

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

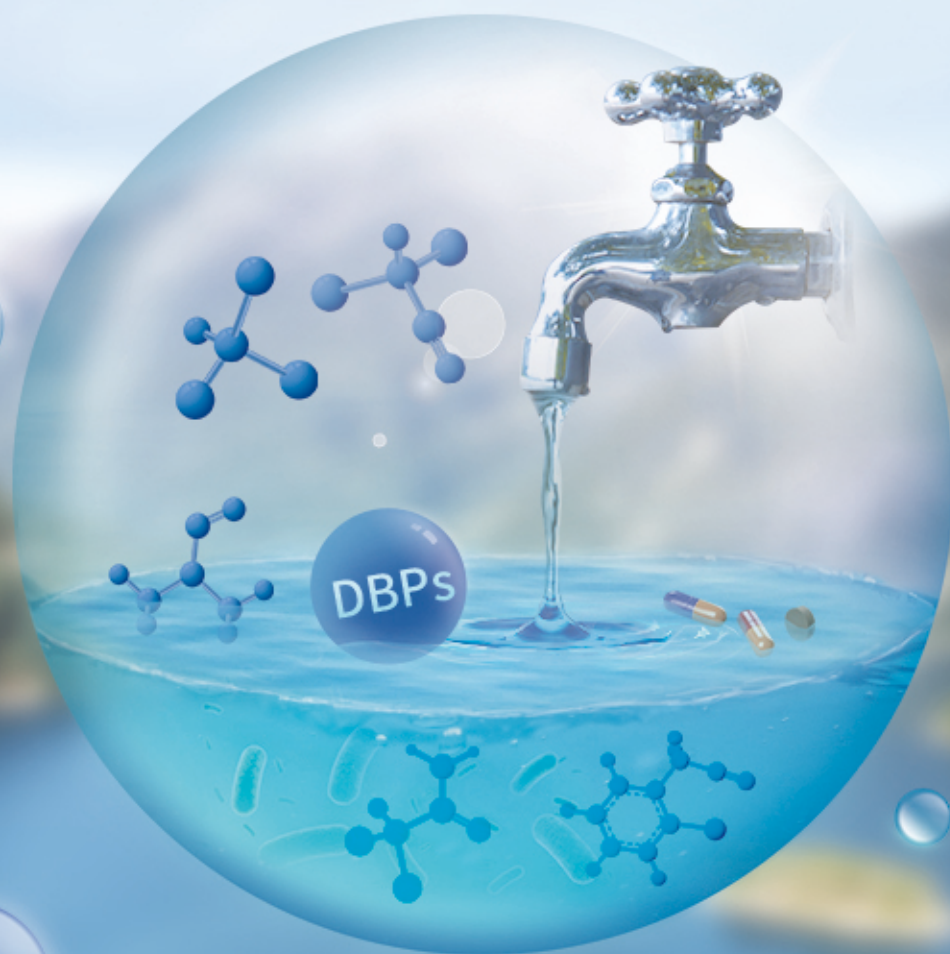
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

- 饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华 (5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹 (5086)

研究报告

- 1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑 (5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (5109)
汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华 (5122)
石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇 (5131)
天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹 (5143)
承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升 (5152)
中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍 (5162)
2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (5169)
基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华 (5180)
典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润 (5193)
沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫帆, 于兴娜 (5201)
天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强 (5210)
郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙 (5220)
基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超 (5228)
长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月 (5239)
河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞吟, 张馨童, 姚波, 崔建升 (5250)
城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋 (5264)
北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊 (5275)
太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯 (5284)
河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧 (5294)
白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升 (5303)
雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊 (5312)
基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南 (5322)
千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮 (5333)
巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠 (5346)
洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞 (5355)
成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛 (5364)
雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰 (5375)
粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀 (5384)
红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇 (5394)
减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璇骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲 (5405)
互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞 (5414)
基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邱琰茗, 郭道宇 (5424)
硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘 (5433)
高锰酸钾改性松木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华 (5440)
混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤 (5450)
负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟 (5460)
一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送 (5472)
生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳 (5481)
紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳 (5491)
南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京 (5500)
城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君 (5510)
我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平 (5519)
典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平 (5526)
稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠 (5535)
镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 彭杰, 李佳欣, 陈文清 (5545)
纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5554)
《环境科学》征订启事 (5108) 《环境科学》征稿简则 (5151) 信息 (5249, 5263, 5283)

2011 ~ 2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征

刘锐源¹, 钟美芳¹, 赵晓雅¹, 卢诗文¹, 田俊泰¹, 李银松¹, 侯墨¹, 梁小明¹, 黄皓旻^{1,2,3,4}, 范丽雅^{1,2,3,4}, 叶代启^{1,2,3,4*}

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 挥发性有机物污染治理技术与装备国家工程实验室, 广州 510006; 3. 广东省大气环境与污染控制重点实验室, 广州 510006; 4. 广东省环境风险防控与应急处置工程技术研究中心, 广州 510006)

摘要: 为阐明近年来我国工业源挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 排放特征, 对排放源分类体系进行完善并采用动态排放因子法, 建立了 2011 ~ 2019 年中国工业源 VOCs 排放清单. 结果表明, 全国工业源 VOCs 排放量从 2011 年 11 122.7 kt 增长到 2017 年 13 397.9 kt, 而后增长势头得到遏制并略有下降, 到 2019 年下降至 13 247.0 kt. 4 个环节的排放结构发生改变, 基础化学原料制造、汽油储运、涂料、油墨、颜料及类似产品和工业防护涂料涂装等排放源对相应环节的排放贡献不断上升, 相反汽车、集装箱制造与石油和天然气加工等行业排放贡献有所下降. 2019 年全国工业源 VOCs 排放中, 工业涂装、印刷和基础化学原料制造排放量大 (共占总量的 39.2%), 且近 9 年排放占比不断增加, 是今后需关注的重点排放源; 空间上, 华东和华南地区 VOCs 排放最多, 山东、广东、江苏和浙江是贡献最大的 4 个省份, 合计占总量的 40.6%.

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 工业源; 排放特征; 排放清单; 中国

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5169-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202102112

Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019

LIU Rui-yuan¹, ZHONG Mei-fang¹, ZHAO Xiao-ya¹, LU Shi-wen¹, TIAN Jun-tai¹, LI Yin-song¹, HOU Mo¹, LIANG Xiao-ming¹, HUANG Hao-min^{1,2,3,4}, FAN Li-ya^{1,2,3,4}, YE Dai-qi^{1,2,3,4*}

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. National Engineering Laboratory for Volatile Organic Compounds Pollution Control Technology and Equipment, Guangzhou 510006, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Atmospheric Environment and Pollution Control, Guangzhou 510006, China; 4. Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Centre for Environmental Risk Prevention and Emergency Disposal, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to better understand the industrial volatile organic compounds (VOCs) emissions in China in recent years, an industrial VOCs emission inventory was developed from 2011 to 2019, based on the dynamic emission factors method and the comprehensive source classification system. The results showed that VOCs emissions increased first from 11 122.7 kt in 2011 to 13 397.9 kt in 2017, and then decreased to 13 247.0 kt in 2019. The emission structure of the four source categories changed. The contribution from basic organic chemical industries, gasoline storage and transportation, manufacturing (i. e., coatings, inks, pigments, and similar products), and industrial protective coatings continued to increase. On the contrary, the contributions of oil and natural gas processing, automobile, and container manufacturing industries declined over the study period. Among the industrial emissions in China in 2019, industrial coating, printing, and basic organic chemical industries emitted large amounts of VOCs (accounting for 39.2% of the total emission), and because their contribution became increasingly prominent since 2011, these sectors will be the key emission sources in the future. With respect to the spatial distribution in 2019, East China and South China had the largest VOCs emissions. Shandong, Guangdong, Jiangsu, and Zhejiang were the four provinces that contributed the most, accounting for 40.6% of the total VOCs emissions.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); industrial sources; emission characteristics; emission inventory; China

