

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献	赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊 O ₃ 浓度时空分布及潜在源区分析	李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层 O ₃ 和前体物 HCHO 及 NO ₂ 的时空特征	王晓雯, 刘旻霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征	明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力	黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中碳组分特征	沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应	高爽, 遆超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系	裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价	陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险	张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)
太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析	王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献	李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估	宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应	李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析	于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群	张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响	李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响	辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茜, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 舒舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制	赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制	魏淑惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制	岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响	贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估	张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估	耿娜, 赵广明, 张大海, 袁黎明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估	马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征	赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响	陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响	郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响	赵肖琼, 张恒慧, 赵润枝, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算	张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响	徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析	刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响	张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素	罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响	鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子	赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响	聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性	唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响	周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响	王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如苗, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性	刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
CuFeO ₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性	刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应	陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估	郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估	赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评估及土壤环境基准值推导	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析	贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估	杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征	周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO ₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析	张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例	陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)	

2006 ~ 2020 年广东省大气甲醛排放演变特征

明桂英¹, 朱曼妮^{1*}, 沙青娥^{1,2}, 张雪驰³, 饶思杰¹, 陈诚¹, 刘慧琳¹, 郑君瑜^{1*}

(1. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 511443; 2. 暨南大学广州区域低碳经济研究基地, 广州 510632; 3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 650011)

摘要: 大气甲醛(HCHO)是臭氧(O₃)和细颗粒物(PM_{2.5})二次组分的关键前体物,在大气光化学反应和二次污染形成过程中扮演着重要角色,并存在致癌性。然而,当前对大气 HCHO 排放来源认识存在不足,制约了二次污染形成机制研究和污染防控策略制定。采用排放因子和成分谱结合方法,建立 2006 ~ 2020 年广东省 HCHO 排放趋势清单,识别了广东省主要 HCHO 排放来源和排放时空演变特征。结果表明,2006 ~ 2020 年期间广东省 HCHO 排放量在 3.9 ~ 5.6 万 t 区间波动,整体呈现极微弱的下降趋势;生物质燃烧源是广东省重要 HCHO 排放源,而受到管控措施的显著影响,其排放量占比从 2006 年的 58% 降至 2020 年的 27%;溶剂使用源的 HCHO 排放则逐渐突显,2020 年占比增长至 28%,并成为广东省首要排放源,其中塑料制品和沥青铺路是主要贡献行业。移动源中以柴油作为燃料的工程机械和货车也是 HCHO 重要排放来源;虽然珠三角和非珠三角地区对广东省 HCHO 排放量贡献相当,但空间分布结果表明 HCHO 排放热点区域分别集中于珠三角中心区域和非珠三角的东西两角,这是由于珠三角主要来源为溶剂使用源和移动源,而非珠三角主要受生物质燃烧源影响。因此,未来应进一步加强珠三角中心区域的工业和移动源减排以及粤西地区的生物质燃烧监管。

关键词: 广东省; 甲醛(HCHO); 排放清单; 排放趋势; 空间演变特征

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-4819-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209277

Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020

MING Gui-ying¹, ZHU Man-ni^{1*}, SHA Qing-e^{1,2}, ZHANG Xue-chi³, RAO Si-jie¹, CHEN Cheng¹, LIU Hui-lin¹, ZHENG Jun-yu^{1*}

(1. Institute for Environment and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 2. Research Center on Low-carbon Economy for Guangzhou Region, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 650011, China)

Abstract: Atmospheric formaldehyde, a key precursor for ozone (O₃) and secondary PM_{2.5}, is carcinogenic and plays an important role in atmospheric photochemistry and the formation of secondary pollution. However, the lack of understanding of the emission sources of atmospheric formaldehyde limits the study on the formation mechanism of secondary pollution and the formulation of pollution control strategies. This study used the emission factor and source profile methods to establish the emission inventories of formaldehyde in Guangdong Province from 2006 to 2020 and identified the main emission sources of formaldehyde and spatial and temporal evolution characteristics. The results showed that the formaldehyde emissions in Guangdong Province fluctuated in the range of 39 000-56 000 tons during 2006 to 2020, exhibiting a very weak downward trend. Biomass combustion is an important source of formaldehyde emission in Guangdong Province, of which the contribution decreased from 58% in 2006 to 27% in 2020 owing to effective control measures implemented in Guangdong Province. The solvent use source became the predominant emission source of formaldehyde in 2020 by contributing up to 28%, primarily through plastic products and asphalt paving sources. The construction machinery and trucks fueled by diesel were important contributors of formaldehyde emissions from mobile sources. Although the formaldehyde emissions in the Pearl River Delta and the non-Pearl River Delta were equivalent, the spatial distributions showed that formaldehyde emission hotspots were concentrated in the center of the Pearl River Delta and the eastern and western areas of the non-Pearl River Delta. This was primarily because the solvent use and mobile sources were the main sources of formaldehyde emissions in the Pearl River Delta, whereas the biomass combustion source was the dominant source in the non-Pearl River Delta. Therefore, the formaldehyde emission mitigations of the industrial and mobile sources in the central region of the Pearl River Delta and the biomass combustion source in the western area of Guangdong should be further strengthened in the future.

Key words: Guangdong Province; formaldehyde(HCHO); emission inventory; emissions trend; spatial evolution characteristics

以臭氧(O₃)和细颗粒物(PM_{2.5})复合污染为主要特征的二次污染问题成为“十四五”阶段亟待解决的大气环境问题。甲醛(HCHO)作为大气自由基光化学循环中重要的中间态物质,被认为是 O₃ 和 PM_{2.5} 中二次颗粒物组分的重要前体物^[1~5]。Lei 等^[6]采用模型估算结果表明 HCHO 排放会导致日间 OH 自由基的生成量增加,从而提高 O₃ 生成速率,使 O₃ 峰值浓度提高 8%; Wang 等^[7]基于最大增量反应活性计算得到深圳城区大气中 HCHO 对臭氧生成潜势贡献占挥发性有机化合物(volatile

organic compounds, VOCs)的 29% ~ 34%。另外,北京地区研究表明, HCHO 是促进细颗粒物中硫酸盐生成的关键因素^[8]。由此可见,大气 HCHO 对二次污染形成具有重要作用。此外,国际癌症研究机构(IARC)于 2004 年将 HCHO 确定为 I 类致癌物^[9],并有研究发现在确定的 187 种有害空气污染物

收稿日期: 2022-09-28; 修订日期: 2022-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41627809, 42205097); 暨南大学广州区域低碳经济研究基地自设项目(22JNZS51)

作者简介: 明桂英(1996 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染源排放清单, E-mail: mm_ya6545258@163.com

* 通信作者, E-mail: zhumann.93@gmail.com; zheng_junyue@gmail.com

中^[10],HCHO 占癌症总风险的 50% 以上^[11]. 2019 年,中国生态环境部发布《有毒有害大气污染物名录(2018)》,HCHO 赫然在列,是大气污染防治的严控对象. 因此,识别大气环境 HCHO 来源对大气环境管控和人类健康具有至关重要的意义.

大气中 HCHO 的来源包括一次排放、二次反应生成和天然源. 虽然从全球尺度来看二次生成是大气 HCHO 的主要来源,但在许多区域一次排放贡献尤为显著. Qian 等^[12]研究表明,冬季北京地区一次排放对 HCHO 的贡献高达 78%. 而 Zeng 等^[13]基于正定矩阵因子分解法解析结果表明,一次排放对武汉地区的 HCHO 贡献率为 55.5%. Wang 等^[14]同样发现,华北平原典型农村地区来自一次排放的 HCHO 占大气 HCHO 比例为 50.6%. 因此,一次排放是大气 HCHO 重要来源,识别和量化 HCHO 一次排放源是持续改善空气质量的关键.

