

唐 凤,沙青娥,刘颖颖,等.2006~2020年广东省人为源多环芳烃排放演变特征 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):19-29.

Tang F, Sha Q E, Liu Y Y, et al. Evolutionary characteristics of anthropogenic polycyclic aromatic hydrocarbon emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020 [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):19-29.

2006~2020年广东省人为源多环芳烃排放演变特征

唐 凤¹,沙青娥^{1,2*},刘颖颖¹,翁淑娟¹,周 宁¹,陈豪琪¹,刘露云¹,司徒淑婷³,钟庄敏^{4,5},许冠英³,陈多宏^{4,5},郑君瑜^{6*} (1.暨南大学环境与气候学院,环境与气候研究院,广东 广州 511443; 2.暨南大学广州区域低碳经济研究基地,广东 广州 510632; 3.广东省佛山生态环境监测站,广东 佛山 528010; 4.广东省生态环境监测中心,广东 广州 510308; 5.生态环境部环境保护区域空气质量监测重点实验室,广东 广州 510308; 6.香港科技大学(广州),可持续能源与环境学域,广东 广州 511458)

摘要: 针对广东省多环芳烃(PAHs)排放清单存在时间滞后、排放源分类不精细、排放演变特征不清晰的问题,基于广泛的文献调研,构建了精细化的人为源PAHs排放因子库,采用排放因子法自下而上地构建了2006~2020年广东省16种PAHs的高分辨率排放清单,识别了广东省PAHs主要排放物种、重点排放源和时空演变特征.研究结果表明:广东省2006~2020年PAHs人为源排放整体呈现下降趋势,下降比例为45%,其中,8种致癌PAHs排放贡献从60%下降到29%;排放量靠前的主要PAHs物种分别为萘(Nap)、苯并[g,h,i]芘(Bghip)和菲(Phe),对PAHs排放总量的平均贡献分别为23%、10%和9%;随着国家柴油车和摩托车排放标准提升、广东省淘汰黄标车、秸秆禁烧等政策推行,广东省PAHs重点排放源逐步从摩托车、柴油车和生物质燃烧演变为工业燃煤、炼焦和民用燃烧源;空间分布上,以摩托车和柴油车排放为主的线源排放显著下降,但以工业燃烧源为主的点源排放在全省许多地区有所上升;从人群健康风险角度考虑,以控制人口密集地区PAHs排放为目标,建议广东省加强炼焦行业等工业燃煤的多环芳烃排放控制.本研究可为广东省开展以人群健康为导向的多环芳烃排放防控提供科学支撑.

关键词: 广东省; 多环芳烃; 排放清单; 排放趋势; 空间分布

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)01-0019-11

Evolutionary characteristics of anthropogenic polycyclic aromatic hydrocarbon emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020. TANG Feng¹, SHA Qing-e^{1,2*}, LIU Ying-ying¹, WENG Shu-juan¹, ZHOU Ning¹, CHEN Hao-qi¹, LIU Lu-yun¹, SI-TU Shu-ping³, ZHONG Zhuang-min^{4,5}, XU Guan-ying³, CHEN Duo-hong^{4,5}, ZHENG Jun-yu^{6*} (1.College of Environment and Climate, Institute for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 2.Guangzhou Regional Low Carbon Economy Research Base, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3.Guangdong Province Foshan Ecology and Environment Monitoring Station, Foshan 528010, China; 4.Guangdong Ecological Environment Monitoring Centre, Guangzhou 510308; 5.Key Laboratory of Regional Air Quality Monitoring for Environmental Protection, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510308; 6.Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), Thrust of Sustainable Energy and Environment, Guangzhou 511458, China). *China Environmental Science*, 2025,45(1): 19-29

Abstract: In response to issues identified in the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) emission inventory for Guangdong Province—including time-lag, unclear source classification, and ambiguous emission trends—a refined PAHs emission factor library for anthropogenic sources was established through comprehensive literature research. A high-resolution, bottom-up PAHs emission inventory of 16PAH compounds for Guangdong Province covering 2006~2020 was developed using the emission factor method, providing insights into principal emission species, key sources, and the spatiotemporal evolution of emissions. The findings were as follows: From 2006 to 2020, anthropogenic PAHs emissions in Guangdong Province showed an overall decline of 45%, with the contribution of carcinogenic PAHs reducing from 60% to 29%. Naphthalene (Nap), benzo[g,h,i]perylene (Bghip), and phenanthrene (Phe) emerged as the primary PAH species, contributing on average 23%, 10%, and 9% to total PAHs emissions, respectively. As national standards for diesel vehicles and motorcycles tightened, yellow-label vehicles were eliminated, and policies like the prohibition on straw burning were enacted, the primary sources of PAHs emissions shifted from motorcycles, diesel vehicles, and

收稿日期: 2024-05-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3700604);广州市2023年度基础与应用基础研究专项项目(2023A04J0250);广州市哲学社会科学“十四五”规划共建课题(2023JDGJ11);2022年江苏省大气环境监测与污染控制高技术重点实验室开放基金重点项目(KHK2202);国家自然科学基金委员会青年科学基金项目(42305112)

* 责任作者, 讲师, shaqing2021@jun.edu.cn; 教授, zhengjunyu@gmail.com

biomass burning to industrial coal combustion, coking, and household combustion. Spatial analysis indicated that line-source emissions (primarily from motorcycles and diesel vehicles) decreased significantly, while point-source emissions from industrial sources increased across several regions. Considering population health risks and the need for targeted PAHs emission controls in densely populated areas, the study recommends enhanced regulation of PAHs from industrial coal combustion and coking industries. This study provides critical scientific support for Guangdong Province's PAHs emission control strategies, with a focus on public health outcomes.

Key words: Guangdong Province; PAHs; emission inventories; emission trends; spatial evolution

多环芳烃(PAHs)是持久性有机污染物(POPs)的一种^[1].其在环境中无处不在,且对人体具有致癌、致畸、致突变作用^[2-5],同时对生态环境也具有严重危害,现已引起广泛关注^[6-7]大气中 PAHs 的最重要来源是含有碳和氢的物质的不完全燃烧^[8-10],例如煤、石油、木材和生物质秸秆等燃料燃烧^[11-13],机动车^[14]和炼焦等活动^[15].

PAHs 作为典型的 POPs,会通过远距离迁移对全球造成环境影响,因此,PAHs 被联合国欧洲经济委员会列入《远距离越境空气污染公约》,全球密切关注 PAHs 的排放、传输、以及生态和健康影响.我国 PAHs 排放是全球最大的,排放量占全球排放总量的 20%以上^[16-17].2017~2020 年间我国先后将 PAHs 物种萘(Nap)、苯并(a)蒽(BaA)、苯并(b)荧蒽(BbF)、苯并(k)荧蒽(BkF)和苯并(a)芘(BaP)列入了优先控制化学品名录^[18-19].

PAHs 排放清单是制定 PAHs 排放控制策略、评估其人群与生态环境风险、开展国际履约谈判与评估的基础数据.国内外学者已针对我国 PAHs 的排放清单开展了一系列的研究,但不同研究的估算结果因排放因子和活动水平来源不同而差异明显.例如:大尺度范围的研究通常基于国家级活动水平来估算排放量,全球排放估算结果表明,2004 和 2007 年中国的 PAHs 排放量分别为 11.4 万 t^[16]和 10.6 万 t^[15];然而,基于精细的省级活动数据所估算的中国 2005 年 PAHs 排放量为 4.7 万 t^[20],这与全球尺度上的核算结果存在 2~3 倍的差异^[21].另一方面,从排放因子的角度,现有研究中 PAHs 排放清单仅提供了生物质燃烧、民用燃煤、工业燃烧和机动车等少数大类排放源的排放因子,以机动车为例,大部分研究对机动车和摩托车 PAHs 排放估算主要只依据燃料类型(柴油/汽油)进行分类^[15-16,20],然而,最新的一些实测研究^[22-24]表明,机动车和摩托车的排放因子随着我国排放标准的提升有明显的下降.为此,我国一些地区

基于更为精细的本地化数据开展了从区域尺度上构建 PAHs 排放清单研究.例如长三角区域^[21,25]和太原市^[26],但多采用单年份或较短的时间跨度.随着近年来我国经济结构与污染管控发生的巨大变化,掌握 PAHs 排放的长期变化趋势,以及深入剖析排放源时空变化格局的演变特征成为当前重点关注的问题.

