

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.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析 方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)

基于在线观测的天津市 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐逸, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)

2017~2018年北京大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征 李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)

北京南部城区 PM_{2.5} 中碳质组分特征 董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)

成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析 冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)

南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源 谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)

2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)

保定市大气污染变化趋势及特征 苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)

郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势 卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)

郑州市少数民族运动会期间 O₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估 赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)

我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征 柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)

典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响 张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)

不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及其减排分析 张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)

天津市2017年移动源高时空分辨率排放清单 刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)

四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征 徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)

抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选 李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)

宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征 张军, 梁青芳, 高煜 (4504)

潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估 秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)

泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析 韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)

长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素 江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)

沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征 王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)

基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估 冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)

降水空间异质性和非点源关键源区识别面积变化的影响 高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)

硅藻群落指示的近50年来大理西湖湖泊生态系统演变规律 张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)

海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征 王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)

内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算 王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)

透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响 姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)

铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能 梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)

纳米 Cu⁰@Fe₃O₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制 石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)

紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制 余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬煜, 杜尔登, 郑璐 (4626)

污水生物处理工艺低温下微生物种群结构 尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐焱, 杨敏 (4636)

不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析 陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文焯 (4644)

全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析 齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)

不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性 袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)

潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应 吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)

不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征 孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)

酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响 张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)

稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响 陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)

解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氮挥发 杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)

外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响 霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾纭, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)

水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期 邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)

铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价 周艳, 王金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)

浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势 魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)

重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析 王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)

重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价 彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)

《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)

天津市 2017 年移动源高时空分辨率排放清单

刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧*

(南开大学环境科学与工程学院, 天津市城市交通污染防治研究重点实验室, 天津 300071)

摘要: 移动源已成为城市地区大气污染的主要贡献源. 已有研究多关注道路移动源(机动车)或非道路移动源(工程机械、农业机械、船舶、铁路内燃机车和民航飞机)中单一源类的排放, 欠缺对移动源总体排放特征的把握. 本研究提出了移动源高时空分辨率排放清单的构建方法, 据此建立了天津市 2017 年移动源排放清单, 并分析其排放构成与时空特征. 结果表明, 天津市移动源 CO、VOCs、NO_x 和 PM₁₀ 的排放量分别为 18.30、6.42、14.99 和 0.84 万 t. 道路移动源是 CO 和 VOCs 的主要贡献源, 占比分别为 85.38% 和 86.60%. 非道路移动源是 NO_x 和 PM₁₀ 的主要贡献源, 占比分别为 57.32% 和 66.95%. 从时间变化来看, 移动源所有污染物排放 2 月均为最低, CO 和 VOCs 在 10 月排放最高, 而 NO_x 和 PM₁₀ 则在 8 月排放最高. 节假日(如春节和国庆节等)对移动源排放的时间变化影响显著. 从空间分布来看, CO 和 VOCs 排放主要集中于城区和车流量大的公路(高速公路和国道)上, NO_x 和 PM₁₀ 在城区与港区均具有较高排放强度. 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. 本研究可为天津市大气污染的精细化管理和空气质量模拟提供数据支撑, 同时可为其他地区移动源排放清单的建立提供方法参考.

关键词: 移动源; 排放清单; 排放因子; 空间分布; 天津

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4470-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003215

Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017

LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, JIN Jia-xin, FANG Jian-xu, SONG Peng-fei, WANG Ting, WU Lin, MAO Hong-jun*

