

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.11
第41卷 第11期

目次

中国工业源挥发性有机物排放清单 梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 叶代启, 陈来国(4767)

中国水泥排放清单及分布特征 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 郭静, 王鹏, 翟文慧, 崔维庚, 汪寿阳, 李时蓓, 董广霞(4776)

环境空气 PM_{2.5} 化学组分监测数据审核指标的建立:以长三角地区为例 张哲, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 郭会琴, 王红丽, 楼晟荣, 陶士康, 陈长虹(4786)

南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征 张毓秀, 于兴娜, 刘偲嘉, 安俊琳, 张程(4803)

郑州市 PM_{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析 张剑飞, 姜楠, 段时光, 孙有昌, 郝祺, 张瑞芹(4813)

山西大学城 PM_{2.5} 中元素特征、来源及健康风险评估 李雪梅, 牟玲, 田妹, 郑利荣, 李杨勇(4825)

2000~2019年中国 PM_{2.5} 时空演化特征 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 程先富(4832)

北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异 尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 郭恒, 刘湘雪, 熊亚军(4844)

基于天气背景天津大气污染输送特征分析 蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 姚青, 刘敬乐(4855)

基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 朱晓婉, 董璠(4864)

基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源 孙佳宁, 谢绍东(4874)

芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析 高亢, 章慧, 刘梦迪, 赵晓宇, 吴婷, 贾其娜(4885)

密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应 张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双(4895)

北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探 陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 陶蕾, 荆红卫(4905)

2009~2018年太湖湖泛强度变化及其影响因素 辛华荣, 朱广伟, 王雷松, 李骏, 陆隽(4914)

雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 陈雯, 刘怀庆(4924)

基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 李健, 李霞, 殷志强(4936)

会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价 李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一(4948)

太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征 张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 郝强州, 李喜梅, 高鹏程(4958)

强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海(4970)

长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序 苏超, 崔严(4981)

嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评价 杨延梅, 赵航晨, 孟睿, 何连生, 赵昊, 杜士林, 丁婷婷(4989)

污水处理厂对漓江桂林市河段淡水生物中微塑料累积的影响 谢元沅, 张清科, 张漓杉, 钟山, 刘俊勇, 侯晓映, 王华, 冯静培, 梁祖鸿, 陈舞阳(4999)

村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律 卢亚楠, 郭雅妮, 王坤, 陆伟东, 王拓, 柴玉峰, 柳蒙蒙, 钟慧, 陈梅雪, 魏源送(5008)

冬季小流域水体微生物多样性及影响因素 朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 王宝珍, 高润霞, 郭锐利, 李武斌(5016)

水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响 王彤, 文刚, 黄廷林, 司凡, 王晨旭, 路林超, 林薇(5027)

长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析 韩文杰, 吴迪, 周家中, 何强, 阚渝姣(5037)

类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响 郭芳, 顾继光, 赵剑, 余华章, 肖利娟(5050)

基于决策树的城市黑臭水体遥感分级 李玲玲, 李云梅, 吕恒, 徐杰, 杨子谦, 毕顺, 许佳峰(5060)

纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制 潘阳, 牛承鑫, 支忠祥, 王建辉, 陆雪琴, 戴金山, 甄广印, 孙彤彤, 康娜英(5073)

温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N₂O 释放的影响 王丝可, 于恒, 左剑恶(5082)

以污泥发酵液与尾水混合液为补碳源的 A²/O 污染物去除特性 荣懿, 邵劲博, 于优城, 石恒, 金鹏康(5089)

不同曝气比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清(5097)

中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响 田中科, 王芬, 闫钊(5106)

基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价 韩琳, 徐夕博(5114)

再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险 沈城, 刘霞雯, 吴健, 黄沈发, 王敏, 黄波涛(5125)

有机改性蒙脱土对苯的吸附机制和影响因素 侯静雯, 施维林, 高娟(5133)

硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉迁移的影响 李义纯, 陈勇, 唐明灯, 李林峰, 林晓扬, 王艳红, 许迪豪, 艾绍英(5143)

叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响 闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰(5151)

重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应 王晓宇, 韩辉(5160)

油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响 赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君(5168)

氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响 张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔(5176)

生物炭影响下土壤呼吸温度敏感性及细菌群落结构的变化 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 黄洋(5185)

铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响 贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰(5193)

典型水环境微生物源异味物研究进展 张海涵, 苗雨甜, 黄廷林, 刘凯文, 刘祥, 黄鑫, 杨尚业, 司凡, 李程遥(5201)

广告:国家微生物科学数据中心 (前插)

《环境科学》征订启事(4785) 《环境科学》征稿简则(4947) 信息(5015, 5124, 5132)

中国工业源挥发性有机物排放清单

梁小明^{1,2}, 孙西勃³, 徐建铁¹, 叶代启^{1*}, 陈来国²

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 生态环境部华南环境科学研究所, 国家环境保护城市生态环境模拟与保护重点实验室, 广州 510655; 3. 广东省环境科学研究院, 广州 510045)

摘要: 以工业源挥发性有机物(VOCs)为研究对象,在前期建立的工业源典型污染源分类系统基础上,对污染源系统和重要污染源排放系数进行修正和更新,采用排放系数法建立了2018年我国工业源VOCs排放清单.结果表明,2018年我国工业源VOCs排放量为12 698 kt.含VOCs产品的使用环节贡献最大,占工业源排放总量的59%.工业涂装、印刷和包装印刷、基础化学原料制造、汽油储存与运输和石油炼制是排放量贡献最大的5大污染源,占工业源排放总量的54%;广东、山东、浙江和江苏是工业VOCs贡献最大的4个省份,排放总量占工业源VOCs总量的41%.海南、宁夏、西藏、黑龙江和新疆这5个省单位工业增加值VOCs排放强度最大,均超过了80 t·(亿元)⁻¹.大多数省份工业VOCs排放主要来自含VOCs产品的使用环节;采用Monte Carlo模拟2018年我国工业源VOCs排放清单95%置信区间不确定度为[-32%, 48%].