作为我国排放源类最复杂、人口最密集、局地排放对人体健康影响最大的省份之一,也有部分学者针对广东省的 PAHs 排放开展了研究.例如,2003 年广东省火电厂和工业燃烧排放清单^[27],2012 年包含广东省在内的全国的机动车 PAHs 排放清单^[22].然而,迄今为止,广东省尚未建立综合的 PAHs 排放清单,且存在生物质燃烧等排放源的排放特征不清、火力发电和工业燃烧研究时间严重滞后、机动车排放核算未考虑排放标准影响导致不确定性大等问题,严重制约 PAHs 排放策略制定与健康影响评估.

鉴于此,本文通过广泛收集广东省 PAHs 排放源活动水平数据和构建精细的人为源 PAHs 排放因子数据库,采用自下而上的方法构建了 2006~2020 年高分辨率 PAHs 排放清单,在此基础上识别了 PAHs 高排放物种、重点排放源和时空演变特征.本文可为评估广东省 PAHs 人群与生态环境风险和制定管控策略提供基础数据支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域与研究对象

表 1 研究的 16 种 PAHs 信息表

Table 1 Information sheet on the 16PAHs studied

中文名称	名称	缩写	环数	分子式
萘	Naphthalene	Nap	2	C ₁₀ H ₈
萘烯	Acenaphthylene	Acy	3	C ₁₂ H ₈
萘	Acenaphthene	Ace	3	C ₁₂ H ₁₀
芴	Fluorene	Flu	3	C ₁₃ H ₁₀

续表 1

中文名称	名称	缩写	环数	分子式
菲	Phenanthrene	Phe	3	C ₁₄ H ₁₀
蒽	Anthracene	Ant	3	C ₁₄ H ₁₀
荧蒽	Fluoranthene	Fla	4	C ₁₆ H ₁₀
芘	Pyrene	Pyr	4	C ₁₆ H ₁₀
苯并[a]蒽	Benzo[a]anthracene	BaA	4	C ₁₈ H ₁₂
蒽	Chrysene	Chry	4	C ₁₈ H ₁₂
苯并[b]荧蒽	Benzo[b]fluoranthene	BbF	5	C ₂₀ H ₁₂
苯并[k]荧蒽	Benzo[k]fluoranthene	BkF	5	C ₂₀ H ₁₂
苯并[a]芘	Benzo[a]pyrene	BaP	5	C ₂₀ H ₁₂
二苯并[a,h]蒽	Dibenzo[ah]anthracene	DahA	5	C ₂₂ H ₁₄
苯并[g,h,i]芘	Benzo[ghi]perylene	Bghip	6	C ₂₂ H ₁₂
茚并[1,2,3-cd]芘	Indeno[123-cd]pyrene	lcdP	6	C ₂₂ H ₁₂

地级市,包括广州、佛山、肇庆、深圳、东莞、惠州、珠海、中山和江门 9 个珠三角(Pearl River Delta, PRD)城市及潮州、汕头、揭阳、汕尾、梅州、湛江、茂名、阳江、云浮、清远、河源和韶关 12 个非珠三角(NPRD, Non-Pearl River Delta Region)城市.研究对象为美国环保署(US EPA)优先控制污染物清单中的 16 种 PAHs 物种,分别为 Nap、Acy、Ace、Flu、Phe、Ant、Fla、Pyr、BaA、Chry、BbF、BkF、BaP、lcdP、DahA 和 Bghip,其信息见表 1.研究的排放源涵盖摩托车、柴油车、汽油车、其他移动源、工业燃烧源、生物质燃烧源、民用燃烧源和火力发电 8 大类污染源,具体源分类信息见表 2.

本文研究区域为广东省行政区域内的 21 个

表 2 广东省人为源 PAHs 排放源分类及活动水平数据与排放因子来源

Table 2 Classification of PAHs emission sources in Guangdong Province and corresponding sources of activity data and emission factors

一级排放源	二级排放源	三级排放源	活动水平数据来源	排放因子来源
摩托车	国 I 前/国 I /国 II/国 III/国 IV		[28,29]调研	[22,34-38]
柴油车	国 I 前/国 I /国 II/国 III/国 IV/国 V/国 VI	微货/轻货/中货/重货/微客/小客/中客/大客	[28,29]调研	[22,24,39-50]
汽油车	国 I 前/国 I /国 II/国 III/国 IV/国 V/国 VI	微货/轻货/中货/重货/微客/小客/中客/大客	[28,29]调研	[22,24,39-50]
	工程机械	G<37KW/37<G<75KW/75<G<130KW/G>130 KW		
	港口机械	G<37KW/37<G<75KW/75<G<130KW/G>130 KW		
其他移动源	农业机械	G<37KW/37<G<75KW/75<G<130KW/G>130 KW	[28-33]调研	[21]
	农用运输车	国 I 前/国 I /国 II/国 III/国 IV		
	渔船			
	船舶	水域/码头		
	铁路机车			
工业燃烧	锅炉燃煤			[21]
	锅炉燃油			[21]
	天然气		[28]环境统计数据	[51]
	焦炭			[52]
	炼焦燃煤			[21]
生物质燃烧	秸秆开放燃烧	水稻/水稻/小麦/玉米/豆类/棉花/油菜/芝麻/甘蔗		[51]
	森林火灾		[28,29]调研	[51]
	秸秆家用燃烧	水稻/水稻/小麦/玉米/豆类/棉花/油菜/芝麻/甘蔗		[51]
	薪柴			[51]
民用燃烧源	煤炭			[21]
	煤油			[21]
	柴油		[28]环境统计数据	[21]
	液化石油气			[51]
	天然气			[51]
火力发电	燃料煤			[51]
	燃料油		[28]环境统计数据	[21]
	天然气			[51]

1.2 排放清单建立方法

基于对广东省各重点 PAHs 排放源的活动水平数据和排放因子开展广泛的调研,本研究采用排放因子法构建广东省 PAHs 排放趋势清单.其中,摩托车、柴油车和汽油车核算公式如式(1)所示:

$$E_{ij} = \sum P_j \times VKT_j \times EF_{ij} \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: i 为 PAHs 物种; j 为车型分类; E_{ij} 为 PAHs 物种 i 在车型分类 j 的排放量; $t;P_j$ 为 j 车型的机动车数量,辆; VKT_j 为 j 型车的年平均行驶里程(Vehicle Kilometers Traveled),km; EF_{ij} 为 j 型车的第 i 类污染物的平均排放因子,g/(km·辆),代表排放源每单位活动水平排放 PAHs 的量.

其他移动源、工业燃烧源、生物质燃烧源、民用燃烧源和火力发电排放核算公式如式(2)所示:

$$E_{m,n} = \sum A_n \times EF_{m,n} \times 10^3 \quad (2)$$

式中: m 为 PAHs 物种; n 为排放源; $E_{m,n}$ 为 PAHs 物种 m 在排放源 n 的排放量; $t;A_n$ 为排放源 n 的活动水平,即燃料消耗量,t; $EF_{m,n}$ 为 PAHs 物种 m 排放源 n 的排放因子,g/kg,代表排放源每单位活动水平排放 PAHs 的量.