(Tianjin Key Laboratory of Urban Transport Emission Research, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Mobile source emissions have become a major contributor to air pollution in urban areas. Most of the previous studies focus on the emissions from a single source such as on-road mobile source (vehicles) or non-road mobile source (construction machinery, agricultural machinery, ships, railway diesel locomotives, aircraft), but few studies investigate the mobile source emissions as a whole. In this study, we introduced a method for developing mobile source emission inventory with high spatiotemporal resolution, and applied this method in Tianjin in 2017 to analyze the emission compositions and spatiotemporal characteristics there. The results showed that the CO, VOCs, NO_x, and PM₁₀ emissions from the mobile sources were 183.03, 64.18, 149.85, and 8.36 thousand tons, respectively. The on-road mobile source was the main contributor to CO and VOCs emissions, accounting for 85.38% and 86.60%, respectively. The non-road mobile source was the main contributor to NO_x and PM₁₀ emissions, accounting for 57.32% and 66.95%, respectively. According to the temporal distributions, the mobile source emissions were lowest in February for all pollutants. Moreover, they were highest in October for CO and VOCs and in August for NO_x and PM₁₀. Holidays (such as Spring Festival and National Day) have a significant impact on the temporal distribution of the mobile source emissions. According to the spatial distributions, the CO and VOCs emissions were concentrated in urban areas and roads with heavy traffic flow (highways and national highways), and the NO_x and PM₁₀ were concentrated in urban areas and port areas. The spatial distributions of different pollutants were determined by the location of their major contributors. This study can provide the required data for fine air pollution control and air quality simulation in Tianjin. Moreover, this method can be applied to the other areas where a mobile source emission inventory needs to be developed.

Key words: mobile source; emission inventory; emission factor; spatial distribution; Tianjin

改革开放以来,随着我国城市化水平的不断提升,各类交通运输工具以及非道路移动机械的保有数量增长迅速,其所带来的排放已成为我国城市地区大气污染的主要来源,引发了灰霾和光化学烟雾等诸多环境问题^[1]. 这些由发动机牵引,能够移动的大气污染源被统称为移动源^[2]. 移动源可分为道路移动源与非道路移动源^[3]. 道路移动源通常指机动车,可细分为载客车、载货车与摩托车^[4]. 非道路移动源涵盖的子源则更为多样,通常包括工程机械、

农业机械、船舶、铁路内燃机车和民航飞机等^[5]. 源解析结果表明,移动源在我国部分城市已成为 PM_{2.5} 的首要来源^[6]. 因此,针对移动源排放开展系统精细地量化评估就显得尤为紧迫与必要.

收稿日期: 2020-03-21; 修订日期: 2020-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41705080); 国家重点研发计划项目(2017YFC0212105); 天津市自然科学基金项目(18JCYBJC23700)

作者简介: 刘庚(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市移动源的排放与控制, E-mail: 1325946113@qq.com

* 通信作者, E-mail: hongjun_mao@hotmail.com

移动源排放清单用以定量描述特定地理区域(国家、省份和城市)在特定时期内(年度、季度和月度)由移动源排放到大气中的污染物的种类与数量,既是大气污染防治政策制定的重要依据,也是空气质量模型的基础数据.以往研究中,对道路移动源排放关注较多,在排放因子、活动水平和计算方法等方面均较为成熟.研究人员在国家^[7]、区域^[8]、省份^[9]和城市^[10]等不同层级上建立了机动车排放清单.李荔等^[11]基于 COPERT 模型,结合改进的“标准道路长度”方法和拥堵延时指数,讨论了江苏省 2015 年机动车排放的时空特征.陶双成等^[12]采用 MOVES 模型模拟本地化排放因子,以 2012 年为基准年建立了关中城市群机动车常规和非常规气态污染物排放清单,分析了不同车型和不同城区的机动车排放分担状况.这些研究探讨了机动车排放的结构、演变和分布,为机动车污染的科学防治提供了重要依据.与道路移动源相比,非道路移动源的研究起步较晚,控制水平相对落后,防治政策尚不完善.非道路移动源涵盖种类较多,多数研究只关注其中的一种或少数几种源的排放状况.杨静等^[13]使用劳氏船级社数据库和船舶自动识别系统,估算了深圳市 2010 年船舶排放量,并利用船舶真实活动轨迹建立了高分辨率空间分配因子和时间特征谱.鲁君等^[14]借助 NONROAD 模型,编制了上海市和杭州市 2014 年非道路移动机械大气污染物排放清单,涵盖了工程机械、港作机械、场内机械、农用机械和地勤设备.也有部分研究针对非道路移动源的总体排放状况开展分析.张礼俊等^[15]讨论了各类非道路移动源适用的排放估算方法,并搜集整理了相关排放因子,建立了珠三角地区 2006 年非道路移动源排放清单.徐文文等^[16]通过相关资料调研和问卷调查等方法获取江苏省非道路移动源活动水平数据,计算了该地区 2015 年非道路移动源大气污染物排放情况.这些研究涵盖的非道路移动源类别均相对较全.然而,目前非道路移动源活动水平搜集与排放因子实测工作尚不够完善,所建立清单的准确度和精细度仍有待提升.

