

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展 陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓(1201)

全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展 孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙(1214)

湖泊水质参数遥感监测研究进展 王思梦, 秦伯强(1228)

淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展 赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超(1244)

长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应 吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋(1258)

中国土地利用碳排放变化及协调分区 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯(1267)

基于 STIRPAT 模型天津减排降碳协同效应多维度分析 刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛(1277)

基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势 佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧(1287)

浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 化学组分污染特征分析 周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳锋, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静(1297)

南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源 徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕(1310)

洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献 闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思(1319)

江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征 宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜(1328)

珠三角典型工业区挥发性有机物(VOCs)组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性 宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏(1336)

2000~2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变 孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧(1346)

港口自有移动源大气污染物排放清单 徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺(1357)

基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控 欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙(1368)

黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估 曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建(1378)

桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征 余悦, 邢新丽, 程敏, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华(1387)

广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析 陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成(1397)

宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评估 徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军(1407)

典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析 王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫(1416)

牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁(1429)

石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析 丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞(1440)

北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞(1452)

拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价 单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文(1465)

南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素 高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔(1475)

调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素 丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文(1484)

典型城市内河细菌组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析 谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晚艳, 郑蕾(1497)

滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算 郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中(1508)

窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制 曾少毅, 李坤权(1519)

高比表面硫脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附 闵炳坤, 李坤权(1528)

不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征 刘晨旭, 白晓慧(1537)

水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析 杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕(1542)

增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响 邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章(1553)

三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化 李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源(1562)

鄱阳湖平原直播稻 CH₄ 通量及其与 CO₂ 通量的综合温室效应 时元智, 崔远来, 才硕, 洪大林, 程婕(1572)

不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析 周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君(1583)

石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估 李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建清(1593)

南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价 杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清(1602)

三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析 石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然(1611)

兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析 康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(1620)

粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评估 王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨(1636)

三门峡某铝业厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳(1646)

某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价 王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东(1657)

化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制 马强, 卫泽斌, 吴启堂(1668)

再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制 林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞(1678)

长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评估 刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红(1686)

稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应 张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚(1698)

巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性 冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕(1706)

蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与翅果菊修复镉污染土壤的影响 陈敏妮, 袁小奇, 张李峰, 何川黔, 高波(1714)

地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议 王锐, 李瑜, 余京, 周皎, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(1727)

张家口市北新屯地区蔬菜种植区微量元素富集特征及成因分析 安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原(1735)

三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化 谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓(1748)

黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响 张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平(1758)

化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响 王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明(1768)

鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化 张丹, 彭双, 王丹青, 王-明, 林先贵(1780)

牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响 张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林(1792)

《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)

港口自有移动源大气污染物排放清单

徐小凡^{1,2}, 王宝庆^{1,2*}, 吴俊成^{1,2}, 李怡诺^{1,2}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300350)

摘要: 基于全面开展大气污染源排放清单编制工作的要求, 研究制定了天津市港口自有移动源排放清单. 对道路和非道路移动源各源类6种大气污染物建立了分辨率为3 km × 3 km的网格化排放清单, 并分析其污染物排放时空分布特征, 利用蒙特卡罗方法分析了清单的不确定性. 结果表明, 2020年港口自有移动源共排放PM₁₀ 148.22 t、PM_{2.5} 135.34 t、SO₂ 1 061.04 t、NO_x 4 027.16 t、CO 756.60 t和VOCs 237.07 t, 其中道路和非道路移动源污染物总排放量占移动源排放量的比例分别为6.66%和93.34%. 全港区自有道路移动源机动车污染物排放的主要贡献源是小型、中型、大型载客汽车(汽油)和重型载货汽车(柴油), 非道路移动源排放的各污染物的主要贡献源均是船舶和工程机械. 不确定性分析结果表明, 移动源总体不确定性范围为-13.3%~16.53%.

关键词: 港口; 移动源; 排放清单; 时空分布; 不确定性分析

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1357-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204226

Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory

XU Xiao-fan^{1,2}, WANG Bao-qing^{1,2*}, WU Jun-cheng^{1,2}, LI Yi-nuo^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. State Environment Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention, Tianjin 300350, China)

Abstract: Based on the comprehensive development of the emission inventory of air pollution sources, the emission inventory of self-owned mobile sources of Tianjin coastal ports was researched and formulated. In this study, a gridded emission inventory with a resolution of 3 km × 3 km was established for six types of air pollutants from road and non-road mobile sources. The spatial and temporal distribution characteristics of pollutant emissions were analyzed, and the uncertainty of the inventory was analyzed using the Monte Carlo method. The results showed that in 2020, the self-owned mobile sources of coastal ports emitted 148.22 t PM₁₀, 135.34 t PM_{2.5}, 1 061.04 t SO₂, 4 027.16 t NO_x, 756.60 t CO, and 237.07 t VOCs, of which the total emissions of road and non-road mobile sources accounted for 6.66% and 93.34% of the mobile source emissions, respectively. The main contributors to motor vehicle pollutant emissions from road mobile sources in the whole port area were small, medium, and large passenger vehicles (gasoline) and heavy trucks (diesel). The main contributors to the pollutants emitted by non-road mobile sources were ships and construction machinery. Uncertainty analysis results showed that the overall uncertainty of mobile sources ranged from -13.3% to 16.53%.

Key words: port; mobile sources; emission inventory; spatiotemporal distribution; uncertainty analysis

移动源大气污染物排放清单是指道路移动源和非道路移动源在一定的时间跨度和空间区域内向大气中排放的大气污染物的量的集合^[1], 其对精准分析污染物来源和时空分布特征, 提出更有效的减排措施, 从而实现大气环境的持续有效改善具有重要意义^[2]. 美国国家环保署于1970年开始发布测试的大气污染物排放因子, 并不断增加和更新进而建立了较为完善的排放因子库^[3], 于1990年开始建立国家污染物排放清单并每隔3 a更新一次. 2000年, Street等^[4]总结了1985~1997年亚洲的SO₂排放量和分布特征. 而相较于美国^[5]、加拿大^[6]和大多数欧洲国家^[7], 我国排放清单工作起步相对较晚^[8-10]. 自环境保护部2015年首次颁布第一批排放清单编制技术指南起^[11,12], 近几年相继发布了10余项, 同时也在多个城市开展了排放清单试点工作^[13-15]. 尽管这些工作取得了阶段性进展, 但仍存在源分类和估算方法精细化程度低^[16], 缺失本土化排放因子^[17]、时空分布和不确定性分析方法等问题, 因此排放清单工作仍需更为细致深入的研究.

从移动源大气污染物排放清单来看, Sallès等^[18]于1996年提出了一种道路交通排放源清单模型并将其应用于巴黎地区排放清单的建立. 2020年, Shahbazi等^[19]提出一种优化模型提高了普遍缺乏精确排放因子数据的Tehran地区排放清单的准确性. 张礼俊等^[20]采用适合各类非道路移动源污染物排放量的估算方法和排放因子, 建立了珠江三角洲地区2006年非道路移动源排放清单. Sun等^[8]、张意等^[21]和刘庚等^[22]分别建立了天津市道路和非道路移动源排放清单. 从港口大气污染物排放清单来看, Goldsworthy等^[23]通过对澳大利亚首都城市300 km半径范围内各地区船舶排放量进行估计, 表明船舶排放的大气污染物所占比例不容忽视. Fu等^[24]通过船上排放试验测量了7艘不同发动机功率的内河船舶的CO、HC、NO_x和PM排放, 获取中

收稿日期: 2022-04-19; 修订日期: 2022-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(21777076)

作者简介: 徐小凡(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染源排放清单, E-mail: 1442014806@qq.com

* 通信作者, E-mail: wbqchina@163.com

国大运河内河船舶的排放数据,结果表明,4种污染物中 NO_x 平均排放因子较高,是车载研究中的 1.4~4.3 倍. Zhang 等^[25] 通过其 2014 年南京龙潭集装箱港口货物装卸设备排放清单数据表明,货物装卸设备产生的 PM 和 HC 排放量超过港口的任何其他排放源. 针对港口大气污染物排放清单研究进展,目前港口移动源大气污染物排放清单的研究还很缺乏,同时存在道路移动源和非道路移动源未综合比较分析、船舶和港作机械分类不统一等问题^[26,27]. 因此本研究以港口为例通过道路移动源和非道路移动源结合分析,填补我国港口大气污染物排放清单污染源类不全面的空缺.