活动水平数据主要来源于广东省环境统计数据,同时结合国家、广东省、广东省内各城市以及行业的统计年鉴数据、污染源普查数据、实地调研数据等.其中,火力发电、民用燃烧源和工业燃烧源的活动水平数据如燃料消耗量等主要依据环境统计数据,使用《中国能源统计年鉴》(2006~2020年)^[28]及广东省各地市统计年鉴进行校验调整;摩托车、汽油车和柴油车的活动水平数据是地区机动车年度总行驶里程,由各类机动车保有量与单辆车的年均行驶里程相乘得到,各类机动车总保有量主要来自《广东统计年鉴》(2006~2020年)^[29],不同排放标准机动车的占比来自广东省内部分城市实地调研,年均行驶里程来自广东省内城市调研数据,同时参考郑等^[30]的研究方法进行趋势校验调整;其他移动源中,工程机械的活动水平数据来自《中国工程机械工业年鉴》(2006~2020年),船舶的活动水平数据来自《中国港口年鉴》(2006~2020年)^[31],渔船的活动水平数据来自《广东农村统计年鉴》(2006~2020年)^[32],铁路机车活动水平数据来自《中国交通年鉴》(2006~2020年)^[33],农业机械活动水平数据来自《中国交通年鉴》(2006~2020年)^[33]和广东省各城市统

计年鉴,港口机械活动水平数据来自《中国港口年鉴》(2006~2020年)^[31]和《广东统计年鉴》(2006~2020年)^[29];生物质燃烧源的活动水平数据主要来自《中国能源统计年鉴》(2006~2020年)^[28]、《广东省统计年鉴》(2006~2020年)^[29]和广东省内部分城市实地调研.

PAHs 的排放因子主要来自国内外已发表的文献^[21-22,24,34-52],本研究优先选取广东省内和国内实测的排放因子.对于移动源,本研究使用了区分排放标准的摩托车^[22,34-38]、柴油车和汽油车^[22,24,39-50]以及其他移动源^[21]的 PHAs 排放因子.需要指出的是,由于目前研究对机动车 PAHs 排放测试主要集中在国 I 到国 V,缺失对国 I 前和国 VI 的 PAHs 排放因子的测试,本研究采用国 I 和国 V 的排放因子分别代替国 I 前和国 VI(摩托车由国 III 代替国 IV).对于工业燃烧源,本研究使用了区分行业和燃料类型的排放因子,包括锅炉燃煤^[21]、锅炉燃油^[21]、炉窑天然气^[51]、焦炭^[52]和炼焦燃煤^[21].对于生物质燃烧,本研究采用 Xu 等^[51]的实测结果,使用了区分农作物类型(见表 1-2)的秸秆开放燃烧和家用燃烧、森林火灾以及薪柴燃烧.对于民用燃烧源,本研究使用了区分燃料类型的排放因子,包括煤炭^[21]、煤油^[21]、柴油^[21]、液化石油气^[51]和天然气^[51].火力发电与民用燃烧源类似,燃料类型包括燃料煤^[51]、燃料油^[21]和天然气^[51].各类排放源使用的活动水平数据和排放因子可见表 2.此外,尽管已有研究实测建立了船舶^[53]、民用燃烧源^[54]等少数分船型、分燃烧技术的精细化排放因子,但在编制排放清单时,我们无法获取分船型、分燃料类型等的精细化活动水平数据,因此难以用此开展排放表征.未来可通过精细化的活动水平数据结合最新的排放因子来进一步构建广东省 PAHs 的排放清单.

1.3 空间分配方法

本研究采用了郑君瑜等^[30]的研究方法,利用与排放源有相同空间变化特征的空间地理信息数据,将排放分配至 3km×3km 网格,绘制了 2006 年和 2020 年 PAHs 排放空间分布以及差值演变.具体方法如下:(1)网格的权重因子;根据不同排放源空间分配表征参数,如工业企业经纬度坐标、道路信息、人口分布、土地利用和航行轨迹等信息数据,建立不同排放源 3km×3km 网格的空间分配因子.(2)单位网格排

放量计算;对各排放源排放总量根据对应空间分配权重因子进行各网格排放量的计算.(3)网格化清单构建;单位网格的排放量进行叠加得到广东省 3km × 3km 的各网格 PAHs 的排放量,最终获得广东省网格化的 PAHs 排放清单.

2 结果与讨论

2.1 PAHs 排放总量及污染源结构演变特征

2006~2020 年广东省 PAHs 排放总量演变特征如图 1(a)所示,结果表明,广东省 PAHs 排放整体上呈现下降趋势,排放总量从 2006 年的 2401t 降为 2020 年的 1307t,下降 45%.其中,2012 年到 2016 年排放迅速下降,主要得益于摩托车、柴油车等移动源提标改造以及广东省对生物质燃烧所采取一系列禁燃措施;2017 年开始有小幅的回升,这是由于燃煤炼焦的

发展所致,2016~2017 年广东省炼焦燃煤用量的年均增长率同比上升 122.5%^[28],导致 PAHs 排放量下降趋势停止.

2006~2020 年广东省 PAHs 排放源结构演变特征如图 1(b)所示.广东省 PAHs 排放的主要贡献源从 2006 年的摩托车,柴油车和生物质燃烧演变为 2020 年的工业燃烧和民用燃烧.从 2006 年到 2020 年,摩托车 PAHs 排放占比从 41%快速下降到 5%,生物质燃烧和柴油车占比分别从 16%和 15%同时降为 4%,这三大排放源的占比共计下降了 89%;而工业燃烧占比从 13%激增到 62%,演变为广东省 PAHs 排放的第一大源,民用燃烧占比从 8%上升到了 12%,其他移动源占比从 4%上升为 9%.可见十五年来,在快速发展与大力管控下,广东省 PAHs 排放来源格局已经发生根本变化.

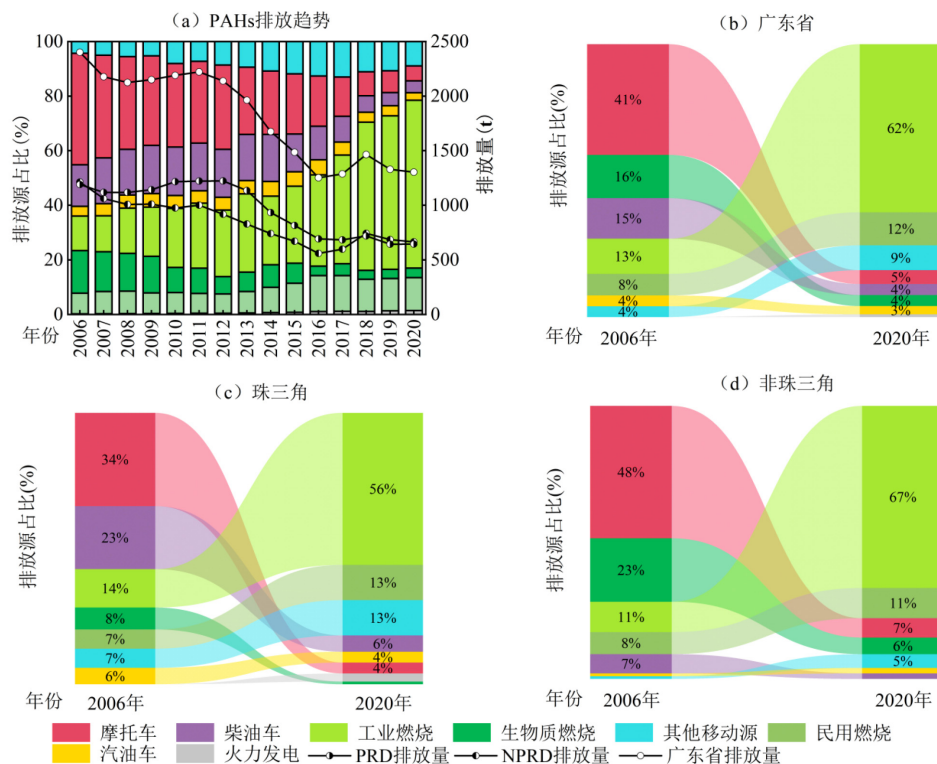


图 1 广东省 2006~2020 年 PAHs 排放量及排放源结构演变特征

Fig. 1 Characteristics of PAHs emissions and source structure evolution in Guangdong Province from 2006 to 2020