排放清单是识别大气污染物排放来源的重要手段,近年来已有机构和研究采用清单方法从国家尺度量化了 HCHO 排放. 美国环保署 (US EPA) 分别建立了 2008、2011、2014 和 2017 年 HCHO 排放清单,其结果表明野外燃烧、非道路移动源、道路移动源、固定燃烧源和工业过程源等为主要贡献源^[15]. 虽然我国仍未建立专门的 HCHO 排放源清单,但少数研究通过 VOCs 组分清单量化了 HCHO 排放并识别了主要贡献源. Wu 等^[16]建立的 2013 年中国人为源 VOCs 组分清单得出 HCHO 排放量共为 80 万 t,在全国范围,其来源几乎完全为移动源和生物质燃烧. Ju 等^[9]结合 OMI 的卫星反演数据和中国多分辨率排放清单 (MEIC) 分析发现,随着人为挥发性有机化合物排放量的不断增加,江浙沪地区燃煤、汽车尾气和工业等排放已成为 HCHO 增加的重要因素. 然而,HCHO 排放清单的研究仍然存在较大局限性,主要体现在:①Wang 等^[17]基于 VOCs 组分观测与排放清单对比发现组分清单中 HCHO 排放可能低估了 2 倍,且目前国内缺乏对工业源 HCHO 排放量化,这可能导致 HCHO 排放低估和来源认识不足;②组分清单排放源分类不够精细,重点行业排放情况不明;③仅有基准年 HCHO 排放清单,缺乏长期的 HCHO 排放趋势及演变特征研究. 以上局限性导致了大气 HCHO 排放来源的认识不清,进而限制了二次污染形成机制的进一步认识和有效污染防治措施的制定.

鉴于此,本研究以中国重要的经济腹地广东省为例,结合排放因子法和成分谱法建立了 2006 ~ 2020 年广东省 HCHO 排放趋势清单,涵盖固定燃烧源、道路移动源、非道路移动源、工艺过程源、溶

剂使用源和生物质燃烧源等重点排放源,并将其细化至三级源. 基于排放清单识别广东省大气 HCHO 重要排放来源及其排放演变特征,并分析排放空间分布演变特征. 本研究有助于进一步认识大气 HCHO 排放来源及排放趋势影响因素,以期为二次污染管控提供基础支撑.

1 材料与方法

1.1 研究范围和排放源分类

本研究区域为广东省,研究年份为 2006 ~ 2020 年. 根据以往研究中 HCHO 源解析结果及排放因子和成分谱数据收集情况,并结合国内排放源实际情况和现阶段建立的 VOCs 排放清单分类体系^[18],本研究将 HCHO 排放清单分为:固定燃烧源、道路移动源、非道路移动源、工艺过程源、溶剂使用源、生物质燃烧源和其他排放源,共 7 类一级源. 进一步依据排放源类别将一级源细化至二级和三级. 具体排放源分类体系和估算方法如表 1 所示.

1.2 趋势清单建立方法

对于生物质燃烧源、道路移动源、固定燃烧源和非道路移动源中的部分二级源,本研究通过文献调研和实际测量,收集 and 建立了对应的 HCHO 排放因子,采用排放因子法进行估算. 对于溶剂使用源、工艺过程源和其他排放源中的餐饮油烟等由于 HCHO 排放研究相对较少,存在缺失排放因子的情况,因此本研究中采用成分谱估算方法进行估算. 具体估算方法如下.

1.2.1 排放因子法

对于能够收集到排放因子的污染源 (见表 1),采用排放因子法进行估算,估算如式 (1) 所示.

$$E_{i,n} = A_{i,n} \times EF_i \quad (1)$$

式中, i 和 n 分别为排放源类别和年份, $E_{i,n}$ 为某年份 n 中 i 类源 HCHO 排放量; A_i 为 i 类排放源活动水平数据; EF_i 为对应污染源 HCHO 排放因子. 基于不同排放源特点,下面对不同排放源的活动水平数据来源和排放因子选取分别进行阐述.

本研究中道路移动源分为行驶排放和启动排放进行估算. 其中,行驶排放估算具体方法见文献 [19],利用团队自主研发的便携式在线 HCHO 测量系统对汽油客车、柴油货车开展了台架和实际道路测试获取 HCHO 排放因子^[20];其他车型采用了文献 [21 ~ 29] 中 HCHO 排放因子平均值,微客和微货采用小客和小货相同排放因子;具体见表 2 和表 3. HCHO 的启动排放通过车辆的启动次数计算,计算如公式 (2) 所示,启动次数数据来自文献 [30],启动排放因子来自台架实际测量. 各车型的行驶排放量

表 1 广东省 HCHO 排放清单源分类和估算方法			
Table 1 Source classification and estimation methods of formaldehyde emission inventory in Guangdong Province			
一级排放源	二级排放源	三级排放源	估算方法
固定燃烧源	火力发电	依据燃料类型划分	排放因子法
	工业燃烧源	依据燃料类型划分	排放因子法
	民用燃烧源	依据燃料类型划分	排放因子法
道路移动源	汽油	依据车辆类型和排放标准划分	排放因子法
	柴油	依据车辆类型和排放标准划分	排放因子法
非道路移动源	飞机		成分谱法
	船舶		成分谱法
	渔船		成分谱法
	农业机械	依据机械类型划分	排放因子法 + 成分谱法
	施工机械	依据机械类型划分	排放因子法 + 成分谱法
	铁路机车		成分谱法
	港口机械		成分谱法
	酒类生产		成分谱法
	食品制造	依据产品类型划分	成分谱法
	医药制造	依据产品类型划分	成分谱法
	涂料生产		成分谱法
	化学工业		成分谱法
	石油化工		成分谱法
	化学纤维		成分谱法
工艺过程源	玻璃		成分谱法
	陶瓷		成分谱法
	建材		成分谱法
	水泥制品		成分谱法
	钢铁	依据产品类型划分	成分谱法
	橡胶制品		成分谱法
	造纸	依据产品类型划分	成分谱法
	汽车制造	依据产品类型划分	成分谱法
	船舶制造		成分谱法
	电子产品	依据产品类型划分	成分谱法
	机械设备制造		成分谱法
	家电涂层	依据产品类型划分	成分谱法
	人造板		成分谱法
	家具制造		成分谱法
	印刷		成分谱法
溶剂使用源	织物印染		成分谱法
	金属制品		成分谱法
	塑料制品		成分谱法
	皮革制品		成分谱法
	制鞋		成分谱法
	玩具制造		成分谱法
	家用溶剂使用		成分谱法
	建筑涂料使用		成分谱法
	农药使用		成分谱法
	沥青铺路		成分谱法
	去污脱脂		成分谱法
	干洗行业		成分谱法
生物质燃烧源	薪柴家用		排放因子法
	秸秆家用	依据作物类型划分	排放因子法
	秸秆露天焚烧	依据作物类型划分	排放因子法
	森林火灾	依据植被类型划分	排放因子法
其他排放源	餐饮油烟		成分谱法
	垃圾焚烧		排放因子法

和启动排放量加和即为道路移动源的 HCHO 年排放总量. 车型分类、燃料比例和保有量数据来自调研和《广东省统计年鉴》(2006 ~ 2020 年)^[31].

$$E_{i,n} = A_{i,n} \times EF_i \times M \tag{2}$$

式中, i 和 n 分别为车型类别和年份, $E_{i,n}$ 为某年份 n 中 i 类车型启动排放量; A_i 为 i 类车型的保有量;

EF_i 为对应车型 HCHO 启动排放因子; M 为启动次数.

