球环境

长三角地区 2000—2019 年黑碳排放核算及其不确定性

李舒惠1,曹闪闪1,杨 依1,程丹阳1,樊林平1,刘 敏1,2*

- 1. 华东师范大学 生态与环境科学学院 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241
- 2. 华东师范大学 崇明生态研究院, 上海 202162

摘 要:基于国家能源活动统计资料,使用排放因子法建立了长三角地区 2000—2019 年黑碳排放清单,并利用 Monte Carlo 方法量化排放因子对黑碳排放核算的影响及不确定性。研究结果表明: (1) 近 20 a 长三角地区总黑碳排放量由 10.72×10^7 kg (2000 年)增加至 12.54×10^7 kg (2019 年),增长了 16.98%;黑碳排放源结构发生显著变化,2000 年居民生活是长三角地区最主要的黑碳排放源(占42.2%);自 2006 年开始工业逐渐成为研究区最主要的黑碳排放源,2019 年工业排放占长三角地区黑碳排放总量的 63.2%。 (2)长三角地区黑碳排放存在明显的空间分异。总体而言,江苏省黑碳排放总量和人均黑碳排放强度居长三角地区首位,安徽省单位 GDP 黑碳排放最高,上海市单位面积黑碳排放强度最高,而浙江省人均和单位面积黑碳排放强度最低。 (3)考虑黑碳排放核算过程中排放因子的取值差异,2019 年长三角地区黑碳排放总量为 7.13×10^7 — 14.49×10^7 kg (95% 置信区间),相对不确定性为一33.50%—35.11%。工业排放因子是长三角黑碳排放核算不确定性的主要贡献者。

关键词:黑碳;排放清单;不确定性;长三角地区

Accounting and uncertainty analysis of black carbon emissions in the Yangtze River Delta from 2000 to 2019

LI Shuhui¹, CAO Shanshan¹, YANG Yi¹, CHENG Danyang¹, FAN Linping², LIU Min^{1,2*}

- 1. Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China
- 2. Institute of Eco-Chongming (IEC), East China Normal University, Shanghai 202162, China

Abstract: *Background, aim, and scope* Black carbon (BC) is a greenhouse gas with a warming benefit second only to that of CO₂. This has an impact on regional climate change and human health. The aim of this study was to examine the BC emission inventory and its uncertainty in the Yangtze River Delta (YRD), one of the fastest growing economies in China, and to provide a scientific basis for reducing BC emissions and achieving emission reduction targets in the YRD. *Materials and methods* Based on the latest energy statistics and domestically measured emission factors, a BC emission inventory in the YRD from 2000 to 2019 was established. The Monte Carlo method was used to analyze the uncertainty of the BC emission inventory, focusing on the influence of the value difference

收稿日期:2022-05-26;录用日期:2022-07-23;网络出版:2022-08-10 Received Date: 2022-05-26; Accepted Date: 2022-07-23; Online first: 2022-08-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41977399)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41977399)

通信作者:刘 敏, E-mail: mliu@re.ecnu.edu.cn

Corresponding Author: LIU Min, E-mail: mliu@re.ecnu.edu.cn

引用格式:李舒惠,曹闪闪,杨 依,等. 2023. 长三角地区 2000—2019 年黑碳排放核算及其不确定性 [J]. *地球环境学报*, 14(1): 86–97, 109. **Citation:** Li S H, Cao S S, Yang Y, et al. 2023. Accounting and uncertainty analysis of black carbon emissions in the Yangtze River Delta from 2000 to 2019 [J]. *Journal of Earth Environment*, 14(1): 86–97, 109.

of emission factor values on the BC emission accounting. The key factors that had a significant effect on the uncertainty of the accounting results were identified and an objectively confidence interval of the BC emission in the YRD was provided. Results The results showed that: (1) the total BC emissions in the YRD increased from 10.72×10^7 kg to 12.54×10^7 kg from 2000 to 2019. In 2000, residences were the largest source of BC emissions in the YRD, accounting for 42.2% of the total BC emissions. Emissions from industrial sources became the largest source of BC emissions after 2006 and accounting for 63.2% of total BC emissions in 2019. (2) BC emissions in the YRD showed noticeable spatial differentiation. The total BC emissions and BC emission intensity per capita in Jiangsu Province were ranked first. (3) The 95% confidence interval of total BC emissions in the YRD in 2019 was $7.13 \times 10^7 - 14.49 \times 10^7$ kg. The relative uncertainty caused by the emission factor was -33.50% - 35.11%, in which industrial sources were the main contributors to the uncertainty of BC emission uncertainty. Discussion (1) Significant changes have occurred in the structure of the BC emissions sources from 2000 to 2019. Owing to the rapid development of urban industries, the contribution of BC emissions from industrial sources has increased. In addition, with the popularization of natural gas energy, the contribution of BC from residential coal combustion in the YRD has significantly reduced. (2) The spatial distribution of BC emissions in the YRD was uneven and closely related to energy consumption, economy, and population density. The cities of Shanghai, Hefei, Fuyang, Xuzhou, and Nanjing had the highest BC emissions, which was related mostly to industrial development and energy consumption. The BC emissions per unit GDP decreased significantly in 2019 in all provinces, indicating that the development of the YRD relied less on energy-intensive industries. (3) The uncertainty of BC emissions was larger than that of other greenhouse gases because the current methods for assessing BC emissions are not as mature or reliable as those for CH₄ and CO₂. Differences in uncertainty calculations between inventories may also arise from differences in calculation methods and coefficients of variation. Conclusions Based on the emission inventory, the economy in the YRD is improving its dependence on energy-intensive industries; however, focus on controlling industrial and transportation sources is still required to reduce BC emissions. Recommendations and perspectives Future studies are required to analyze the uncertainties caused by emission control technologies.

Key words: black carbon; emission inventory; uncertainty; the Yangtze River Delta

黑碳 (black carbon, BC) 是大气细颗粒物 (PM₂₅)的重要组分, 粒径尺度为 0.01—0.1 μm, 是化石燃料和生物质燃料不完全燃烧的产物 (Kirchstetter et al., 2004)。黑碳气溶胶对可见 光波段有强烈的吸收作用, 能够改变地表的辐射 能量平衡进而影响气候变化(曹阳等, 2021), 其增温效益超过甲烷(CH₄),是仅次于二氧化碳 (CO₂)的温室气体(Bond et al., 2013)。黑碳 可以通过跨境传输对区域气候变化(钟流举等, 2007) 和水循环造成影响(吉振明, 2018), 其 表面可吸附有毒有害物质,进入人体呼吸系统后 可能危害人体健康(Janssen et al., 2011)。自上 世纪90年代以来,世界各国为应对气候变化采 取了一系列围绕 CO。减排的措施, 其成本昂贵且 需要长期努力。相比 CO, 而言, BC 在大气中停 留周期仅为几天到几周 (Simpson and Hatcher,