尽管已有研究对道路移动源和非道路移动源的排放均有所涉及,但将两类源相结合,考察移动源整体排放状况的研究却非常少见.张景文等^[3]建立的南昌市移动源排放清单,同时涵盖了道路移动源和非道路移动源,为分析移动源的整体排放状况提供了有益参考,但该清单在时空精度等方面仍有提升空间.例如,该研究以区域 GDP 为依据进行非道路移动源排放的空间分配,此结果显然难以满足空气质量模型的数据精度要求.

天津市地处华北平原,是环渤海地区的经济中心.近年来,天津市交通运输工具以及非道路移动机械拥有量增长迅速,移动源已成为当地大气污染的重要来源^[17].已有研究针对天津市道路移动源^[18]与非道路移动源^[5]分别建立了排放清单,但对移动源排放的总体认识仍然欠缺.本研究基于文献^[19],结合已有研究成果,提出移动源高时空分辨率排放清单的构建方法,综合调查数据、统计数据和相关研究数据,建立天津市 2017 年移动源排放清单,涵盖 CO、VOCs、NO_x 和 PM₁₀ 共 4 类污染物,讨论了移动源的排放构成及其月度变化规律,并给出了空间分辨率为 0.01°×0.01°的移动源网格化排放清单,以期为当地大气污染的精细化管控和空气质量模拟提供数据支撑,并为其他地区移动源排放清单的建立提供方法参考.

1 材料与方法

1.1 移动源排放计算

移动源排放量为道路移动源排放量与非道路移动源排放量之和,公式如下:

$$E_{\text{TTL},p} = E_{\text{on},p} + E_{\text{non},p} \quad (1)$$

式中, $E_{\text{TTL},p}$ 、 $E_{\text{on},p}$ 和 $E_{\text{non},p}$ 分别指移动源、道路移动源和非道路移动源污染物 p 的排放量,单位为 t.以下将分别阐述道路移动源与非道路移动源排放的计算方法.

1.2 道路移动源排放计算

道路移动源主要指机动车,排放计算采用以下公式:

$$E_p = \sum_{i,j,h} \text{VP}_{i,j,h} \times \text{VKT}_i \times \text{EF}_{i,j,h,p} \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中, E 为排放量,t; VP、VKT 和 EF 分别为机动车保有量、年均行驶里程和排放因子,单位分别为辆、km 和 $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$; i 、 j 和 h 分别表示机动车的车辆类型(9 类:微型载客车、小型载客车、中型载客车、大型载客车、微型载货车、轻型载货车、中型载货车、重型载货车、摩托车)、燃料种类(3 种:汽油、柴油、其他)和排放标准(6 个阶段:国 I 前、国 I、国 II、国 III、国 IV、国 V); p 为污染物种类.