关键词:挥发性有机物(VOCs);排放清单;排放特征;工业源;中国

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)11-4767-09 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202004163

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China

LIANG Xiao-ming^{1,2}, SUN Xi-bo³, XU Jian-tie¹, YE Dai-qi^{1*}, CHEN Lai-guo²

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ecological Environment Simulation and Protection, South China Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China; 3. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China)

Abstract: An industrial volatile organic compounds (VOCs) emission inventory was developed in China in 2018. It was based on the emission factors method, using a revised and updated source classification system and emission factors of key industrial sources. Results showed that the total industrial VOCs emission in China in 2018 reached as high as 12 698 kt. Processes using products containing VOCs were the largest contributors, accounting for 59% of the total emission. The industrial coating industry, printing, the basic organic chemical industry, gasoline storage and transport, and the oil refinery industry were the five largest emitters, accounting for 54% of the total emission. Guangdong, Shandong, Zhejiang, and Jiangsu were the four largest emission contributors, contributing to 41% of the total emission. Hainan, Ningxia, Tibet, Heilongjiang, and Xinjiang showed the largest VOCs emission intensities, with more than 80 t·(100 million yuan)⁻¹. Processes using products containing VOCs were the main emission contributors in most provinces. The uncertainty for the total industrial VOCs emission in 2018, based on a Monte Carlo simulation, was [-32%, 48%] at the 95% confidence interval.

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

近年来,我国高浓度近地面臭氧(O₃)和二次气溶胶(SOA)污染频发^[1-3],自2013年《国家大气污染防治行动计划》及相关控制对策实施以来,污染物减排取得了一定的成效,与2013年相比,2018年京津冀,长三角和珠三角PM_{2.5}年均浓度分别降低了48%、39%和32%.然而,我国臭氧日最大8h浓度年均值仍在不断增加,从2013年的139 mg·m⁻³增加到2018年的151 mg·m⁻³^[4,5].根据广东省环境状况报告,珠三角地区以PM_{2.5}为首要污染物天数的比例从2013年的46%降至2018年的17%,而臭氧作为首要污染物天数比例则从27%增加到2018年的56%^[6,7],其他地区也发生了类似的情况,我国臭氧污染形势严峻.挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是近地面O₃和PM_{2.5}形成的重要前体物^[8-10].根据对O₃及其前驱物的环境观测研

究,主要发达地区和臭氧不达标地区一般属于VOCs控制敏感区,例如京津地区,长三角和珠三角地区^[11-15].

污染源排放清单为政策制定者提供污染物排放来源及特征信息,从而指导控制对策的制定,清单编制是VOCs污染控制的重要基础工作之一.目前大量的研究者对我国人为源VOCs排放清单进行不断地研究和完善^[16-25],但仍存在一些不足.一方面,不同研究者估算的VOCs排放量结果差别较大.如Streets等^[17,18]估算的2000年中国的VOCs排放量,

收稿日期: 2020-04-20; 修订日期: 2020-05-29

基金项目: 国家环境保护专项(第二次全国污染源普查)

作者简介: 梁小明(1992~),女,博士,助理研究员,主要研究方向为大气挥发性有机物的排放与控制对策, E-mail: liangxm.scut@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: cedqye@scut.edu.cn

由于能源数据被高估,导致排放总量分别比 Ohara 等^[19]和 Bo 等^[20]估算的高 2.7 Tg 和 6.4 Tg. 另一方面,前期建立的大多数排放清单中排放因子主要基于发达国家建立的因子库,如美国 AP-42 或欧盟 CORINAIR 因子库,然而,国内近年已有大量重要污染源排放因子的研究成果^[26~31]. 并且,由于生产工艺与控制技术等存在的差异,许多污染源实际的排放因子与国外系统的排放因子库也具有较大差异. 另外,随着经济的快速发展,污染源产业结构的升级和 VOCs 防控对策的实施等,我国 VOCs 排放特征也发生了变化,过去的研究结果不能反映中国目前的排放水平,因此给环境政策的制定带来了很大的不确定性.

基于上述事实,本研究以人为源中贡献最大的工业源为对象,在前期建立的工业源典型污染源分类系统基础上,对污染源系统和重要污染源排放系数进行修正和更新,采用排放系数法建立了 2018 年我国工业源 VOCs 排放清单,对 VOCs 排放重要污染源和省份进行识别,同时采用 Monte Carlo 模拟对清单不确定性进行定量评估,以期为我国 VOCs 控制政策的制定提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 排放源分类系统

本研究排放源分类系统,在 Qiu 等^[22]建立的污染源系统基础上进行补充和完善. 按照 VOCs 物质流动的方向,以“源头追踪”的思想分为 4 个环节: 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(如表 1). 与 Qiu 等^[22]建立的污染源系统相比,本研究主要在 3 个方面进行了完善. 首先,补充了部分前期未考虑的工业子源,主要包括:①丙烯酸、乙酸、乙酸乙酯、甲醛和丁二烯等基础化学原料制造;②漆包线、印刷电路板、铝电解电容器和 IC 等电子制造业;③镍、铝、镁和锌的金属冶炼,以及④化肥工业,染料、颜料制造、水泥工业和玻璃制造等. 其次,本污染源分类系统移除了一些非工业来源. 例如,属于生活源范围的建筑装饰和干洗. 最后,考虑到行业的清晰性和活动水平的可获取性,对一些重要污染源进行了重新分类. 例如,原分类系统中家具制造、机械设备制造和交通运输设备制造被重新分类为工业涂装,包括木制品涂装、汽车制造和维修、船舶制造、工业防护涂装、摩托车和自行车制造等. 改进的污染源分类系统涵盖了 99 类工业子源,如表 1 所示,基本涵盖了所有工业排放源.

1.2 排放量核算

本研究采用排放因子法对我国工业源 VOCs 排

放清单进行自上而下的估算. 各污染源可通过式 (1) 进行估算:

$$E = \sum_{i,j} A_{i,j} \times EF_i \quad (1)$$

式中, i 为特定污染源; j 为省份; E 为 VOCs 排放量; $A_{i,j}$ 为省市 i 污染源的活动水平数据,如原料消耗量,产品生产量; EF_i 为污染源 i 的排放因子.