过去十年, 细颗粒物 (fine particulate matter, PM_{2.5}) 和臭氧 (ozone, O₃) 污染成为制约我国空气优良天数指标的主要污染物, 对空气质量和人类健康造成了不利影响^[1,2]. 为此国家颁布了一系列政策, 污染物减排取得了一定成效: 相比于 2015 年, 2019 年全国 PM_{2.5} 年均浓度从 55 μg·m⁻³ 降至 36 μg·m⁻³, 区域 PM_{2.5} 浓度显著下降. 然而 O₃ 浓度不降反增, 2019 年 O₃ 浓度较 2015 年增长 22%, 重点地区 O₃ 作为首要污染物天数比例不断上升. 为遏制 O₃ 增长势头并进一步降低 PM_{2.5} 浓度, 有效控制挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 这一

关键前体物至关重要^[3~6].

摸清 VOCs 排放特征作为一项基础工作, 能更好地指导 VOCs 防治. 目前已有大量学者通过编制 VOCs 排放清单, 开展相关工作^[7~16]. 有研究表明, 人为源 VOCs 排放中, 工业源是最大的排放源, 其次是移动源^[12,13], 由于采取了严格的控制, 车辆排放的 VOCs 总量持续下降^[17], 而工业源排放不断增

收稿日期: 2021-02-17; 修订日期: 2021-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0212805)

作者简介: 刘锐源 (1996 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境与污染控制, E-mail: liu_ryy@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: cedqye@scut.edu.cn

加^[12,18],因此,削减工业源 VOCs 具有重要意义。

目前,工业源 VOCs 清单研究仍然存在一定不足:一是排放源体系不够完善,如未考虑农药生产、机械设备制造仅考虑金属切削机床和污染控制设备制造等;二是本地化排放因子的研究成果^[19~24]未应用于清单编制中,仍然采用国外的系数;三是部分中长期清单未将控制措施纳入考虑,即排放因子无变化,排放量的变化更多取决于活动水平的改变。自 2010 年国家层面首次将 VOCs 列为防控重点污染物后,VOCs 控制力度不断加强,伴随着经济发展和产业结构优化,近十年工业源 VOCs 排放量和排放结构变化较大,以往的研究可能无法反映目前的情况,不利于科学研究和政策制定。

为此,本研究以工业源 VOCs 为对象,对现有的工业排放源分类和排放因子进行完善和更新,采用动态排放因子法,编制 2011~2019 年全国工业源 VOCs 排放清单,分析排放趋势和排放结构变化,识别重点污染源和省份,以期为深化 VOCs 治理提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 排放源分类体系

本研究基于“源头追踪”的方法,将 VOCs 的生产、储存与运输、以 VOCs 为原料的工艺过程和含 VOCs 产品的使用这 4 个环节作为第一级源。相较于以前的研究^[10,11,25],第二级和第三级源进行分类进行了一些改进。一方面将以前缺失的排放源纳入统计,包括:①VOCs 的生产考虑了液化石油气、液化天然气、丙烯、苯乙烯和乙二醇等产品的制造;②储存与运输增加了天然气输送源;③涂料、油墨、颜料及类似产品制造、化学纤维、农副食品加工和食品制造分别考虑了炭黑、粘胶纤维、肉制品、面包和饼干生产,同时将农药制造纳入以 VOCs 为原料的工艺过程;④含 VOCs 产品的使用中,考虑了泡沫塑料制造、金属制罐、沥青生产和洗煤,并将电缆、移动电话、电视机、电子计算机和家电等产品制造纳入电子电器制造业。另一方面为保持与国民经济行业分类(GB/T 4754-2017)统一,对部分排放源进行了整理:将集装箱制造从运输设备制造中移出,与金属制罐纳入集装箱及金属包装容器制造第二级排放源;将食品和饮料制造拆分为农副食品加工、食品制造和酒类制造;金属冶炼拆分为炼钢和有色金属冶炼等。体系共涵盖 43 类行业,146 个子源,具体的源分类如表 1 所示。

1.2 排放量核算方法

2011~2019 年是我国开始控制 VOCs 并不断加

大治理力度的重要时期,为准量化排放量的变化趋势,本研究采用基于控制技术变化的动态排放因子法,排放因子主要考虑行业发展和治理情况,包括低 VOCs 产品替代率及其 VOCs 削减率、行业收集水平、不同治理设施覆盖率及其处理效率等因素。排放量计算方法如式(1)所示:

$$E_{i,y} = \sum_j A_{i,j,y} \left[EF_i \sum_m C_{i,y,m} (1 - \eta_m) \times \sum_n C_{i,y,n} (1 - \mu_i \times \eta_n) \right] \quad (1)$$

式中, i 、 j 、 y 、 m 和 n 分别代表排放源、省份、年份、源头替代技术和治理技术; $E_{i,y}$ 指排放源 i 在 y 年的排放量; $A_{i,j,y}$ 指在 y 年排放源 i 省份 j 的活动水平; EF_i 指未考虑削减措施的排放因子; $C_{i,y,m}$ 指在 y 年份源头替代技术 m 在排放源 i 的应用比例; η_m 指源头替代技术 m 的 VOCs 削减率,未采取源头替代则 η_m 设为 0; $C_{i,y,n}$ 指在 y 年份末端控制技术 n 在排放源 i 的应用比例; η_n 指末端控制技术 n 的处理效率,未采用控制技术则 η_n 设为 0; μ_i 指排放源 i 平均收集效率。

1.3 排放因子

未考虑控制措施的排放因子优先选取国内实测的系数,例如印刷、集装箱、木质家具、电子产品、合成洗涤剂、合成革制造和工业防护涂料涂装等行业均采用了课题组前期实测结果^[11,20,21,32,34];其次选取文献[29]中的排放因子,其考虑了有机溶剂产品 VOCs 含量限值等各类国家标准;当缺乏本土化数据时,参考发达国家或地区构建的排放因子库^[26,30]。

获取具有代表性的行业收集效率、治理设施覆盖率和治理效率对于修正排放因子至关重要。本研究中,设施覆盖率和行业治理效率是通过对企业调研统计、现场监测并结合文献[34,36~39]的调研结果计算获得的,涉及企业 35 612 家,范围覆盖京津冀、长三角和珠三角地区以及山东、山西、四川和江西等省份。收集效率参考课题组实测结果^[37]并经专家讨论获得。表 2 列出了主要行业 VOCs 治理情况调查结果,典型行业 VOCs 治理设施覆盖率在 30%~95% 之间,石化和集装箱等企业规模较大或集中度高的行业的设施覆盖率较高;从治理技术上看,目前采用的技术仍以吸附法、吸收法、UV 光解和低温等离子体为主(在印刷、家具和木材加工等以中小企业居多的行业更为突出),行业实际处理效率低。总体而言,除石化、集装箱和汽车等个别行业减排成效较为显著外,多数行业修正后的 VOCs 排放因子减少不足 7%,仍具有很大的减排空间。