从广东省内不同经济区域来看,从图 1(a)可知,珠三角和非珠三角的 PAHs 排放总量相当,但由于这两个地区产业结构等差异,PAHs 排放源贡献特征及其演变趋势有所差异,如图 1(c)和(d)所示.从贡献特征来看,珠三角地区相较非珠三角地区经济和工业

产业发达,人口密集,机动车(柴油车和汽油车)保有量高,因此工业燃烧和机动车 PAHs 排放占比高于非珠三角地区;珠三角地区的排放源结构现已逐步演变为工业燃烧源、生物质燃烧源和移动源等排放源占主导,这与邹昶等^[5]通过对珠三角地区实测

PAHs 进行诊断比值法和 PMF 源解析识别出主要贡献源较为吻合;非珠三角地区摩托车保有量和农田面积较珠三角地区更大,农村地区早期供热部分采用秸秆与薪柴家用燃烧,导致摩托车和生物质燃烧 PAHs 排放贡献较大.从演变趋势来看,2006~2020 年,珠三角地区 PAHs 排放主要贡献源从摩托车和柴油

车逐步演变为工业燃烧源,这是由于摩托车和柴油车排放标准提升所致;非珠三角地区 PAHs 排放贡献源则从摩托车和生物质燃烧源逐渐演变为工业燃烧源,这是由于摩托车提标、生物质禁烧等政策以及珠三角地区工业产业转移等原因所致.

2.2 PAHs 物种演变特征

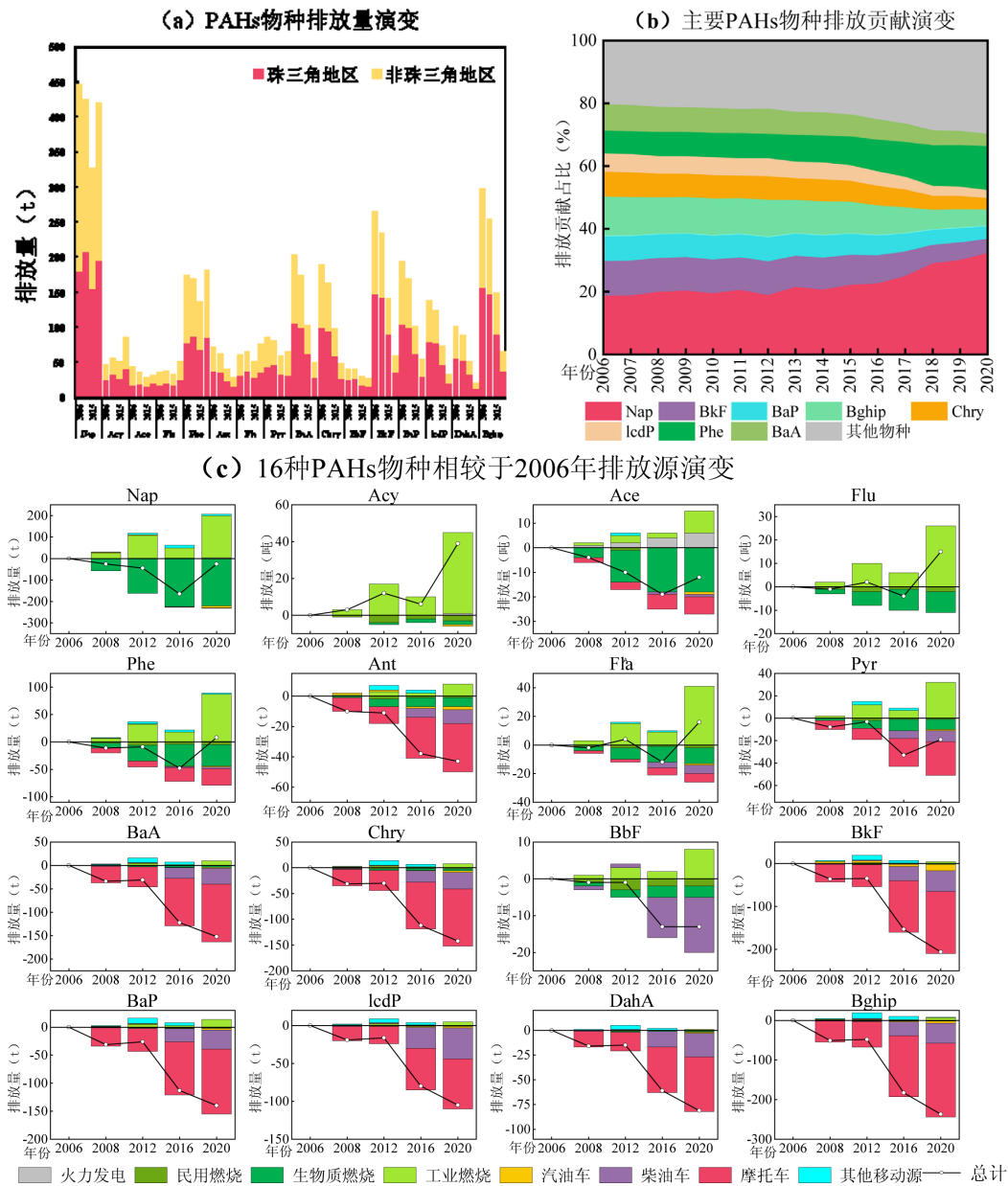


图2 广东省 2006~2020 年 16 种 PAHs 物种排放演变特征

Fig.2 Characterization of the emission evolution of 16PAHs species in Guangdong Province from 2006 to 2020

广东省 16 种 PAHs 的排放量和区域贡献如图 2(a)所示.从排放量看,2006 年至 2020 年大部分 PAHs 物种呈现下降趋势,特别是 Bghip、BkF 和 BaA 等物种排放快速下降,同比下降比例分别为 77.8%、

77.6%和 75.0%.这些物种的减排主要得益于摩托车和柴油车排放标准提升.然而,Acy、Flu 和 Fla 等物种整体呈现上升趋势,特别是 Acy,2020 年相比于 2006 年上升 82.3%,其主要来自工业燃烧源中的炼

焦燃煤,这与 Mu 等^[56]的研究具有一致性。从各物种的区域贡献来看,珠三角地区主要以 3~4 环的 PAHs 为主,这与邹昶灏等^[55]对珠三角环境空气中实测浓度数据的研究具有一致性,特别是 Chry、BbF、BkF、BaP、IcdP、DahA 和 Bghip 等高环 PAHs 在珠三角地区的贡献略高于非珠三角地区,而 Nap、Ace 和 Phe 等中低环 PAHs 物种在非珠三角地区的贡献略高于珠三角地区。

广东省 16 种 PAHs 物种排放贡献演变如图 2(b) 所示,2006 年广东省的主要 PAHs 物种是 Nap (18.6%)、Bghip(12.5%)和 BkF(11.1%),2020 年演变为 Nap(32.3%)、Phe(14.0%)和 Acy(6.6%)。16 种 PAHs 中,8 种致癌^[57]PAHs(BaA、Chry、BbF、BkF、BaP、IcdP、DahA 和 BghiP)占比从 2006 年的 60%下降到 2020 年的 29%,这主要得益于广东省禁摩、淘汰黄标车等地区政策和国家排放标准提升带来的摩托车和柴油车减排。