1.3 排放因子

排放因子是代表行业单位生产能力或单位消费水平 VOCs 排放强度的重要指标,其准确性和代表性程度对于采用排放因子法估算清单结果的准确性具有重要意义. 为了减少清单结果的不确定性,在构建 VOCs 污染源排放因子时,在团队建立的排放系数库^[22]基础上,结合国内各行业排放系数最新研究成果,对系数库进行更新和完善,更新结果如表 1 所示. 主要更新工作包括:印刷工业、工业涂装和电子制造业源排放系数结合了笔者最新的研究成果^[26]和目前排放控制现状进行了重新估算. 另外,一些重点污染源如石油炼制、汽车制造与维修、制鞋业和合成革等,均结合目前最新的研究成果^[28~31]进行了估算和更新.

1.4 活动水平

工业源各类源活动水平信息获取来源如表 1 所示,大多数工业子源省级活动水平信息均来自最新的官方统计数据,包括国家统计局数据库、各类统计年鉴(如《中国统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》)以及不同行业协会(如中国涂料工业协会和中国胶黏剂与胶黏带工业协会)等. 部分污染源活动水平信息对应为原料消耗量,如含 VOCs 产品的使用环节印刷油墨消耗量、涂装涂料消耗量和木材加工胶黏剂消耗量等,一般情况,此类活动水平信息难以获取,研究一般采用表观消费量(表观消费量 = 产量 + 进口量 - 出口量)来表征各类原料消耗量. 针对活动水平信息仅能获取国家级信息的部分污染源,研究通过结合各类子源相关性高的活动水平数据分配至省级层面. 包括纺织印染染料消耗量、木材加工工业胶黏剂消耗量、制鞋业胶黏剂消耗量、工业涂装中汽车制造与维修、船舶制造等,分别采用各省印染布产量、人造板产量、制鞋产量、汽车和船舶产量等进行分配. 另外,通常获取的工业溶剂使用源中各类溶剂消耗量是未细分各子行业的消耗量,如涂料、油墨和胶黏剂,在使用前需根据各溶剂源细分行业的生产或应用类型比例进行分配. 例如,根据细分行业的油墨生产类型比例,印刷与包装印刷中油墨消耗量可分为平板印刷、凹版印刷、孔板印刷和凸版印刷等.

表 1 工业源污染源分类系统、排放系数与活动水平来源
Table 1 Source classification, emission factor, and activity level for industrial sources

| 环节 | 子行业 | 类型 | 排放系数 ¹⁾ | 单位 | 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 ^[21] /0.5 ^[21] | kg·t ⁻¹ | 国家统计局数据库 | |
| | 石油炼制 | 原油加工 | 1 ^[28] | kg·t ⁻¹ | 国家统计局数据库 | |
| | 基础化学原料制造 | 苯/甲醇/乙烯/乙酸/乙酸乙酯/甲醛/丁二烯/丙烯/合成氨 | 0.55 ^[32] /5.55 ^[32] /0.5 ^[32] / 6.35 ^[32] /0.555 ^[32] /5.95 ^[32] / 11.6 ^[32] /0.111 ^[33] /4.72 ^[33] | kg·t ⁻¹ | 国家统计局数据库 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 ^[32] /0.012 ^[32] | kg·t ⁻¹ |
| 储存与运输 | 原油 | 国产/进口/出口 | 0.54 ^[22] /0.88 ^[22] /0.51 ^[22] | kg·t ⁻¹ | 国家统计局数据库 | |
| | 汽油 | 国产/进口/出口 | 4.54 ^[22] /4.49 ^[22] /4.22 ^[22] | kg·t ⁻¹ | 国家统计局数据库 | |
| | 柴油 | 国产/进口/出口 | 2.46 ^[22] /3.06 ^[22] /1.84 ^[22] | kg·t ⁻¹ | 国家统计局数据库 | |
| 以 VOCs 为原料的工艺过程 | 涂料及类似产品制造 | 涂料/油墨/染料/颜料制造 | 15 ^[33] /60 ^[33] /81.4 ^[33] /10 ^[32] | kg·t ⁻¹ | 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 ^[33] | kg·t ⁻¹ | 中国胶黏剂与胶黏带工业协会 | |
| | 合成纤维生产 | 涤纶/锦纶/腈纶/维纶/氨纶/丙纶/醋酸纤维 | 3.39 ^[34] /3.75 ^[32] /125.1 ^[32] / 7.7 ^[32] /40 ^[34] /37.1 ^[32] /145.2 ^[32] | kg·t ⁻¹ | 国家统计局数据库 中国石油和化学工业联合会 | |
| | | | 合成树脂生产 | LLDPE/HDPE/LDPE/PVC/ ABS/PS/PP | 5.7 ^[33] /10 ^[33] /10 ^[33] /0.7448 ^[33] / 1.4 ^[35] /5.4 ^[33] /3 ^[33] | kg·t ⁻¹ |
| | 合成橡胶生产 | / | 7.6 ^[36] | kg·t ⁻¹ | 中国统计年鉴 | |
| | 橡胶制品 | 轮胎制造 | 0.28 ^[36] | kg·条 ⁻¹ | 中国统计年鉴 | |
| | 食品和饮料制造 | 成品糖/食用植物油 白酒/啤酒/葡萄酒/发酵酒精 | 0.2 ^[36] /2.45 ^[34] 16.26 ^[36] /0.43 ^[36] /0.55 ^[33] / 32.1 ^[32] | kg·t ⁻¹ kg·kL ⁻¹ | 中国统计年鉴 国家统计局数据库 中国轻工业年鉴 | |
| | | | 日用化学产品制造 | 合成洗涤剂 | 0.025 ^[16] | kg·t ⁻¹ |
| | 化学原料药 | / | 114.14 ^[32] | kg·t ⁻¹ | 中国统计年鉴 | |
| | 焦炭生产 | / | 1.25 ^[37] | kg·t ⁻¹ | 中国统计年鉴 | |
| | 纺织印染 | / | 81.4 ^[33] | kg·t ⁻¹ | 中国染料工业协会 | |
| | 合成革 | / | 163.46 | kg·t ⁻¹ | 中国石油和化学工业联合会 | |
| | 造纸和纸制品业 | 纸浆/纸制品 | 0.25 ^[37] /0.1 ^[37] | kg·t ⁻¹ | 中国轻工业年鉴 | |
| | 印刷和包装印刷 | 平版印刷/凸版印刷/凹版印刷/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/装订胶黏剂使用 | 489.18/514.14/607.74/539.80/ 183.40/603.94/526.53/89 ^[37] | kg·t ⁻¹ | 中国油墨协会 中国胶黏剂和胶黏带工业协会 | |
| 木材加工 | | | 胶黏剂使用 | 89 ^[33] | kg·t ⁻¹ | 中国胶黏剂和胶黏带工业协会 |
| 制鞋业 | 胶黏剂使用 | 644 | kg·t ⁻¹ | 中国胶黏剂和胶黏带工业协会 | | |
| 含 VOCs 产品的使用 | 工业涂装 | 木制品制造/汽车制造与维修/船舶制造/工业防护涂装/摩托车制造/自行车制造 | 430.32/151/380.8/367.2/1.8 ^[38] / 0.3 ^[38] | kg·t ⁻¹ | 中国涂料工业协会 国家统计局数据库 | |
| | | | 覆铜板生产 | 0.1 | kg·m ⁻² | 中国电子材料行业协会 |
| | 电子制造业 | 印制电路板生产 铝电解电容器 集成电路生产 | 漆包线生产 | 40.08 | kg·t ⁻¹ | 覆铜板材料分会 |
| | | | 0.2344 | kg·m ⁻² | 中国电子元件行业协会 | |
| | | | 1.16 | kg·百万只 ⁻¹ | 中国统计年鉴 | |
| | | | 0.0709 | kg·万块 ⁻¹ | | |
| | 金属冶炼业 | 热轧/镍冶炼/铝冶炼/镁冶炼/锌冶炼 | 0.007 ^[33] /0.24 ^[37] /0.634 ^[37] / 1.201 ^[37] /0.806 ^[32] | kg·t ⁻¹ | 国家统计局数据库 中国有色金属工业协会 | |
| | | | 非金属矿制品业 | 水泥生产/黏土砖瓦/平板玻璃/玻璃纤维 | 0.012 ^[33] /0.132 ^[38] /4.4 ^[38] / 3.15 ^[38] | kg·t ⁻¹ |
| | 环境治理 | 卫生填埋/垃圾堆肥/垃圾焚烧/污水处理 | 0.23 ^[35] /0.74 ^[35] /1.5 ^[35] / 0.0011 ^[38] | kg·t ⁻¹ | 中国统计年鉴 城乡建设统计年鉴 | |
| | 火力发电 | 煤/燃料油 | 0.15 ^[20] /0.13 ^[20] | kg·t ⁻¹ | 中国能源统计年鉴 | |
| 供热 | 煤/燃料油 | 0.19 ^[37] /0.2 ^[33] | kg·t ⁻¹ | 中国能源统计年鉴 | | |
| 工业消费 | 煤/燃料油 液化石油气/天然气 ¹⁾ | 0.18 ^[20] /0.15 ^[20] 0.48 ^[33] /0.088 ^[20] | kg·t ⁻¹ g·m ⁻³ | 中国能源统计年鉴 | | |

