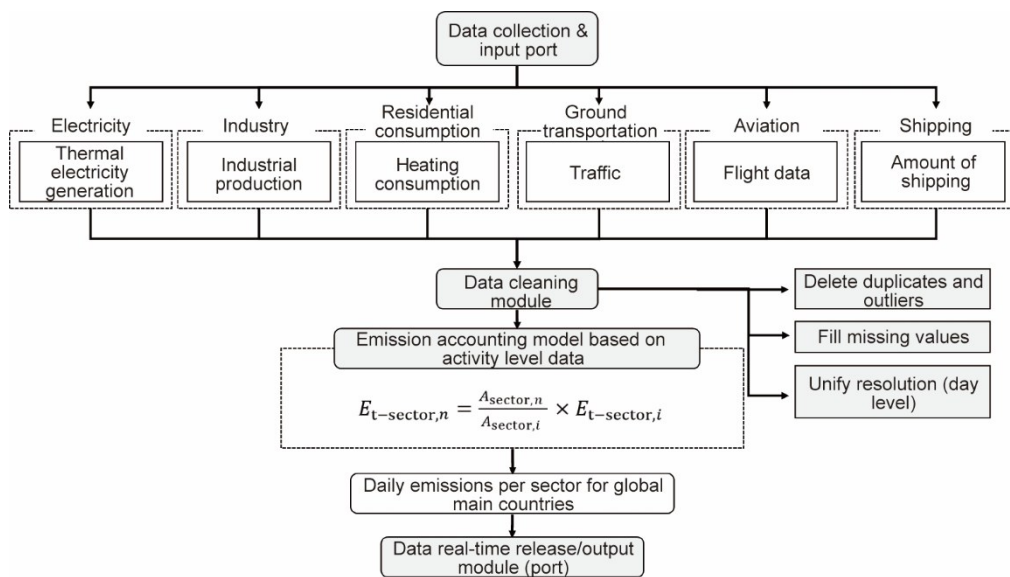


图1. 近实时碳排放系统框架。 $E_{t\text{-sector},n}$ 、 $A_{\text{sector},n}$ 、 $A_{\text{sector},i}$ 和 $E_{t\text{-sector},i}$ 分别表示某个行业第 n 天的总排放量、某个行业第 n 天的活动数据、某个行业第 i 天的活动数据和某个行业第 i 天的总排放量。

放因子。

由于行业内的能源消费结构是相对稳定的，可以采用行业的活动数据和排放因子 (A_{sector} 和 F_{sector}) 代替燃料的活动数据和排放因子，从而得到一套基于行业活动数据的碳排放核算方法：

$$E_t = \sum_{\text{sector}} (A_{\text{sector}} \times F_{\text{sector}}) \quad (7)$$

一个行业的活动数据是与相应行业的能源消费有关的数据，可以反映该行业生产的实际活动水平（参见IPCC方法中的活动数据）。行业碳排放因子取决于行业的燃料消耗结构和这些燃料的排放因子。由于排放因子在一定时期内保持稳定，假设行业排放因子保持不变，在与不确定性相关的计算中考虑这种假设的不确定性。

从方法上讲，依靠行业排放因子保持不变的这个假设，实时碳排放系统进一步提出了一套基于部门实时活动数据的碳排放核算方法。首先，实时收集关于各种行业活动的公开可用和更新的实时数据。例如，电力行业碳排放的主要来源是热力发电过程中的化石燃料排放，比如煤、石油和天然气。因此，可以采用热力发电（或发电）来描述电力行业的活动数据特征。地面交通行业的主要排放来源是化石燃料，比如汽车燃油消耗。因此，可以采用交通量来描述地面交通行业的活动数据特征。各个部门具体的活动水平数据如表4所示。

完成数据选择后，进行数据清洗。步骤如下：①删除重复数据；②剔除离群值（大于4个标准差）；③采用线性插值补充缺失值；④改变数据的时间分辨率，每日进行统一。然后，将各个行业清洗后的数据代入上述基于行业活动数据的碳排放核算模型，并采用式（7）进行计算。由于行业碳排放因子保持不变，因此：

$$E_{t-\text{sector}, n} = \frac{A_{\text{sector}, n}}{A_{\text{sector}, i}} \times E_{t-\text{sector}, i} \quad (8)$$

式中， $E_{t-\text{sector}, n}$ 、 $A_{\text{sector}, n}$ 、 $A_{\text{sector}, i}$ 和 $E_{t-\text{sector}, i}$ 分别表示某个行业第 n 天的总排放量、某个行业第 n 天的活动数据、某个行业第 i 天的活动数据和某个行业第 i 天的总排放量。

最后，可以通过数据输出端口，实时获取和发布全球

主要国家和子行业的每日碳排放。与目前的碳核算方法相比，实时碳排放技术具有以下优势：采用之前基于化石燃料消耗的碳排放核算方法，提出了一套碳排放核算方法，该方法可以根据各种生产和社会数据，反映行业的能源消费水平。目前的碳排放方法只能针对区域层面的排放开展年度排放核算，而实时碳排放系统可以计算具有日尺度分辨率的子行业碳排放数据。目前的碳排放方法生成的碳排放数据通常存在一年或以上的延迟。实时碳排放系统在近实时水平上提高了更新和发布碳排放数据的能力。该方法实时收集各种活动水平数据，基于行业活动水平数据在碳排放核算模型中实时计算碳排放，并通过数据输出接口实时更新和发布碳排放数据。数据更新发布在碳监测网站 (<https://carbonmonitor.org>) 上。