天津市是国务院批复确定的中国北方对外开放的门户,中国北方的航运中心,中国北方最大的港口城市、国际性综合交通枢纽、国家物流枢纽和北方国际航运核心区^[28]. 作为京津冀海上门户的天津港则是带动北方乃至中国发展的重要港口^[29],码头等级达 30 万吨级,航道水深 -22 m,拥有各类泊位 192 个,万吨级以上泊位 128 个. 2020 年货物吞吐量完成 4.35 亿 t,位居世界港口第九位;集装箱吞吐量突破 1 835 万标准箱,排名世界港口第八位. 2021 年货物吞吐量完成 5.30 亿 t,集装箱吞吐量突破 2 026.94 万标准箱. 2022 年仅一季度集装箱吞吐量已完成 462.70 万标准箱. 为响应 2017 年 4 月初,文献^[30-32] 对京津冀大气污染传输通道城市全面开展大气污染源排放清单编制工作的要求,建立天津市港口精确的移动源排放清单尤为重要.

本研究通过相关指南和文献^[30,31] 确定港口排放因子. 计算不同类型道路和非道路移动源大气污染物排放量,分析时空变化,使用 Oracle Crystal Ball 软件,开展蒙特卡罗模拟,参考 TRACE-P 清单的不确定度经验值,将活动水平和排放因子计算各参数的不确定性进行综合分析,以期为我国港口的空气质量管理 and 政策制定提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域与污染物

研究港口地处渤海湾西端,背靠雄安新区,辐射东北、华北和西北等内陆腹地,连接东北亚与中亚,将其分为 A、B、C、D 和 E 这 5 个港区,具体位置如图 1 所示. 截至 2019 年,研究区域所包含港区港口岸线总长 32.7 km,水域面积 336 km²,陆域面积 131 km². 研究建立了港口 2020 年自有移动源排放清单,大气污染物包括 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 、CO 和 VOCs 共 6 种污染物,其中道路移动源包括大、中、小、微型载客汽车和重、中、轻、微型载货

汽车,非道路移动源包括工程机械、小型通用机械、发电机组和船舶.

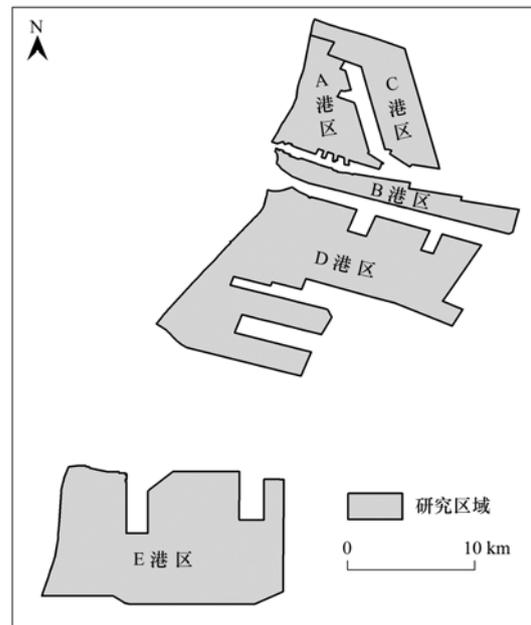


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Schematic of the research area

1.2 排放清单估算

1.2.1 排放量

道路移动源排放量按照公式(1)计算^[33].

$$E = P \times EF \times VKT \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中, E 为道路移动源排放量, t; P 为机动车保有量, 辆; EF 为基于行驶里程的污染物排放系数, $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$; VKT 为年均行驶里程, km.

非道路移动源中工程机械、小型通用机械和发电机组的排放量计算方法见式(2)^[33].

$$E = \sum_n (P_n \times G_n \times LF_n \times hr_n \times EF_n) \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中, E 为工程机械、小型通用机械和发电机组的排放量, t; n 为功率段, kW; P 为保有量, 台; G 为平均额定净功率, kW; LF 为负载因子; hr 为年使用小时数, h; EF 为污染物排放系数, $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$.

船舶的排放量计算方法见式(3)^[33].

$$E = \sum G \times LF \times hr \times EF \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中, E 为船舶的排放量, t; G 为船舶发动机(包括主机和辅机)额定净功率, kW; LF 为负荷系数; hr 为不同状态下(包括停泊和巡航)的航行小时数, h; EF 为污染物排放系数, $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$.

1.2.2 排放因子及相关参数确定

道路移动源污染物的排放因子通过文献^[30] 获取. 汽油机动车(微型、小型载客车和其它车辆)排放系数劣化系数(相对于 2014 年综合基准排放系

数)分国 1 前和国 1 ~ 国 5 标准进行计算,汽油含硫量排放修正因子 CO、VOCs 和 NO_x 分别取 0.90、0.96 和 0.95,柴油含硫量排放修正因子均取 1.

机动车尾气排放系数由基准排放系数修正获得^[20]:

$$EF = BEF \times \lambda \times \theta \quad (4)$$

式中, BEF 为基准排放系数,即在平均行驶工况、油品质量和环境条件下的车辆排放水平; λ 为劣化修正因子,即随行驶里程增加对车辆排放状况劣化和排放系数升高的影响; θ 为其他使用条件修正因子,即油品含硫量等对车辆排放状况的影响.

针对非道路移动源污染物,通过文献[31]获取排放因子,同样按照国 1 前和国 1 ~ 国 5 排放标准

取值确定出小型通用机械、工程机械 (<37、37 ~ 75、75 ~ 130 和 >130 kW) 和发电机组的排放因子并进行计算. 船舶主辅机污染物排放因子和负载系数通过文献[27]获取,巡航运行时主辅机负载系数分别取 0.8 和 0.13,停泊时主辅机负载系数分别取 0 和 0.17,排放因子具体数值见表 1.

1.2.3 活动水平数据获取与来源

移动源活动水平数据均由研究区域所在各公司填报后提供,活动水平调查内容和获取途径见表 2.