广东省 16 种 PAHs 排放贡献演变如图 2(c) 所示,2020 年相比于 2006 年,Acy、Flu、Phe 和 Fla 排放有所增长,主要是由于工业燃烧源的排放增长所致;其中,Flu、Phe 和 Fla 呈现波动增长,这是由于生物质燃烧源的大力减排抵消了部分工业燃烧排放。除了以上 4 种 PAHs 之外,其它 12 种 PAHs 排放均呈现下降趋势,其中,Nap 和 Ace 受生物质减排影响,在 2012~2016 年间显著下降,但随着工业燃烧的快速发展,2016~2020 年减排开始放缓;8 种致癌^[57]PAHs (BaA、Chry、BbF、BkF、BaP、IcdP、DahA 和 BghiP) 演变趋势较为一致,其受益于摩托车^[35]和柴油车^[58]提标在 2012~2016 年快速减排,在其他年份缓慢减排。

2.3 重点污染源排放演变特征

2.3.1 摩托车和柴油车 摩托车是早期广东省 PHAs 排放的首要污染源,2006 年其对 PAHs 排放总量的贡献高达到 41%,此后呈现持续下降的趋势,如图 3(a)所示。摩托车 PAHs 排放量从 2006 年的 981t 快速下降到 2020 年的 71t,降幅 92%。这主要得益于两方面的改善,其一是由于广东省所实行的一系列“禁摩”措施导致广东省摩托车的保有量的大幅下降;其二是摩托车排放因子随国标的提升显著下降^[16,29-33],如图 3(b)所示。

柴油车 PAHs 排放总量呈现下降趋势,如图 3(c)

所示,从 2006 年的 366t 下降为 2020 年的 57t,降幅 84%。这主要得益于排放标准提升带来的 PAHs 排放因子下降^[22,24,34-50],如图 3(d)所示。2009 年和 2010 年呈现小幅上升趋势,这主要是由于经济复苏期货运需求刺激下柴油车保有量快速上升所致。2011~2020 年,随着柴油车排放标准和燃油标准提高以及黄标车淘汰,PAHs 排放量快速下降。从柴油车的车型来看,如图 3(c)所示,对柴油车 PAHs 排放贡献较大的车型为柴油轻货,排放贡献在 2006 年为 42%,其后稳定在 40%左右,在 2020 年贡献增加为 48%,这主要是由于 2020 年新冠肺炎疫情影响下,人员流动量减少使得客车行驶里程减少导致客车 PAHs 排放减少所致。

2.3.2 工业燃烧源 工业燃烧源是近年来广东省 PAHs 排放的首要贡献源,且其排放仍呈现总体上升的态势,如图 4 所示,广东省工业燃烧 PAHs 排放从 2006 年的 309t 上升为 2020 年的 820t,上升了 165%。在工业燃烧源的二级排放源中,锅炉燃煤和炼焦燃煤是 PAHs 排放的主要贡献子源,二者合计贡献超过 94%的工业燃烧 PAHs 排放;焦炭和燃油锅炉燃料消耗量较小,PAHs 排放贡献占比在 2006 年为 6%,排放呈现持续下降的趋势;天然气作为清洁能源,对 PAHs 排放贡献远低于其他燃料。

广东省工业燃烧源 PAHs 排放随时间演变可以分为四个具有显著差异的阶段,分别为 2006~2013 年,2013~2016 年,2016~2018 年和 2018~2020 年。2006~2013 年,工业燃烧 PAHs 排放总体呈上升趋势,锅炉燃煤的贡献持续稳定在 80%左右,这主要是由于工业的快速发展带动锅炉燃煤消耗量快速增长所致。2013~2016 年,工业燃烧 PAHs 排放总体呈下降趋势,锅炉燃煤占比开始减少,炼焦燃煤占比开始增加;2016~2018 年,工业燃烧 PAHs 排放激增 80%,锅炉燃煤占比迅速降为 40%,而炼焦燃煤占比快速上升到 60%;锅炉燃煤占比下降原因在于《广东省大气污染防治行动计划(2014~2017 年)》通过“煤炭总量控制”、“煤改气”等能源结构调整和排放限值等末端治理措施,有效地控制了广东省锅炉燃煤的 PAHs 排放;工业燃烧 PAHs 排放与炼焦燃煤占比上升的主要原因是广东省炼焦行业快速发展导致炼焦煤耗增加。2018~2020 年排放与子源结构基本保持稳定。基于以上排放演变特征分析,建议广东省进一步加强炼焦燃煤 PAHs 排放特征与影响

的研究,细化炼焦行业 PAHs 控制策略,继续推进锅炉燃煤排放控制.

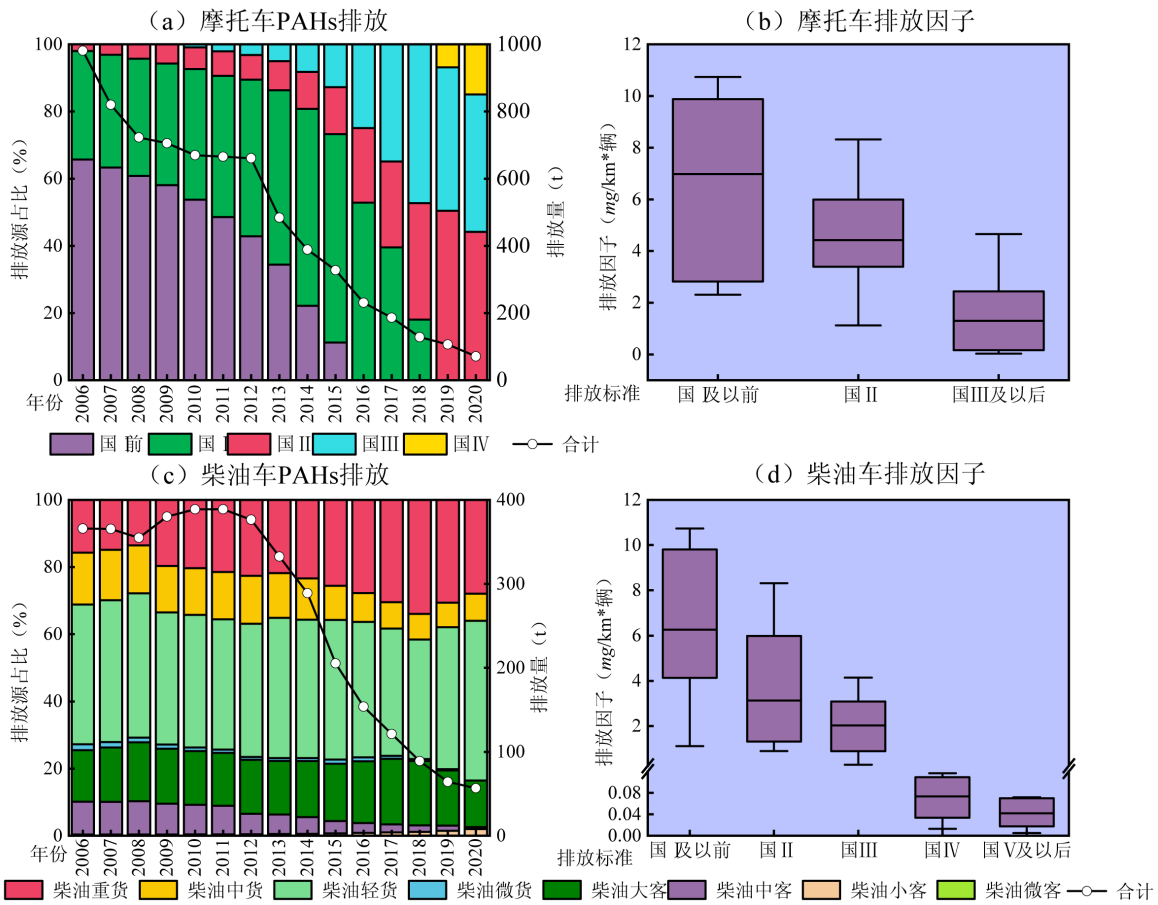


图3 广东省 2006~2020 年摩托车和柴油车 PAHs 排放量及排放因子演变特征

Fig.3 Evolutionary characteristics of PAHs emissions and emission factors from motorcycles and diesel vehicles in Guangdong Province from 2006 to 2020