保有量信息的详实与否决定了机动车排放估算的精细化程度.然而,我国公开的统计数据中,通常只提供分车辆类型(i)的机动车保有量,缺乏燃料种类(j)和排放标准(h)的相关信息,难以支撑精细化的排放清单编制.本研究采用了 Lang 等^[8]提出的方法对车队构成状况进行模拟,公式为:

$$VP_{i,j,h} = \begin{cases} \sum_y N_{i,j,h,y}, & (h \neq \text{国 I 前}), \\ VP_{i,j} - \sum_{h=\text{国 I}} \sum_y N_{i,j,h,y}, & (h = \text{国 I 前}). \end{cases} \quad (3)$$

式中, y 为排放标准执行时段中的某一年份; N 为该年份的新车注册量. 对于不同的车辆类型和燃料种类, 排放标准的执行时段存在差异. 例如, 对于汽油小型载客车而言, 其国 I 排放标准的执行时段为 2000 年 7 月 1 日至 2005 年 6 月 30 日. 公式(3)中, 保有量(表 1)和新车注册量数据来自文献[20], 燃料种类数据来自文献[21], 不同燃料车型的排放标准执行时段来自文献[1].

年均行驶里程受诸多社会经济因素的影响, 在不同城市存在一定差异. 例如, 微型与小型载客车的年均行驶里程值与当地的汽车拥有水平(通常以千人汽车保有量来衡量, 单位: 辆·千人⁻¹)呈反比关系^[22], 这意味着千人汽车保有量较高的地区, 年均行驶里程会相对较低. 文献[19]中推荐了不同车型的年均行驶里程值, 这些推荐值代表了全国平均的机动车活动水平. 但在应用至特定地区时, 还应充分考虑当地的区域交通状况. 基于文献[19]推荐的年均行驶里程值和天津市已有研究^[18,23], 确定不同车辆类型的年均行驶里程的取值(表 1).

表 1 2017 年天津市机动车保有量、
年均行驶里程和平均速度

Table 1 Vehicle population, annual average vehicle kilometers travelled, and average speeds in Tianjin in 2017

车辆类型	保有量/辆	年均行驶里程/km	平均速度 /km·h ⁻¹
微型载客车	20 620	18 000	24.5
小型载客车	2 479 919	21 248	24.5
中型载客车	13 024	42 150	20
大型载客车	26 361	56 000	20
微型载货车	2 286	30 000	35
轻型载货车	241 242	39 900	35
中型载货车	11 309	56 300	41.5
重型载货车	64 573	76 300	41.5
摩托车	9 204	6 137	25

排放因子通常来源于模型模拟. 以往研究曾通过 MOVES^[12]、COPERT^[24]和 IVE^[25]等模型获取排放因子. 与这些模型相比, 文献[19]纳入了更多国内机动车排放的测试结果, 本土化程度更高^[26]. 本研究采用文献[19]的推荐方法模拟排放因子, 公式为:

$$EF_{i,j,h,p} = BEF_{i,j,h,p} \times \varphi_{i,j,h,p} \times \gamma_{i,j,h,p} \times \lambda_{i,j,h,p} \times \theta_{i,j,h,p} \quad (4)$$

式中, BEF 为文献[19]推荐的基准排放因子; φ 、 γ 、 λ 和 θ 分别为环境修正因子、速度修正因子、劣化修

正因子和其他修正因子. 环境修正因子反映地理气象因素对排放的影响, 由温度、湿度和海拔决定, 根据文献[20], 取值分别为 14℃、56.2% 和 3.3 m. 速度修正因子反映行驶工况对排放的影响, 由不同车辆类型的平均行驶速度(表 1)决定, 相关数据来自于调查与已有研究^[18], 单位为 km·h⁻¹. 劣化修正因子反映车队劣化水平对排放的影响, 由研究年决定, 此处取 2017 年. 其他修正因子反映油品质量、车辆载重对排放的影响. 油品质量主要体现在燃料含硫量上, 根据文献[1], 汽油和柴油含硫量的限值均取 1×10^{-5} . 车辆载重则根据文献[19]的推荐, 取值 50%.

1.3 非道路移动源排放计算

非道路移动源包括 5 类: 工程机械、农业机械、船舶、铁路内燃机车和民航飞机. 不同非道路移动源的计算方法存在区别.