根据调查数据得港口自有机动车保有量共计 11 272 辆,年均行驶时间共计 5 470 937 h,具体数值见表 3. 从中可知,港区自有机动车主要分布在 A 和 B 港区,保有量分别占全港区机动车保有量的

表 1 船舶主辅机污染物排放因子/g·(kW·h)⁻¹

Table 1 Pollutant emission factors for main and auxiliary engines of ships /g·(kW·h)⁻¹

发动机类型	SO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	VOCs
主机	3.97	13.20	0.47	0.43	1.10	0.53
辅机	4.24	13.90	0.49	0.45	1.10	0.42

表 2 移动源活动水平调查内容及数据获取来源

Table 2 Contents of mobile source activity level survey and data acquisition sources

污染源	主要信息	具体调查内容	数据获取来源
道路移动源	机动车信息	不同公司各车型保有量和年均行驶时间(按车型、使用性质、燃油类型和排放标准等分类)	各公司填报
非道路移动源	基本信息	工程机械(<37、37~75、75~130 和 >130 kW)、发电机组、小型通用机械的保有量(<37 kW)、功率和年均使用小时数等;船舶参数(拖轮、油轮)和运行时间	各公司填报和集团提供

表 3 各港区自有机动车分车型活动水平

Table 3 Activity level of self-owned motor vehicles by type in each port area

车辆类型	A 港区		B 港区		C 港区		D 港区		E 港区		其他(港外)			
	保有量 / 辆	年均行驶时间/h	保有量 / 辆	年均行驶时间/h	保有量 / 辆	年均行驶时间/h	保有量 / 辆	年均行驶时间/h	保有量 / 辆	年均行驶时间/h	保有量 / 辆	年均行驶时间/h		
载客汽车	微型	汽油	400	5000	200	36 000	/	/	/	/	/	5	40 000	
		柴油	1	5000	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
	小型	汽油	4845	341 944	2 364	301 300	634	129 585	198	54 000	32	423 174	131	34 720
		柴油	13	70 808	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
		其它	5	5 000	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	中型	汽油	9	10 010	/	/	/	/	1	5 000	/	/	1	13 560
		柴油	10	23 500	3	17333	/	/	/	/	2	40 000	6	52 258
		其它	/	/	1	200	/	/	/	/	/	/	/	/
	大型	汽油	/	/	/	/	/	/	4	80 000	/	/	1	15 000
		柴油	36	111 240	/	/	8	106 187	/	/	1	50 000	/	/
		其它	/	/	2	3 960	/	/	/	/	/	/	/	/
	载货汽车	微型	汽油	3	10	3	30 317	/	/	/	/	/	2	25 000
柴油			2	13 500	3	12 004	/	/	/	/	/	/	/	/
轻型		汽油	9	36 500	6	47528	2	2 990	1	1 500	/	/	/	/
		柴油	66	82 571	65	55 501	4	1 620	4	4 500	/	/	/	/
中型		汽油	13	24 000	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
		柴油	266	58 800	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
重型		汽油	/	/	/	/	9	4 470	/	/	/	/	/	/
		柴油	1 297	1 206 156	567	121 420	/	/	/	/	/	/	/	/
		其它	37	1 767 771	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
合计		7 012	3 761 810	3214	625 563	657	244 852	208	145 000	35	513 174	146	180 538	

62.21%和28.51%,年均行驶时间分别占全港区年均行驶里程的68.76%和11.43%。根据车辆类型分析可知,全港区机动车均以小型载客汽车(汽油)为主,保有量占全港区机动车总量的72.78%,年均行驶时间占全港区总年均行驶里程的23.48%。其次,A和B港区重型载货汽车(柴油)保有量分别占各自港区机动车总量的18.50%和17.64%,年均行驶时间分别占全港区总年均行驶时间的22.05%和2.22%。

表4 各港区自有非道路移动机械活动水平

Table 4 Activity level of self-owned non-road mobile machinery in each port area

机械类型	功率分布 /kW	A 港区		B 港区		C 港区		D 港区		E 港区	
		保有量 /辆	年均使用 时间/h	保有量 /辆	年均使用 时间/h	保有量 /辆	年均使用 时间/h	保有量 /辆	年均使用 时间/h	保有量 /辆	年均使用 时间/h
小型通用机械	<37	/	/	25	82	/	/	12	120	/	/
	>37	/	/	/	/	1	2	1	40	/	/
发电机组	75~130	/	/	1	0	/	/	/	/	/	/
	>130	81	3 971	/	/	1	2	/	/	/	/
	<37	70	3 362	4	9 464	23	2 266	/	/	/	/
工程机械	37~75	96	8 914	3	360	7	820	10	2 000	2	1 680
	75~130	79	11 232	8	2 425	23	1 356	22	2 400	13	4 858
	>130	408	1 292 291	163	25 041	40	9 620	46	10 000	15	1 678
其它(自有船舶)	拖轮	保有量 38 艘				年均行驶时间 96 367 h					
	油轮	保有量 6 艘				年均行驶时间 60 000 h					

2 结果与讨论

2.1 排放清单

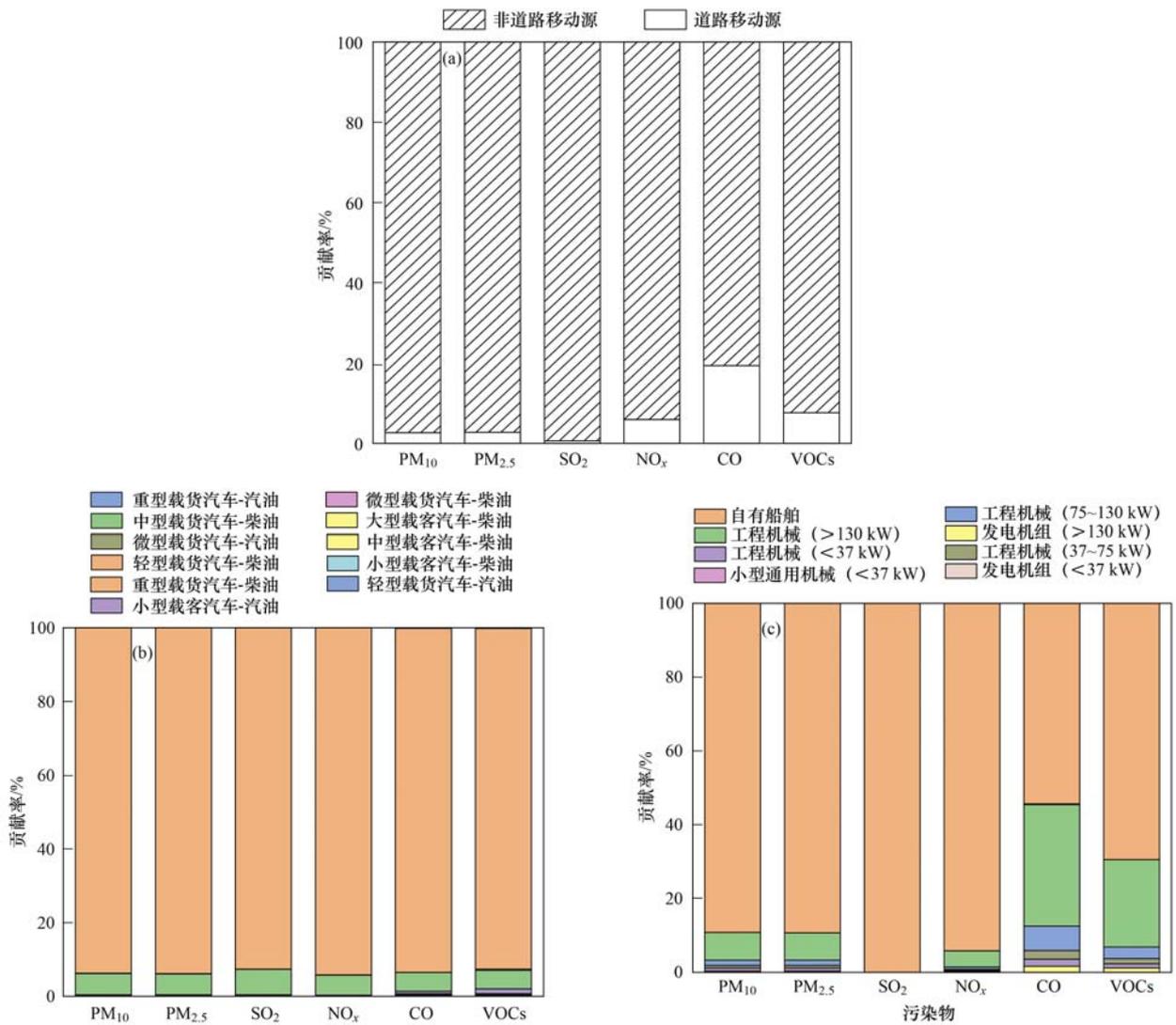
本研究结果显示,2020年天津市港口自有移动源共排放PM₁₀ 148.22 t、PM_{2.5} 135.34 t、SO₂ 1 061.04 t、NO_x 4 027.16 t、CO 756.60 t和VOCs 237.07 t。其中,道路移动源共排放PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO_x、CO和VOCs的量分别为4.01、3.74、7.10、239.87、146.90和18.19 t;非道路移动源共排放PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO_x、CO和VOCs的量分别为144.21、131.60、1 053.94、3 787.29、609.70和218.88 t。道路移动源排放主要贡献源是重型载货汽车(柴油),其次是小型、中型和大型载客汽车(汽油),其他车型贡献率较小,见图2(b)。非道路移动源的最大排放源均为自有船舶,除自有船舶外,A、B、C和D港区非道路移动源排放的各污染物的最大贡献源均是工程机械,其他非道路移动源贡献较小,见图2(c)。由此可以看出,将船舶和工程机械作为港口非道路移动源的减排措施的重点会具有较高的减排潜力和较好的减排效果。