表 1 排放源分类体系、基准年(2011 年)排放因子和活动水平说明

Table 1 Source classification, emission factor for industrial sources in 2011, and activity level description

第一级	第二级	第三级	排放因子	单位	活动水平类型	活动水平来源
VOCs 的生产	石油和天然气开采	原油开采/天然气开采	0.6 ^[8] /0.5 ^[8]	kg·t ⁻¹	产品产量	国家统计局
	石油和天然气加工	原油加工(储罐/转运/泄漏/废水处理)	1.82 ^[26]	kg·t ⁻¹	原油加工量	国家统计局
		液化石油气/液化天然气	0.32 ^[27] /0.5083 ^[27]	kg·t ⁻¹	产品产量	国家统计局
	基础化学原料制造	苯/甲醇/乙烯/乙酸/丙烯/丙烯腈/丁二烯/苯乙烯/乙 酸乙酯/甲醛/乙二醇/合成 氨	0.55 ^[28] /5.55 ^[28] /0.5 ^[28] / 6.35 ^[28] /0.111 ^[26] /0.988 ^[29] / 11.6 ^[28] /0.223 ^[29] /0.555 ^[28] / 5.95 ^[28] /0.15 ^[12] /4.72 ^[26]	kg·t ⁻¹	产品产量	国家统计局 中国化学工业协会 中国石油和化学工业联合会
	肥料制造	氮肥/磷肥	0.006 ^[28] /0.006 ^[28]	kg·t ⁻¹	产品产量	国家统计局
储存与 运输	原油	国产/进口/出口	0.54 ^[10] /0.88 ^[10] /0.51 ^[10]	kg·t ⁻¹	周转量	国家统计局
	汽油	国产/进口/出口	4.54 ^[10] /4.49 ^[10] /4.22 ^[10]	kg·t ⁻¹		中国能源统计年鉴
	柴油	国产/进口/出口	2.46 ^[10] /3.06 ^[10] /1.84 ^[10]	kg·t ⁻¹		
	煤油	国产/进口/出口	2.46 ^[10] /3.06 ^[10] /1.84 ^[10]	kg·t ⁻¹		
	燃料油	国产/进口/出口	2.46 ^[10] /3.06 ^[10] /1.84 ^[10]	kg·t ⁻¹		
	天然气	国产/进口/出口	2.6 ^[27]	g·m ⁻³		
以 VOCs 为原料 的工艺 过程	涂料、油墨、颜料及 类似产品制造	涂料/油墨/染料/有机颜 料/炭黑	15 ^[26] /50 ^[29] /10 ^[28] /10 ^[28] / 0.7 ^[30]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国轻工业年鉴 中国涂料工业协会 中国油墨协会 中国染料工业协会
	胶黏剂生产	/	8 ^[26]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国胶黏剂与胶黏带工业协会
	化学纤维制造	粘胶纤维/醋酸纤维/涤纶/ 锦纶/腈纶/维纶/氨纶/丙 纶	14.5 ^[29] /145.2 ^[28] /3.39 ^[28] / 3.78 ^[28] /125.1 ^[28] /7.7 ^[28] / 40 ^[8] /37.1 ^[28]	kg·t ⁻¹	产品产量	国家统计局 中国化纤工业协会 中国石油和化学工业联合会
	合成树脂材料制造	PE(LLDPE/HDPE/LDPE)/ PVC/ABS/PS/PP	(5.7 ^[26] /10 ^[26] /10 ^[26])/ 0.7448 ^[26] /1.4 ^[30] /2.2 ^[8] /2.2 ^[8]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国石油和化学工业联合会
	合成橡胶制造	/	7.6 ^[31]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国统计年鉴
	橡胶制品制造	轮胎制造	0.28 ^[31]	kg·条 ⁻¹	产品产量	中国统计年鉴
	农副食品加工	植物油/成品糖/肉制品	2.45 ^[10] /0.2 ^[10] /0.143 ^[29]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国统计年鉴
	食品制造	面包/饼干	3 ^[30] /1 ^[29]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国焙烤食品糖制品工业协会
	酒类制造	白酒/啤酒/葡萄酒/发酵酒 精	16.26 ^[31] /0.43 ^[31] /0.55 ^[26] / 32.10 ^[28]	kg·kl ⁻¹	产品产量	国家统计局 中国轻工业年鉴
	日用化学产品制造	合成洗涤剂	0.239 ^[32]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国统计年鉴
	化学农药制造	/	146 ^[15]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国农药工业协会
	化学药品制造	/	114.14 ^[28]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国统计年鉴
含 VOCs 产品的 使用	焦炭生产	/	1.25 ^[31]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国统计年鉴
	沥青生产	/	0.018 ^[26]	kg·t ⁻¹	产品产量	国家统计局
	煤炭开采和洗选	洗煤	0.2 ^[29]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国能源统计年鉴
	纺织印染	/	81.4 ^[26]	kg·t ⁻¹	染料消费量	中国染料工业协会
	制鞋	/	0.06 ^[25]	kg·pair ⁻¹	产品产量	国家统计局
	塑料制品生产	泡沫塑料/塑料人造革、合 成革制造	770 ^[29] /163.46 ^[11]	kg·t ⁻¹	发泡剂、PU 浆料消费量	中国塑料加工工业协会 中国石油和化学工业联合会
	造纸和纸制品	纸浆/纸制品	0.25 ^[31] /0.1 ^[31]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国轻工业年鉴
	印刷和包装印刷	平版印刷/凹版印刷/凸版 印刷/孔版印刷/UV 油墨印 刷/其他油墨印刷/包装与 标签黏合与复合/装订	333.5 ^[20] /600.1 ^[20] /522.3 ^[20] / 390.9 ^[20] /197 ^[20] /603.94 ^[11] / 573.3 ^[20] /89 ^[31]	kg·t ⁻¹	油墨、胶黏 剂消费量	中国油墨协会 中国胶黏剂和胶黏带工业协会
	木材加工	人造板生产(胶合板/纤维 板/刨花板)	0.50 ^[29]	kg·m ⁻³	产品产量	中国林业年鉴
	家具制造	木质家具	430.32 ^[11]	kg·t ⁻¹	涂料消费量	中国涂料工业协会
		金属家具	0.2 ^[27]	kg·piece ⁻¹	产品产量	中国家具年鉴
	交通设备制造	轿车/客车/载货汽车/摩托 车/自行车	4.8 ^[30] /7.8 ^[30] /32 ^[30] /1.5 ^[30] / 0.3 ^[33]	kg·piece ⁻¹	产品产量	国家统计局
		民用船舶	85 ^[25]	t·(万载重吨) ⁻¹		
		集装箱制造	67 ^[34]	kg·TEU ⁻¹		中国集装箱行业协会
	集装箱及金属 包装容器制造	金属制罐	1 ^[35]	kg·(1 000 cans) ⁻¹	产品产量	中国包装联合会