2004),因此,减少黑碳排放量是在短时间内改善空气质量、保护人体健康以及缓解气候变化的有效措施。

黑碳排放核算是获取和了解区域黑碳排放清单和时空分布特征的重要手段。目前黑碳排放的相关研究主要基于排放因子,由燃烧物质量推算黑碳排放量(Evans et al., 2017)。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第三次评估报告(https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg1/)指出, 2000年全球由生物质燃烧和化石燃料燃烧产生的黑碳排放量分别为5.7 Tg·a⁻¹和6.6 Tg·a⁻¹。然而,由于可获取数据的限制,一些亚洲和全球黑碳排放清单没有考虑生物质露天燃烧的排放(Ohara et al., 2007;Junker and Liousse, 2008)。目前中国黑碳排放核算大多基于国外学者建立的全球黑碳排放模式,较少使用国内实测排放因子。Cooke et al. (1999)

对排放清单进行了改进, 在核算时考虑了不同国 家机动车排放因子的差异,改进后的清单被广泛 用于各种大气传输模型。Bond et al. (2004)综 合考虑了燃烧物、燃烧类型、地区差异以及排 放控制技术,提出中国1996年黑碳排放总量为 1365 Gg·a⁻¹。根据 Cao et al. (2006) 发表的黑碳 高分辨率排放清单, 2000年中国黑碳排放总量达到 1500 Gg·a⁻¹, 这一结果与 Streets et al. (2003) 发表 的同年中国黑碳排放总量(1049 Gg·a⁻¹)存在一 定差异。通过使用国内排放因子并考虑排放控制 技术对清单进行改进, Zhang et al. (2009)研究 表明 2006 年中国黑碳排放总量为 1800 Gg·a⁻¹, 付 加锋等(2018)得出2012年中国黑碳排放总量为 1887 Gg·a⁻¹。总体而言,目前国内外关于黑碳排 放的核算数值之间存在较大差异, 对黑碳排放清 单不确定性的量化分析还比较缺乏。

中国是全球黑碳排放量最大的国家, 黑碳总排 放量约占全球总排放量的 25%—30% (Ni et al., 2014: Mao et al., 2016), 这给中国在国际气 候与温室效应谈判中带来巨大压力(Li et al., 2016)。长江三角洲地区(简称长三角地区) 作为中国工业化和城市化程度最高、经济增长最 快、大气污染最为严重的地区之一, 以碳质气溶 胶为主的区域性污染问题已成为该地区不可忽视 的环境问题(许敏, 2021)。本文基于中国能 源活动数据和黑碳排放因子库, 建立长三角地区 2000-2019年黑碳气溶胶排放清单,在此基础上 利用 Monte Carlo 方法对排放清单进行不确定性分 析, 重点分析排放因子取值差异对黑碳排放核算 的影响并识别对核算结果不确定性影响较大的关 键因子, 客观评价长三角地区黑碳排放的取值区 间,进而为研究区黑碳排放政策的制定和实施提 供数据基础和理论支撑。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况

长三角地区(32°34′—29°20′N,115°46′—123°25′E)位于长江入海之前的冲积平原,地势低平,包括江苏省、浙江省、安徽省和上海市共计41个城市,区域总面积为3.58×10⁵ km²,属亚热带季风气候。2019年,长三角地区以全国16.1%的人口(2.27亿人)创造了全国24.08%的地区生产总值(GDP)(23.8万亿元)。伴随着经济的快

速发展,长三角地区能源消耗量和机动车保有量逐年增加。根据国家统计年鉴数据,2006—2019年长三角地区能源消费总量从 4.79×10⁸ t 标准煤增加至 8.05×10⁸ t 标准煤(增长了 67.91%)。长三角地区各省市能源消费结构以化石能源为主,2019年长三角地区的煤炭消费量为 5.95×10⁸ t,原油消费量为 1.08×10⁸ t,天然气消费量为 5.95×10¹⁰ m³(中华人民共和国国家统计局,2020)。长三角作为能源消耗大、产业碳排放高的地区,建立其区域内黑碳气溶胶排放清单并对其不确定性进行定量分析,有利于全面准确了解黑碳的时空分布及演变,对有效降低黑碳排放、实现长三角地区及全国的减排目标具有重要意义。

1.2 黑碳排放核算及其不确定性评价

基于能源活动统计资料(曹国良等, 2011; Qin and Xie, 2011)采用排放因子法计算长三角地区各类污染源黑碳排放量。基本公式如下:

$$E=\sum (M_i \times F_i) + \mu \times M_j \div s \times F_j$$
 (1)
式中: E 为黑碳总排放量(g); M 为能源消耗量
(kg); i 代表各类能源; j 代表各类秸秆; F 为
各类排放因子(g·kg⁻¹); s 为农作物谷草比; μ
为焚烧比例,取值 40%。

黑碳排放源按行业可分为工业、火电供暖、 交通运输、居民生活消费和生物质燃烧五个方 面(图1)。其中工业、火电供暖、交通运输和 居民生活的黑碳排放量基于能源消耗数据以及排 放因子估算 (Qin and Xie, 2011; Wang et al., 2012)。工业能源消耗类型包括原煤、洗精煤、 焦炭、汽油、煤油及柴油;火电供暖能源消耗包 括原煤、汽油、柴油和燃料油; 交通运输排放参 考陆燕等(2015)的研究,能源消耗类型分为燃 料油、柴油、汽油。居民生活排放计入煤和石油 类燃烧。生物质燃烧所产生的黑碳排放量,需 先根据主要农作物(水稻、小麦、玉米、棉花及 其他秸秆)产量和谷草比计算出秸秆产生量,再 根据不同种类生物质的排放因子以及露天燃烧比 例计算(Zhang et al., 2013)。表 1 总结了目前 黑碳各类排放源的排放因子的范围。火电供暖、 交通源和生物质燃烧的排放因子主要来自 Streets et al. (2003)和 Cao et al. (2006)的研究,工业 和居民生活源的排放因子参考 Lu et al. (2015) 和 Chen et al. (2005)的研究。最终使用 Lu et al. (2015)的推荐值作为各类排放源的排放因子。

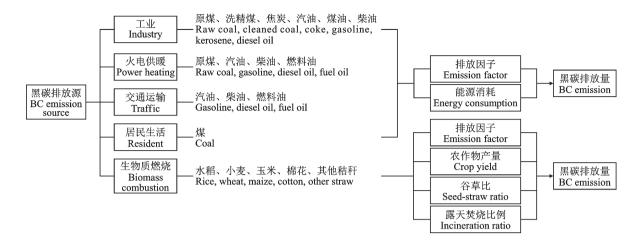


图 1 本研究黑碳排放源分类及黑碳排放量的核算

Fig. 1 Classification of black carbon emission sources and estimation method of BC emission