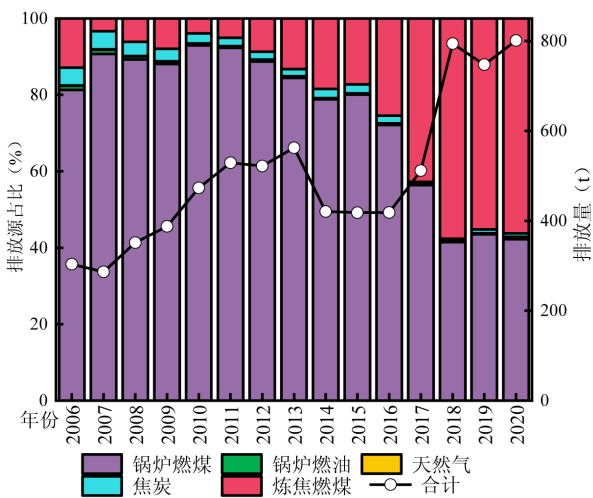


图4 广东省 2006~2020 年工业燃烧源 PAHs 排放演变特征
Fig.4 Evolutionary characteristics of PAHs emissions from industrial combustion sources in Guangdong Province from 2006 to 2020

2.3.3 生物质燃烧源 生物质燃烧源 PAHs 排放演变如图 5 所示,生物质燃烧 PAHs 排放的主要二级源是秸秆家用和秸秆开放燃烧,其在 2006~2016 年呈现波动下降的趋势,从 2006 年的 375t 到 2016 年的 46t,下降了 88%,这是由于农村居民生活水平提高以及广东省对秸秆采取的禁烧、还田等一系列措施,秸秆家用和秸秆开放燃烧整体上呈现下降趋势,而秸秆开放燃烧极易受降雨、湿度和气温等自然因素影响导致排放变化趋势呈现波动性^[59];生物质燃烧 PAHs 排在 2016 年到 2020 年基本稳定.

秸秆家用是广东省前期生物质燃烧源 PAHs 排放的主要贡献源,在 2006 年贡献占比高达 82%,其排放量从 2006 年的 307t 到 2020 年的 0.14t 下降比例高达 99.95%,随着广东省不断加强农村家用秸秆燃

烧的监管,以及天然气燃料的大力普及,农村居民供能需求得以满足,秸秆家用燃烧量持续下降接近清零,随之秸秆开放的贡献逐步凸显,到 2020 年贡献占比达 98%,取代秸秆家用成为生物质燃烧 PAHs 排放的主要贡献源。

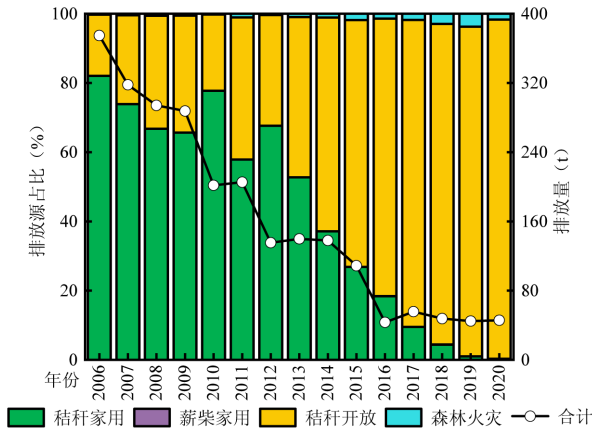


图 5 广东省 2006~2020 年生物质燃烧源 PAHs 排放演变特征
Fig.5 Evolutionary characteristics of PAHs emissions from biomass combustion sources in Guangdong Province from 2006 to 2020

2.4 广东省 PAHs 排放空间演变特征

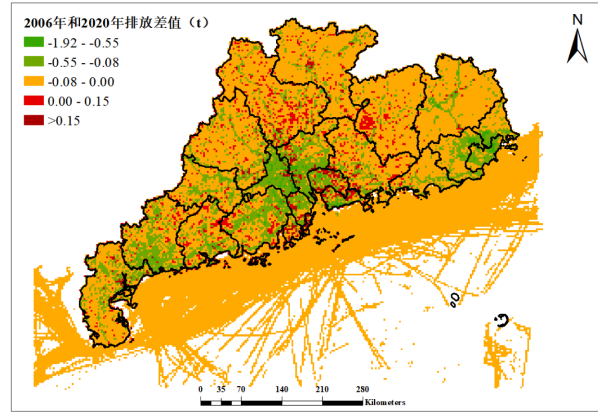
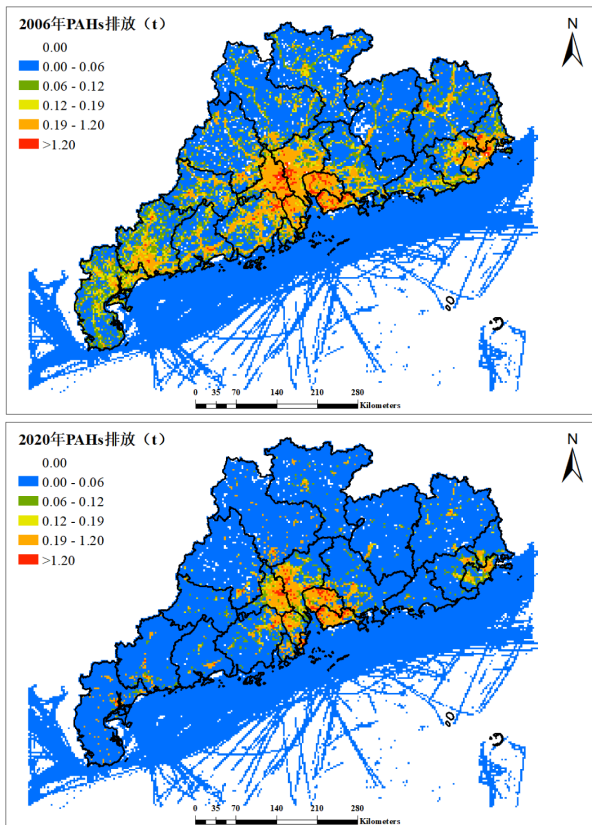


图 6 广东省 PAHs 排放空间分布及其演变特征(3km×3km)
Fig.6 Characteristics and evolution of the spatial distribution of PAHs emissions in Guangdong Province (3km×3km)
审图号:GS(2019)3333 号

广东省 2006 年和 2020 年 PAHs 排放空间分布及 2020 年相对 2006 年的排放差值空间分布如图 6 所示。由图 6(a)、(b)可知,广东省 PAHs 排放的高值区域始终集中在经济发达、人口集中和人类活动频繁的广州、东莞、深圳和佛山等珠三角中心城市,以及东西两翼农田面积大、农村人口密集的潮州、汕头、湛江和茂名等非珠三角城市。2020 年珠三角地区排放较大的四个城市依次为佛山、广州、深圳和珠海,这与牛计伟等^[60]对 2020 年四个城市中 16 种 PAHs 年均质量浓度实测结果对比较为一致。此外,从图 6(c)可知,2020 年相比于 2006 年,沿路网分布的线源排放显著下降,这得益于摩托车和柴油车的大力减排;非珠三角地区东西两翼也有明显的减排,这主要得益于摩托车的排放标准提升和生物质燃烧源的管控;随着经济发展,珠三角地区部分工业企业逐步向非珠三角地区迁移,非珠三角地区点源排放明显增加,珠三角地区和珠三角外围非珠三角地区都存在诸多显著增加的点源排放,这主要为工业燃烧 PAHs 排放,未来广东省应加强工业燃烧企业的 PAHs 减排。