工程机械、农业机械、船舶和铁路内燃机车排放基于燃料消耗量计算, 公式为:

$$E_p = \sum_i Y_i \times EF_{i,p} \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中, E 为排放量, t; Y 为燃料消耗量, kg; EF 为排放因子, g·kg⁻¹; i 和 p 分别为非道路移动源类型与污染物种类. 工程机械和农业机械的燃料消耗量, 采用张礼俊等^[15]提出的方法获取, 数据均来源于文献[27]. 工程机械主要应用于建筑业, 因此以建筑业的柴油消耗量作为工程机械的燃料消耗量. 农业机械的燃料消耗同样以柴油为主^[28], 但目前只能获取到农、林、牧和渔业的总柴油消耗量, 因此还需参考文献[29]中农业机械动力分布的相关数据来确定其燃料消耗量.

船舶和铁路内燃机车的燃料消耗量无法直接获取, 需要根据客货周转量和单位周转量的燃料消耗量进行推算, 公式为:

$$Y_i = (0.065 \times KZ_i + HZ_i) \times YX_i \quad (6)$$

式中, KZ 为客运周转量, 单位为万人·km; HZ 为货运周转量, 单位为万 t·km; YX 为油耗因子, 单位为 kg·(万 t·km)⁻¹. 此处假定旅客平均体重为 65 kg^[30], 即 0.065 t, 据此将客运周转量的单位由“万人·km”转为“万 t·km”, 以便于燃料消耗量的估算. 从文献[20]中可获取水运和铁路的客运周转量与货运周转量. 不同研究中油耗因子的取值有一定差异, 对于船舶油耗因子, 范武波等^[31]在四川的研究中取值为 60, 金陶胜等^[32]在天津的研究中取值为 55, 文献[30]的推荐值则为 50. 尽管金陶胜等^[32]的研究地区与本研究的—致, 但其研究年(2006 年)相对偏早. 考虑到近些年船舶节能技术的发展, 本研究中船舶的油耗因子取值为 50. 对于铁路内燃机车油

耗因子,张礼俊等^[15]在珠三角的研究中取值为 25.9,徐文文等^[16]在江苏的研究中取值为 27.2,文献[33]中报告的油耗因子值为 36.综合以上结果,本研究中铁路内燃机车的油耗因子取值为 31.6.

此外,铁路机车包括蒸汽机车、内燃机车和电力机车共 3 类^[34].但统计数据中并未提供分机车类型的铁路周转量,本研究基于我国不同铁路机车的拥有量,将总周转量划分至不同机车类型,公式为:

$$Z_j = Z \times \frac{N_j}{\sum_j N_j} \quad (7)$$

式中, Z 为铁路的客运或货运周转量, N 为铁路机车拥有量, j 为铁路机车燃料种类.根据文献[27]中的数据,2017 年蒸汽机车、内燃机车和电力机车的拥

有量分别为 15、8 568 和 12 837 台.据此可求出内燃机车所分担的客货周转量.

民航飞机排放基于标准起飞着陆(landing and take-off, LTO)循环计算.完整的 LTO 循环包含 4 个工作状态,即进近、滑行、起飞和爬升.排放的计算公式为:

$$E_p = C \times EF_p \times 10^{-3} \quad (8)$$

式中, E 为排放量,t; C 为 LTO 循环次数; EF 为排放因子,单位为 $\text{kg} \cdot \text{LTO}^{-1}$. LTO 数据来源于文献[35].

基于文献[30]推荐值,同时结合相关研究^[14,15,28,32,34],确定各类非道路移动源的排放因子取值.本研究中非道路移动源的活动水平与排放因子值汇总于表 2.