排放源		推荐值 Recommended	
Emission source	燃料 Fuels	范围 Range/(g·kg ⁻¹)	/(g·kg ⁻¹) (陆燕等, 2015 (Lu Y et al., 2015)
	原煤 Raw coal	0.003 — 0.32 (Streets et al., 2001)	0.01
火电供暖 Power	汽油 Gasoline	0.05(陆燕等, 2015(Lu Y et al., 2015))—0.26((曹国良等,2006(Cao G L et al., 2006))	0.05
heating	煤油 Kerosene	0.2(陆燕等,2015(Lu Y et al., 2015))—0.36(Streets et al., 2001)	0.2
	柴油 Diesel oil	0.25(Streets et al., 2001)—0.26((曹国良等, 2006(Cao G L et al., 2006))	0.25
	原煤 Raw coal	0.003(Streets et al.,2001)—1.58((曹国良等,2006(Cao G L et al., 2006))	0.5
工业	洗精煤 Cleaned coal	0.5(陆燕等,2015(Lu Y et al., 2015))	0.5
	焦炭 Coke	0.28 (Bond et al.,2004) —0.5 (陆燕等,2015 (Lu Y et al., 2015))	0.5
Industry	汽油 Gasoline	0.07(Streets et al., 2001)—0.26((曹国良等, 2006(Cao G L et al., 2006))	0.07
	煤油 Kerosene	$0.08 \; (\; {\rm Bond \; et \; al.} \; , \; \; 2004 \;) \; 0.36 \; (\; {\rm Streets \; et \; al.} \; , \; \; 2001 \;)$	0.2
	柴油 Diesel oil	0.25 (Streets et al., 2001) — 0.30 (Bond et al., 2004)	0.25
	燃料油 Fuel oil	0.1(陆燕等, 2015(Lu Y et al., 2015))—0.36(Streets et al., 2001)	0.1
交通 Traffic	汽油 Gasoline	0.049((曹国良等, 2006(Cao G L et al., 2006))—0.08(Streets et al., 2001)	0.05
	柴油 Diesel oil	1.1 (Streets et al., 2001)	1.1
居民生活 Resident	煤 Coal	0.28((曹国良等, 2006(Cao G L et al., 2006))—3.7(Streets et al., 2001)	0.28
	水稻 Rice	0.10 (Zhang et al., 2013) —0.58 (Streets et al., 2001)	0.53
上物质燃烧	小麦 Wheat	0.49 (Li et al., 2007) —0.90 (Streets et al., 2001)	0.8
Biomass	玉米 Maize	0.30(Zhang et al.,2013)—0.78(曹国良等,2007(Cao G L et al., 2007))	0.75
combustion	棉花 Cotton	0.82(曹国良等,2007(Cao G L et al., 2007))	0.82
	其他秸秆 Other straw	0.66(曹国良等, 2006(Cao G L et al., 2006))	0.8

使用蒙特卡洛(Monte Carlo)随机抽样方法对排放因子取值所带来的黑碳排放核算不确定性进行定量分析。其主要步骤为:首先通过参考陆燕等(2015)的推荐值和相关文献排放因子取值确定排放因子的均值和标准差,生成不同部门排

放因子概率分布(正态分布)并利用排放因子取值范围进行率定;随后从相关黑碳排放因子中随机抽取1000个样本,根据排放因子法计算各部门相应黑碳排放量;最后进行1000次重复计算,得到黑碳排放量的概率分布,从而获得相应

不确定性统计值。负相对不确定性=(2.5百分位-平均值)/平均值;正相对不确定性=(97.5百分位-平均值)/平均值。

1.3 数据来源

使用的数据主要包括长三角地区共计 41 个城市的人口、土地面积、GDP、各类能源消耗数据、主要农作物产量及谷草比,时间范围为

2000—2019年。数据来源为各类统计年鉴以及 文献资料,具体如表 2 所示。能源数据用于计算 长三角地区工业、发电供暖、交通运输及居民生 活源的黑碳排放量;农作物产量及谷草比(Lal, 2005)用于计算生物质燃烧源黑碳排放;人口、 面积和 GDP 用于计算长三角地区各省市黑碳单 位排放强度。

	表 2 本研究数据名称、来源及用途 Tab. 2 Name, source and use of data for this st	udy
数据名称	数据来源	数据用途
Data	Sources	Use
能源消费量	中国能源统计年鉴	黑碳排放量
Energy consumption	China energy statistics yearbook	BC emission
主要农作物产量	中国农村统计年鉴	生物质燃烧源黑碳排放
Crop yield	China rural statistics yearbook	BC emission from residents
农作物谷草比	相关研究文献	生物质燃烧源黑碳排放
Seed-straw ratio	Related literature	BC emission from residents
人口、面积、GDP	中国统计年鉴	各省市黑碳单位排放强度
Population, area, GDP	China statistics yearbook	BC emission of cities

2 结果与讨论

2.1 长三角地区 2000—2019 年黑碳排放时间变 化趋势

2000-2019年,长三角地区黑碳排放总量由 10.72×10⁷ kg 增加至12.54×10⁷ kg (图 2), 黑 碳排放源结构发生显著变化。2000年长三角地区 居民生活源排放量是该地区最主要的黑碳排放源 $(4.53 \times 10^7 \text{ kg})$,占黑碳排放总量的 42.2%。除了 化石燃料, 秸秆和薪柴燃烧也是长三角农村地区做 饭和取暖的能源获取方式(Streets et al., 2001), 这些生物质的燃烧是居民生活排放黑碳的主要贡 献者。居民生活源排放在2008年之前包含生物质 燃烧和化石燃料燃烧两类来源,2000-2007年共 减少了 1.70×10⁷ kg, 其中生物质燃烧排放减少了 1.41×10⁷ kg。2008 年后统计年鉴中不再收录生物 质燃烧数据,居民生活源排放仅包含化石燃料燃 烧。国家对燃煤的有效控制和长三角地区农村居民 燃料消耗减少也导致居民生活源黑碳排放由 2008 年的 0.56×10^7 kg 下降至 2019 年的 0.12×10^7 kg。 2006年,长三角地区工业源黑碳排放量(5.97× 10^7 kg) 超过居民生活排放量(2.71×10⁷ kg),成 为长三角地区最重要的黑碳排放源。此后 10 a, 工业源排放量逐年增加,在2015年达到峰值 (9.48×10⁷ kg, 占比 66.9%) 后逐渐下降至 2019