针对二级源排放特征,2020年港口移动源大气排放6种污染物排放贡献率见图2(a)。从中可知,港口移动源污染物均主要由非道路移动源排放,其总排放量占移动源排放量的比例为93.34%,而自有

根据调查数据得港口自有非道路移动机械的保有量共计1 198辆,具体数值见表4。从中可知,全港区除船舶外,非道路移动机械主要分布在A和B港区,保有量分别占全港区保有量的63.60%和17.68%,年均使用时间分别占全港区总年均使用时间的94.68%和2.68%。根据港作机械类型分析可知,全港区均以工程机械为主,保有量占总自有非道路移动机械保有量的86.14%,年均使用时间占总自有非道路移动机械年均使用时间的89.64%。

道路移动源污染物总排放量占移动源排放量的比例仅为6.66%。主要原因在于非道路移动源的主要燃料为柴油和重油,具有使用年限长、耗油量高、污染物单机排放量大等特点^[34],因此作为港区的重要作业工具非道路移动源污染物排放贡献率较为突出。而对港口的电力、港机、集装箱码头、轮驳和物流发展等各单位排放特征分析得出,除自有船舶外,在所有单位中,物流发展的排放量最大。这一结果与研究区域港口作为我国主枢纽港和综合运输体系的重要枢纽的业务特征密切相关。同时与刘庚等^[22]所研究的天津市道路移动源是CO和VOCs的主要贡献源,非道路移动源是NO_x和PM₁₀的主要贡献源存在差异。

为进一步研究港口非道路移动源大气污染物排放现状,将本研究结果与国内部分代表性港口大气污染物排放情况进行对比分析,具体数据见表5。从中可知,国内港口作业机械排放的大气污染物中,NO_x排放量均远高于其他种类污染物,其中船舶排放的大气污染物中除NO_x外SO₂也为主要污染物。通过对天津港历年大气污染物排放数据对比可知,2013年大气污染水平较差,此后随着大气污染治理各项工作的展开,污染物排放量有了明显下降,2020年大气污染物排放总量分别占2013、2014和2018年6种污染物排放总量的4.26%、11.59%和



(b)小型载客汽车-汽油的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放贡献率为 0; (c)除自有船舶外,其他非道路移动源 SO₂ 排放贡献率为 0

图 2 港口各港区移动源大气污染物排放贡献率

Fig. 2 Contribution rate of air pollutant emissions from mobile sources in each port area

表 5 国内港口大气污染物排放数据对比

Table 5 Comparison of air pollutant emission data of domestic ports

研究区域	年份	研究对象	大气污染物排放量/t·a ⁻¹						吞吐量 ×10 ⁸ /t	文献
			PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x	CO	VOCs		
舟山港	2010	船舶	2 592.60	2 348.70	21 574.40	34 594.20	3 009.20	1 498.90	5.77	[35]
上海港	2010	船舶	4 600.00	3 700.00	35 400.00	57 300.00	4 900.00	/	6.53	[36]
		工程机械	/	130.00	5.80	2 900.00	800.00	400.00		
青岛港	2016	船舶	2 100.00	1 800.00	15 600.00	23 400.00	1 700.00	/	5.10	[37]
厦门港	2018	船舶	592.00	491.00	2816.00	10 544.00	17 55.00	/	2.17	[38]
珠海高栏港	2018	沿海船舶及远洋船舶	65.54	59.66	18.48	835.47	122.57	/	1.28	[39]
			5 412.00	4 922.00	60 507.00	72 704.00	5 716.00	/		[40]
			4 030.00	3 720.00	29 300.00	14 300.00	3 570.00	/	4.46	[41]
天津港	2016(上半年)	船舶	2 618.96	2 094.69	24 103.29	24 780.48	2 005.90	830.68	2.70	[42]
			2 040.00	1 820.00	14 530.00	28 610.00	2210.00	/	5.08	[43]
	2014	工程机械	801.90	791.90	189.50	2 039.40	1 857.90	626.20	5.40	[44]
天津港	2020	道路和非道路移动源	148.22	135.34	1 061.04	4 027.16	756.60	237.07	4.35	本研究

12.94%。由此可以看出近几年港口打造智慧港口和绿色港口工作成效明显。但 2020 年港口排放大气污

染物中,NO_x 仍为最主要污染物,占 6 种污染物排放总量的 63.27%,此外 SO₂ 和 CO 也为主要污染物,

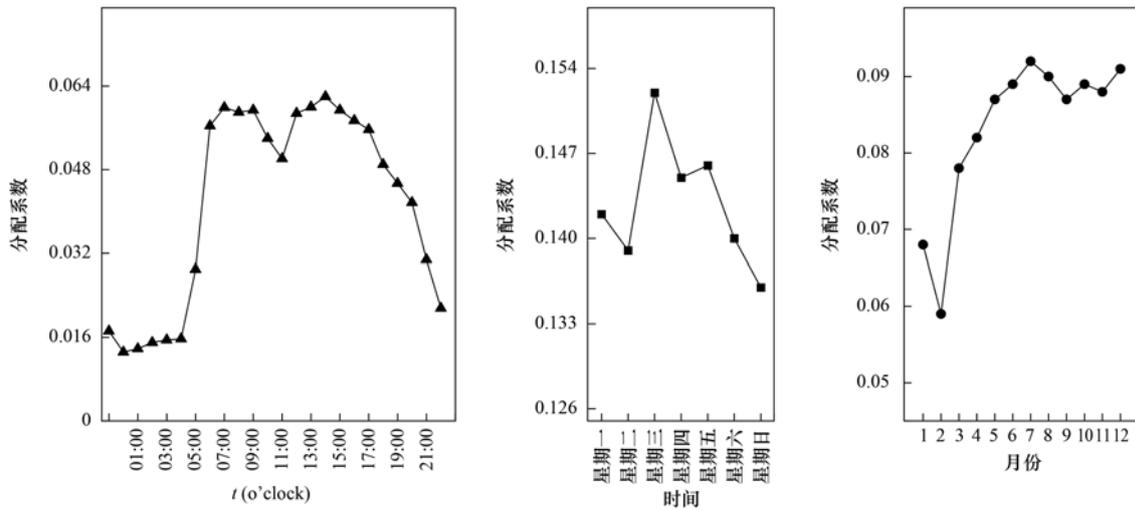


图 3 港口移动源大气污染物小时、日和月分配系数

Fig. 3 Hourly, daily, and monthly distribution coefficients of air pollutants from mobile sources