参考文献[65]详细讨论了这种技术的不确定性（表5）。

迄今为止，实时碳排放技术已被广泛用于动态监测碳排放和研究新冠病毒肺炎疫情的影响。基于实时碳排放系统发布的碳监测数据，Liu等[66]针对全球主要国家不同行业的CO₂排放，开展了近实时监测。结果表明，与2019年同期相比，2020年上半年的全球CO₂排放减少了8.8%（-1551 Mt CO₂）。根据源自碳监测装置的美国国家层面的实时碳数据，研究报道了自2019年1月至2020年12月的每日化石燃料碳排放数据，并分析了新冠病毒肺炎疫情对美国碳排放的影响。结果显示，疫情暂时大幅度减少了碳排放，而具体范围变化较大，这是由于美国各个州的公共卫生政策比较严格[67]。从碳监测数据库得到的中国省级实时数据库，跟踪了三个行业（电力、工业和交通）的CO₂排放动态趋势，并且首次估算了西藏的CO₂排放。结果表明，省级电力行业的碳排放具有明显的季节特征，长江以北和长江以南的工业部门碳排放趋势明显不同，交通行业的碳排放受节假日的影响更大[68]。交通行业的详细数据显示，2020年上半年，该行业的碳排放迅速下降，随后出现反弹。第二波疫情带来了新一轮减排[69]。

表4 各个行业的碳排放来源和活动数据选择

Sector	Source of carbon emissions	Activity data
Electricity	Thermal fossil fuel consumption	Thermal electricity
Industry	Fossil fuel consumption (e.g., steel production in high temperature) and industrial process (e.g., cement production)	Industrial production
Residential consumption	Fossil fuel consumption for residents	Heating consumption
Ground transportation	Fossil fuel consumption for vehicles	Traffic
Aviation	Fossil fuel consumption for aviation	Flight data
Shipping	Fossil fuel consumption for ships	Amount of running ships

表5 各个行业的不确定性

Sector	Sources of uncertainty	Uncertainty
Power	Inter-annual variability of coal emission factors and changes in mix of generation fuel in thermal production	±14.0%
Ground transportation	Assumption that the relative magnitude in car counts (and thus emissions) follow a similar relationship with Tom-Tom congestion index in Paris	±9.3%
Industry	Monthly production data	±36.0%
Residential consumption	Comparison with daily residential emissions derived from real fuel consumption in several European countries	±40%
Aviation	The difference in daily emission data estimated based on the two methods (flight route distance/the number of flights)	±10.2%
International shipping	International Marine Organization (IMO)	±13.0%
Projection of emissions growth rate in 2019	Combination of the reported uncertainty of the projected growth rates and the EDGAR estimates in 2018	±0.8%
EDGAR emissions in 2018	—	±5.0%
Overall	—	±7.2%

4. 结论和未来研究展望

由于现有碳排放核算方法存在局限性，本文回顾的近实时碳排放技术旨在通过解决技术问题并克服当前方法的缺陷，解决这些问题，从而为碳中和战略提供基本数据支持。同时，在确保数据精度的前提下，该方法为中国开展更精细的时间尺度碳排放监测奠定了坚实的科学基础。这种实时碳排放技术已经得到国内和国际学术界的广泛认可（例如，《2021年排放差距报告》[70]提供了碳监测数据来源。）这种技术的主要优势在于，能够在多个行业层面实时监测和跟踪碳排放。同时，该技术提供了主要碳排放国家之间更加系统的每日比较。此外，这种近实时核算方法可作为国际气候变化相关谈判的一个重要参考。理论上，基于IPCC推荐的碳核算方法，通过合理近似（比如排放因子）和大量的数据收集，这种技术可以缩小从一年或两年的数据统计延迟到近实时监测的差距，有助于中国对碳监测做出迅速响应。尽管如此，技术和数据方面均存在障碍。对于一些国家来说，碳排放数据的连续年度更新仍然是一个挑战。具体而言，如果当前使用的数据源停止更新或变得不可靠，那么就需要新的数据源；因此，亟需开发和利用能够适应这些最新利用的数据源的新方法。障碍可以逐步得到改善，因为更多数据源是开源的，或是由世界各地的研究人员开发，并且人们对监测机制和方法的理解也在深化（比如由碳卫星提供监测）；这有助于缩小近实时监测的不确定性。

因此，未来近实时碳排放技术的发展和應用將集中在以下方面：①监测近实时CO₂排放（GEOS-CF）[71–72]和开发实时人为碳排放监测系统[73]，以揭示人为碳排放波动；②开发基于消费者端的实时碳排放技术，以更高时