年的 7.92×10⁷ kg (占比 63.2%)。 2019年,居民 生活排放仅占长三角地区黑碳排放总量的0.9%。 近 20 a 长三角地区黑碳排放总量中, 交通排放占比 由 3.4% 增至 14.6%, 生物质排放占比由 14.9% 增 至 17.8%, 发电供暖排放量 20 a 来始终低于黑碳排 放总量的4%。在全国范围内,2008年对中国(不 含港澳台) 黑碳气溶胶排放贡献最大的是工业源和 居民生活排放(黄观等, 2015), 分别占黑碳排 放总量的 43.3% 和 39.6%。与全国黑碳排放源结构 相比,本文核算的2008年长三角地区工业源黑碳 排放的占比高于全国平均, 而居民生活源占比显著 低于全国平均,造成这种差异的原因与长三角地区 的能源消费结构有关。2000-2015年长三角地区 工业增加值约占全国的17%(张新林等,2019), 由于城市工业迅速发展,工业源对黑碳排放的贡献 不断增加。此外,随着天然气能源普及,长三角地 区居民生活燃煤贡献显著减少, 因而工业源贡献比 重较高(陆燕等, 2015)。

由于研究时间段以及采用排放因子的不一致,不同黑碳排放清单间存在一定差异(表 3)。根据中国多尺度排放清单模型(multi-resolution emission inventory for China,MEIC)提供的分省黑碳排放数据,2008-2017年长三角地区黑碳排放总量由 21.43×10^7 kg 降至 15.37×10^7 kg(Li et al.,2017;Zheng et al.,2018)。2014年前MEIC清单

核算的黑碳排放量高于本研究,2014—2017年 黑碳排放量下降,与本文呈相反的趋势,主要是 由于 MEIC 工业源排放由 4.95×10⁷ kg 降至 3.07× 10⁷ kg。从黑碳排放源结构上看,与本文相比, MEIC 清单得到的居民生活源占比高出 30%,主要 是由于 MEIC 清单未计入农业生物质燃烧数据,因 此该排放源占比为 0;另外,由于数据限制,本文 2008 年后居民生活源排放未计入生物质燃料的燃烧;同时,受居民生活源排放未计入生物质燃料的燃烧;同时,受居民生活源占比过低影响,本文计算 的工业源占比高于其他清单。Qin and Xie(2011) 发表的 2000 年黑碳排放清单中居民生活排放比例 高于本文及其他清单,主要是由于 2000 年中国家 庭广泛使用煤燃料做饭和取暖,近年来煤逐渐被天然气取代,居民使用煤产生的黑碳也相应减少。与 Wang et al. (2012)、Zhang et al. (2013)以及付加锋等(2018)的结果相比,黑碳排放差异主要是由于本文使用的能源活动数据不包含天然气消费。此外,中国机动车排放标准在1999—2010年经历不断变革,排放因子较之前变低,也会导致不同清单交通源黑碳排放的差异。不同排放清单产生差异的原因还包括编制清单的活动数据的来源不同、排放因子的取值不同,以及不同清单的数据处理和计算方式可能存在差异等,这些差异难以评估。

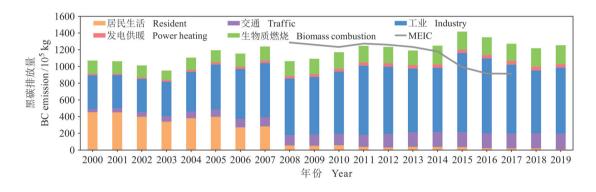


图 2 2000—2019 年长三角地区黑碳排放及其组分时间变化趋势及其与 MEIC 清单的对比 Fig. 2 BC emissions in the YRD from 2000 to 2019 and comparison with MEIC

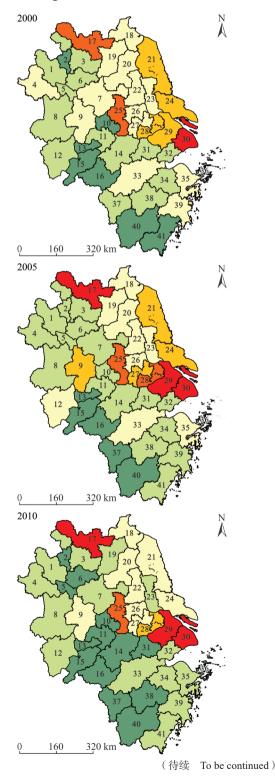
表 3 长三角地区黑碳排放核算已有研究对比 Tab. 3 Comparison of different emission lists								
排放清单 Emission inventory	年份 Year	黑碳排放 BC emission	工业 Industry	发电供暖 Power heating	交通 Traffic	居民生活 Resident	生物质燃烧 Biomass combustion	总计 Total
MEIC	2017	排放量 Emission/10 ⁷ kg	4.66	0.02	5.41	5.29	0.00	15.37
MEIC	2017	占比 Ratio/%	30.28	0.12	35.19	34.40	0.00	100.00
Qin and Xie, 2011	2000	排放量 Emission/10 ⁷ kg	4.64	0.11	1.72	7.99	1.42	15.87
Qili alid Ale, 2011		占比 Ratio/%	29.20	0.69	10.82	50.32	8.97	100.00
Wang et al., 2012	2007	排放量 Emission/10 ⁷ kg	1.52	2.33	0.27	0.73	0.12	4.87
wang et al., 2012		占比 Ratio/%	31.30	47.83	5.59	15.02	2.51	100.00
Zhang et al., 2013	2008	排放量 Emission/10 ⁷ kg	6.22	0.23	2.90	6.27	1.06	16.68
Zhang et al., 2013		占比 Ratio/%	37.31	1.38	17.38	37.59	6.34	100.00
付加锋等, 2018 (Fu J F et al., 2018)	2012	排放量 Emission/10 ⁷ kg	7.29	0.31	3.22	6.50	1.26	18.57
	2012	占比 Ratio/%	39.26	1.64	17.33	34.99	6.78	100.00
本研究	2019	排放量 Emission/10 ⁷ kg	7.92	0.44	1.84	0.12	2.23	12.55
This study	2019	占比 Ratio/%	63.15	3.49	14.64	0.94	17.78	100.00

2.2 长三角地区黑碳排放的空间分异特征

2000—2019年,黑碳集中排放的区域分布在上海市、安徽省合肥市和阜阳市、江苏省徐州市和南京市及沿海地区(图3)。其中,苏州市与上海市接壤,受GDP增长驱动,20 a来苏州市黑

碳排放总量增长了 0.39×10⁷ kg(67.82%),并在 2019 年超过了上海市(0.94×10⁷ kg),成为长三 角地区黑碳排放最多的城市。安徽省各城市黑碳排放量增加速度最快,其中合肥市黑碳排放在 2019 年达到 0.94×10⁷ kg,增长了 147.90%,仅次于上

海市和苏州市。徐州市位于江苏省北部,靠近内陆,2000—2010年,徐州市黑碳排放量由 0.75×10⁷ kg 增加至 1.08×10⁷ kg。2019年,随着国家大气污染防控政策的实施,徐州市黑碳排放又降至 0.47×10⁷ kg。总体而言,浙江省各城市黑碳排放量较低,2019年黑碳排放量最高的是杭州市(0.40×10⁷ kg)。