表 2 道路移动源 HCHO 行驶排放因子/ $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$

Table 2 HCHO running emission factors of on-road mobile sources/ $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$			
车型	排放标准	排放因子	来源
汽油客车、汽油货车、出租车和公交车	国 I 前	5.55	实测
	国 I	4.43	实测
	国 II	6.96	实测
	国 III	1.40	实测
	国 IV	0.60	实测
	国 V	0.56	实测
	国 VI	0.27	实测
柴油微客	国 I 前	0.41	[21]
	国 I	0.41	[21]
	国 II	0.41	[21]
	国 III	8.40	[22]
	国 IV	0.50	[23~25]
	国 V	0.14	[25]
柴油小客	国 VI	0.03	[26]
	国 I 前	0.41	[21]
	国 I	0.41	[21]
	国 II	0.41	[21]
	国 III	8.40	[22]
	国 IV	0.50	[23~25]
柴油中客	国 V	0.14	[25]
	国 VI	0.03	[26]
	国 I 前	14.13	[27]
柴油大客	国 I 前	31.06	实测
	国 I	31.06	实测
	国 II	31.06	实测
	国 III	31.06	实测
	国 IV	31.06	实测
	国 V	31.06	实测
柴油微货	国 VI	31.06	实测
	国 I 前	63.51	实测
	国 I	81.13	实测
	国 II	54.04	实测
	国 III	35.59	实测
	国 IV	23.97	实测
柴油轻货	国 V	23.97	实测
	国 VI	11.98	实测
	国 I 前	49.40	实测
	国 I	63.10	实测
	国 II	42.03	实测
	国 III	50.64	实测
柴油中货	国 IV	16.17	实测
	国 V	9.03	实测
	国 VI	6.48	实测
	国 I 前	18.56	实测
柴油重货	国 I 前	104.30	[28]
	国 I	96.40	[28]
	国 II	53.90	[28]
	国 III	38.58	实测
	国 IV	9.00	实测
	国 V	9.00	实测
普通摩托车	国 VI	9.00	实测
	国 I 前	0.24	[29]

表 3 道路移动源 HCHO 启动排放因子¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$

Table 3 HCHO start emission factors of on-road mobile sources/ $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$				
车型	标准	冷启动	热启动	HCHO 排放因子来源
柴油货车	国 0~国 3	35.2	38.0	实测
	国 4	35.2	2.0	实测
	国 5~6	35.2	3.7	实测
其他车	国 1	8.0	/	实测
	国 2	5.2	/	实测
	国 3	4.9	/	实测
	国 4	1.6	/	实测
	国 5	0.9	/	实测
	国 6	0.6	/	实测

1) 其他车不考虑热启动的超量排放

非道路移动源中,农用运输车采用排放因子法,结合公式(1)基于行驶里程进行估算,其 HCHO 排放因子采用文献[32]结果.内燃叉车结合公式(1)基于单位施工面积油耗法的排放因子法估算,其排放因子通过实际测量获得,见表 4.柴油消耗量从《中国能源统计年鉴》(2006~2020 年)^[33]获得,再根据各城市施工建筑面积比例和柴油发动机总动力比例进行分配.

本研究考虑了森林火灾、秸秆露天焚烧、秸秆家用和薪柴家用这 4 种生物质燃烧形式.其中森林火灾和秸秆露天焚烧基于卫星火点法计算,具体方法和活动水平数据获取参考文献[34],排放因子源于文献[35~37].秸秆家用和薪柴家用计算方法参照公式(1),活动水平数据包括秸秆燃烧量、农作物产量和农村人口等,来源于《中国能源统计年鉴》^[33]和《广东省农村统计年鉴》^[38].

固定燃烧源中电厂和工业燃烧源 HCHO 排放因子从美国环保署排放因子数据库 AP-42^[39]获取,民用燃烧源排放因子采用文献[40,41]结果.计算方法参照公式(1).活动水平数据来源于《广东省统计年鉴》(2006~2020 年).

1.2.2 成分谱法

针对缺失排放因子的 HCHO 估算则基于各源 VOCs 排放估算的基础上,和源成分谱中 HCHO 的组分排放质量分数相乘得出 HCHO 排放量,估算如公式(3)所示.

$$E_{i,n} = A_{i,n} \times EF_{i,\text{VOCs}} \times \varphi_i \times (1 - \beta) \quad (3)$$

式中, i 和 n 分别为排放源类别和年份, $E_{i,n}$ 为某年份 n 中 i 类源 HCHO 排放总量; A_i 为 i 类排放源活动水平数据; $EF_{i,\text{VOCs}}$ 为对应污染源 VOCs 排放因子; φ_i 为对应污染源 VOCs 成分谱中 HCHO 质量占比,工艺过程源和溶剂使用源排放因子和成分谱来源见文献[39,42~58],非道路移动源来源见文献

表 4 固定燃烧源、生物质燃烧源及其他排放源 HCHO 排放因子

Table 4 HCHO emission factors of stationary combustion sources, biomass combustion sources, and other emission sources

一级源分类	二级源分类	三级源分类	HCHO 排放因子	单位	HCHO 排放因子来源
非道路移动源	农业机械	农用运输车-三轮	0.026 0	$\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	[32]
		农用运输车-四轮	0.075 0	$\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	[32]
	施工机械	内燃叉车	0.840 0	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	实测
生物质燃烧	秸秆露天焚烧	水稻、玉米和甘蔗	1.550 0	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[35]
	森林火灾	针叶林和常绿阔叶林等	1.598 0	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[35]
	秸秆家用	水稻、小麦和花生等	0.945 0	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[36]
	薪柴家用	薪柴	0.601 0	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[37]
固定燃烧源	电厂	燃料煤	0.000 1	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[39]
		燃料油	0.006 5	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[39]
		天然气	0.001 2	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	[39]
		煤气	0.000 4	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	[39]
	工业燃烧	燃料煤	0.000 1	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[39]
		燃料油	0.006 5	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[39]
		天然气	0.001 2	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	[39]
		焦炭	0.000 1	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[39]
	民用燃烧	煤炭	0.016 0	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[40,41]
		煤油	0.049 0	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[40]
		液化石油气	0.113 0	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[40]
		天然气	0.069 0	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	[40]
其他排放源	垃圾焚烧		0.0431	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[39]

[42,46,57,59 ~ 61] (见表 5); β 为末端治理设施对 VOCs 的平均治理效率,来源于广东省环境统计数据.

非道路移动源中,飞机、船舶和渔船活动水平数据包括机械保有量、行驶里程和油耗数据等,主要通过统计年鉴和船讯网等途径获取.工业过程源和溶剂使用源活动数据主要来自广东省环境统计数据、《广东省统计年鉴》(2006 ~ 2020 年)和行业发展报告等.

1.3 网格化清单建立方法

本研究采用了郑君瑜等^[62]研究的排放清单空间分配方法,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 3 km × 3 km 网格,绘制了 2006 年 HCHO 排放空间分布以及 2010、2015、2020 年和 2006 年的差值演变.具体方法如下:①利用 ArcGIS,对 3 km × 3 km 网格分别进行空间匹配,以得到相应的空间权重因子,空间权重因子按照经纬度坐标、航行轨迹、人口分布和土地利用数据等代表性数据进行分配,具体分配方法见文献[63],为了保证空间分配的准确性,获得空间权重因子后,分别对所有网格的城乡空间权重进行加和并验证.②用每个网格的空间分配权重因子,分别乘以相应的 HCHO 排放量,从而获得每个网格的排放量,最终获得网格化 HCHO 排放清单.将不同年份每个网格的排放量作差,获得相应

的空间排放差值.

2 结果与讨论

2.1 2006 ~ 2020 年广东省 HCHO 排放总量及源结构演变

2.1.1 排放总量演变特征

2006 ~ 2020 年广东省 HCHO 排放总量演变特征如图 1 所示.15 年来广东省 HCHO 排放总量变化呈波动性,2006 ~ 2020 年期间污染物 HCHO 排放量由 4.4 万 t 下降至 4.3 万 t,仅减少了 2.2%,整体呈现极微弱的下降趋势.2006 ~ 2008 年,广东省 HCHO 排放量快速上升,年均增长 13%.2008 年广东省 HCHO 排放量增长至 5.7 万 t,随后在 2009 ~ 2016 年间呈现较明显的波动下降趋势,2016 年达到最低值 3.8 万 t.2017 ~ 2019 年 HCHO 排放量趋于稳定,而 2020 年呈现上升势态.