1) 其他未标注来源排放系数均来自本研究；2) 工业消费中液化石油气和天然气包括了火力发电和供热过程燃气的消耗

2 结果与讨论

2.1 污染源分布特征

2018 年我国工业源 VOCs 排放量为 12 698 kt. 如图 1 所示,工业源 4 大排放环节中,含 VOCs 产品的使用贡献最大,占工业源排放总量的 58.89%,其次为以 VOCs 为原料的工艺过程、储存与运输和 VOCs 的生产,排放量贡献依次为 16.33%、13.07% 和 11.71%.

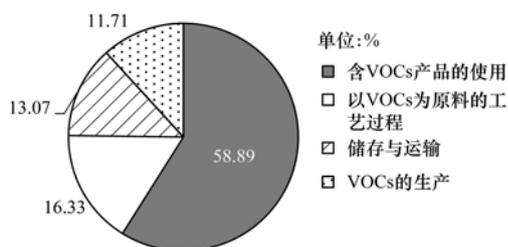


图 1 2018 年我国工业源 VOCs 中 4 大排放环节贡献情况

Fig. 1 VOCs contributions of four major categories for industrial sources in China in 2018

2.1.1 VOCs 的生产

VOCs 的生产环节各子行业 VOCs 排放贡献情况如图 2 所示,该环节排放总量为 1 487 kt. 其中,贡献最大的子行业为基础化学原料制造,占该环节 VOCs 排放总量的 47.89%. 该子行业涉及的产品种类繁多,本研究仅估算了苯、甲醇、乙烯和乙酸等 9 类基础化学原料的制造 VOCs 排放. 其次为石油炼制,贡献为 40.59%. 2018 年我国原油加工量超过 6 亿 t,加工数量也逐年递增. 石油炼制行业涉及排放环节多,并多以无组织逸散,如储罐呼吸、阀门管件泄漏以及油品装卸过程等,使得治理上存在难度. 原油和天然气开采行业贡献相对较小,占该环节排放总量的 11.50%. 肥料制造 VOCs 贡献最小,占比不到 1%.

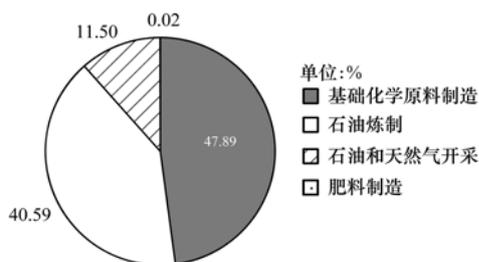


图 2 2018 年我国工业源 VOCs 的生产环节贡献情况

Fig. 2 VOCs contributions of production of VOCs for industrial sources in China in 2018

2.1.2 储存与运输

储存与运输环节各子行业 VOCs 排放贡献情况

如图 3 所示,该环节排放总量为 1 660 kt. 该环节 VOCs 的排放主要来源于各类油品的存储和运输以及周转过程 VOCs 的无组织逸散. 如存储过程中的储罐呼吸,运输过程的油罐车呼吸逸散,油品周转过程涉及的装卸逸散及油罐车和管道损耗等. 其中,贡献最大的为汽油储存与运输,占该环节 VOCs 总量的 41.35%. 其次为原油和柴油储存与运输,占比分别为 30.72% 和 27.93%.