表 2 天津市非道路移动源活动水平和排放因子

Table 2 Activity level and emission factors of non-road mobile source in Tianjin

非道路移动源类型	活动水平		排放因子 ¹⁾			
	指标	取值	CO	VOCs	NO _x	PM ₁₀
工程机械	燃料消耗量/万 t	107.39	12.55	3.65	34.77	2.25
农业机械	燃料消耗量/万 t	21.46	16.19	4.84	42.84	2.97
船舶	燃料消耗量/万 t	64.55	13.67	5.12	56.23	3.75
铁路内燃机车	燃料消耗量/万 t	3.15	6.50	3.45	53.38	2.44
民航飞机	LTO 循环/万次	8.48	9.14	2.68	16.29	0.54

1) 排放因子单位:工程机械、农业机械、船舶和铁路内燃机车为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,民航飞机为 $\text{kg} \cdot \text{LTO}^{-1}$

1.4 移动源排放时间分配

对排放时间变化规律的探究有助于提升污染控制政策的针对性,改善空气质量模型模拟结果的精度.然而当前对移动源,尤其是非道路移动源,时间变化规律的数据积累仍然较为匮乏.本研究对移动源排放时间变化的讨论主要在月变化层面.基于时变系数,将年排放量分配至不同月份,公式为:

$$E_{p,m} \sum_i E_{i,p} \times TV_{i,m} \quad (9)$$

式中, TV 为时变系数,%; i 为移动源类别,包括机动车、工程机械、农业机械、船舶、铁路内燃机车和民航飞机; m 为月份,1~12 月.不同类别移动源时变系数的取值不一,估算方式亦有所差别.机动车排放的时变系数通常基于车流量数据.工程机械和农业机械的时变系数分别考虑了建筑工地施工时间分布和农忙农闲生产状况.船舶排放时变系数根据船舶航行时间分布来确定,对铁路内燃机车按照客货运输情况,对民航飞机则参考机场飞机起落状况.本研究基于实地调查结果^[5],同时结合已有的研究成果^[31],确定了不同类别移动源的月度时间变化系数(图 1).

1.5 移动源排放空间分配

网格化排放清单可以反映排放的空间分布状况,是空气质量模型的基础输入数据.获取网格化排放清单需要对排放进行空间分配.对不同类型的排

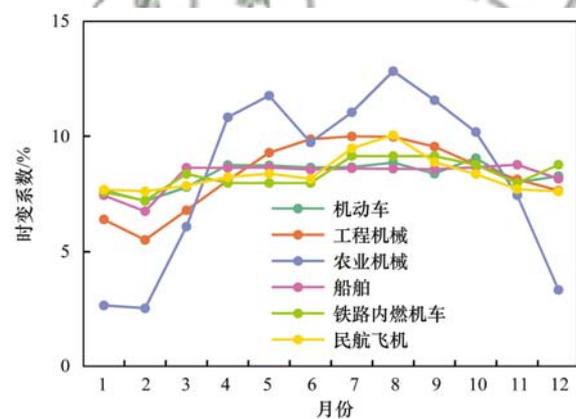


图 1 移动源排放时变系数

Fig. 1 Time-varying coefficients of mobile sources

放源,采用的空间分配代用参数有所差异.以往研究对于道路移动源和非道路移动源排放的空间分配方法均开展过相关讨论.针对道路移动源排放空间分配的研究相对较多.宋翔宇等^[36]以县级的第二产业增加值为代用参数建立了中国 $40 \text{ km} \times 40 \text{ km}$ 分辨率机动车排放清单,孙世达等^[24]以道路长度为代用参数建立了青岛市 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ 分辨率机动车排放清单.Gong 等^[37]采用路网信息与交通流量建立了郑州市 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 机动车排放清单,并与基于人口分布作为代用参数的空间分配结果进行了对比.针对非道路移动源空间分配的研究则相对较少.随

潇^[38]以面积比率为代用参数建立了京津冀 9 km × 9 km 非道路移动机械排放清单. 张意等^[5]和范武波等^[31]综合考虑了各类非道路移动源的空间分布特征,分别在天津市和四川省建立了 3 km × 3 km 非道路移动源排放清单. 总体而言,与非道路移动源相比,道路移动源的空间分配在方法层面和应用层面都更为成熟.