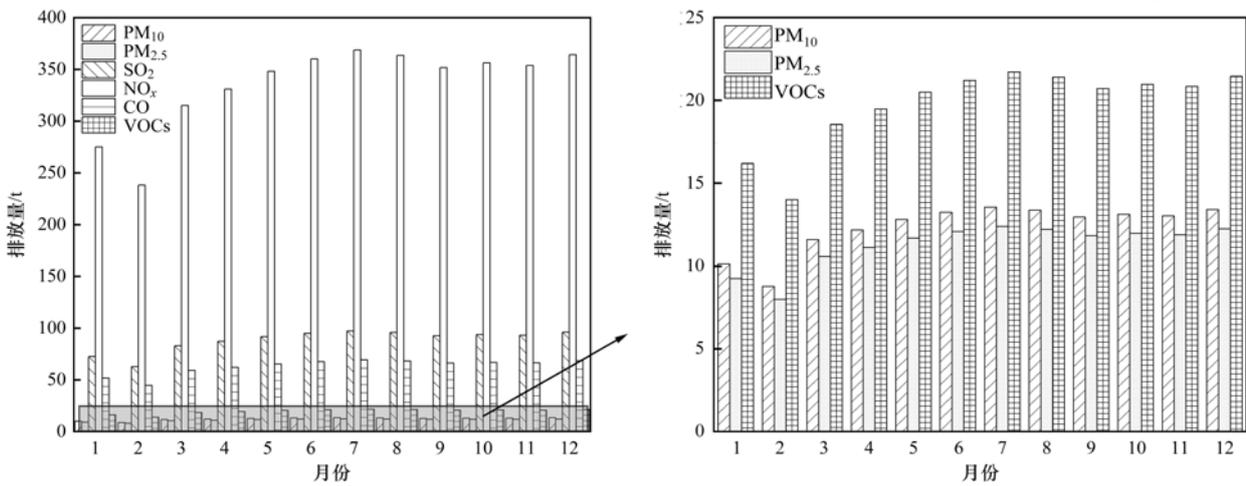
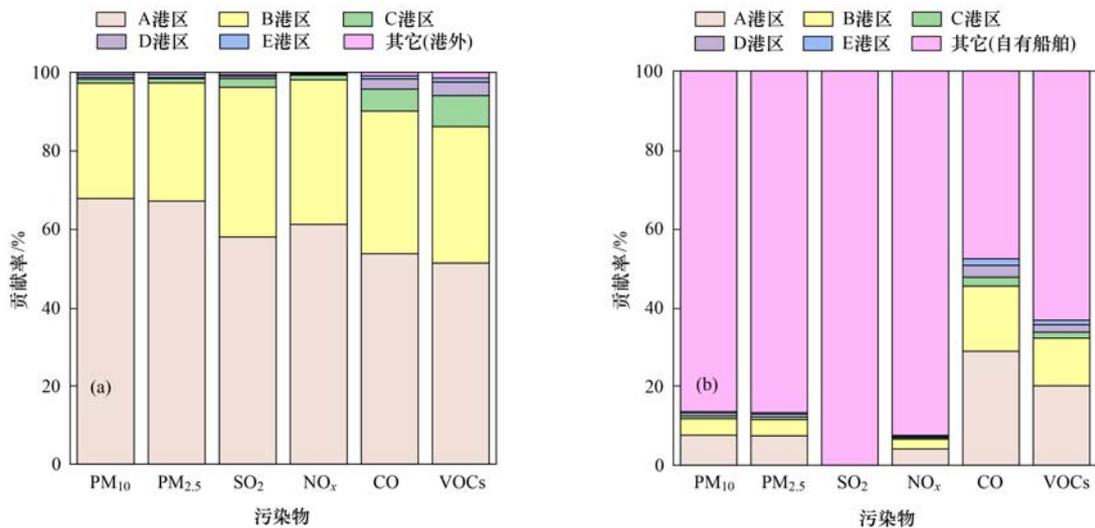


图 4 港口移动源大气污染物月排放量

Fig. 4 Monthly emissions of air pollutants from mobile sources in ports



(a) 道路移动源, (b) 非道路移动源

图 5 港口各港区移动源大气污染物排放贡献率

Fig. 5 Contribution rate of air pollutant emissions from mobile sources in each port area