续表 1

第一级	第二级	第三级	排放因子	单位	活动水平类型	活动水平来源
含 VOCs 产品的使用	工业防护涂料涂装	/	367.2 ^[11]	kg·t ⁻¹	涂料消费量	中国涂料工业协会
		漆包线/电缆	24.75 ^[21] /15.46 ^[26]	kg·t ⁻¹		
	电子电器制造	集成电路制造	0.070 9 ^[25]	kg·万块 ⁻¹	产品产量	国家统计局 中国统计年鉴
		覆铜板/印制电路板	0.1 ^[10] /0.264 ^[20]	kg·m ⁻²		中国电子材料行业协会
		铝电解电容器	1.2 ^[20]	kg·百万只 ⁻¹		覆铜板材料分会
		微型电子计算机/移动电话/电视机/家电	0.2 ^[26] /0.01 ^[28] /0.2 ^[26] /0.2 ^[29]	kg·piece ⁻¹		中国电子元件工业协会
	炼钢	热轧/电弧炉	0.3 ^[29] /0.1 ^[29]	kg·t ⁻¹	产品产量	国家统计局
	有色金属冶炼	镍/铝/镁/锌	0.24 ^[25] /0.634 ^[25] /1.201 ^[25] / 0.806 ^[28]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国有色金属工业协会
	非金属矿制品制造	水泥、石灰和石膏制造/黏土砖瓦/	0.012 ^[26] /0.132 ^[29] /0.432 ^[29] / 0.1 ^[26] /3.15 ^[29]	kg·t ⁻¹	产品产量	中国统计年鉴 中国统计年鉴 中国玻璃纤维工业协会
		沥青油毡/平板玻璃/玻璃纤维				
	环境治理	卫生填埋/堆肥/焚烧/废水处理	0.23 ^[31] /0.74 ^[31] /0.02 ^[26] / 0.001 1 ^[26]	kg·t ⁻¹	处理量	中国统计年鉴
		煤/燃料油	0.15 ^[33] /0.13 ^[33]	kg·t ⁻¹		
	发电	液化石油气/天然气/煤气	0.034 ^[29] /0.045 ^[29] /0.000 44 ^[33]	g·m ⁻³	燃料消费量	中国能源统计年鉴
		煤/燃料油	0.18 ^[10] /0.04 ^[26]	kg·t ⁻¹		
	热力生产及供应	液化石油气/天然气/煤气	0.50 ^[29] /0.088 ^[29] /0.000 44 ^[33]	g·m ⁻³		
		煤/燃料油	0.18 ^[33] /0.04 ^[26]	kg·t ⁻¹		
	工业消费	煤/燃料油	0.18 ^[33] /0.04 ^[26]	kg·t ⁻¹		
		液化石油气/天然气	0.48 ^[29] /0.088 ^[29] /0.000 44 ^[33]	g·m ⁻³		

表 2 主要行业 VOCs 治理情况调查结果/%

Table 2 Survey results of VOCs treatment in major industries/%

行业	收集效率	设施覆盖率	治理效率	行业	收集效率	设施覆盖率	治理效率
石油炼制	40	82	59	塑料制品	5	42	16
基础化学原料制造	30	79	41	造纸	10	33	24
涂料、油墨、颜料及类似产品制造	10	68	30	印刷	20	63	27
合成纤维	30	56	35	木材加工	10	38	26
合成树脂	30	62	33	家具	25	60	28
合成橡胶	20	61	31	汽车	60	82	58
橡胶制品	10	41	21	船舶	5	48	33
农药	30	66	34	集装箱	5	93	37
制药	30	60	29	金属制品	20	56	34
纺织印染	20	61	17	机械设备	5	63	28
制鞋	10	53	29	电子电器	20	43	29

随着更多的 VOCs 控制装置投入运行,VOCs 排放水平逐步下降,但由于缺少连续且完整的统计数据,在构建动态排放因子库时,本研究提出以下假设:①2011 年全国层面 VOCs 管控刚刚起步,实施的控制措施少,涉 VOCs 企业基本未安装治理设备,绝大多数行业仍然处于未治理状态^[40,41];②排放因子变化趋势符合 S 型曲线模型,该模型曾被用于确定由技术覆盖率提高和工艺升级驱动的动态排放因子,并以此估算历史和未来的排放量^[42,43]. 由于 VOCs 管控总体上仍处于起步阶段,因此本研究认为排放因子变化正处于下降速率逐步增大的阶段,参数设置方法参考文献[42~45]. 基于以上假设,结合对行业治理的调研结果获得动态排放因子,以此反映控制政策实施和措施演变.

同时,新标准或者新政策的实施时间被用于确

定排放因子变化的时间,如鞋和箱包用胶粘剂有害物质限量(GB 19340-2014)规定了胶粘剂的含量限值,2015 年后制鞋业排放因子参考徐志荣等^[23]基于 178 家制鞋厂的核算结果;2016 年集装箱行业统一在普通干货集装箱生产上推广应用水性涂料,2017 年后排放因子根据实测数据^[34]和产品结构(干箱产量占 95%,特箱占 5%)计算获得. 另外,乘用车制造水性涂料使用量占比从 2010 年 14% 提高到 2018 年 83%,货车制造水性涂料使用占比从 0% 提高到 40%^[46],因此本研究同样考虑了这 2 个排放源的源头替代削减.

1.4 活动水平

本研究中大部分省级活动水平数据来自中国统计年鉴和中国能源统计年鉴等各类统计年鉴及中国化纤工业协会等不同行业协会. 部分活动水平信息难

以获取,本研究遵循了文献[11,25]的获取方法:储运与运输环节中各类油品的周转量采用表观周转量(产量+进口+出口)表示;染料、油墨、包装用胶黏剂、木质家具和工业防护涂料消费量以表观消费量(产量+进口-出口)表示.乙二醇产量、染料消费量、PU浆料消费量和木质家具涂料消费量等活动水平无法直接获取省级层面信息,因此分别根据各省乙二醇产能、印染布产量、合成革产量和木质家具产量等与之相关性较高的指标进行分配获得.

2 结果与讨论

2.1 排放变化趋势

2.1.1 总体排放趋势

2011~2019 年全国工业源 VOCs 排放量从 2011 年 11 122.7 kt 增长到 2017 年的 13 397.9 kt,而后下降到 2019 年的 13 247.0 kt,呈先增长后平稳且略有下降的趋势(图 1).分阶段看,2011~2014 年 VOCs 排放量快速增长,年均增长率为 6.1%,这主要是由于工业的快速发展所导致的(VOCs 产生量年均增长率为 6.6%).2015 年,由于 VOCs 产生量较 2014 年仅增长 1.4%,减排措施施行导致的 VOCs 削减量超过新增量,排放量出现首次下降.2016~2019 年,VOCs 排放增长得到遏制并略有下降,2019 年较 2016 年下降 0.7%,而 VOCs 产生量增长 4.3%,一方面说明产业结构升级和控制措施施行明显减少了排放,另一方面说明各行业活动水平的增速明显放缓也是造成这一现象的原因之一.

分排放环节看,4 个环节与总体变化趋势基本一致.含 VOCs 产品的使用、以 VOCs 为原料的工艺过程、VOCs 的生产和储存与运输分别占总量的

54.1%~56.4%、18.5%~21.2%、13.3%~14.3%和 10.9%~11.9%.4 个环节的占比变化不大,与 Simayi 等^[9]于 2010~2016 年对 VOCs 排放的研究较为一致.