3 结论

3.1 从 2006~2020 年,广东省 PAHs 排放整体上呈现下降趋势,排放总量从 2006 年的 2401t 至 2020 年的 1307t 下降了 45%;然而,近年来炼焦燃煤 PAHs 排放快速上升,打断了 PAHs 排放总量的下降趋势。

3.2 广东省的主要 PAHs 物种从 2006 年以 Nap(18.6%)、Bghip(12.5%)和 BkF(11.1%)转变为

2020 年的 Nap(32.3%)、Phe(14.0%)和 Acy(6.6%),8 种致癌 PAHs(BaA、Chry、BbF、BkF、BaP、IcdP、DahA 和 BghiP)的贡献占比从 60%下降到 29%。

3.3 广东省 PAHs 排放贡献源从摩托车、柴油车和生物质燃烧已经演变为工业燃烧源,排放的高值区域始终集中在经济发达、人口集中和人类活动繁多的珠三角城市,以及沿海和农村人口密集的部分非珠三角城市,珠三角和非珠三角的 PAHs 排放总量相当。

参考文献:

- [1] Patnaik P. A Comprehensive guide to the properties of hazardous chemical substances [M]. 3th ed. New York: John Wiley and Sons Publishers, 1999.
- [2] 郭建,罗孝俊,管克兰,等.石化工业园员工 PAHs 的皮肤暴露及健康风险 [J]. 中国环境科学,2022,42(11):5427-5435.
Guo J, Luo X J, Guan K L, et al. Skin exposure to PAHs and health risks among employees in a petrochemical industrial park [J]. China Environmental Science, 2022,42(11):5427-5435.
- [3] 车凯,郁金星,刘松涛,等.河北南部变电站场地土壤中 PAHs 含量、来源及健康风险 [J]. 中国环境科学,2020,40(11):4865-4874.
Che K, Yu JX, Liu ST, et al. PAHs content, sources, and health risks in the soil of a substation site in southern Hebei [J]. China Environmental Science, 2020,40(11):4865-4874.
- [4] Li C, Li Z, Wang H. Characterization and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution in particulate matter in rural residential environments in China—A review [J]. Sustainable Cities and Society, 2023,96,104690-104704.
- [5] 冯承莲,雷炳莉,王子健.中国主要河流中多环芳烃生态风险的初步评价 [J]. 中国环境科学,2009,29(6):583-588.
Feng C L, Lei B L, Wang Z J. Preliminary assessment of ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in major rivers of China [J]. China Environmental Science, 2009,29(6):583-588.
- [6] Dat N D, Chang M B. Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies [J]. Science of the Total Environment, 2017,609:682-693.
- [7] Humel S, Schmidt S N, Sumetzberger-Hasinger M, et al. Enhanced accessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heterocyclic PAHs in industrially contaminated soil after passive dosing of a competitive sorbate [J]. Environmental Science & Technology, 2017,51(14):8017-8026.
- [8] Du W, Yun X, Chen Y, et al. PAHs emissions from residential biomass burning in real-world cooking stoves in rural China [J]. Environmental Pollution, 2020,267:115592-115599.
- [9] Sun J, Shen Z, Zeng Y, et al. Characterization and cytotoxicity of PAHs in PM_{2.5} emitted from residential solid fuel burning in the Guanzhong Plain, China [J]. Environmental Pollution, 2018,241:359-368.
- [10] Manoli E, Samara C. Polycyclic aromatic hydrocarbons in natural waters: sources, occurrence and analysis [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 1999,18(6):417-428.
- [11] Gong P, Wang X. Forest fires enhance the emission and transport of persistent organic pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons from the central Himalaya to the Tibetan Plateau [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2021,8(7):498-503.
- [12] Mallah M A, Changxing L, Mallah M A, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overview [J]. Chemosphere, 2022,296:133948-133963.
- [13] Du W, Chen Y, Zhu X, et al. Wintertime air pollution and health risk assessment of inhalation exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in rural China [J]. Atmospheric Environment, 2018,191:1-8.
- [14] Chen L Y, Liu W J, Tao S, et al. Spatiotemporal variations and source identification of atmospheric nitrated and oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal cities of the Bohai and Yellow Seas in northern China [J]. Chemosphere, 2021,279:130565-130577.
- [15] Mu L, Li X, Liu X, et al. Characterization and emission factors of carbonaceous aerosols originating from coke production in China [J]. Environmental Pollution, 2021,268:115768-115775.
- [16] Shen H, Huang Y, Wang R, et al. Global atmospheric emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from 1960 to 2008 and future predictions [J]. Environmental Science & Technology, 2013,47(12):6415-6424.
- [17] Zhang Y, Tao S. Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for 2004 [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(4):812-819.
- [18] 中华人民共和国环境保护部,工业和信息化部,国家卫生和计划生育委员会.关于发布《优先控制化学品名录(第一批)》的公告[EB/OL]. [公告 2017 年第 83 号]. 20171227.https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/t20171229_428832.htm?tdsourcetag=s_pcqq_aiomsg. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Industry and Information Technology, National Health and Family Planning Commission. Announcement on the release of the "Priority control chemicals list (first batch)" [EB/OL]. [Announcement No. 83 of 2017]. 20171227.
- [19] 中华人民共和国生态环境部,工业和信息化部,国家卫生健康委员会.关于发布《优先控制化学品名录(第二批)》的公告[EB/OL]. [公告 2020 年第 47 号]. 20201030.https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202011/t20201102_805937.html. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Ministry of Industry and Information Technology, National Health Commission. Announcement on the release of the "Second batch of priority control chemicals list" [EB/OL]. [Announcement No. 47 of 2020].
- [20] 徐徐.中国大气中人为多环芳烃排放对人群健康影响的研究 [D]. 济南:山东大学,2014.
Xu X. Polycyclic aromatic hydrocarbons air pollution generated from human activity and its human health impact in China [D]. Jinan, Shandong University, 2014.
- [21] Zhang P, Zhou Y, Chen Y, et al. Construction of an atmospheric PAH emission inventory and health risk assessment in Jiangsu, China [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2023,16(3):629-640.
- [22] Cui H, Lu Y, Zhou Y, et al. Spatial variation and driving mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) emissions from vehicles in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,336:130210-130222.
- [23] Zhao T, Yang L, Huang Q, et al. PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and nitrated-PAHs (NPAHs) emitted by gasoline vehicles: Characterization and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2020,727:138631-138640.
- [24] 郑轩.基于车载测试的重型柴油车黑碳与多环芳烃排放特征研究 [D]. 北京:清华大学,2016.
Zheng X. Emission characteristics of black carbon and polycyclic aromatic hydrocarbon from heavy duty diesel vehicles Based on PEMS Method [D]. Beijing, Tsinghua University, 2016.
- [25] Li B, Zhou S, Wang T, et al. An improved gridded polycyclic aromatic hydrocarbon emission inventory for the lower reaches of the Yangtze River Delta region from 2001 to 2015 using satellite data [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018,360:329-339.
- [26] 蒋秋静,李跃宇,胡新新,等.太原市多环芳烃(PAHs)排放清单与分布特征分析 [J]. 中国环境科学,2013,33(1):14-20.
Jiang QJ, Li YY, Hu XX, et al. Emission inventory and distribution characteristics analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Taiyuan City [J]. China Environmental Science, 2013,33(1):14-20.
- [27] 王翠萍.广东省主要持久性有机污染物排放状况的初步研究 [D]. 广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所),2007.
Wang C P. Preliminary study on the emission situation of the main persistent organic pollutants in Guangdong Province, China [D]. Guangzhou, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [28] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴(2006-2020) [M]. 北京:中国统计出版社,2021.
Energy Statistics Department of the National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook (2006-2020) [M]. Beijing: China