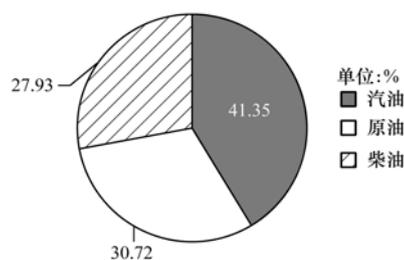


图 3 2018 年我国工业源储存与运输环节贡献情况

Fig. 3 VOCs contributions of storage and transport for industrial sources in China in 2018

2.1.3 以 VOCs 为原料的工艺过程

以 VOCs 为原料的工艺过程环节各子行业 VOCs 排放贡献情况如图 4 所示,该环节排放总量为 2 073 kt. 该环节贡献最大的为食品和饮料制造,占比为 23.79%,包括成品糖制造、食用植物油食品制造和白酒、啤酒、葡萄酒和发酵酒精等酒类制造, VOCs 主要来源于白酒和发酵酒精的制造. 其次为涂料及其类似产品制造行业,贡献了该环节 19.01% 的 VOCs,其中涂料制造过程贡献最大,占该行业排放总量的 67.01%. 化学原料药制造与合成纤维行业对该环节 VOCs 贡献相当,占比分别为 15.54% 和 15.45%. 其中,合成纤维中贡献最大的为涤纶、腈纶和醋酸纤维,分别占该行业 VOCs 排放量的 42.49%、24.00% 和 16.86%. 橡胶制品制造和合成树脂部门对该环节贡献相当,分别为 11.03% 和 9.89%. 其中,合成树脂中贡献最大的为聚丙烯

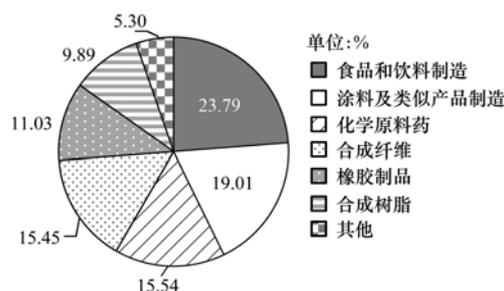


图 4 2018 年我国工业源以 VOCs 为原料的工艺过程环节贡献情况

Fig. 4 VOCs contributions of industrial processes using VOCs as raw materials for industrial sources in China in 2018

树脂(PP)和高密度聚乙烯树脂(HDPE),分别占该行业排放总量的 29.88% 和 21.41%。另外该环节还有 5.30% 的 VOCs 来自胶黏剂生产、合成橡胶和日用化学产品制造等其他部门。

2.1.4 含 VOCs 产品的使用

含 VOCs 产品的使用环节各部门 VOCs 排放贡献情况如图 5 所示,该环节排放总量为 7 478 kt。其中,贡献最大的部门为工业涂装行业,远超过其他行业,占该环节 VOCs 总量的 46.78%。工业涂装行业包括木制品制造、汽车制造和维修、船舶制造、工业防护涂装、摩托车及自行车制造等,其中,贡献最大的为工业防护涂装,占该行业排放量的 63.52%。印刷和包装印刷是除工业涂装外第二贡献大的行业,含 VOCs 产品的使用环节 18.52% 的 VOCs 来自印刷和包装印刷,该行业 VOCs 主要贡献子源为包装与标签黏合与复合等,占行业 67.25%,其次为凹版印刷和平板印刷,占比分别为 10.39% 和 9.77%。焦炭生产对该环节 VOCs 排放贡献排名第三,占比为 7.32%。其他行业 VOCs 排放贡献均小于 5%,排放贡献相对较大的依次为:制鞋业 4.55%、合成革 4.19%、火力发电 3.87%、环境治理 3.20%、非金属矿制品业 3.11% 和电子制造业 2.86%。另外,工业消费、木材加工、纺织印染和其他(供热、金属冶炼业和造纸和纸制品业)贡献相对较小,合计贡献了该环节 VOCs 排放量的 5.61%。

2.2 省级分布特征

图 6 为 2018 年我国工业源 VOCs 分省市排放情况以及 4 大环节各省市贡献情况。广东、山东、浙江和江苏是工业 VOCs 贡献最大的 4 个省份,其 VOCs 排放量均超过了 1 000 kt,排放总量占工业源 VOCs 总量的 41%,均为经济发展和工业生产水平

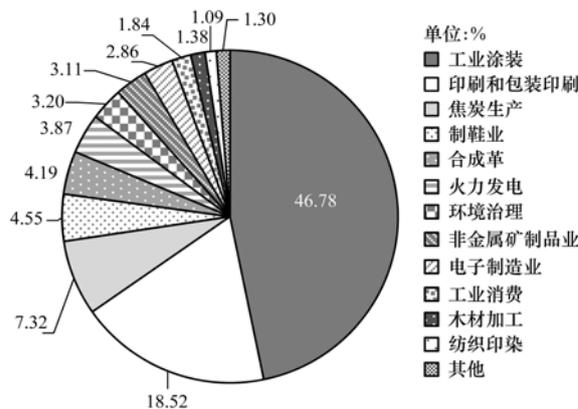
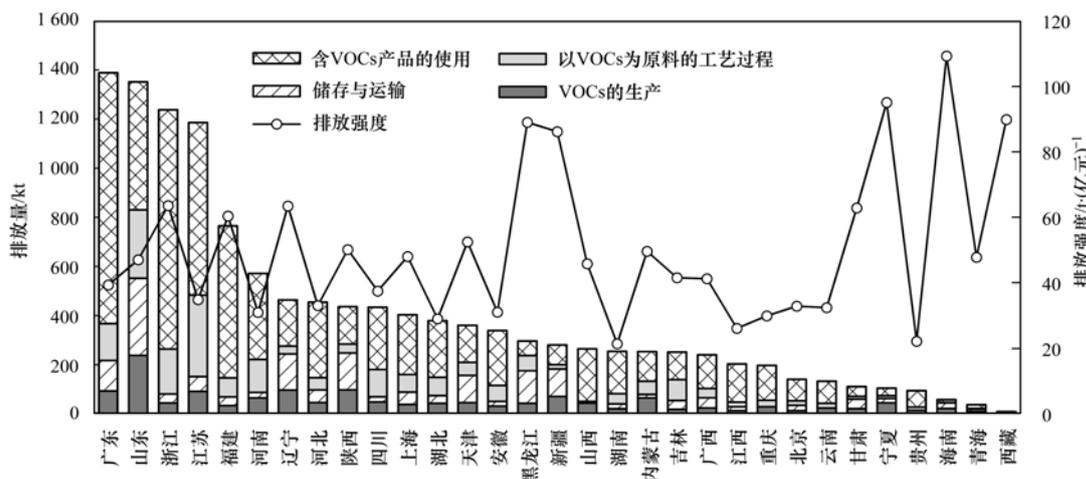