从总量来看,珠三角和非珠三角地区对整个广东省的排放量相当.非珠三角地区 HCHO 排放变化趋势上与广东省具有一致性;而珠三角地区 HCHO 排放总体呈现缓慢稳定上升趋势,原因可能为经济增长和环境治理的共同作用.此外,在“国十条”和“蓝天保卫战”的影响下,NO_x、PM_{2.5}和 VOCs 等常规污染物减排成效显著^[64,65],而 HCHO 则未呈现明显的下降.因此,在常规污染物基本达标的背景下,未来应在 HCHO 等污染物方面加大治理.

表 5 VOCs 排放因子、HCHO 占比和数据来源

Table 5 VOCs emission factors, HCHO occupations and data sources

一级源分类	二级源分类	三级源分类	VOC 排放因子 /g·kg ⁻¹	HCHO 占比 /%	VOC 排放 因子来源	成分谱来源
工艺过程源	酒类生产	啤酒	0.35	4.81	[42]	[57]
	食品制造	糕点饼干	1	4.81	[43]	[57]
		糖果	8	4.81	[43]	[57]
	医药制造	中成药和化学原料药	114.14	3.51	[44]	[58]
	涂料生产	涂料生产	50	0.07	[43]	[57]
	化学工业	合成橡胶	7.17	0.04	[43]	[57]
	石油化工	石油产品	1.82	4.17	[43]	[57]
	化学纤维	化学纤维	5.1	0.04	[45]	[57]
	玻璃	日用玻璃制品	0.4	0.17	[46]	[39]
	建材	粘土砖瓦	0.132	1.59	[46]	[39]
	陶瓷	卫生陶瓷	29.22	0.01	[46]	[39]
	水泥制品	熟料	0.004	6.05	[47]	[39]
	钢铁	烧结	0.25	0.70	[46]	[57]
	橡胶制品	轮胎制造	0.16	0.04	[48]	[57]
	造纸	纸制品	0.1	8.62	[49]	[57]
溶剂使用源	车辆制造	汽车喷涂	21.2	0.63	[43]	[57]
	船舶制造	溶剂型涂料(PU 漆等)	12.8	0.63	[46]	[57]
	电子产品	计算机和彩电	0.2	0.63	[46]	[57]
		印刷电路板	0.09	0.63	[46]	[57]
	家电涂层	家用电冰箱	0.2	0.63	[46]	[57]
	家具制造	木质家具制造	0.4	0.63	[43]	[57]
	制鞋	皮鞋	0.03	0.63	[43]	[57]
	印刷	包装印刷	300	0.63	[50]	[57]
	织物印染	印染布	10	0.63	[51]	[57]
	人造板	胶合板	0.5	14.29	[43]	[57]
	机械设备制造	设备制造和机床涂层	0.4	0.63	[43]	[57]
	塑料制品	塑料制品	2.2	12.59	[52]	[58]
	皮革制品	皮革制品	224	12.59	[53]	[58]
	家用溶剂使用		0.1	0.04	[54]	[57]
	建筑涂料使用		120	0.00	[55]	[57]
非道路移动源	农药使用		469.69	0.04	[43]	[57]
	沥青铺路		16.5	8.00	[56]	[57]
	去污脱脂		0.04	0.04	[43]	[57]
	干洗行业		0.02	0.04	[52]	[57]
	飞机		1.18	14.90	[42]	[57]
	船舶		0.5	29.00	[59]	[60]
	渔船		3.93	29.00	[42]	[60]
	铁路机车		3.11	25.00	[46]	[61]
	港口机械		5.2	25.00	[42]	[61]

2.1.2 排放源结构演变特征

如图 1 所示,生物质燃烧源、溶剂使用源、非道路移动源、工艺过程源和道路移动源是广东省 HCHO 主要排放来源,历年来对 HCHO 排放量占比超过 80%。然而在广东省出台的各项政策的影响之下,其排放结构存在明显变化。

图 1(a) 中,2006 年生物质燃烧源对广东省 HCHO 排放量占比为 58%, 是 HCHO 第一大排放源,主要来自非珠三角地区(42%)。近年来,为打赢蓝天保卫战,广东省铁腕禁烧,生物质燃烧有明显的下降趋势,至 2020 年其对广东省 HCHO 排放量占比减少至 27%。然而随着工业快速发展,溶剂使用

源和工艺过程源的 HCHO 排放则呈现上升趋势。2006 ~ 2020 年溶剂使用源对广东省大气 HCHO 排放量占比从 17% 上升至 28%, 成为广东省首要来源。此外,非道路移动源对广东省 HCHO 排放量占比 2006 年至 2020 年期间由 9% 上升至 19%, 成为第三大来源,主要来自珠三角。珠三角地区道路移动源的 HCHO 排放量年均占比(9%) 高于非珠三角地区(3%), 这说明在人口密集地区道路移动源 HCHO 排放更值得被关注。此外,固定燃烧源 HCHO 排放量占比于 2020 年上升至 7%, 主要原因是广东省煤改气政策使天然气的使用量增加。虽然 Wu 等^[16] 基于 VOCs 组分清单估算出 2013 年广东省

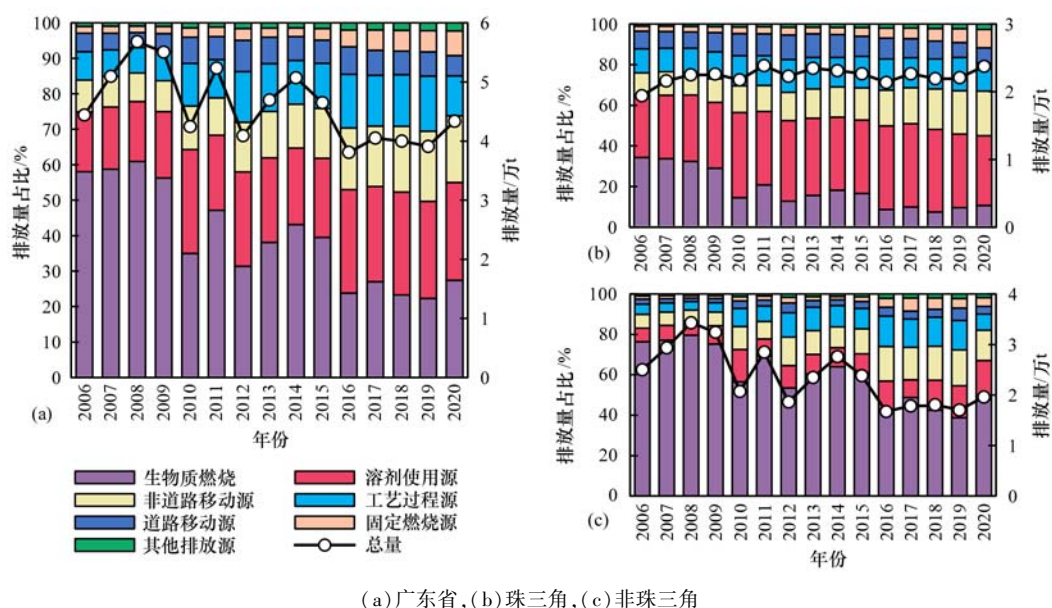


图 1 2006 ~ 2020 年广东省 HCHO 排放变化特征

Fig. 1 Characteristics of formaldehyde emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020