(续图3 Continued Fig. 3) 2015 N 320 km 160 2019 N 160 320 km 黑碳排放总量 Total BC emission/10⁵ kg 20 40 60

1.亳州市; 2.淮北市; 3.宿州市; 4.阜阳市; 5.淮南市; 6.蚌埠市; 7.滁州市; 8.六安市; 9.合肥市; 10.马鞍山市; 11.芜湖市; 12.安庆市; 13.铜陵市; 14.宣城市; 15.池州市; 16.黄山市; 17.徐州市; 18.连云港市; 19.宿迁市; 20.淮安市; 21.盐城市; 22.扬州市; 23.泰州市; 24.南通市; 25.南京市; 26.镇江市; 27.常州市; 28.无锡市; 29.苏州市; 30.上海市; 31.湖州市; 32.嘉兴市; 33.杭州市; 34.绍兴市; 35.宁波市; 36.舟山市; 37.衢州市; 38.金华市; 39.台州市; 40.丽水市; 41.温州市。

1. Bozhou City; 2. Huaibei City; 3. Suzhou City; 4. Fuyang City; 5. Huainan City; 6. Bengbu City; 7. Chuzhou City; 8. Lu'an City; 9. Hefei City; 10. Ma'anshan City; 11. Wuhu City; 12. Anqing City; 13. Tongling City; 14. Xuancheng City; 15. Chizhou City; 16. Huangshan City; 17. Xuzhou City; 18. Lianyungang City; 19. Suqian City; 20. Huai'an City; 21. Yancheng City; 22. Yangzhou City; 23. Taizhou City; 24. Nantong City; 25. Nanjing City; 26. Zhenjiang City; 27. Changzhou City; 28. Wuxi City; 29. Suzhou City; 30. Shanghai City; 31. Huzhou City; 32. Jiaxing City; 33. Hangzhou City; 34. Shaoxing City; 35. Ningbo City; 36. Zhoushan City; 37. Quzhou City; 38. Jinhua City; 39. Taizhou City; 40. Lishui City; 41. Wenzhou City.

图 3 长三角地区 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、 2019 年黑碳排放空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of BC emissions in the YRD

从黑碳排放源结构来看(表4),2019年长三角地区四省市均以工业排放为主,占黑碳排放总量的50%以上。由居民生活和发电供暖产生的黑碳排放占比最小,最低小于10%。江苏省地处平原,工业发展迅速,2000—2019年工业排放占比由28.77%增至67.99%;安徽省工业排放占比减少13.16%,但仍是最重要的黑碳排放源,排放总量增加0.68×10⁷ kg;上海交通运输产生的黑碳排放增长迅速,2000年交通排放量为0.09×10⁷ kg

(7.63%),2019年交通排放量迅速增至0.29×10⁷ kg(31.24%),成为长三角地区交通源黑碳排放占比最大的地区;由于上海农村人口密度小于安徽省、江苏省和浙江省,其生物质燃烧占黑碳排放总量的比例最小(2.34%)且显著低于其余三省。安徽省居民生活源黑碳排放在2010年出现突增,主要原因是由于统计年鉴中收录的居民燃煤消费量在2008年以前及以后为空值,导致与2010年排放量计算结果差异较大。

表 4 长三角地区 2000 年、2010 年和 2019 年黑碳排放来源构成 Tab. 4 Source of BC emissions in the YRD in 2000, 2010, and 2019													
黑碳排放源 BC sources		江苏省 Jiangsu Province		浙江省 Zhejiang Province		安徽省 Anhui Province			上海市 Shanghai City				
		2000	2010	2019	2000	2010	2019	2000	2010	2019	2000	2010	2019
工业 Industry	排放量 Emission/10 ⁷ kg	1.53	4.06	3.95	0.10	0.18	1.07	1.65	2.39	2.33	0.78	0.84	0.57
maustry	占比 Ratio/%	28.77	73.17	67.99	5.22	16.15	59.48	71.42	62.29	58.26	67.69	68.55	61.05
发电供暖 Power heating	排放量 Emission/10 ⁷ kg	0.06	0.15	0.19	0.05	0.11	0.11	0.02	0.06	0.11	0.03	0.04	0.03
rower heating "	占比 Ratio/%	1.09	2.78	3.24	2.59	9.71	6.33	0.77	1.45	2.68	2.69	3.24	3.10
交通运输 Traffic	排放量 Emission/10 ⁷ kg	0.12	0.45	0.70	0.15	0.40	0.33	0.00	0.24	0.51	0.09	0.25	0.29
Traffic	占比 Ratio/%	2.32	8.17	12.12	7.97	36.46	18.28	0.13	6.34	12.77	7.63	20.80	31.24
居民生活 Resident	排放量 Emission/10 ⁷ kg	2.94	0.07	0.03	1.37	0.10	0.04	0.00	0.35	0.03	0.21	0.06	0.02
Resident	占比 Ratio/%	55.23	1.28	0.58	71.27	8.98	1.99	0.05	9.09	0.67	18.48	5.16	2.28
生物质燃烧 Biomass	排放量 Emission/10 ⁷ kg	0.67	0.81	0.93	0.25	0.31	0.25	0.64	0.80	1.02	0.04	0.03	0.02
combustion	占比 Ratio/%	12.60	14.60	16.08	12.95	28.70	13.92	27.63	20.83	25.61	3.50	2.25	2.34
总计 Total	排放量 Emission/10 ⁷ kg	5.32	5.54	5.80	1.92	1.10	1.80	2.31	3.84	4.00	1.15	1.22	0.93

黑碳排放与能源消耗、经济及人口密度密切相关(高嵩等,2017)。为了解长三角地区黑碳排放的空间分布特征及其成因,分别计算了2000—2019年各省黑碳排放总量、单位面积黑碳排放量、人均黑碳排放量以及单位GDP黑碳排放量(图4)。结果表明:2019年长三角地区黑碳排放总量由高到低为江苏省>安徽省>浙江省>上海市。2000年江苏省黑碳排放在长三角地区占比49.8%,2019年降至46.4%,这是由于安徽省排放总量增长速度超过了江苏省,其中工业是安徽省黑碳排放增长的主要贡献源。2019年单位面积黑碳排放量为上海市>江苏省>安徽省>浙江省,上海市2000年单位面积黑碳排放量为1832.98 kg·km²,2019年减少至1494.67 kg·km²,居民生活和工业是上海市黑碳排放减少的主要原