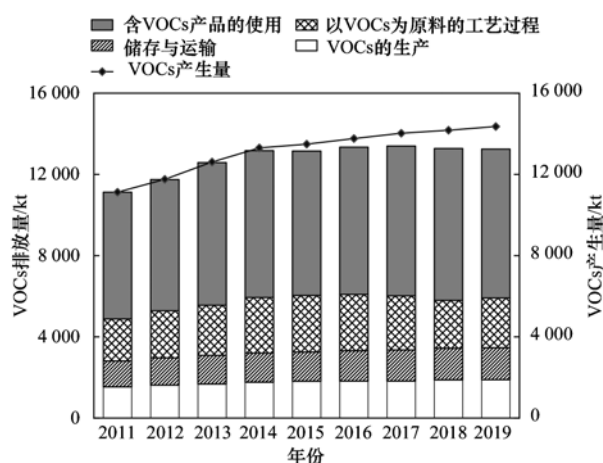
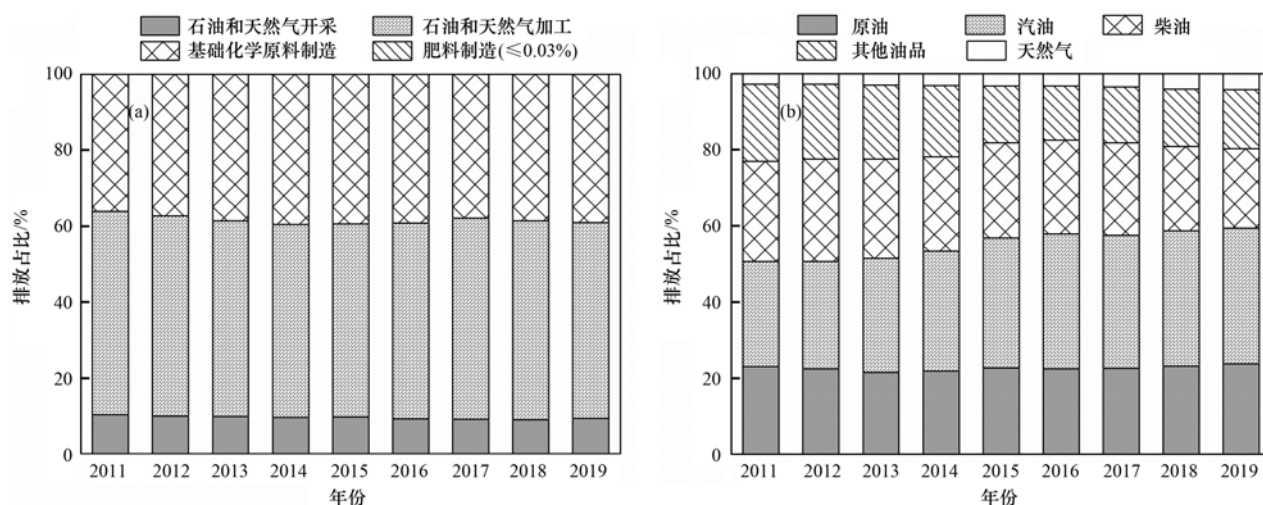


图 1 中国 2011~2019 年工业源 VOCs 排放变化趋势

Fig. 1 Temporal trends in industrial VOCs emissions in China from 2011 to 2019

2.1.2 污染源排放结构变化

第一和第二排放环节中各污染源 2011~2019 年排放占比变化如图 2 所示.石化行业 VOCs 减排起步较早,从“十二五”提出加强生产、输送和存储过程排放控制,到“十三五”要求全面推行 LDAR 技术和建成监测监控体系等,VOCs 排放得到较为有效地控制,石油和天然气加工与基础化学原料制造行业的 VOCs 排放量增长率年际变化分别从 2012 年 3.6% 和 8.5% 下降至 2019 年 -1.1% 和 1.5%.由于石油炼制行业收集治理效率更高,其对 VOCs 的生产这一环节的排放贡献下降了 2.0 个百分点,而基础化学原料制造上升了 2.9 个百分点.同时,基



(a) 第一环节:“VOCs 的生产”;(b) 第二环节:“储存与运输”

图 2 2011~2019 年中国第一和第二排放环节中各行业 VOCs 排放结构演变

Fig. 2 Evolution of VOCs emissions structure of each industry in the first and the second sources in China from 2011 to 2019

础化学原料产量的快速增长也是造成这一现象的原因之一,如9年间甲醇产量从2 227万 t 提高到6 216 万 t,增长率达179.1%。

储存与运输环节中,2019年汽油和天然气对这一环节的VOCs排放贡献有所提高,分别较2011年提升了8.1个百分点和1.4个百分点,主要原因是随着生活水平的提高,人们对城市燃气和机动车的需求快速增长,导致天然气和汽油储运的排放量增加。而柴油储运由于其较低的挥发性,且需求量增速较小,排放贡献呈下降趋势,从26.4%减少至20.9%。从排放量看,近9年天然气、汽油和原油VOCs排放量逐年增长,柴油和其他油品排放量有所下降。

第三和第四排放环节中各污染源2011~2019年排放占比变化如图3所示。涂料、油墨、颜料及类似产品制造和化学纤维制造VOCs排放贡献上升,而酒类制造呈现下降趋势。涂料和油墨产量不断扩大,特别是涂料,2019年较2011年增长了123.1%,因此尽管排放系数减少约2%,排放量仍逐年增长(2017年除外),从205.0 kt 增长到405.3 kt。化学纤维制造排放占比上升2.2个百分点的原因与其相似,也是产量扩大导致的,如涤纶产量增长了71.2%。酒类制造排放贡献下降则由于白酒、啤酒和葡萄酒产量下降导致。农药制造行业排放贡献先后升降,与2015年起农药产量逐步减少密切相关。

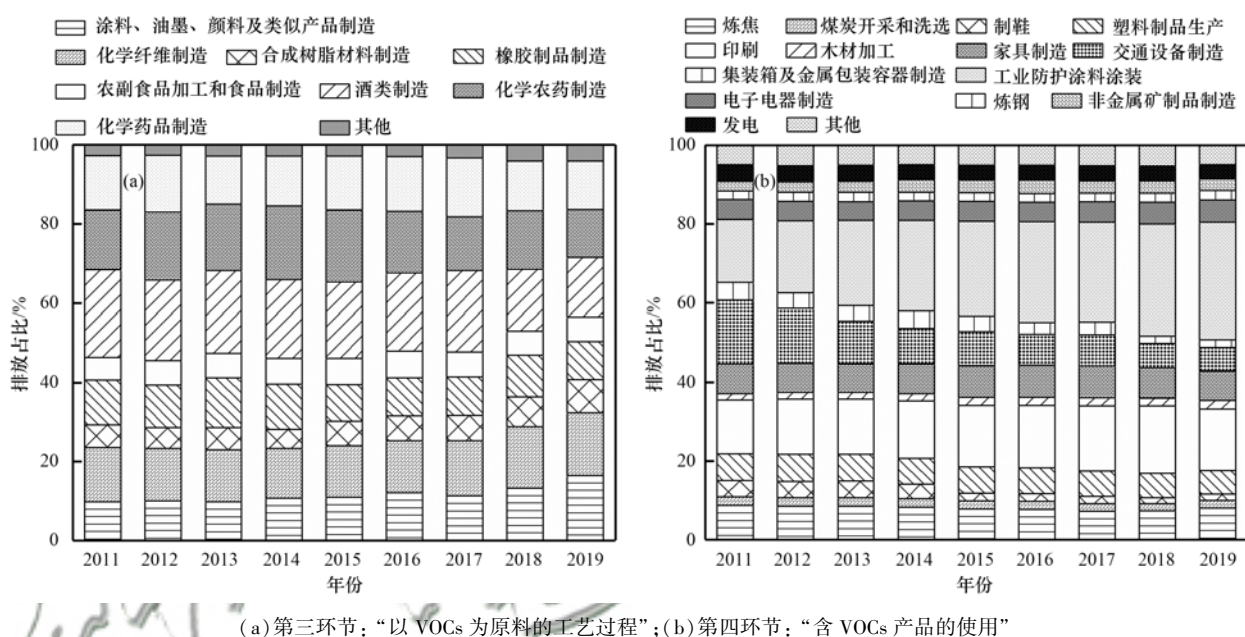


图3 2011~2019年中国第三和第四排放环节中各行业VOCs排放结构演变

Fig. 3 Evolution of VOCs emissions structure of each industry in the third and the fourth sources in China from 2011 to 2019