HCHO 的排放量(4.1 万 t)与本研究结果(4.7 万 t)相近,但是源结构存在差异,且该研究的组分清单中未包含溶剂使用源。

虽然珠三角和非珠三角对广东省 HCHO 排放总量的贡献相当,但由于经济发展和产业结构的悬殊,在源结构上表现出很大不同。图 1(b)中,在 2006 ~ 2020 年期间,珠三角地区溶剂使用源始终是第一贡献源,2006 年其排放量占比为 30%,2020 年为 31%,在排放量占比上虽无大幅变化,但其排放量增长了 40%。现阶段,广东省政府对工业企业已实施一系列污染控制措施,在一定程度上对 VOCs 起到减排作用,但仍存在 VOCs 治理效率、废气收集效率和后处理设备安装率低等问题,未来溶剂使用源中 HCHO 等含氧挥发性有机化合物的排放管控应作为重点。非道路移动源是珠三角地区第二大 HCHO 排放源,排放量占比由 12% 增长至 22%。图 1(c)中,非珠三角地区 HCHO 主要来自生物质燃烧源(2006 年排放量占比 76%),并主导着整体的趋势走向。虽然受到野外禁烧等管控政策影响,生物质燃烧 HCHO 排放显著下降,但其于 2020 年排放量占比达 48%,仍然为非珠三角区域首要排放来源。整体而言,广东省 HCHO 排在减排政策和经济发展的影响下,生物质燃烧和道路移动源排放有所下降,非道路移动源和溶剂使用源等的排放逐渐凸显。

2.2 广东省 HCHO 重点源排放特征

2.2.1 生物质燃烧源

生物质燃烧是广东省 HCHO 排放的主要来源和排放趋势变化的主要影响因素,其 HCHO 排放量呈现波动下降趋势。如图 2 所示,森林火灾和秸秆露

天焚烧是生物质燃烧 HCHO 排放的主要贡献者,2006 ~ 2020 年期间,平均排放量占比超 75%。森林火灾在 2008 年排放量达到峰值(1.9 万 t),2020 年降至 0.6 万 t;而秸秆露天焚烧在 2009 年达到峰值(1.1 万 t),2020 年下降至 0.5 万 t。温度和降雨等自然因素是影响森林火灾和秸秆露天焚烧的重要因素,同时管控政策也起到一定的减排效果。近年来,广东省不断加强秸秆焚烧的监管,秸秆以直接还田的形式代替焚烧,有效降低了秸秆露天焚烧排放。另外,森林火灾的排放量也随着人们防范意识的加强而大幅下降,由 2006 年的 1.2 万 t 下降至 2020 年的 0.6 万 t,下降幅度为 50%。同时,家用秸秆和薪柴燃烧 HCHO 排放也急剧减少。然而,生物质燃烧依然是非珠三角地区重要 HCHO 排放源,尤其是露天焚烧需进一步加大减排力度。

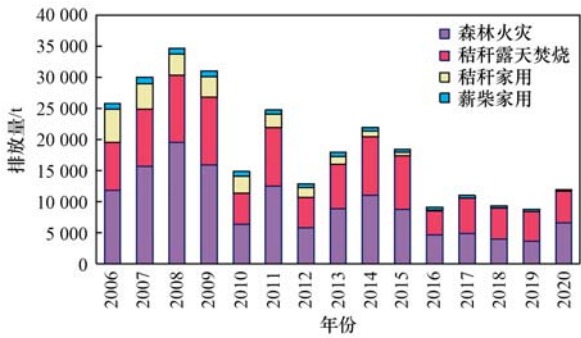


图 2 2006 ~ 2020 年生物质燃烧源 HCHO 排放变化特征

Fig. 2 Characteristics of formaldehyde emissions from biomass combustion sources from 2006 to 2020

2.2.2 溶剂使用源和工艺过程源

工业部门是 VOCs 的重要排放部门,同样也是 HCHO 的重要排放来源。图 3 展示了广东省溶剂使

用源(包括工业溶剂源和非工业溶剂源)和工艺过程源 HCHO 排放的变化特征。

如图 3(a)所示,溶剂使用源首要贡献源为塑料制品行业,其年均排放量占比超过 50%,由于该行业中加入的胶粘剂、涂料、油墨和塑胶粒等原辅料会产生大量 HCHO,并且收集效率和废气处理效率较低,导致 HCHO 大量排放,自 2018 年来,国内外加大了塑料污染治理和水性涂料替代,塑料制品行业的 HCHO 排放量明显降低. 溶剂使用源其他主要贡献子源依次为沥青铺路(年均占比 7%)、皮革制品(7%)、金属制品(6%)和人造板(5%). 值得注意的是,沥青铺路 HCHO 排放自 2019 ~ 2020 年大幅上升,主要原因是这两年湛江、梅州、茂名和阳江等非珠三角地区铺装路面增量较大. 此外,随着市场规模扩大,人造板制造行业 HCHO 排放量呈现逐年上升的趋势,排放量占比由 2006 年的 3% 上升至 2020 年的 13%,其中 2020 年上升最为显著,这可能是“十三五规划”脱贫攻坚行动使木材及制品需求增加导致.

从图 3(b)工艺过程源排放趋势和结构演变特征来看,石油化工业 HCHO 排放量占比最高(年

均占比为 59%),2006 ~ 2013 年石油化工业排放量稳步上升,排放量增长幅度为 66%,2014 年后 VOCs 实施管控治理、关停高污染企业和工业提标改造等举措使 HCHO 排放量呈现缓慢下降趋势,在疫情影响下,2020 年石油化工业 HCHO 排放量明显下降,排放量较 2019 年下降 38%. 医药制造行业的年均占比为 18%,排名第二,其 HCHO 排放主要来自车间内溶剂使用和消毒. 食品制造是工艺过程源中第三大排放子源,且排放量占比呈现逐年上升趋势,2006 年仅占 7%,而 2020 年上升至 16%.

需要注意的是,溶剂使用源和工艺过程源严重缺乏 HCHO 排放因子和成分谱占比信息,本研究在选取成分谱时部分子源采用了综合的 VOCs 成分谱,并且采用了综合 VOCs 治理效率,这导致了一定的排放估算误差. 作为 HCHO 的重要排放来源,未来应开展更多的排放测试从而进一步认识排放特征.