因。2019年各省人均黑碳排放顺序为江苏省>安徽省>上海市>浙江省,近20 a 安徽省人均黑碳排放量增加了1924.18 kg·万人¹。除安徽省外,其余三省市人均黑碳排放强度均有所下降。2019年长三角地区各省市单位 GDP 黑碳排放总量由高到低为安徽省>江苏省>浙江省>上海市。安徽省2000年单位 GDP 黑碳排放总量为7963.86 kg·亿元¹,反映了过去安徽省创造单位经济价值的环境负荷较大,也间接反映了安徽省的区域经济技术水平略低于其余三省市;2019年各省市的单位 GDP 黑碳排放量均明显下降,说明长三角经济的发展对高耗能产业依赖情况在改善。对于未来长三角地区黑碳排放量的调控,应该注重能源消耗量、产业结构的调整,使其与经济协调发展。

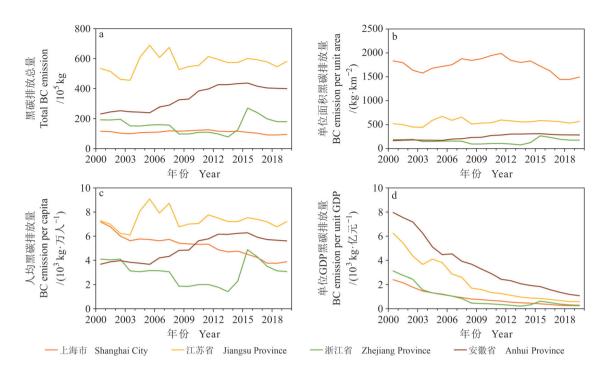


图 4 长三角地区各省黑碳排放总量(a)、单位面积黑碳排放(b)、人均黑碳排放量(c)和 单位 GDP 黑碳排放量(d)的演变

Fig. 4 Total BC emissions (a), BC emissions per unit area (b), BC emissions per capita (c) and BC emissions per unit GDP (d) in the YRD

2.3 长三角地区黑碳排放核算的不确定性分析

综合考虑黑碳排放核算过程中排放因子的取值差异,Monte Carlo 模拟表明 2019 年长三角地区黑碳排放总量为 7.13×10⁷—14.49×10⁷ kg (95%置信区间),相对不确定性为 -33.50%—35.11%(图 5)。黑碳排放源不确定性由大到小排序为工业、发电供暖、生物质燃烧、居民生活和交通。工业源在 95% 置信区间下不确定性为 -57.49% —60.54%,是长三角黑碳排放不确定性的主要贡献者,主要是由于其相比其他排放源而言,工业排放因子来源更多、差异更大,对整体不确定性的贡献较大(李楠等,2017)。

上海市黑碳排放核算的不确定性最小(表5),95%置信区间下的总排放量为0.58×10⁷—1.04×10⁷ kg,相对不确定性为-28.46%—29.32%。浙江省黑碳总排放量为1.08×10⁷—2.48×10⁷ kg(95%置信区间),不及江苏省(3.09×10⁷—6.11×10⁷ kg)的一半,但其相对不确定性高达-37.88%—41.92%,这与统计方法有关,即不确定性在较低的平均值下会被放大。此外,浙江省工业源在95%置信区间下的相对不确定性为

-65.45%—73.21%,是浙江省黑碳总排放量不确定性的主要贡献者。

总体而言,本文得到的长三角地区黑碳排放 不确定性低于其他研究结果。Zhang et al. (2013) 通过模拟指出全国黑碳排放清单在95%置信区间 的不确定性为-53.51%-179.92%, Qin and Xie (2011) 指出黑碳排放清单不确定性为-49.45%-136.71%, Lu et al. (2011)则指出其不确定性为 -43%-93%。清单不确定性差异一方面是由于与 全国范围相比本文研究区域较小, 另一方面原因 是不同研究使用的不确定分析方法和排放因子研 究来源不尽相同。杨栋等(2014)通过蒙特卡洛 模拟得到长三角 CH4 排放清单在 95% 置信区间的 不确定性为-15.60%-22.24%, CO₂的不确定性 为 -6.04% -- 5.34%。 可以看出与其他温室气体相 比, BC 排放量的不确定性明显偏大, 这是由于 目前对BC排放量的评估方法还没有CH。和CO。 成熟可靠。清单间不确定性计算的差异还可能来 源于计算方法和变异系数的不同。此外, 与国家 尺度相比, 城市和区域尺度的温室气体排放清单 具有更大的不确定性 (Ogle et al., 2003; Wunch et al., 2009)

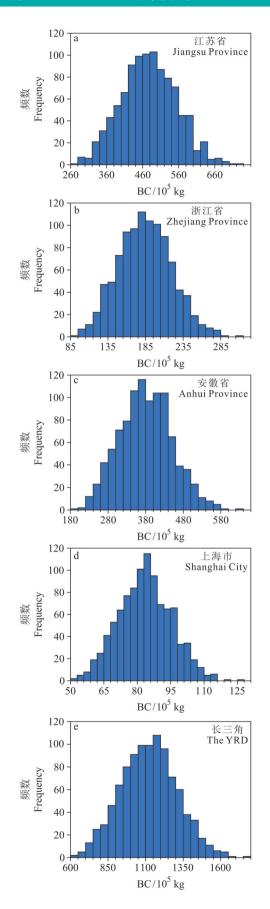


图 5 2019 年长三角地区各省市黑碳排放不确定性分布 Fig. 5 The uncertainties of BC emissions in the YRD in 2019

表 5 长三角地区 BC 总排放量不确定性 Tab. 5 The uncertainties of total inventories for YRD BC emissions

	В	C 总排放	量		
TP 12.	BC e	774 2 W			
地区 Region	2.5 百分位 The 2.5 percentiles	平均值 Mean	97.5 百分位 The 97.5 percentiles	不确定性 Uncertainty/%	
江苏省 Jiangsu Province	3.09	4.57	6.11	-32.37—33.61	
浙江省 Zhejiang Province	1.08	1.75	2.48	-37.88-41.92	
安徽省 Anhui Province	2.32	3.60	5.02	-35.75 39.34	
上海市 Shanghai City	0.58	0.81	1.04	-28.46-29.32	
长三角地区 The YRD	7.13	10.72	14.49	-33.5035.11	

3 结论

基于国家能源活动数据和黑碳排放因子库, 建立了长三角地区 2000—2019 年黑碳气溶胶排放 清单,在此基础上利用 Monte Carlo 方法对排放清 单进行不确定性分析,重点分析排放因子取值差 异对黑碳排放核算的影响,得出以下结论:

- (1)2000—2019年长三角地区黑碳排放总体增加,黑碳排放源的结构发生了显著变化。 2000年居民生活排放是长三角地区最主要的黑碳排放源,2006年之后工业排放成为长三角地区的主要黑碳排放源。
- (2)长三角地区黑碳排放存在明显的空间分异,2019年黑碳排放总量由高到低为江苏省>安徽省>浙江省>上海市;人均黑碳排放强度为江苏省>安徽省>上海市>浙江省;单位面积黑碳排放强度为上海市>江苏省>安徽省>浙江省;单位 GDP 黑碳排放总量顺序为安徽省>江苏省>浙江省>上海市。
- (3)对排放因子取值差异的不确定性分析表明: 2019年长三角地区黑碳总排放量为 7.13×10⁷—14.49×10⁷ kg(95% 置信区间),相对不确定性为 -33.50%—35.11%。工业排放因子的不确定性是长三角黑碳排放核算过程中不确定性的主要贡献者。