对于道路移动源,本研究采用郑君瑜等^[39]提出的“标准道路长度”方法对排放进行空间分配. 该方法引入了标准道路长度和道路折算系数两个核心概念. 所谓标准道路长度,即假设存在一条虚拟道路,该道路的单位长度为单位标准道路长度,其交通流量为标准交通流量. 其中,标准交通流量是用户自定义常

数^[40]. 道路折算系数则指不同道路类型实际交通流量与标准交通流量的比值. 使用此方法对机动车排放进行空间分配,分为 3 步:①根据道路折算系数,将研究区域内不同道路类型的实际长度转换为标准道路长度,并求出总标准道路长度;②基于研究区域总排放量与总标准道路长度,求取标准排放强度;③将标准排放强度与单个网格内的标准道路长度相结合,计算网格内排放量. 与单纯使用经济参数、人口分布和道路密度作为代用参数相比,“标准道路长度”法综合考虑了交通流量、排放强度、路网分布等信息,有效降低了空间分配偏差,其分配结果也更符合排放实际. 本研究中,天津市的道路类型被分为 6 类,分别为高速公路、快速路、国道、省道、县乡道和支路(图 2).

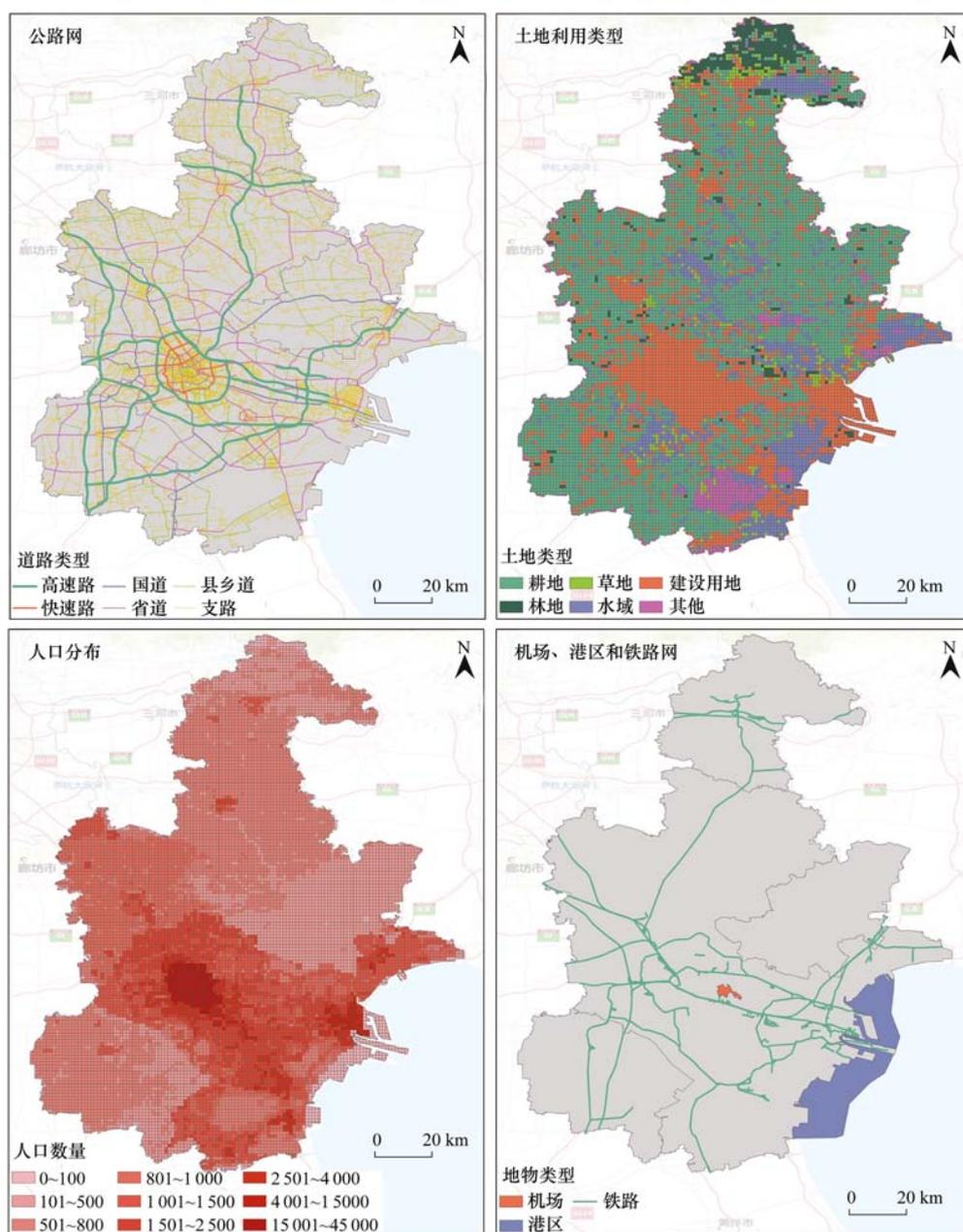


图 2 移动源排放空间分配代用参数

Fig. 2 Spatial surrogate for allocating emissions of mobile source

对于非道路移动源,本研究考虑各类型源排放的分布特点,选取不同的代用参数.对于工程机械和农业机械,同时使用土地利用类型和人口分布两种代用参数.这一分配方法基于两个假定:①源排放通常发生在与其最相关的地类上;②源排放与人类活动密切相关,人口密集的地带排放强度也会相对较高.通常而言,与工程机械与农业机械排放最相关的地类分别为建设用地和耕地.因此,对于工程机械排放,首先将排放分配至建设用地上,然后根据建设用地上的人口分布状况,将排放分配至网格.农业机械排放的分配方法与工程机械类似,基于耕地分布与人口分布将排放分配至网格.