2.2.3 非道路移动源和道路移动源

图 4(a)展示了广东省非道路移动源 HCHO 排放及不同机械类型排放量变化特征. 非道路移动源 HCHO 排放量呈现较快上升趋势,2020 年其排放量

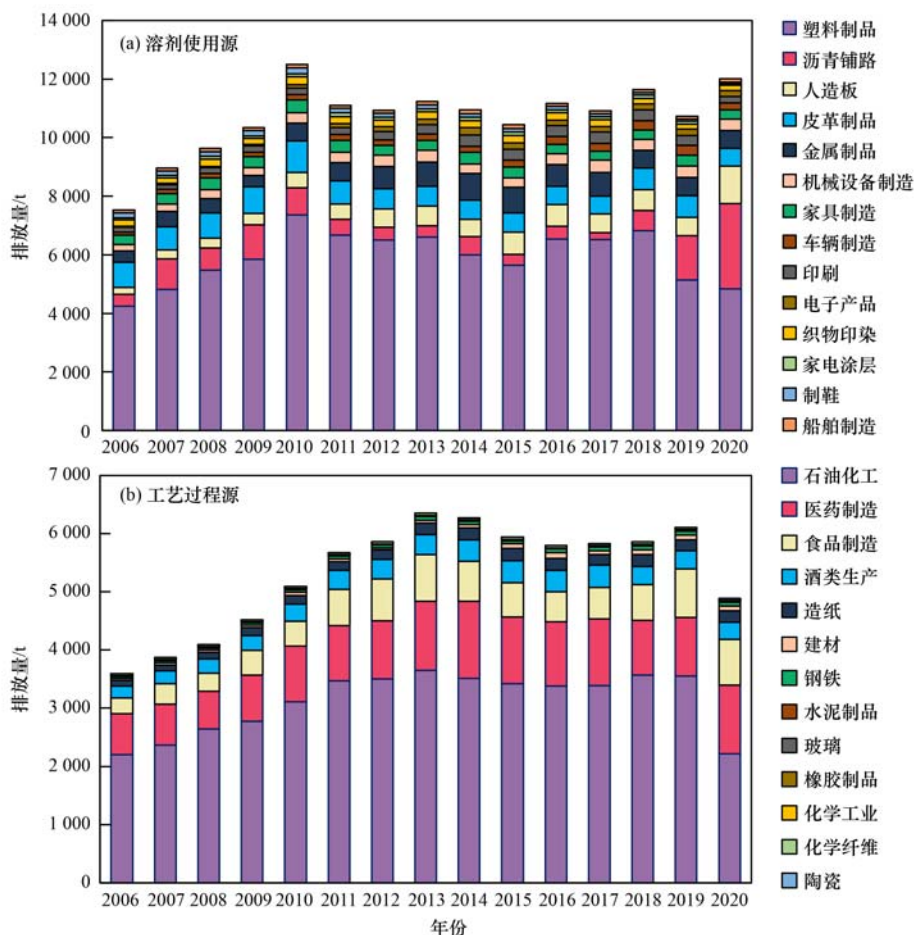


图 3 2006 ~ 2020 年溶剂使用源和工艺过程源 HCHO 排放变化特征

Fig. 3 Characteristics of formaldehyde emissions from solvent use sources and industrial processes from 2006 to 2020

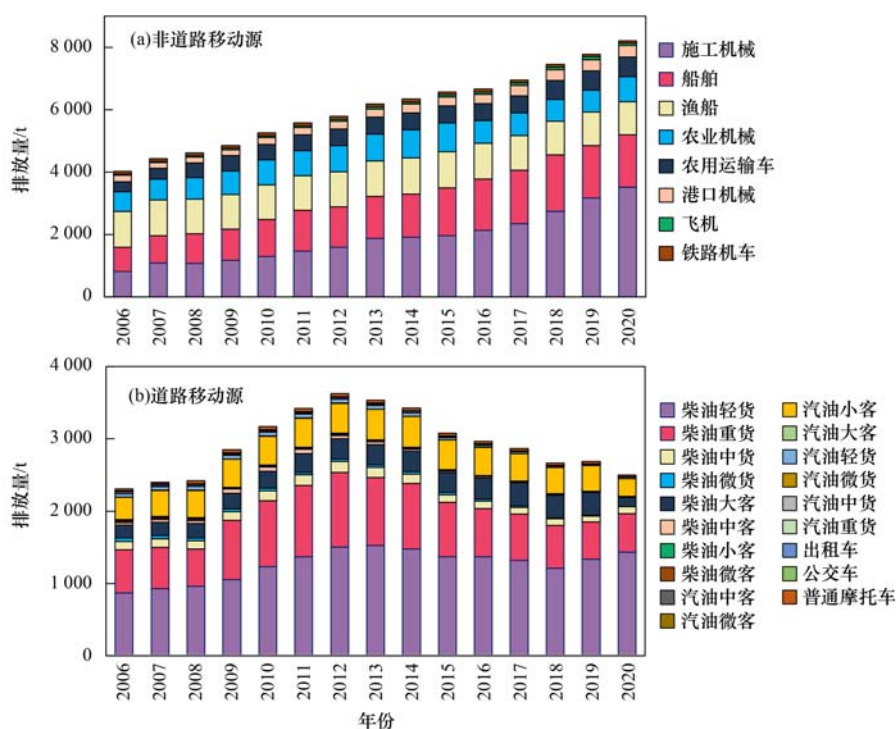


图 4 2006~2020 年非道路和道路移动源 HCHO 排放变化特征

Fig. 4 Characteristics of formaldehyde emissions from non-road mobile sources and on-road mobile sources from 2006 to 2020

为 0.8 万 t, 是 2006 年排放量的两倍. 施工机械是非道路移动源贡献最为显著的污染源, 2006~2020 年, 排放量占比由 21% 上升至 43%. 船舶和渔船的排放量占比次于施工机械, 其中船舶排放更为突出, 2006 至 2020 年期间, 船舶排放量上升比例为 50%. 此外, 农业水平的机械化导致农业机械和农用运输车的排放量也不断上升. 当前针对非道路移动源的排放相关政策较少且管控难度较大, 未来, 应考虑在工程机械、船舶和铁路机车等非道路移动源提出有效减排措施.

道路移动源中各类车辆排放趋势如图 4(b) 所示. 柴油车在道路移动源排放尤为突出, 排放量占比超过 80%, 主要来自柴油轻货、柴油重货和柴油大客. 其中, 柴油轻货 2020 年排放量占比为 58%, 是道路移动源最大的排放子源, 柴油重货和柴油大客占比分别为 22% 和 5%. 汽油车中以小型客车排放为主, 排放量年均占比为 12%, 2020 年在疫情影响下大幅减小. 道路移动源的排放量整体上呈现先上升后下降的趋势, 于 2012 年达到排放峰值. 前期排放上升主要由车辆保有量迅猛增加所导致, 随着车辆排放标准和燃油标准逐年提高以及老旧车辆的淘汰, 后期排放量有明显的下降. 总体而言, 广东省政府针对道路移动源减排而采取的政策措施如提高排放标准 and 淘汰老旧车辆等已见成效, 但机动车的减排在未来仍有很大空间, 其中柴油轻货和柴油重货应作为 HCHO 减排的重点对象.

2.3 广东省 HCHO 排放空间演变特征

图 5 展示了 2006 年广东省 HCHO 排放空间分布, 以及 2010、2015 和 2020 年相对 2006 年的 HCHO 排放空间变化特征. 整体而言, 广东省 HCHO 排放分布呈现中心和两边高特点, 高值区始终集中在经济发达、人口稠密和人类活动繁多的珠三角中心区域以及农业火点和农村人口活跃的非珠三角东西两角. 相较于 2006 年, 经济发达的广州、佛山和深圳等珠三角地区排放量均呈持续上升趋势, 因为珠三角地区集中了大量高 VOCs 排放的工业企业. 随着非珠三角地区的经济发展和珠三角产业结构的逐步转移, 工业企业趋于向非珠三角扩散, 非珠三角地区呈现点状增加区域, 湛江和茂名地区呈现带状排放高值区. 和 2006 年相比, 非珠三角区域 2010 年和 2020 年下降明显, 而 2015 年上升, 主要受到生物质燃烧影响. 但是以茂名为首的粤西地区排放量处于高值并有一定的增加趋势, 主要是由工业源排放导致. 而 2006 年非道路移动源在广东省沿海城市存在较高的 HCHO 排放, 且污染集中连片分布于珠三角中心区域, 且其他年份相较于 2006 年排放增加尤为明显. 因此, 未来应多关注珠三角中心区域和粤西地区的工业源减排以及珠三角的移动源管控.