由于汽车制造业对VOCs的有效管控,2019年交通设备制造排放贡献较2011年下降10.3个百分点。印刷业尽管排放量增速减缓,但由于行业以小微企业为主,收集治理效率低且排放占比最大的凹印和复合工艺以溶剂型原辅材料使用居多,排放贡献仍增长了2.1个百分点。集装箱及金属包装容器制造行业排放贡献从4.5%下降至1.9%,主要归因于集装箱行业水性化改造,其排放量下降超70%。工业防护涂料VOCs排放量快速增加,排放贡献增长了13.8个百分点,大量的溶剂型涂料使用和低治理效率是其增长的主要原因。机械设备制造如工程机械,涂料水性化进程缓慢,整体替代率不足5%,而钢结构等行业对涂层性能要求高,也均以溶剂型涂料为主。

2.2 2019年排放特征

2.2.1 污染源排放特征

2019年中国工业源VOCs排放量约为

13 247.0 kt。由于大量使用含VOCs的产品,该环节的排放量位居榜首,超过了其他3个环节的总和,占总量的55.3%(图4)。以VOCs为原料的工艺过程、VOCs的生产和储存与运输,分别占18.5%、14.3%和11.9%。

VOCs的生产中,石油和天然气加工与基础化学原料制造行业VOCs排放贡献最大,分别占该环节51.5%和39.1%;储存与运输中,由于汽油易挥发且需求量大,汽油储运是该环节最大的源,占35.61%;以VOCs为原料的工艺过程中,47.4%的VOCs排放来源于涂料、油墨、颜料及类似产品制造、化学纤维制造和酒类制造这3个排放贡献最大的行业;工业防护涂料、印刷、炼焦和家具制造是含VOCs产品的使用环节最主要的排放源,排放量分别占该环节29.8%、15.7%、8.0%和7.5%。

表3列出了2019年工业源中VOCs排放量前

表 3 2019 年工业源 VOCs 排放量前 10 的排放源

Table 3 Top ten sources of industrial VOCs emissions in 2019

排放源	排放量/kt
工业涂装	3 309.9
印刷	1 148.2
石油和天然气加工	971.5
基础化学原料制造	737.3
炼焦	589.1
汽油储运	561.4
塑料制品生产	440.4
电子电器制造	412.7
涂料、油墨、颜料及类似产品制造	405.3
化学纤维制造	389.7

大,达5 402.3 kt,贡献率为 42.3%. 其次是华南、华北和华中地区,分别占 13.1%、11.9% 和 9.8%,西北、东北和西南地区排放最少. 分省看,山东 (1 406.8 kt)、广东 (1 405.2 kt)、江苏

(1 373.6 kt)和浙江(1 192.8 kt) VOCs 排放量超过 1 000 kt,分别占所在地区的 25.1%、81.0%、24.5% 和 21.3%,是全国排放前 4 的省份,合计占总量的 40.6%.

排放环节贡献上,绝大多数省份的 VOCs 主要来自于含 VOCs 产品的使用(图 6),而在海南和黑龙江储存与运输贡献了主要排放(以油品生产和进口为主); VOCs 的生产对宁夏贡献最大 (46.8%),其中主要是石油加工和甲醇生产. 各省不同环节贡献与其产业结构有关,例如,广东和江苏 VOCs 排放量接近,但来源不相同:在广东,含 VOCs 产品的使用占 68.8%,以 VOCs 为原料的工艺过程占 11.7%,而在江苏这两环节分别占 54.7% 和 33.4%,原因是广东的家具、电子电器和印刷等产业较发达,而在江苏药品、农药和橡胶生产等行业发展更具规模.

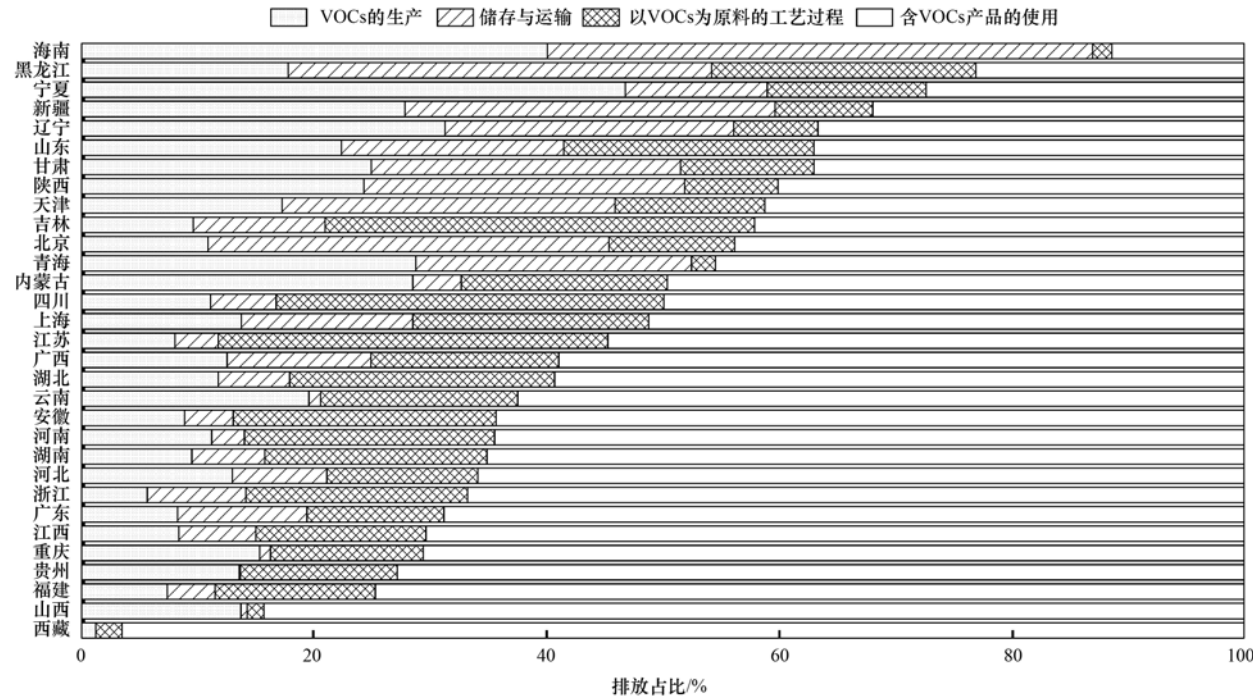


图 6 2019 年中国各省 4 个环节 VOCs 排放贡献

Fig. 6 Industrial VOCs emissions contribution of four source categories in each province of China in 2019

2.3 排放清单评估

2.3.1 同类研究比较

目前全国层面最新的成果主要集中在 2011 ~ 2018 年^[9,11~16],部分研究按照交通、生物质燃烧、化石燃料燃烧、工艺过程和溶剂使用这 5 类源或其他方式进行分类. 为方便比较,本研究将其重新归类并尽可能保持统计口径一致,各清单结果如表 4 所示.