空分辨率获取由国际贸易产生的具体的碳排放流，同时考虑生命周期；③整合基于卫星的“自上而下”的数据和方法。多个国际碳卫星项目[如中国科学院的国际合作伙伴计划——“国际碳卫星观测数据分析合作计划（二期）”]为在全球范围内精确监测CO₂浓度提供了很好的机会。需要开展更多比较研究，以利用卫星数据校准“自下而上”的碳核算方法。总的来说，需要进一步开发近实时碳排放技术，以便为更好地理解全球气候变化提供更加准确及时的数据支持。

致谢

感谢国家自然科学基金项目(71874097和41921005)、北京市自然科学基金项目(JQ19032)、求是科技基金会和深圳市科学技术委员会学院稳定性支持项目(WDZC20200819173345002)的资助。

Authors' contributions

Zhu Liu conceptualizes this review. Taochun Sun writes the original manuscript with the help of Piyu Ke, Chenxi Lu, and follows the suggestions from Zhu Deng. Ying Yu revises the original manuscript. Da Huo and Xiang Ding provides exquisite language polishing to this review.

Compliance with ethics guidelines

Zhu Liu, Taochun Sun, Ying Yu, Piyu Ke, Zhu Deng, Chenxi Lu, Da Huo, and Xiang Ding declare that they

have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for policymakers. In: Climate change 2014: mitigation of climate change. Fifth assessment report. Cambridge: Cambridge University Press; 2014.
- [2] Ma C, Xu H, Su M. The research progress on greenhouse gas inventory methods. *Prog Geogr* 2013;32(3):400–7. Chinese.
- [3] Liu Z, Guang DB, Wang W. Carbon emission accounting in China. *Scientia Sinica Terrae* 2018;48(07):878–87. Chinese.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2007—the physical science basis: working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press; 2007.
- [5] Guan D, Peters GP, Weber CL, Hubacek K. Journey to world top emitter: an analysis of the driving forces of China’s recent CO₂ emissions surge. *Geophys Res Lett* 2009;36(4):L04709.
- [6] Shan Y, Guan D, Zheng H, Ou J, Li Y, Meng J, et al. China CO₂ emission accounts 1997–2015. *Sci Data* 2018;5(1):17201.
- [7] Muntean M, Guizzardi D, Schaaf E, Crippa M, Solazzo E, Olivier J, et al. Fossil CO₂ emissions of all world countries—2018 report. Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2018.
- [8] Friedlingstein P, Jones MW, O’ Sullivan M, Andrew RM, Hauck J, Peters GP, et al. Global carbon budget 2019. *Earth Syst Sci Data* 2019;11(4):1783–838.
- [9] Friedlingstein P, O’ Sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Hauck J, Olsen A, et al. Global carbon budget 2020. *Earth Syst Sci Data* 2020;12(4):3269–340.
- [10] IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [Internet]. Geneva: IPCC; 1996 [cited 2022 Feb 22]. Available from: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>.
- [11] 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [Internet]. Geneva: IPCC; 2006 [cited 2022 Feb 22]. Available from: <https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- [12] National Communication [Internet]. Beijing: Department of Climate Change of National Development and Reform Commission; 2015 [cited 2022 Feb 22]. Available from: <https://tnc.ccchina.org.cn/>. Chinese.
- [13] Outline of the National Medium and Long-term Scientific and Technological Development Plan [Internet]. Beijing: State Council of the People’s Republic of China; 2006 [cited 2022 Feb 22]. Available from: http://www.gov.cn/jrzq/2006-02/09/content_183787.htm. Chinese.
- [14] The Twelfth Five-Year Plan for National Economic and Social Development [Internet]. Beijing: The Central People’s Government of the People’s Republic of China; 2011 [cited 2022 Feb 22]. Available from: http://www.gov.cn/2011lh/content_1825838.htm#. Chinese.
- [15] The Special Plan for Science and Technology Development to Address Climate Change in China’s Twelfth Five-Year Plan [Internet]. Beijing: The Central People’s Government of the People’s Republic of China; 2012 [cited 2022 Feb 22]. Available from: http://www.gov.cn/zwqk/2012-07/11/content_2181012.htm. Chinese.
- [16] The National Climate Change Plan to Address Climate Change (2014–2020) [Internet]. Beijing: State Council of the People’s Republic of China; 2014 [cited 2022 Feb 22]. Available from: <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/2015/20151119/xgzc33810/document/1455885/1455885.htm>. Chinese.
- [17] Wei W, Ren X, Cai Z, Hou Q, Liu Y, Li Q. Research on China’s greenhouse gas emission—progress on emission inventory from the CAS strategic priority research program. *Bull Chin Acad Sci* 2015;30(6):839–47. Chinese.
- [18] National Development and Reform Commission of China. Enhanced actions on climate change in 2015—China’s intended nationally determined contributions. Beijing: Department of Climate Change, National Development and Reform Commission of China; 2015. Chinese.
- [19] China’s achievements, new goals and new measures for nationally determined contributions [Internet]. Glasgow: United Nations Climate Change Conference; 2020 [cited 2022 Feb 22]. Available from: <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/China%20First/China%E2%80%99s%20>