- Statistics Press, 2021.
- [29] 广东省统计局. 广东统计年鉴(2006~2020) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
Guangdong Provincial Bureau of Statistics. Guangdong statistical yearbook (2006~2020) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [30] 郑君瑜, 王水胜, 黄志炯, 等. 区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Zheng J Y, Wang S S, Huang Z J, et al. Technical methods and applications for establishing regional high-resolution atmospheric emission inventories [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [31] 中国港口年鉴编辑部. 中国港口年鉴(2006~2020) [M]. 北京: 中国港口杂志社, 2021.
Editorial Office of China Ports Yearbook. China ports yearbook (2006~2020) [M]. Beijing: China Ports Magazine Press, 2021.
- [32] 广东农村统计年鉴编辑委员会. 广东省农村统计年鉴(2006~2020) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
Editorial Committee of Guangdong Rural Statistical Yearbook. Guangdong rural statistical yearbook (2006~2020) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [33] 中国交通年鉴编辑部. 中国交通年鉴(2006~2020) [M]. 北京: 中国交通出版社, 2021.
Editorial Office of China Communications Yearbook. China communications yearbook (2006~2020) [M]. Beijing: China Communications Press, 2021.
- [34] 王伯光, 吕万明, 周 炎, 等. 城市隧道汽车尾气中多环芳烃排放特征的研究 [J]. 中国环境科学, 2007, (4): 482-487.
Tian B G, LV W M, Zhou Y, et al. Emission characteristic of PAHs composition in motor vehicles exhaust of city tunnel [J]. China Environmental Science, 2007, (4): 482-487.
- [35] Adam T, Farfaletti A, Montero L, et al. Chemical characterization of emissions from modern two-stroke mopeds complying with legislative regulation in Europe (EURO-2) [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(1): 505-512.
- [36] Spezzano P, Picini P, Cataldi D, et al. Particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from non-catalysed, in-use four-stroke scooters [J]. Environmental monitoring and assessment, 2007, 133: 105-117.
- [37] Spezzano P, Picini P, Cataldi D, et al. Particle-and gas-phase emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from two-stroke, 50cm³ mopeds [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(18): 4332-4344.
- [38] Yang H H, Hsieh L T, Liu H C, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from motorcycles [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(1): 17-25.
- [39] Chen F, Hu W, Zhong Q. Emissions of particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Fu Gui-shan Tunnel of Nanjing, China [J]. Atmospheric Research, 2013, 124: 53-60.
- [40] Alves C A, Barbosa C, Rocha S, et al. Elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in exhaust particles emitted by light-duty vehicles [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22: 11526-11542.
- [41] Fang X, Wu L, Zhang Q, et al. Characteristics, emissions and source identifications of particle polycyclic aromatic hydrocarbons from traffic emissions using tunnel measurement [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 67: 674-684.
- [42] Hao X, Zhang X, Cao X, et al. Characterization and carcinogenic risk assessment of polycyclic aromatic and nitro-polycyclic aromatic hydrocarbons in exhaust emission from gasoline passenger cars using on-road measurements in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 645: 347-355.
- [43] Ho K F, Ho S S H, Lee S C, et al. Emissions of gas-and particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Shing Mun Tunnel, Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(40): 6343-6351.
- [44] Kristensson A, Johansson C, Westerholm R, et al. Real-world traffic emission factors of gases and particles measured in a road tunnel in Stockholm, Sweden [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(5): 657-673.
- [45] Liu Y, Wang S, Lohmann R, et al. Source apportionment of gaseous and particulate PAHs from traffic emission using tunnel measurements in Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 107: 129-136.
- [46] Liu Y, Gao Y, Yu N, et al. Particulate matter, gaseous and particulate polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an urban traffic tunnel of China: Emission from on-road vehicles and gas-particle partitioning [J]. Chemosphere, 2015, 134: 52-59.
- [47] Louis C, Liu Y, Tassel P, et al. PAH, BTEX, carbonyl compound, black-carbon, NO₂ and ultrafine particle dynamometer bench emissions for Euro 4 and Euro 5 diesel and gasoline passenger cars [J]. Atmospheric Environment, 2016, 141: 80-95.
- [48] Wang X, Khlystov A, Ho K F, et al. Real-world vehicle emissions characterization for the shing mun tunnel in Hong Kong and Fort McHenry Tunnel in the United States [J]. Research Reports: Health Effects Institute, 2019, 199: 5-52.
- [49] Zhang Y, Wang X, Li G, et al. Emission factors of fine particles, carbonaceous aerosols and traces gases from road vehicles: recent tests in an urban tunnel in the Pearl River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 122: 876-884.
- [50] Zheng X, Zhang S, Wu Y, et al. Measurement of particulate polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from gasoline light-duty passenger vehicles [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 185: 797-804.
- [51] Xu S, Liu W, Tao S. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons in China [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(3): 702-708.
- [52] 李保杰. 南京大气多环芳烃的时空分布特征与模拟 [D]. 南京: 南京大学, 2016.
Li B J. The Spatio-temporal Distribution of Atmospheric Gaseous PAHs Concentration and Numerical Simulation in Nanjing [D]. Nanjing, Njing University, 2016.
- [53] Wang L, Du W, Yun X, et al. On-site measured emission factors of polycyclic aromatic hydrocarbons for different types of marine vessels [J]. Environmental Pollution, 2022, 297: 118782-118790.
- [54] Wang J, Du W, Chen Y, et al. Nitrated and oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons emissions from solid fuel combustion in rural China: Database of 12 real-world scenarios for residential cooking and heating activities [J]. Science of the Total Environment, 2022, 852: 158501-158507.
- [55] 邹晨灏, 赵时真, 田乐乐, 等. 珠江三角洲城市大气中多环芳烃的污染特征、来源解析和健康风险评估 [J]. 地球化学, 2021, 50(6): 644-653.
Zou Z H, Zhao S Z, Tian L L, et al. Pollution characteristics, source apportionment, and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban atmosphere of the Pearl River Delta [J]. Geochemistry, 2021, 50(6): 644-653.
- [56] Mu L, Peng L, Cao J, et al. Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from coking industries in China [J]. Particuology, 2013, 11(1): 86-93.
- [57] Nisbet I C T, Lagoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1992, 16(3): 290-300.
- [58] Dat N D, Chang M B. Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 682-693.
- [59] 明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 等. 2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征 [J]. 环境科学, 2023, 44(9): 4819-4831.
Ming G Y, Zhu M N, Sha Q E, et al. Evolution characteristics of atmospheric formaldehyde emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020 [J]. Environmental Science, 2023, 44(9): 4819-4831.
- [60] 牛计伟, 李晓恒, 季佳佳, 等. 2016~2022 年珠三角地区 PM_{2.5} 中多环芳烃污染特征及健康风险 [J]. 环境卫生学杂志, 2024, 14(5): 431-437.
Niu J W, Li X H, Ji J J, et al. Pollution characteristics and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in the Pearl River Delta region from 2016 to 2022 [J]. Journal of Environmental Health, 2024, 14(5): 431-437.

致谢: 本研究活动水平数据部分来源于广东省生态环境监测中心和广东省佛山生态环境监测站, 在此表示感谢。

作者简介: 唐 凤(1999-), 女, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染源排放清单及其健康影响评估. tangfeng9522@163.com.