图 5 2018 年我国工业源含 VOCs 产品的使用环节贡献情况
Fig. 5 VOCs contributions of processes using products containing VOCs for industrial sources in China in 2018

较高的省份。贵州、海南、青海和西藏贡献最小, VOCs 排放量均小于 100 kt, 4 个省份排放量占工业源总量不到 2%。其余福建、河南和辽宁等 23 个省份工业 VOCs 排放量均在 100 ~ 800 kt 之间,从各省市单位工业增加值 VOCs 排放量(排放强度)来看,海南、宁夏、西藏、黑龙江和新疆这 5 个省份 VOCs 排放强度最大,均超过了 80 t·(亿元)⁻¹,湖南、贵州、江西、湖北和重庆 VOCs 排放强度最小,均小于 30 t·(亿元)⁻¹,这均与各地区产业结构特征有关。

各省市工业 VOCs 的 4 大排放环节贡献特征显示(图 6),大多数省份工业 VOCs 排放主要来自含 VOCs 产品的使用环节,如广东、山东、浙江和江苏等。部分省份如黑龙江,新疆,海南和宁夏等省,储存和运输和 VOCs 的生产环节分别是工业 VOCs 排放最大的环节。各省细分污染源 VOCs 贡献情况与其工业产业结构密切相关,例如全国 35% 的原油加工



中国香港、澳门和台湾资料暂缺

图 6 2018 年我国工业源 VOCs 排放省市分布情况

Fig. 6 Industrial VOCs emission inventory for each provinces in China in 2018

量来自山东和辽宁,石油炼制行业在两省 VOCs 排放贡献分别为第三(10%)和第二(17%)污染源;基础化学原料制造中,37%的 VOCs 排放来自最大子污染源甲醇制造.全国甲醇产量最大的省份为内蒙古,生产了全国 20%的甲醇,基础化学原料制造为该省 VOCs 最大排放源,排放量占该省 VOCs 排放总量的 24%;焦炭产量位于全国之首的山西,全国约 20%的焦炭产自该省,焦炭生产为该省 VOCs 排放最大污染源,排放量占该省 VOCs 排放总量的 44%.总体上,各省贡献前 3 污染源主要集中在工业涂装、印刷与包装印刷、基础化学原料制造和汽油储存运输 4 大污染源.

2.3 排放清单对比

为了使不同研究成果工业源 VOCs 排放清单对比更清晰,研究将不同研究的污染源分类系统根据本研究分类特征,重新归类为 4 大类:VOCs 的生产、储存与运输、以 VOCs 为原料的工艺过程和含 VOCs 产品的使用过程(表 2).目前最新的全国层面 VOCs 排放清单研究成果主要集中在 2011~2013 年,主要包括 Zheng 等^[25]研究的 2011~2013 年工业源 VOCs 排放清单和 Wu 等^[23,24]研究的 2008~2013 年我国人为源 VOCs 排放清单(对比过程已将交通源

和生物质燃烧源等扣除).

如表 2 所示,从我国工业源 VOCs 排放总量来看,本研究 VOCs 排放量均低于其他研究,一方面是排放清单污染源涵盖范围不同带来的差异,例如在含 VOCs 产品的使用环节,Wu 等^[23,24]建立的清单还包括了农药使用、沥青道路铺装、建筑装饰、餐饮油烟、干洗和日用品使用等非工业子源;而在该环节,Zheng 等^[25]所建立的清单同样也涵盖了建筑装饰和干洗等非工业子源;以上两项研究总体上,涵盖了更多的非工业污染源,使得清单 VOCs 总量比本研究大.另一方面是清单核算过程排放系数不同带来的差异,本研究此次建立的工业源 VOCs 排放系数综合考虑了目前国内最新的排放系数研究成果,与 Zheng 等^[25]和 Wu 等^[23,24]建立的主要基于较早排放系数成果和国外因子库的排放系数相比,更能代表中国各行业目前的 VOCs 排放水平.例如,本研究此次对重要污染源如石油炼制、印刷业、工业涂装、电子制造业和合成革等排放系数进行了更新,更新的排放系数总体比 Zheng 等^[25]和 Wu 等^[23,24]对应子源排放系数小.此外,近年来,我国工业源产业结构的调整与升级等也是 VOCs 排放量差异的一项重要来源.

表 2 我国工业源 VOCs 排放清单对比/Tg
Table 2 Comparison of China's industrial VOCs emission inventories/Tg

| 基准年 | VOCs 的生产 | 储存与运输 | 以 VOCs 为原料的工艺过程 | 含 VOCs 产品的使用过程 | 综合 | 文献 |
|------|----------|-------|-----------------|----------------|-------|------|
| 2018 | 1.49 | 1.66 | 2.07 | 7.48 | 12.7 | 本研究 |
| 2011 | / | / | / | / | 15.3 | [25] |
| 2012 | / | / | / | / | 21.0 | [25] |
| 2012 | 3.01 | 0.7 | 5.42 | 8.57 | 17.7 | [23] |
| 2013 | 3.03 | 1.51 | 2.67 | 22.15 | 29.36 | [25] |
| 2013 | 2.90 | 0.75 | 5.48 | 8.33 | 17.46 | [24] |

2.4 不确定性分析

本研究采用 Monte Carlo 模拟对 2018 年我国工业源 VOCs 排放清单不确定性进行定量评估.首先确定活动水平和排放系数的概率密度分布函数.研究假设排放清单输入的活动水平和排放系数基础数据均呈正态分布,定义研究选取的数据为平均值,其不确定度(即相对标准差)与平均值的比值为标准偏差,作为描述各参数的概率密度函数.活动水平和排放系数不确定度则依据数据获取方式来确定,主要参考 TRACE-P^[17]清单以及 Qiu 等^[22]和魏巍等^[39]的研究成果,具体数值见表 3.然后采用 Monte Carlo 方法,将输入基础数据的不确定性传递至清单,从而评估排放清单的不确定性.