由于在长三角黑碳排放清单核算过程中使用的能源活动水平数据依赖公开的统计资料,2008年后统计年鉴居民生活源未计入生物质燃料,本文仅考虑煤和石油类燃烧,对区域核算结果有一定的影响。随着国家高效燃烧和超低排放的要求,排放因子的现势性未能考虑完整,进而增加了黑碳排放核算的不确定性。总体而言,基于黑碳排放清单,长三角经济的发展对高耗能产业依赖情况在改善,但仍需重视对工业源和交通运输源的控制以减少黑碳排放量;同时,需根据不同人口经济特点对黑碳排放的重点地区实施控制措施。对于未来长三角地区黑碳排放的调控,应该注重对能源消耗、产业结构的调整,使其与经济协调发展。

参考文献

- 曹国良,张小曳,龚山陵,等. 2011. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单 [J]. *科学通报*,56(3): 261-268. [Cao G L, Zhang X Y, Gong S L, et al. 2011. List of main particulate matter and pollution gas emission sources in China area [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(3): 261-268.]
- 曹国良,张小曳,王亚强,等. 2006. 中国大陆黑碳气溶胶 排放清单 [J]. *气候变化研究进展*,2(6): 259-264,317. [Cao G L, Zhang X Y, Wang Y Q, et al. 2006. Inventory of black carbon emission from China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2(6): 259-264,317.]
- 曹国良,张小曳,王亚强,等. 2007. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算 [J]. *科学通报*,52(15): 1826-1831. [Cao G L, Zhang X Y, Wang Y Q, et al. 2007. Estimation of emissions from open-burning of farmland straw in China region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(15): 1826-1831.]
- 曹 阳,安欣欣,刘保献,等.2021. 北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 [J]. 环境科学, 42(12): 5633-5643. [Cao Y, An X X, Liu B X, et al. 2021. Characteristics and main influencing factors of black carbon aerosol in Beijing [J]. Environmental Science, 42(12): 5633-5643.]
- 付加锋,齐 蒙,刘 倩,等. 2018. 黑碳气溶胶排放量测算及空间分布研究 [J]. *科技导报*, 36(2): 38-46. [Fu J F, Qi M, Liu Q, et al. 2018. The emission estimation and spatial distribution of black carbon aerosol [J]. *Science & Technology Review*, 36(2): 38-46.]
- 高 嵩,许潇锋,陶风波,等.2017.长三角地区近10年气溶

- 胶时空分布特征 [J]. 环境科学与技术, 40(9): 192-202. [Gao S, Xu X F, Tao F B, et al. 2017. Temporal and spatial distributions of aerosols over the Yangtze River Delta region in recent 10 years [J]. *Environmental Science & Technology*, 40(9): 192-202.]
- 黄 观, 刘 伟, 刘志红, 等. 2015. 黑碳气溶胶研究概况 [J]. 灾害学, 30(2): 205–214. [Huang G, Liu W, Liu Z H, et al. 2015. A research overview of black carbon aerosols [J]. Journal of Catastrophology, 30(2): 205–214.]
- 吉振明. 2018. 青藏高原黑碳气溶胶外源传输及气候效应模拟研究进展与展望 [J]. *地理科学进展*, 37(4): 465-475. [Ji Z M. 2018. Advances and prospects of research on simulating transboundary black carbon and their climatic effects over the Tibetan Plateau [J]. *Progress in Geography*, 37(4): 465-475.]
- 李 楠, 卞雅慧, 钟庄敏, 等. 2017. 广东省人为源 BC、OC 排放清单建立与校验 [J]. 环境科学学报, 37(2): 419–428. [Li N, Bian Y H, Zhong Z M, et al. 2017. Development and verification of black carbon and organic carbon anthropogenic emission inventory in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 37(2): 419–428.]
- 陆 燕,王勤耕,张艳燕. 2015. 长江三角洲黑碳排放特征研究 [J]. 南京大学学报(自然科学), 51(3): 535-542. [Lu Y, Wang Q G, Zhang Y Y, 2015. Black carbon emission in the Yangtze River Delta [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 51(3): 535-542.]
- 许 敏. 2021. 中国长三角地区 PM_{2.5} 时空分布数值模拟研究 [J]. *气象与环境学报*, 37(4): 33-39. [Xu M. 2021. Numerical simulation on the spatiotemporal distribution of PM_{2.5} in the Yangtze River Delta [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 37(4): 33-39.]
- 杨 栋, 申双和, 张 弥, 等. 2014. 南京和长三角地区 CO₂ 与 CH₄ 人为排放清单估算的不确定性分析 [J]. 气象科 学, 34(3): 325–334. [Yang D, Shen S H, Zhang M, et al. 2014. Uncertainty analysis on the estimation of CO₂ and CH₄ emission inventory over Nanjing and Yangtze River Delta [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 34(3): 325–334.]
- 张新林, 仇方道, 王长建, 等. 2019. 长三角城市群工业生态效率空间溢出效应及其影响因素 [J]. *长江流域资源与环境*, 28(8): 1791–1800. [Zhang X L, Qiu F D, Wang C J, et al. 2019. Spatial spillover effects and driving factors of industrial eco-efficiency in Yangtze River Delta urban agglomerations [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 28(8): 1791–1800.]

- 中华人民共和国国家统计局 . 2020. 中国统计年鉴: 2020 [M]. 北京:中国统计出版社. [National Bureau of Statistics of China. 2020. China statistical yearbook: 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press.]
- 钟流举,郑君瑜,雷国强,等.2007. 大气污染物排放源清单 不确定性定量分析方法及案例研究 [J]. 环境科学研究, 20(4): 15-20. [Zhong L J, Zheng J Y, Lei G Q, et al. 2007. Quantitative uncertainty analysis in air pollutant emission inventories: methodology and case study [J]. *Research of Environmental Sciences*, 20(4): 15-20.]
- Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, et al. 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11): 5380-5552.
- Bond T C, Streets D G, Yarber K F, et al. 2004. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. *Journal of Geophysical Research*, 109(14): D14203. DOI: 10.1029/2003JD003697.
- Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C. 2006. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China [J]. Atmospheric Environment, 40(34): 6516–6527.
- Chen Y J, Sheng G Y, Bi X H, et al. 2005. Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China [J]. Environmental Science & Technology, 39(6): 1861–1867.
- Cooke W F, Liousse C, Cachier H, et al. 1999. Construction of a 1°×1° fossil fuel emission data set for carbonaceous aerosol and implementation and radiative impact in the ECHAM4 model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D18): 22137–22162.
- Evans M, Kholod N, Kuklinski T, et al. 2017. Black carbon emissions in Russia: a critical review [J]. *Atmospheric Environment*, 163: 9–21.
- Janssen N A H, Hoek G, Simic-Lawson M, et al. 2011. Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with PM₁₀ and PM_{2.5} [J]. *Environmental Health Perspectives*, 119(12): 1691–1699.
- Junker C, Liousse C. 2008. A global emission inventory of carbonaceous aerosol from historic records of fossil fuel and biofuel consumption for the period 1860—1997 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 8(5): 1195–1207.
- Kirchstetter T W, Novakov T, Hobbs P V. 2004. Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D21). DOI:

- 10.1029/2004JD004999.
- Lal R. 2005. World crop residues production and implications of its use as a biofuel [J]. *Environment International*, 31(4): 575–584.
- Li B G, Gasser T, Ciais P, et al. 2016. The contribution of China's emissions to global climate forcing [J]. *Nature*, 531(7594): 357–361.
- Li M, Liu H, Geng G N, et al. 2017. Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 4(6): 834–866.
- Li X H, Wang S X, Duan L, et al. 2007. Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stover in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 41(17): 6052–6058.
- Lu Z, Zhang Q, Streets D G. 2011. Sulfur dioxide and primary carbonaceous aerosol emissions in China and India, 1996—2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(18): 9839–9864.
- Mao Y H, Liao H, Han Y M, et al. 2016. Impacts of meteorological parameters and emissions on decadal and interannual variations of black carbon in China for 1980—2010 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(4): 1822–1843.
- Ni M J, Huang J X, Lu S Y, et al. 2014. A review on black carbon emissions, worldwide and in China [J]. *Chemosphere*, 107: 83–93.
- Ogle S M, Jay Breidt F, Eve M D, et al. 2003. Uncertainty in estimating land use and management impacts on soil organic carbon storage for US agricultural lands between 1982 and 1997 [J]. *Global Change Biology*, 9(11): 1521–1542.
- Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. 2007. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980—2020 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(16): 4419–4444.
- Qin Y, Xie S D. 2011. Estimation of County-level black carbon emissions and its spatial distribution in China in 2000 [J]. *Atmospheric Environment*, 45(38): 6995–7004.
- Simpson M J, Hatcher P G. 2004. Overestimates of black carbon in soils and sediments [J]. *Naturwissenschaften*, 91(9): 436–440.
- Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D21). DOI: 10.1029/2002JD003093.

(下转109页)

- $PM_{2.5}$ 时空分布特征及其与气象因素的关系 [J]. *生态环境学报*, 26(10): 1747–1754. [Yang X C, Zhao W J, Xiong Q L, et al. 2017. Spatio-temporal distribution of $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) area in 2016 and its relationship with meteorological factors [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 26(10): 1747–1754.]
- 姚荣鹏,张 勃,王立兵,等. 2021. 2015—2019 年中东部地区 PM_{2.5} 时空演变及其驱动力 [J]. *生态学杂志*, 40(3): 813—824. [Yao R P, Zhang B, Wang L B, et al. 2021. Spatiotemporal variations of PM_{2.5} and driving factors over central and eastern China between 2015 and 2019 [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 40(3): 813—824.]
- 易文利,朱婵园,郭 婵,等. 2020. 陕西省冬春季 PM_{2.5} 时空分布特征研究 [J]. *地球与环境*, 48(6): 663–671. [Yi W L, Zhu C Y, Guo C, et al. 2020. Spatio-temporal distribution of PM_{2.5} during winter and spring seasons in Shaanxi Province [J]. *Earth and Environment*, 48(6): 663–671.]
- 赵 辉,郑有飞,吴晓云,等. 2018. 江苏省大气复合污染特征与相关气象驱动 [J]. 中国环境科学, 38(8): 2830-2839. [Zhao H, Zheng Y F, Wu X Y, et al. 2018. Atmospheric compound pollution characteristics and the effects of meteorological factors in Jiangsu Province [J]. China Environmental Science, 38(8): 2830-2839.]
- 周敏丹, 匡耀求, 云国梁. 2020. 基于地理探测器的广州市大气 PM_{2.5} 浓度驱动因素分析 [J]. 环境科学研究, 33(2): 271–279. [Zhou M D, Kuang Y Q, Yun G L. 2020. Analysis of driving factors of atmospheric PM_{2.5} concentration in Guangzhou City based on geo-detector [J]. Research of Environmental Sciences, 33(2): 271–279.]

- Jing Z Y, Liu P F, Wang T H, et al. 2020. Effects of meteorological factors and anthropogenic precursors on PM_{2.5} concentrations in cities in China [J]. Sustainability, 12(9): 3550. DOI: 10.3390/su12093550.
- Katanoda K, Sobue T, Satoh H, et al. 2011. An association between long-term exposure to ambient air pollution and mortality from lung cancer and respiratory diseases in Japan [J]. *Journal of Epidemiology*, 21(2): 132–143.
- Luo K, Li G D, Fang C L, et al. 2018. PM_{2.5} mitigation in China: socioeconomic determinants of concentrations and differential control policies [J]. *Journal of Environmental Management*, 213: 47–55.
- Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J, et al. 2012. Meteorological modes of variability for fine particulate matter (PM_{2.5}) air quality in the United States: implications for PM_{2.5} sensitivity to climate change [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(6): 3131–3145.
- Tobler W R. 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region [J]. *Economic Geography*, 46(S1): 234–240.
- Wang S J, Liu X P, Yang X, et al. 2018. Spatial variations of PM_{2.5} in Chinese Cities for the joint impacts of human activities and natural conditions: a global and local regression perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 203: 143–152.
- Wu W Q, Zhang M, Ding Y T. 2020. Exploring the effect of economic and environment factors on PM_{2.5} concentration: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Environmental Management*, 268: 110703. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110703.

(上接97页)

- Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, et al. 2001. Black carbon emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 35(25): 4281–4296.
- Wang R, Tao S, Wang W T, et al. 2012. Black carbon emissions in China from 1949 to 2050 [J]. *Environmental Science & Technology*, 46(14): 7595–7603.
- Wunch D, Wennberg P O, Toon G C, et al. 2009. Emissions of greenhouse gases from a North American megacity [J]. *Geophysical Research Letters*, 36(15): L15810. DOI: 10.1029/2009GL039825.
- Zhang N, Qin Y, Xie S D. 2013. Spatial distribution of black carbon emissions in China [J]. *Chinese Science Bulletin*,

- 58(31): 3830-3839.
- Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14): 5131–5153.
- Zhang Y S, Shao M, Lin Y, et al. 2013. Emission inventory of carbonaceous pollutants from biomass burning in the Pearl River Delta Region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 76: 189–199.
- Zheng B, Tong D, Li M, et al. 2018. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(19): 14095–14111.