分别占 6 种污染物排放总量的 16.67% 和 11.89%。

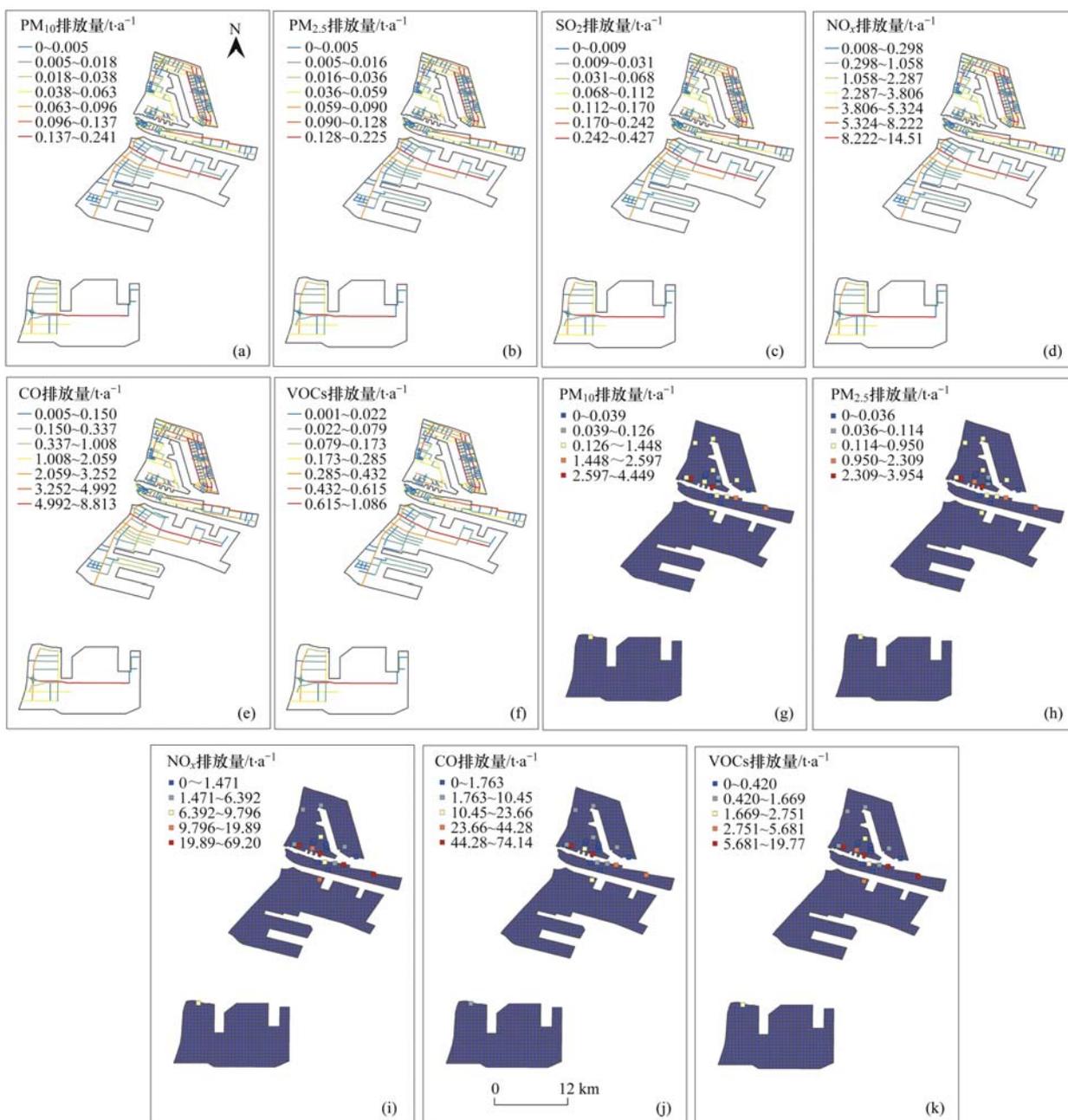
2.2 排放清单时空分布

2.2.1 时间变化

通过实地调查,对港口移动源的小时、日和月分配系数进行计算,结果如图 3 所示。可以看出,以时刻为单位,07:00~21:00 污染物排放较高,其中 11:00~12:00 具有一定的减小。结合 Huang 等^[45]的研究,分配系数呈现 V 形分别出现在中午和黎明前。主要原因在于这两个时间段是一天中人类活动频率最低的时期,同时前者还有大气边界层上升和风速增加等气候条件因素的影响。以天为单位,星期

三到星期五分配系数较大,周日分配系数最小,排放强度分布特征明显,工作日普遍大于非工作日。这主要是因为港口大部分集装箱吞吐工作都是集中在此时间段,车流量较大。

由于港口工作内容和工作量相对灵活的特殊性,以小时和天为单位的时空分布存在更高的不确定性,因此选择以月为例加以更深入的分析。2020 年港口自有移动源各污染物月排放量和时间变化见图 4。可见,6 种污染物排放月度变化状况具有一致性。6~8 月和 12 月各污染物排放贡献率较高,其中排放峰值出现在 7 月,1 月和 2 月各污染物排放贡献率较低,呈



(a)~(f)为道路移动源;(g)~(k)为非道路移动源

图 6 港口各港区移动源大气污染物排放空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of air pollutant emissions from mobile sources in port areas

现春夏秋高,冬季低的趋势.主要因为6~8月为社会生产的活跃期,而我国春节假期通常在公历2月,这与我国工作日与节假日工作习惯相符.

2.2.2 空间分布

污染物的空间分布差异是由其主要贡献源的空

间位置决定的^[22].通过本文建立的2020年港口移动源大气污染物的排放清单,结合ArcGIS的可视化功能,得到港口道路和非道路移动源线源路段各污染物分辨率为3 km × 3 km的空间分布规律.如图5和图6所示,港口各港区移动源污染排放呈现出显