2.4 不确定性分析

在 HCHO 排放清单编制过程中, 由于活动水平、排放因子、成分谱和估算方法的局限, 导致结果存在不确定性. 活动水平方面, 本研究数据主要从

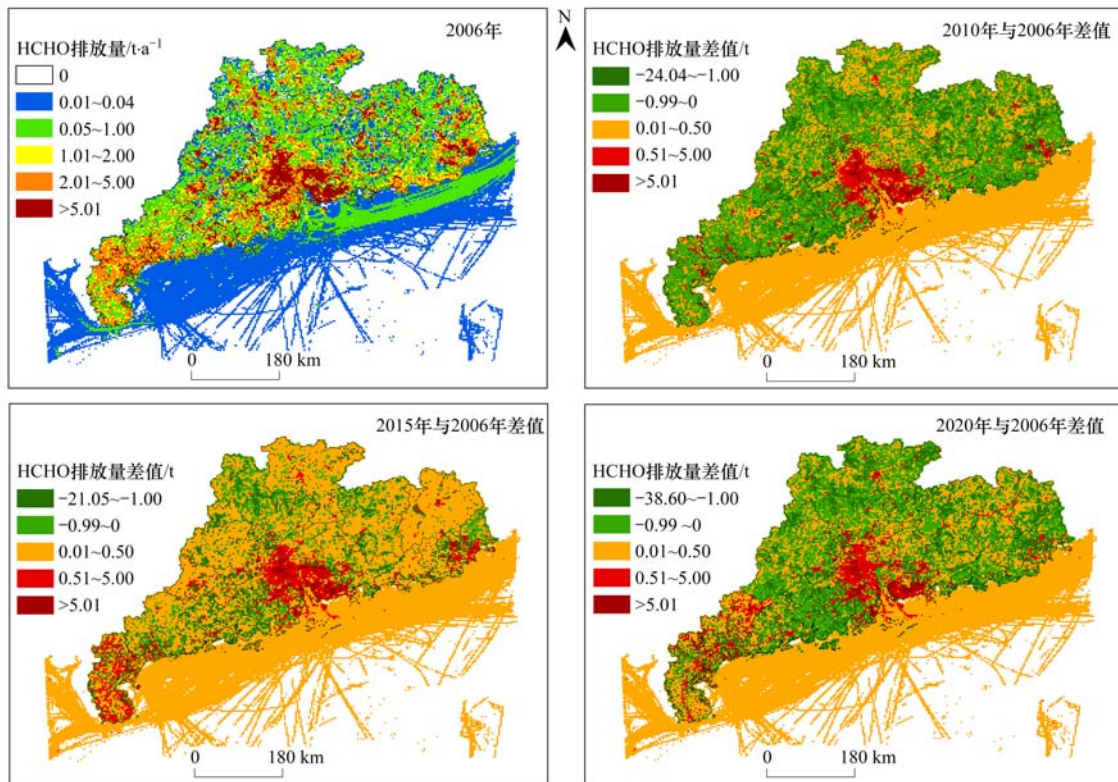


图5 广东省 HCHO 排放空间分布演变特征(3 km × 3 km)

Fig. 5 Spatial evolution characteristics of formaldehyde emissions in Guangdong Province(3 km × 3 km)

官方统计数据获取,在数据整理过程中进行了二次核对与修正,在一定程度上降低了数据的不确定性。排放因子和成分谱方面,由于较多 VOCs 源成分谱采用 SUMMA 罐和 DNPH 管等离线采样方法,HCHO 等关键组分占比存在缺失或差异大的问题,且多数子源由于缺乏本土成分谱而采用了国外测试结果,因此存在一定的不确定性^[18]。为此,本研究采用蒙特卡罗模拟对清单不确定性进行定量评估。结果显示,2020 年广东省 HCHO 排放清单的不确定性范围为(-57%, 61%)。其中工艺过程源和溶剂使用源采用了成分谱法计算,活动水平数据、VOCs 排放因子、成分谱均会导致不确定性,不确定性分别为: (-84%, 179%)和(-85%, 156%)。近年来国内外学者就道路移动源和生物质燃烧排放因子开展大量的测试研究,并且许多研究采用了已经经过验证的在线测量技术,不确定性相对较小,分别为: (-63%, 103%)和(-81%, 99%)。非道路移动源研究相对成熟,不确定性为(-68%, 113%)。固定燃烧源不确定性略高于移动源,由于排放测试研究较少,工艺和后处理差异是导致不确定性的的重要因素,不确定性为(-87%, 126%)。

3 结论

(1)2006~2020 年期间,广东省大气 HCHO 排

放量由 4.4 万 t 下降至 4.3 万 t,总体呈现微弱下降趋势,但期间排放量呈现波动变化。

(2)广东省大气 HCHO 主要排放源按贡献大小依次为生物质燃烧源、溶剂使用源、非道路移动源、工艺过程源和道路移动源。其中,溶剂使用源是珠三角地区 HCHO 第一大排放源,且排放量大幅上升;非珠三角地区 HCHO 首要排放源则为生物质燃烧。

(3)近年来,生物质燃烧源和道路移动源在政策管控下排放量呈现整体下降趋势。而溶剂使用源和工业过程源的 HCHO 排放在经济和管控政策的相互影响下变化不显著。非道路移动源由于未受管控,HCHO 排放持续上升。

(4)生物质燃烧源中主要排放源为森林火灾和秸秆露天焚烧,溶剂使用源和工业过程源中塑料制品和石化行业 HCHO 排放量大,移动源中以柴油为燃料的工程机械和柴油货车排放量占比突出。

(5)广东省 HCHO 排放高值区集中在经济发达和人口稠密的珠三角中心区域和农业活动较发达的非珠三角东西两角,广州、佛山和深圳等地区受工业排放影响,其排放量占比突出并呈现增加趋势。受非道路移动源排放影响,沿海城市同样存在较高的 HCHO 排放。

(6)广东省大气 HCHO 排放清单不确定性范围

为(-57%, 61%), 工艺过程源和溶剂使用源不确定性较大。

参考文献:

- [1] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 2063-2101.
- [2] Fu T M, Jacob D J, Palmer P I, *et al.* Space-based formaldehyde measurements as constraints on volatile organic compound emissions in east and south Asia and implications for ozone[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D6), doi: 10.1029/2006jd007853.
- [3] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [4] Carlier P, Hannachi H, Mouvier G. The chemistry of carbonyl compounds in the atmosphere—A review [J]. *Atmospheric Environment*, 1986, **20**(11): 2079-2099.
- [5] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds[J]. *Chemical Reviews*, 2003, **103**(12): 4605-4638.
- [6] Lei W, Zavala M, de Foy B, *et al.* Impact of primary formaldehyde on air pollution in the Mexico city metropolitan area [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(7): 2607-2618.
- [7] Wang C, Huang X F, Han Y, *et al.* Sources and potential photochemical roles of formaldehyde in an urban atmosphere in South China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, **122**(21): 11934-11947.
- [8] Moch J M, Dovrou E, Mickley L J, *et al.* Contribution of hydroxymethane sulfonate to ambient particulate matter: a potential explanation for high particulate sulfur during severe winter haze in Beijing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(21): 11969-11979.
- [9] Ju T Z, Fan J C, Liu X, *et al.* Spatiotemporal variations and pollution sources of HCHO over Jiangsu-Zhejiang-Shanghai based on OMI[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2022, **15**(1): 15-30.
- [10] Scheffe R D, Strum M, Phillips S B, *et al.* Hybrid modeling approach to estimate exposures of hazardous air pollutants (HAPs) for the national air toxics assessment (NATA) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(22): 12356-12364.
- [11] Blair A, Saracci R, Stewart P A, *et al.* Epidemiologic evidence on the relationship between formaldehyde exposure and cancer [J]. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 1990, **16**(6): 381-393.
- [12] Qian X, Shen H Q, Chen Z M. Characterizing summer and winter carbonyl compounds in Beijing atmosphere [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **214**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116845.
- [13] Zeng P, Lyu X, Guo H, *et al.* Spatial variation of sources and photochemistry of formaldehyde in Wuhan, Central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **214**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116826.
- [14] Wang J H, Sun S Y, Zhang C X, *et al.* The pollution levels, variation characteristics, sources and implications of atmospheric carbonyls in a typical rural area of North China Plain during winter[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **95**: 256-265.
- [15] USEPA. 2014 national emissions inventory (NEI) data [EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/2014-national-emissions-inventory-nei-data>, 2018-11-16.
- [16] Wu R R, Xie S D. Spatial distribution of ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(5): 2574-2583.
- [17] Wang M, Shao M, Chen W, *et al.* A temporally and spatially resolved validation of emission inventories by measurements of ambient volatile organic compounds in Beijing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(12): 5871-5891.
- [18] Sha Q E, Zhu M N, Huang H W, *et al.* A newly integrated dataset of volatile organic compounds (VOCs) source profiles and implications for the future development of VOCs profiles in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **793**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148348.
- [19] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2655-2669.
- [20] Pan Y Y, Li N, Zheng J Y, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2655-2669.
- [21] Zhu M N, Dong H B, Yu F, *et al.* A new portable instrument for online measurements of formaldehyde: from ambient to mobile emission sources [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, **7**(5): 292-297.
- [22] Karavalakis G, Stournas S, Bakeas E. Light vehicle regulated and unregulated emissions from different biodiesels[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(10): 3338-3346.
- [23] Zervas E. Regulated and non-regulated pollutants emitted from two aliphatic and a commercial diesel fuel[J]. *Fuel*, 2008, **87**(7): 1141-1147.
- [24] Karavalakis G, Bakeas E, Stournas S. Influence of oxidized biodiesel blends on regulated and unregulated emissions from a diesel passenger car[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(13): 5306-5312.
- [25] Karavalakis G, Boutsika V, Stournas S, *et al.* Biodiesel emissions profile in modern diesel vehicles. Part 2: effect of biodiesel origin on carbonyl, PAH, nitro-PAH and oxy-PAH emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(4): 738-747.
- [26] 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.
- [27] Martinet S, Liu Y, Louis C, *et al.* Euro 6 unregulated pollutant characterization and statistical analysis of after-treatment device and driving-condition impact on recent passenger-car emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(10): 5847-5855.
- [28] Dong D, Shao M, Li Y, *et al.* Carbonyl emissions from heavy-duty diesel vehicle exhaust in China and the contribution to ozone formation potential [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 122-128.
- [29] Yao Z L, Jiang X, Shen X B, *et al.* On-road emission characteristics of carbonyl compounds for heavy-duty diesel trucks [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(3): 915-925.
- [30] Yang H H, Liu T C, Chang C F, *et al.* Effects of ethanol-blended gasoline on emissions of regulated air pollutants and carbonyls from motorcycles[J]. *Applied Energy*, 2012, **89**(1): 1-10.