本研究估算的 VOCs 排放量与 Liang 等^[11]的研究结果相似,但较其他学者的估计小,原因主要有两个方面. 首先,统计的覆盖面不同. 如 Sun 等^[12]的研

究涵盖了商业和生活用燃料消费、加油站、建筑装饰和农药使用等生活和农业源; Li 等^[14]的研究同样涵盖了干洗、家用溶剂和农药使用等源,但这些不在本研究的范围内. 其次,排放因子有差异:一是基准排放因子选取不同,如 Wu 等^[13]的研究中造纸行业排放因子选取自 AP-42^[26],本研究选取自文献[28];二是本研究综合了本土化排放因子的成果,如印刷业采用了实测的基于 4 种印刷方式和包装复合等工艺的排放系数,在 Simayi 等^[9]的研究中行业排放因子选取自文献[29]提供的传统油墨和新型油墨

两种不同系数,因此本研究可能更能反映中国工业 VOCs 排放实际情况;三是本研究根据近些年污染治

理变化动态修正排放因子,其值有不同幅度地下降,导致本研究的排放量及其增速较其他研究低.

表 4 工业源 VOCs 排放清单对比/Tg

Table 4 Comparison of China's industrial VOCs emission inventories/Tg

项目	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	文献
VOCs 的生产	1.54	1.62	1.68	1.77	1.81	1.82	1.82	1.88	本研究 [9]
	1.64	1.75	1.78	1.87	1.92	1.92			
		3.01 ^[13]	3.03 ^[15] /2.90 ^[16]					1.49 ^[11]	
储存与运输	1.27	1.35	1.41	1.43	1.43	1.49	1.53	1.55	本研究 [9]
	0.66	0.70	0.75	0.79	0.87	0.94			
		0.70 ^[13]	1.51 ^[15] /0.75 ^[16]					1.62 ^[11]	
以 VOCs 为原料的工艺过程	2.07	2.32	2.47	2.74	2.79	2.78	2.67	2.36	本研究 [9]
	3.83	4.25	4.66	4.52	4.61	4.66			
		3.16 ^[13]	2.67 ^[15] /3.49 ^[16]					2.12 ^[11]	
含 VOCs 产品的使用	6.24	6.46	7.02	7.23	7.11	7.25	7.38	7.48	本研究 [9]
	8.83	8.82	9.15	9.78	10.00	10.62			
		10.82 ^[13]	22.15 ^[15] /7.74 ^[16]					7.22 ^[11]	
合计	11.12	11.75	12.58	13.17	13.15	13.34	13.40	13.28	本研究 [9] [12] [14] [15]
	14.96	15.52	16.34	16.95	17.40	18.14			
	17.09	17.93	18.82	19.38	19.96				
			16.74		18.49		19.81		
	15.3	21.0	29.36						
		17.7 ^[13]	14.88 ^[16]					12.45 ^[11]	

2.3.2 2019 年排放清单不确定性分析

本研究采用 Monte Carlo 模拟量化了 2019 年 VOCs 排放清单的不确定性,假设输入的活动水平等基础数据遵循正态分布,定义研究选取的数值为平均值,不同来源数据的不确定度(相对标准差)考虑其可靠性,取值参考文献[10,11,47,48]的研究结果.

模拟结果如表 5 所示.经 10 000 次重复计算,全国工业源 VOCs 排放清单在 95% 置信区间不确定度为[-51%, 68%]. VOCs 的生产、储存和运输、以 VOCs 为原料的工艺过程以及含 VOCs 产品的使用 95% 置信区间不确定度分别为[-53%, 70%]、[-67%, 107%]、[-52%, 75%]和[-51%, 83%].储存与运输、含 VOCs 产品的使用不确定性较大,前者因为排放因子是根据标准和法规中相关信息计算得出,且油品周转量以表观周转量表示;后者是因为部分活动水平,如油墨使用量,以表观消费量表示,且子源的消费量是根据行业协会统计调查进行分配获得,进而影响了清单的可靠性.

表 5 本研究中工业源 VOCs 排放清单的不确定性

Table 5 Uncertainties among industrial VOCs emission inventory in this study

排放环节	95% 置信区间不确定度范围	
	单项	全国
VOCs 的生产	[-53%, 70%]	
储存和运输	[-67%, 107%]	[-51%, 68%]
以 VOCs 为原料的工艺过程	[-52%, 75%]	
含 VOCs 产品的使用	[-51%, 83%]	

3 结论

(1)2011 ~ 2019 年,全国工业源 VOCs 排放量从 2011 年的 11 122.7 kt 增长到 2017 年的 13 397.9 kt,而后增长势头得到遏制并略有下降,到 2019 年下降至 13 247.0 kt.分阶段看,2011 ~ 2014 年归因于工业的快速发展,VOCs 排放量持续增加,年均增长率达 6.1%;2015 ~ 2019 年,由于减排政策实施和活动水平增速放缓,2019 年 VOCs 排放量较 2015 年仅增长 0.7%.

(2)4 个环节的排放结构发生改变,基础化学原料制造、汽油储运、涂料、油墨、颜料及类似产品和工业防护涂料等排放源对相应环节的 VOCs 排放贡献上升,相反石油和天然气加工、汽车和集装箱制造等行业的排放贡献有所下降.

(3)2019 年中国工业源 VOCs 排放中,工业涂装、印刷和基础化学原料制造等行业排放量大(占总量 39.2%),且近 9 年其排放贡献日益突出,是今后需关注的重点排放源.空间上,华东和华南地区的排放最大(占总量 55.4%);山东、广东、江苏和浙江是排放量前 4 大省份(占总量 40.6%).

参考文献:

[1] Lu X, Hong J Y, Zhang L, et al. Severe surface ozone pollution in China: a global perspective [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2018, 5(8): 487-494.
[2] Guo S, Hu M, Zamora M L, et al. Elucidating severe urban haze formation in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111 (49):