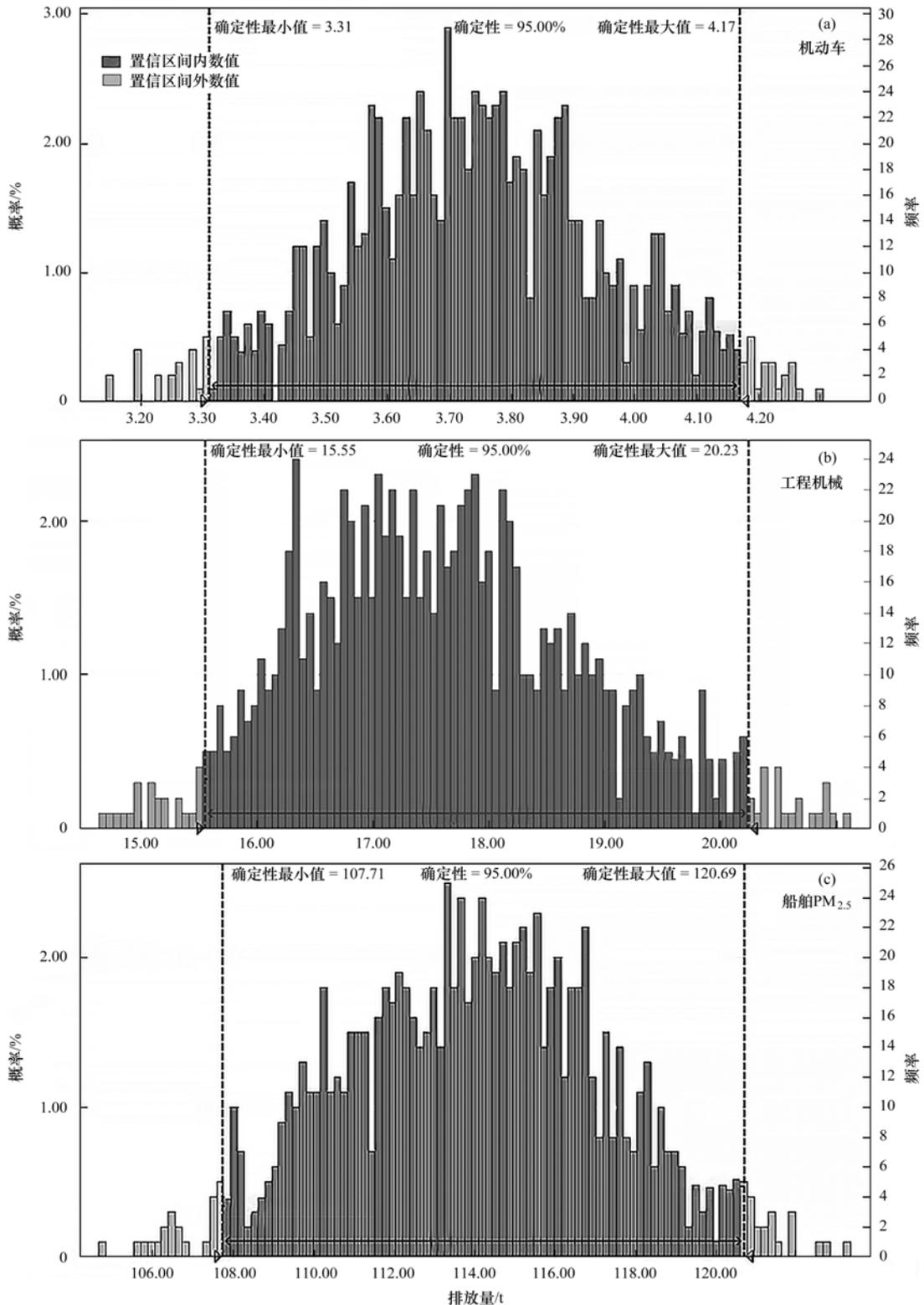


图7 不确定性分析示意

Fig. 7 Uncertainty analysis diagram

著的空间分布差别。

针对道路移动源空间排放特征,由 2020 年港口各港区道路移动源排放贡献率图 5(a) 和图 6(a) ~ 6(f) 可知,6 种污染物排放量最大的港区均为 A 港区,PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO_x、CO 和 VOCs 的贡献率分别为 67.58%、67.11%、58.03%、61.15%、53.66% 和 51.24%。主要原因在于作为港口生产作业的主体港区,A 港区约占天津市沿海港口现有陆域面积的 1/3,承担了天津市沿海港口一半左右的货物吞吐量,除水运方式以外,A 港区的公路集疏运量占 A 港区集疏运总量的 85% 以上^[46]。在此基础上,根据每种车型的总排放量和每种车型在不同道路上的卡口数据,进一步针对不同道路类型(主干路、次干路、支线和匝道)排放进行分析见图 5(a),结果表明港口道路移动源贡献率符合从主干路、次干路和支线到匝道依次减小的趋势。与道路移动源相比,非道路移动源空间排放特征相对复杂^[47],从 2020 年港口各港区非道路移动源大气污染物排放贡献率图 5(b) 和图 6(g) ~ 6(k) 中可以看出,自有船舶 PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO_x、CO 和 VOCs 的贡献率分别为 86.38%、86.63%、100.00%、92.44%、47.69% 和 63.18%。除自有船舶外,最大排放源均为 B 港区,PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x、CO 和 VOCs 的贡献率分别为 7.60%、7.48%、4.15%、28.95% 和 20.19%,第二大排放源均为 B 港区,PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x、CO 和 VOCs 的贡献率分别为 4.21%、4.10%、2.47%、16.56% 和 12.13%。

2.3 不确定性分析

研究过程中已对获取的活动水平数据通过横向纵向比较等多种方式仔细审核数据的合理性,减少数据的不确定性。尽管如此,依然存在部分难以避免的不确定性因素。以下详细讨论移动源的不确定性来源。

(1) 此次研究中污染物各源类的排放量是通过选取代表性的排放因子和活动水平数据计算得出,因此,不确定性主要来源于活动水平和排放因子两个方面,而排放因子部分数据或选取固定的数值,或通过多个参数和公式计算得到,存在一定的不确定性。

(2) 非道路移动源中工程机械、发电机组、小型通用机械的空间分配,依据企业经纬度确定点位,按照点数据进行空间分配,实际上是面数据,这也增加了清单的不确定性。

(3) 非道路移动源中船舶计算时使用的主机功率和辅机功率使用从已有研究中获得的公式进行拟合,主辅机功率比例、主辅机负荷系数和污染物的

主辅机排放系数从已有研究中获得,存在一定的不确定性。

为评估排放清单的不确定性,将活动水平、排放因子和排放因子计算各参数的不确定性进行综合分析。使用 Oracle Crystal Ball 软件,开展蒙特卡罗模拟,其不确定度参考 TRACE-P 清单的经验值;量化随机误差时使用 95% 的置信区间,将累计概率密度为 2.5% 对应的排放量作为排放量的下限,97.5% 对应的值为排放量的上限,经 10 000 次重复计算,获得了港口集团移动源 6 项污染物的排放清单的不确定性,结果表明,移动源总体不确定性范围为 -13.3% ~ 16.53%,图 7 分别为对污染物排放量贡献率较高的机动车、工程机械和船舶 PM_{2.5} 不确定性分析结果,从中可知,机动车、工程机械和船舶 PM_{2.5} 排放量确定性为 95% 的置信区间分别为 3.31 ~ 4.17、15.55 ~ 20.23 和 107.71 ~ 120.69 t。因此,对于本研究针对港口集团的排放清单工作不确定性相对较小,数据具有高可靠性,可为相关研究和管理决策提供参考和支撑^[48]。

3 结论

(1) 2020 年天津市港口自有移动源共排放 PM₁₀ 148.22 t、PM_{2.5} 135.34 t、SO₂ 1 061.04 t、NO_x 4 027.16 t、CO 756.60 t 和 VOCs 237.07 t。其中,自有道路移动源污染物总排放量占移动源排放量的比例为 6.66%,自有非道路移动源污染总排放量占移动源排放量的比例为 93.34%。

(2) 港口自有道路移动源 6 种污染物的最大贡献源均是 A 港区。其中,自有机动车污染物排放的主要贡献源是重型载货汽车(柴油),其次是小型、中型和大型载客汽车(汽油)。

(3) 港口自有非道路移动源中,除自有船舶外,6 种污染物最大排放源均为 A 港区,第二大排放源均为 B 港区。A、B、C 和 D 港区非道路移动源排放的各污染物的最大贡献源均是工程机械,其他非道路移动源贡献较小。其中,E 港区的非道路移动源全部是工程机械。

(4) 蒙特卡罗模拟表明,移动源总体不确定性范围为 -13.3% ~ 16.53%。机动车、工程机械和船舶 PM_{2.5} 排放量确定性为 95% 的置信区间分别为 3.31 ~ 4.17、15.55 ~ 20.23 和 107.71 ~ 120.69 t。

参考文献:

- [1] 张立斌,黄凡,张银菊,等. 监利县大气污染源排放清单及特征研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(9): 182-189.
Zhang L B, Huang F, Zhang Y J, et al. Emission inventory and characteristics of atmospheric pollution sources in Jianli county [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(9): 182-