经模型 10 000 次重复计算,获取 2018 年我国工业源 VOCs 排放清单 95% 置信区间不确定度为 [-32%, 48%].工业源 4 大排放环节 95% 置信区间不确定度分别为 VOCs 的生产[-53%, 70%],储存与运输[-76%, 131%],以 VOCs 为原料的工艺过程[-45%, 62%]和含 VOCs 产品的使用[-46%, 77%].

3 结论

(1) 2018 年我国工业源 VOCs 排放量为 12 698 kt. 4 大排放环节中,含 VOCs 产品的使用环节贡献最大,占工业源排放总量的 59%.工业涂装、印刷和包装印刷、基础化学原料制造、汽油储存与运

表 3 工业源活动水平和排放系数不确定度

Table 3 Uncertainties of activity data and emission factors for industrial sources

| 环节 | 子行业 | 不确定度/% | | |
|-----------------|-----------|-----------------------------------|------|------|
| | | 活动水平 | 排放系数 | |
| VOCs 的生产 | 石油和天然气开采 | 原油开采 | ±30 | ±50 |
| | | 天然气开采 | ±30 | ±50 |
| | 石油炼制 | 原油加工 | ±30 | ±50 |
| | 基础化学原料制造 | 苯/甲醇/乙烯/丙烯/乙酸/乙酸乙酯/甲醛/丁二烯/合成氨 | ±30 | ±150 |
| | 肥料制造 | 氮肥/磷肥 | ±30 | ±150 |
| 储存与运输 | 原油 | 国产/进口/出口 | ±80 | ±100 |
| | 汽油 | 国产/进口/出口 | ±80 | ±100 |
| | 柴油 | 国产/进口/出口 | ±80 | ±100 |
| 以 VOCs 为原料的工艺过程 | 涂料及类似产品制造 | 涂料/油墨/染料/颜料生产 | ±80 | ±150 |
| | 胶黏剂生产 | / | ±80 | ±150 |
| | 合成纤维生产 | 涤纶/锦纶/腈纶/维纶/氨纶/丙纶/醋酸纤维 | ±80 | ±150 |
| | 合成树脂生产 | PE 树脂/PVC 树脂/ABS 树脂/PS 树脂/PP 树脂 | ±80 | ±150 |
| | 合成橡胶生产 | / | ±30 | ±150 |
| | 橡胶制品 | 轮胎制造 | ±30 | ±100 |
| | | 成品糖/食用植物油 | ±30 | ±80 |
| | 食品和饮料制造 | 白酒/啤酒/葡萄酒/发酵酒精 | ±80 | ±150 |
| | 日用化学产品制造 | 合成洗涤剂 | ±30 | ±100 |
| | 化学原料药 | / | ±30 | ±150 |
| 含 VOCs 产品的使用 | 焦炭生产 | / | ±30 | ±100 |
| | 纺织印染 | / | ±100 | ±100 |
| | 合成革 | / | ±80 | ±50 |
| | 造纸和纸制品业 | 纸浆 | ±80 | ±150 |
| | | 纸制品 | ±80 | ±150 |
| | 印刷和包装印刷 | 平版油墨/凹版油墨/凸版油墨/孔版油墨/UV 油墨/其他油墨 | ±100 | ±50 |
| | | 包装与标签黏合与复合/装订胶黏剂使用 | | |
| | 木材加工 | 胶黏剂使用 | ±100 | ±50 |
| | 制鞋业 | 胶黏剂使用 | ±100 | ±50 |
| | | 木制品制造/汽车制造与维修/船舶制造/工业防护涂装 | ±100 | ±50 |
| | 工业涂装 | 摩托车制造/自行车制造 | ±30 | ±150 |
| | 电子制造业 | 覆铜板生产/漆包线生产/印制电路板生产/铝电解电容器/集成电路生产 | ±80 | ±50 |
| | 金属冶炼业 | 热轧/镍/铝/镁/锌冶炼 | ±80 | ±150 |
| | 非金属矿制品业 | 水泥生产/黏土砖瓦/平板玻璃/玻璃纤维 | ±30 | ±150 |
| | 环境治理 | 卫生填埋/堆肥/焚烧 | ±30 | ±150 |
| | 污水处理 | ±30 | ±150 | |
| 火力发电 | 煤/燃料油 | ±30 | ±100 | |
| 供热 | 煤/燃料油 | ±30 | ±100 | |
| | 煤/燃料油 | ±30 | ±100 | |
| 工业消费 | 液化石油气/天然气 | ±30 | ±100 | |

输、石油炼制是排放量贡献最大的 5 大污染源,占工业源排放总量的 54%。

(2)广东、山东、浙江和江苏是工业 VOCs 贡献最大的 4 个省份,排放总量占工业源 VOCs 总量的 41%。海南、宁夏、西藏、黑龙江和新疆 5 个省份单位工业增加值 VOCs 排放强度最大,均超过了 80 t·(亿元)⁻¹,大多数省份工业 VOCs 排放主要来自含 VOCs 产品的使用环节。

(3)采用 Monte Carlo 模拟 2018 年我国工业源 VOCs 排放清单 95% 置信区间不确定度为 [-32%, 48%]。其中,VOCs 的生产为 [-53%, 70%],储存与运输为 [-76%, 131%],以 VOCs 为原料的工艺过程为 [-45%, 62%]和含 VOCs 产品的使用为 [-46%, 77%]。

参考文献:

[1] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Ground-level ozone in the

- Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90** (1): 512-518.
- [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] Xue L K, Wang T, Gao J, *et al.* Ground-level ozone in four Chinese cities: precursors, regional transport and heterogeneous processes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14** (23): 13175-13188.
- [4] 生态环境部. 2018 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201905/P020190619587632630618.pdf>, 2019-05-29.
- [5] 广东省生态环境厅. 2013 年中国环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201605/P020160526564151497131.pdf>, 2014-05-27.
- [6] 广东省生态环境厅. 2013 年广东省环境状况公报 [EB/OL]. http://gdee.gd.gov.cn/hjzkgb/content/post_2335526.html, 2014-06-05.
- [7] 广东省生态环境厅. 2018 年广东省环境状况公报 [EB/OL]. http://gdee.gd.gov.cn/hjzkgb/content/post_2466184.html, 2019-05-17.
- [8] Sun G J, Yao L, Jiao L, *et al.* Characterizing PM_{2.5} pollution of a subtropical metropolitan area in China [J]. *Atmospheric and Climate Sciences*, 2013, **3**(1): 100-110.
- [9] Zhao P S, Dong F, Yang Y D, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 389-398.
- [10] 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.
- [11] Han S Q, Zhang M, Zhao C S, *et al.* Differences in ozone photochemical characteristics between the megacity Tianjin and its rural surroundings [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **79**: 209-216.
- [12] Ding A J, Fu C B, Yang X Q, *et al.* Ozone and fine particle in the western Yangtze River Delta: an overview of 1 yr data at the SORPES station [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(11): 5813-5830.
- [13] Lam S H M, Saunders S M, Guo H, *et al.* Modelling VOC source impacts on high ozone episode days observed at a mountain summit in Hong Kong under the influence of mountain-valley breezes [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 166-176.
- [14] 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.
- [15] Ran L, Zhao C S, Geng F H, *et al.* Ozone photochemical production in urban Shanghai, China: analysis based on ground level observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114** (D15):, doi: 10.1029/2008JD010752.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Streets D G, Yarber K F, Woo J H, *et al.* Biomass burning in Asia; annual and seasonal estimates and atmospheric emissions [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17** (4), doi: 10.1029/2003GB002040.
- [19] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, *et al.* An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7** (16): 4419-4444.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Tsai J H, Huang P H, Chiang H L. Characteristics of volatile organic compounds from motorcycle exhaust emission during real-world driving [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 215-226.
- [28] 鲁君. 典型石化企业挥发性有机物排放测算及本地化排放系数研究 [J]. *环境污染与防治*, 2017, **39**(6): 604-609.
- Lu J. A study on VOCs emission inventory of typical petrochemical plant and its local emission factor [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017, **39** (6): 604-609.
- [29] 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.
- [30] 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 等. 浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3463-3469.

- Xu J Q, Wang Z M, Song S, *et al.* Pollution characteristics and emission coefficients for volatile organic compounds from the synthetic leather industry in Zhejiang province [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3463-3469.
- [31] 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 等. 浙江省汽车整车制造行业挥发性有机物产排污系数[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1093-1098.
- Teng F H, Yang Z P, Dong S B, *et al.* Producing coefficients and emission coefficients of volatile organic compounds from the automobile manufacturing industry in Zhejiang Province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1093-1098.
- [32] 中国台湾环境保护署. 公私场所固定源申报空气污染防治费之挥发性有机物排放计量公告系数(2009)[M]. 2009.
- [33] US EPA. AP-42: compilation of air pollutant emission factors [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch04>, 2008-06-11.
- [34] 邱凯琼. 工业源挥发性有机物减排潜力及其对空气质量的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [35] European Environment Agency (EEA). EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook-2007 [EB/OL]. <https://www.eea.europa.eu/publications/EMEP/CORINAIR5>, 2007-12-06.
- [36] 陈颖. 我国工业源 VOCs 行业排放特征及未来趋势研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [37] 杨利娟. 我国工业源 VOCs 排放时空分布特征与控制策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [38] 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.
- [39] 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.



CONTENTS

| | |
|---|---|
| Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China | LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, <i>et al.</i> (4767) |
| Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China | TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (4776) |
| Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient PM _{2.5} : A Case Study of the Yangtze River Delta | ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (4786) |
| Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area | ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, <i>et al.</i> (4803) |
| Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhengzhou | ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, <i>et al.</i> (4813) |
| Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in PM _{2.5} in Shanxi University Town | LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, <i>et al.</i> (4825) |
| Spatio-temporal Evolution of PM _{2.5} Concentration During 2000-2019 in China | XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, <i>et al.</i> (4832) |
| Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing | YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, <i>et al.</i> (4844) |
| Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background | CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4855) |
| Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification | WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4864) |
| Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data | SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874) |
| Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu | GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, <i>et al.</i> (4885) |
| Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir | ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, <i>et al.</i> (4895) |
| Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer | CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, <i>et al.</i> (4905) |
| Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018 | XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, <i>et al.</i> (4914) |
| Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula | ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, <i>et al.</i> (4924) |
| Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes | SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, <i>et al.</i> (4936) |
| Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China | LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, <i>et al.</i> (4948) |
| Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve | ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (4958) |
| Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain | LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4970) |
| Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin | SU Chao, CUI Yan (4981) |
| Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network | YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, <i>et al.</i> (4989) |
| Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section | XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, <i>et al.</i> (4999) |
| Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns | LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, <i>et al.</i> (5008) |
| Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter | ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, <i>et al.</i> (5016) |
| Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier | WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5027) |
| Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta | HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (5037) |
| Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China | GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (5050) |
| Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree | LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (5060) |
| Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism | PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, <i>et al.</i> (5073) |
| Effects of Temperature and Substrate Concentration on N ₂ O Release of ANAMMOX Process | WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082) |
| Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A ² /O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source | RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, <i>et al.</i> (5089) |
| Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules | ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (5097) |
| Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge | TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106) |
| Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics | HAN Lin, XU Xi-bo (5114) |
| Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites | SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, <i>et al.</i> (5125) |
| Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors | HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133) |
| Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System | LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (5143) |
| Effects of Intercropping of <i>Brassica chinensis</i> L. and <i>Tagetes patula</i> L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants | YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (5151) |
| Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides | WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160) |
| Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation | ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, <i>et al.</i> (5168) |
| Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China | ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, <i>et al.</i> (5176) |
| Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure | CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (5185) |
| Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings Area | JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, <i>et al.</i> (5193) |
| Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems | ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5201) |