- 17373-17378.
- [3] Liu X H, Zhang Y, Xing J, *et al.* Understanding of regional air pollution over China using CMAQ, part II. Process analysis and sensitivity of ozone and particulate matter to precursor emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(30): 3719-3727.
- [4] Jin X M, Holloway T. Spatial and temporal variability of ozone sensitivity over China observed from the Ozone Monitoring Instrument[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(14): 7229-7246.
- [5] Yuan B, Hu W W, Shao M, *et al.* VOC emissions, evolutions and contributions to SOA formation at a receptor site in eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(17): 8815-8832.
- [6] Tang G, Wang Y, Li X, *et al.* Spatial-temporal variations in surface ozone in Northern China as observed during 2009-2010 and possible implications for future air quality control strategies [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(5): 2757-2776.
- [7] 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.
- [8] Wei W, Wang S X, Chatani S, *et al.* Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(20): 4976-4988.
- [9] Simayi M, Hao Y F, Li J, *et al.* Establishment of county-level emission inventory for industrial NMVOCs in China and spatial-temporal characteristics for 2010- 2016 [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **211**: 194-203.
- [10] Qiu K Q, Yang L X, Lin J M, *et al.* Historical industrial emissions of non-methane volatile organic compounds in China for the period of 1980-2010[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **86**: 102-112.
- [11] Liang X M, Sun X B, Xu J T, *et al.* Improved emissions inventory and VOCs speciation for industrial OFP estimation in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **745**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140838.
- [12] Sun W, Shao M, Granier C, *et al.* Long-term trends of anthropogenic SO₂, NO_x, CO, and NMVOCs emissions in China [J]. *Earth's Future*, 2018, **6**(8): 1112-1133.
- [13] Wu R R, Bo Y, Li J, *et al.* Method to establish the emission inventory of anthropogenic volatile organic compounds in China and its application in the period 2008-2012 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **127**: 244-254.
- [14] 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.
- [15] Zheng C H, Shen J L, Zhang Y X, *et al.* Quantitative assessment of industrial VOC emissions in China: historical trend, spatial distribution, uncertainties, and projection [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **150**: 116-125.
- [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] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [18] Zhang J N, Xiao J F, Chen X F, *et al.* Allowance and allocation of industrial volatile organic compounds emission in China for year 2020 and 2030 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **69**: 155-165.
- [19] 王肖丽, 余宇帆, 黄志炯, 等. 基于实地调研的广东省工业 VOC 排放清单改进研究[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(4): 1013-1024.
- Wang X L, Yu Y F, Huang Z J, *et al.* Improvement and research on industrial VOC emission inventory in Guangdong Province based on the field investigation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(4): 1013-1024.
- [20] 梁小明, 陈来国, 孙西勃, 等. 基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4382-4394.
- Liang X M, Chen L G, Sun X B, *et al.* Raw materials and end treatment-based emission factors for volatile organic compounds (VOCs) from typical solvent use sources [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4382-4394.
- [21] 王宇楠. 漆包线生产过程中挥发性有机物 (VOCs) 排放特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [22] 黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 等. 加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4103-4109.
- Huang Y H, Chang Y Q, Ren B Q, *et al.* Study and application of test method for VOCs emission factor of refueling in service station [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4103-4109.
- [23] 徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 等. 浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3702-3707.
- Xu Z R, Yao Y, Cai W D, *et al.* Pollution characteristics and emission coefficient of volatile organic compounds from shoe-making industry in Zhejiang province [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3702-3707.
- [24] 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.
- [25] 梁小明. 我国人为源挥发性有机物反应性排放清单与臭氧控制对策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [26] US EPA. AP-42: compilation of air pollutant emission factors [EB/OL]. https://19january2017snapshot.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emission-factors_.html#:~:text=AP-42%2C%20Compilation%20of%20Air%20Pollutant%20Emission%20Factors%2C%20has,industry%20sector%20or%20group%20of%20similar%20emitting%20sources.,2008-06-11.
- [27] Fu S, Guo M X, Luo J M, *et al.* Improving VOCs control strategies based on source characteristics and chemical reactivity in a typical coastal city of South China through measurement and emission inventory[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140825.
- [28] 台湾环境保护署. 公私场所固定污染源申报空气污染防制费之挥发性有机物之行业制程排放系数、操作单元(含设备组件)排放系数、控制效率及其他计量规定[R]. 台北, 中国: 台湾环境保护署, 2009.
- [29] 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.

- [30] European Environment Agency (EEA). EMEP/CORINAIR emission inventory guidebook-2007 [EB/OL]. <https://www.eea.europa.eu/publications/EMEP-CORINAIR5>, 2007-12-06.
- [31] 陈颖, 叶代启, 刘秀珍, 等. 我国工业源 VOCs 排放的源头追踪和行业特征研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 48-55.
- Chen Y, Ye D Q, Liu X Z, *et al.* Source tracing and characteristics of industrial VOCs emissions in China[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(1): 48-55.
- [32] 何梦林. 典型化工园区挥发性有机物排放特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [33] 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.
- [34] 陈小方. 集装箱制造业挥发性有机物排放特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [35] Li J, Hao Y F, Simayi M, *et al.* Verification of anthropogenic VOC emission inventory through ambient measurements and satellite retrievals [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, **2019**, **19**(9): 5905-5921.
- [36] 张嘉妮. 木质家具制造业挥发性有机物排放特征及其控制技术[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [37] 柯云婷. 溶剂使用行业挥发性有机物排放特征及控制技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [38] 吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 等. 厦门市工业源 VOCs 排放清单及控制对策分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5336-5344.
- Wu D Y, Zhuang M Z, Wu Y C, *et al.* Analysis of industrial VOCs emission inventory and countermeasures in Xiamen [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5336-5344.
- [39] 卢滨, 黄成, 卢清, 等. 杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 533-542.
- Lu B, Huang C, Lu Q, *et al.* Emission inventory and pollution characteristics of industrial VOCs in Hangzhou, China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 533-542.
- [40] Zheng J, Chang M, Xie H T, *et al.* Exploring the spatiotemporal characteristics and control strategies for volatile organic compound emissions in Jiangsu, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **127**: 249-261.
- [41] 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [42] Zhu C Y, Tian H Z, Hao Y, *et al.* A high-resolution emission inventory of anthropogenic trace elements in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region of China [J]. Atmospheric Environment, 2018, **191**: 452-462.
- [43] Wang K, Tian H Z, Hua S B, *et al.* A comprehensive emission inventory of multiple air pollutants from iron and steel industry in China: temporal trends and spatial variation characteristics [J]. Science of the Total Environment, 2016, **559**: 7-14.
- [44] Ye X J, Hu D, Wang H H, *et al.* Atmospheric mercury emissions from China's primary nonferrous metal (Zn, Pb and Cu) smelting during 1949-2010 [J]. Atmospheric Environment, 2015, **103**: 331-338.
- [45] Hua S B, Tian H Z, Wang K, *et al.* Atmospheric emission inventory of hazardous air pollutants from China's cement plants: temporal trends, spatial variation characteristics and scenario projections [J]. Atmospheric Environment, 2016, **128**: 1-9.
- [46] 闫福成. 2018 年中国汽车涂料工业发展状况及 2019 年展望 (下) [J]. 中国涂料, 2019, **34**(4): 12-20.
- Yan F C. Situation of the Chinese automotive coatings industry's development in 2018 and outlook of 2019 (II) [J]. China Coatings, 2019, **34**(4): 12-20.
- [47] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 305-312.
- Wei W, Wang S X, Hao J M. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 305-312.
- [48] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, *et al.* An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, **108** (D21), doi: 10.1029/2002JD003093.

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i> (5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i> (5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i> (5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOW Wei, <i>et al.</i> (5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i> (5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i> (5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i> (5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i> (5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i> (5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i> (5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i> (5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i> (5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i> (5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i> (5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i> (5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i> (5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i> (5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i> (5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i> (5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i> (5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i> (5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i> (5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i> (5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i> (5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i> (5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i> (5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i> (5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i> (5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in A Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i> (5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i> (5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i> (5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i> (5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i> (5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i> (5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i> (5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i> (5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i> (5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i> (5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i> (5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i> (5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i> (5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i> (5554)