- 189.
- [2] 陶双成. 关中城市群道路移动源污染物排放清单与减排策略研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [3] USEPA (US Environmental Protection Agency). AP-42: Compilation of Air Emissions Factors [EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-Compilation-air-emissions-factors>, 2009-10-14.
- [4] Streets D G, Tsai N Y, Akimoto H, *et al.* Sulfur dioxide emissions in Asia in the period 1985-1997 [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(26): 4413-4424.
- [5] USEPA (US Environmental Protection Agency). 2002 National Emissions Inventory Data & Documentation [EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/pollutant-emissions-summary-files-earlier-neis>, 2007-05-30.
- [6] Skeaff J M, Dubreuil A A. Calculated 1993 emission factors of trace metals for Canadian non-ferrous smelters [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(10): 1449-1457.
- [7] van der Gon H D, van het Bolscher M, Visschedijk A, *et al.* Emissions of persistent organic pollutants and eight candidate POPs from UNECE-Europe in 2000, 2010 and 2020 and the emission reduction resulting from the implementation of the UNECE POP protocol [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(40): 9245-9261.
- [8] Sun S D, Zhao G, Wang T, *et al.* Past and future trends of vehicle emissions in Tianjin, China, from 2000 to 2030 [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **209**: 182-191.
- [9] 高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 等. 河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3663-3675.
- Gao D D, Yin S S, Gu X K, *et al.* Vehicle air pollutant emission inventory and characterization in Henan province from 2016 to 2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3663-3675.
- [10] 田俊杰, 丁祥, 安静宇, 等. 长三角区域人为源挥发性有机物高分辨率排放清单 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 58-65.
- Tian J J, Ding X, An J Y, *et al.* High-resolution emission inventory of reactive volatile organic compounds from anthropogenic sources in the Yangtze River delta region [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 58-65.
- [11] 周咪咪. 山东省人为源大气污染物排放清单的建立及污染特征研究[D]. 济南: 济南大学, 2021.
- [12] 周文强. 运城市大气污染物时空分布特征与潜在源区研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- [13] 李成. 中国非道路移动源排放及未来趋势研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [14] 唐倩, 郑博, 薛文博, 等. 京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1591-1599.
- Tang Q, Zheng B, Xue W B, *et al.* Contributors to air pollutant emission changes in autumn and winter in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1591-1599.
- [15] 杨添棋, 王洪昌, 张辰, 等. 京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO₂ 协同减排效益评估 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 5315-5325.
- Yang T Q, Wang H C, Zhang C, *et al.* Carbon dioxide mitigation co-effect analysis of structural adjustment measures in the “2+26” cities in the Jing-Jin-Ji and its surroundings [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5315-5325.
- [16] 潘春梅, 朱翔, 王健, 等. 大气污染源排放清单研究进展 [J]. *环境科学导刊*, 2020, **39**(4): 72-78.
- Pan C M, Zhu X, Wang J, *et al.* Research progress on emission inventory of air pollution sources [J]. *Environmental Science Survey*, 2020, **39**(4): 72-78.
- [17] 刘欢, 商轶, 金欣欣, 等. 船舶排放清单研究方法及进展 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(1): 1-12.
- Liu H, Shang Y, Jin X X, *et al.* Review of methods and progress on shipping emission inventory studies [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(1): 1-12.
- [18] Sallès J, Janischewski J, Jaecker-Voirol A, *et al.* Mobile source emission inventory model. Application to Paris area [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 1965-1975.
- [19] Shahbazi H, Hosseini V. Impact of mobile source emission inventory adjustment on air pollution photochemical model performance [J]. *Urban Climate*, 2020, **32**, doi: 10.1016/j.uelim.2020.100618.
- [20] 张礼俊, 郑君瑜, 尹沙沙, 等. 珠江三角洲非道路移动源排放清单开发 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 886-891.
- Zhang L J, Zheng J Y, Yin S S, *et al.* Development of non-road mobile source emission inventory for the Pearl River Delta region [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 886-891.
- [21] 张意, Michel A, 李东, 等. 天津市非道路移动源污染物排放清单开发 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4447-4453.
- Zhang Y, Michel A, Li D, *et al.* Development of a non-road mobile source emissions inventory for Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4447-4453.
- [22] 刘庚, 孙世达, 孙露娜, 等. 天津市 2017 年移动源高时空分辨率排放清单 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4470-4481.
- Liu G, Sun S D, Sun L N, *et al.* Mobile source emission inventory with high spatiotemporal resolution in Tianjin in 2017 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4470-4481.
- [23] Goldsworthy L, Goldsworthy B. Modelling of ship engine exhaust emissions in ports and extensive coastal waters based on terrestrial AIS data - An Australian case study [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, **63**: 45-60.
- [24] Fu M L, Ding Y, Ge Y S, *et al.* Real-world emissions of inland ships on the Grand Canal, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 222-229.
- [25] Zhang Y, Peng Y Q, Wang W, *et al.* Air emission inventory of container ports' cargo handling equipment with activity-based “bottom-up” method [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, **9**(7): 1-9.
- [26] 庞凯莉, 张凯山, 马帅, 等. 中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1132-1142.
- Pang K L, Zhang K S, Ma S, *et al.* Analysis of activity and its emissions trend for construction equipment in China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1132-1142.
- [27] 邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 等. 结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4338-4347.
- Qiu H, Liu D T, Wu Y Z, *et al.* Investigating the pollutants of marine shipping emissions along the East China Sea by combing in-situ measurements and automatic identification system [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4338-4347.
- [28] 李明瑜. 天津北方国际航运中心竞争力研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2019.
- [29] 张鹏. 基于深度学习的天津港集装箱吞吐量预测研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2021.
- [30] 中华人民共和国环境保护部. 关于开展京津冀大气污染传输通道污染源排放清单编制工作的通知 [S]. 2017.
- [31] 中华人民共和国环境保护部. 道路机动车大气污染物排放清

- 单编制技术指南(试行)[S]. 2014.
- [32] 中华人民共和国环境保护部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[S]. 2014.
- [33] 贺克斌, 张强, 王书肖. 城市大气污染源排放清单编制技术手册[J]. 2018.
- [34] 史双昕, 杨文龙, 董亮, 等. 我国移动污染源废气排放执法监管体系研究[A]. 见: 第二十五届大气污染防治技术研讨会论文集[C]. 西安: 中国环境科学学会, 2021.
- [35] 尹佩玲, 黄争超, 郑丹楠, 等. 宁波-舟山港船舶排放清单及时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 27-37.
Yin P L, Huang Z C, Zheng D N, *et al.* Marine vessel emission and its temporal and spatial distribution characteristics in Ningbo-Zhoushan Port [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 27-37.
- [36] 谭华, 刘娟, 沈寅, 等. 码头港作机械大气污染物排放清单研究[J]. 环境科学与管理, 2013, **38**(6): 82-87, 102.
Tan H, Liu J, Shen Y, *et al.* Emission inventory of air pollutants from cargo handling equipments[J]. *Environmental Science and Management*, 2013, **38**(6): 82-87, 102.
- [37] 吕建华, 付飞, 左华, 等. 青岛市船舶废气排放清单及应用[J]. 环境保护科学, 2019, **45**(5): 107-115.
Lyu J H, Fu F, Zuo H, *et al.* Ship emission inventory and its application in Qingdao [J]. *Environmental Protection Science*, 2019, **45**(5): 107-115.
- [38] 王坚, 黄屋, 刘艳英, 等. 厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3572-3580.
Wang J, Huang C, Liu Y Y, *et al.* Vessels' air pollutant emissions inventory and emission characteristics in the Xiamen emission control area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3572-3580.
- [39] 李明明, 周竹军. 珠海高栏港船舶大气污染物排放清单研究[J]. 中国海事, 2021, (2): 54-56.
Li M M, Zhou Z J, *et al.* Research on ship air pollutant emission list in Gaolan port of Zhuhai [J]. *China Maritime Safety*, 2021, (2): 54-56.
- [40] 宋亚楠. 内河和近海船舶排放特性及排放清单研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [41] Chen D S, Zhao Y H, Nelson P, *et al.* Estimating ship emissions based on AIS data for port of Tianjin, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **145**: 10-18.
- [42] 张安民, 刘禹, 张殿君, 等. 基于 GIS 的天津港船舶大气污染空间分布规律[J]. 测绘科学技术学报, 2018, **35**(6): 622-626, 632.
Zhang A M, Liu Y, Zhang D J, *et al.* The spatial distribution of ship's atmospheric pollutants based on GIS in Tianjin port [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2018, **35**(6): 622-626, 632.
- [43] Yang L, Zhang Q J, Zhang Y J, *et al.* An AIS-based emission inventory and the impact on air quality in Tianjin port based on localized emission factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **783**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146869.
- [44] Zhang F. Study on the inventory of air pollutants in ports of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, **330**(3), doi: 10.1088/1755-1315/330/3/032111.
- [45] Huang Y Y, Yan Q W, Zhang C R. Spatial-temporal distribution characteristics of PM_{2.5} in China in 2016 [J]. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2018, **2**(2), doi: 10.1007/s41651-018-0019-5.
- [46] 王晶. 天津港北疆港区港内集装箱运输分析与评价[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [47] 王文鹏, 王占祥, 李继祥, 等. 兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1315-1327.
Wang W P, Wang Z X, Li J X, *et al.* Gridded emission inventories of major criteria air pollutants and source contributions in Lan-Bai metropolitan area, northwest China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1315-1327.
- [48] 乔琦, 白璐, 刘丹丹, 等. 我国工业污染源产排污核算系数法发展历程及研究进展[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(8): 1783-1794.
Qiao Q, Bai L, Liu D D, *et al.* Development and research progress of pollutant generation and discharge coefficients for industrial pollution sources in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(8): 1783-1794.

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-cla, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)