- 281-286.
- [30] Wen Y F, Zhang S J, He L Q, *et al.* Characterizing start emissions of gasoline vehicles and the seasonal, diurnal and spatial variabilities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **245**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118040.
- [31] 广东省统计局. 广东统计年鉴(2006~2020) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2020.
- [32] Yao Z L, Shen X B, Ye Y, *et al.* On-road emission characteristics of VOCs from diesel trucks in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **103**: 87-93.
- [33] 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, 2007-2021.
- [34] Xu Y Q, Huang Z J, Ou J M, *et al.* Near-real-time estimation of hourly open biomass burning emissions in China using multiple satellite retrievals [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **817**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152777.
- [35] Akagi S K, Yokelson R J, Wiedinmyer C, *et al.* Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(9): 4039-4072.
- [36] Yokelson R J, Burling I R, Urbanski S P, *et al.* Trace gas and particle emissions from open biomass burning in Mexico [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(14): 6787-6808.
- [37] Hays M D, Geron C D, Linna K J, *et al.* Speciation of gas-phase and fine particle emissions from burning of foliar fuels [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(11): 2281-2295.
- [38] 广东农村统计年鉴编辑委员会. 广东农村统计年鉴(2006~2020) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2020.
- [39] USEPA. Compilation of air pollutant emissions factors (AP-42) [EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>, 2020-08-20.
- [40] Zhang J F, Smith K R. Emissions of carbonyl compounds from various cookstoves in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(14): 2311-2320.
- [41] Wang Q, Geng C M, Lu S H, *et al.* Emission factors of gaseous carbonaceous species from residential combustion of coal and crop residue briquettes [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2013, **7**(1): 66-76.
- [42] 广东省环境保护监测中心站, 香港特别行政区政府环境保护署. 珠江三角洲地区空气污染物排放清单编制手册 [M]. 广州: 广东省环境保护局, 2005.
- [43] 环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>, 2014-08-20.
- [44] 张强, Klimont Z, Streets D G, 等. 中国人为源颗粒物排放模型及2001年排放清单估算 [J]. *自然科学进展*, 2006, **16**(2): 223-231.
- [45] Wang Q L, Li S J, Dong M L, *et al.* VOCs emission characteristics and priority control analysis based on VOCs emission inventories and ozone formation potentials in Zhoushan [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **182**: 234-241.
- [46] 贺克斌. 城市大气污染物排放清单编制技术手册 [EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2018/1116/8107025055001133.shtm>, 2015-04-01.
- [47] 韩丽, 王幸锐, 何敏, 等. 四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4535-4542.
- Han L, Wang X R, He M, *et al.* Inventory and environmental impact of VOCs emission from the typical anthropogenic sources in Sichuan Province [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4535-4542.
- [48] Li M, Zhang Q, Zheng B, *et al.* Persistent growth of anthropogenic non-methane volatile organic compound (NMVOC) emissions in China during 1990-2017: drivers, speciation and ozone formation potential [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(13): 8897-8913.
- [49] Yin S S, Zheng J Y, Lu Q, *et al.* A refined 2010-based VOC emission inventory and its improvement on modeling regional ozone in the Pearl River Delta Region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **514**: 426-438.
- [50] 闫东杰, 苏航, 黄学敏, 等. 西安市人为源挥发性有机物排放清单及研究 [J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(2): 446-452.
- Yan D J, Su H, Huang X M, *et al.* VOCs emission inventory of anthropogenic sources in Xi'an [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(2): 446-452.
- [51] Klimont Z, Streets D G, Gupta S, *et al.* Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(8): 1309-1322.
- [52] Bo Y, Cai H, Xie S D. Spatial and temporal variation of historical anthropogenic NMVOCs emission inventories in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(23): 7297-7316.
- [53] Fu X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **70**: 39-50.
- [54] 王丽涛. 北京地区空气质量模拟和控制情景研究 [D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [55] 高美平, 邵霞, 聂磊, 等. 中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1152-1162.
- Gao M P, Shao X, Nie L, *et al.* Establishment of VOCs emissions factor and emissions inventory from using of architectural coatings in China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1152-1162.
- [56] 范辞冬, 王幸锐, 王玉瑶, 等. 中国人类活动源非甲烷挥发性有机物(NMVOC)排放总量及分布 [J]. *四川环境*, 2012, **31**(1): 82-87.
- Fan C D, Wang X R, Wang Y Y, *et al.* Anthropogenic total emissions and distribution of non-methane volatile organic compounds in China [J]. *Sichuan Environment*, 2012, **31**(1): 82-87.
- [57] USEPA (United States Environment Protection Agency). SPECIATE [EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate>, 2021-06-20.
- [58] 王红丽, 杨肇勋, 景盛翱. 工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2617-2628.
- Wang H L, Yang Z X, Jing S A. Volatile organic compounds (VOCs) source profiles of industrial processing and solvent use emissions: a review [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2617-2628.
- [59] 叶斯琪. 珠江三角洲地区船舶排放特征及对区域空气质量影响的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [60] 叶潇. 基于实测的非道路移动源、生物质锅炉污染物排放特征研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [61] Wang R C, Yuan Z B, Zheng J Y, *et al.* Characterization of VOC emissions from construction machinery and river ships in the Pearl River Delta of China [J]. *Journal of Environmental*

- Sciences, 2020, **96**: 138-150.
- [62] 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.
- [63] 杨静. 珠江三角洲 2012 年大气排放源清单建立与时空分配改进研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [64] Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, *et al.* Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, **116**(49): 24463-24469.
- [65] 崔晓珍, 沙青娥, 李成, 等. 2013—2017 年珠江三角洲主要大气污染控制措施减排效果评估[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(5): 1800-1808.
- Cui X Z, Sha Q E, Li C, *et al.* Assessment of emission reduction effect of major air pollution control measures in the Pearl River Delta from 2013 to 2017 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(5): 1800-1808.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过 8 000 字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.

图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.

学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qi, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WSI for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ming, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)