土地利用分布和人口分布的相关数据来源于资源环境数据云平台^[41](图2).对于船舶、铁路内燃机和民航飞机,这3类排放源的活动范围相对容易确定,对应的空间分配代用参数也比较明晰.具体而言,船舶排放根据港区范围与航道分布进行分配^[5],铁路内燃机车排放根据铁路网分布进行分配^[31],民航飞机排放则根据机场位置及范围进行分配^[42].

2 结果与讨论

2.1 排放特征

天津市 2017 年移动源 CO、VOCs、NO_x 和 PM₁₀

的排放总量分别为 18.30、6.42、14.99 和 0.84 万 t (图3).道路移动源是 CO 和 VOCs 的主要贡献源,占比分别为 85.38% 和 86.60%.机动车的 CO 排放,是燃料不完全燃烧的产物,通常发生在内燃机局部缺氧或低温状态下.尽管近年来随着排放标准提升,机动车的单车 CO 排放水平下降显著^[43],但其排在移动源整体中的占比仍然较高.机动车排放的 VOCs 有尾气排放与蒸发排放两个来源.随着排放标准的加严,尾气排放的 VOCs 已得到明显控制^[17],蒸发排放的 VOCs 开始逐渐占据主导地位^[44].根据源解析结果,机动车已成为天津市最大的人为 VOCs 排放源,贡献占比达到了 31%^[45],应引起足够重视.非道路移动源是 NO_x 和 PM₁₀ 的主要贡献源,占比分别为 57.32% 和 66.95%.道路移动源以汽油为主要燃料,而非道路移动源通常以柴油和重油为主要燃料.相较于道路移动源,非道路移动源通常具有技术水平低、使用年限长、燃料消耗大、维护检修少和单机排放高等特点,其尾气中 NO_x 和 PM₁₀ 排放尤其高^[15].徐文文等^[16]认为江苏省非道路移动源排放的 NO_x 已占到了全省总量 19%,对区域空气质量造成的影响已不容小觑.

道路移动源 CO、VOCs、NO_x 和 PM₁₀ 的排放量

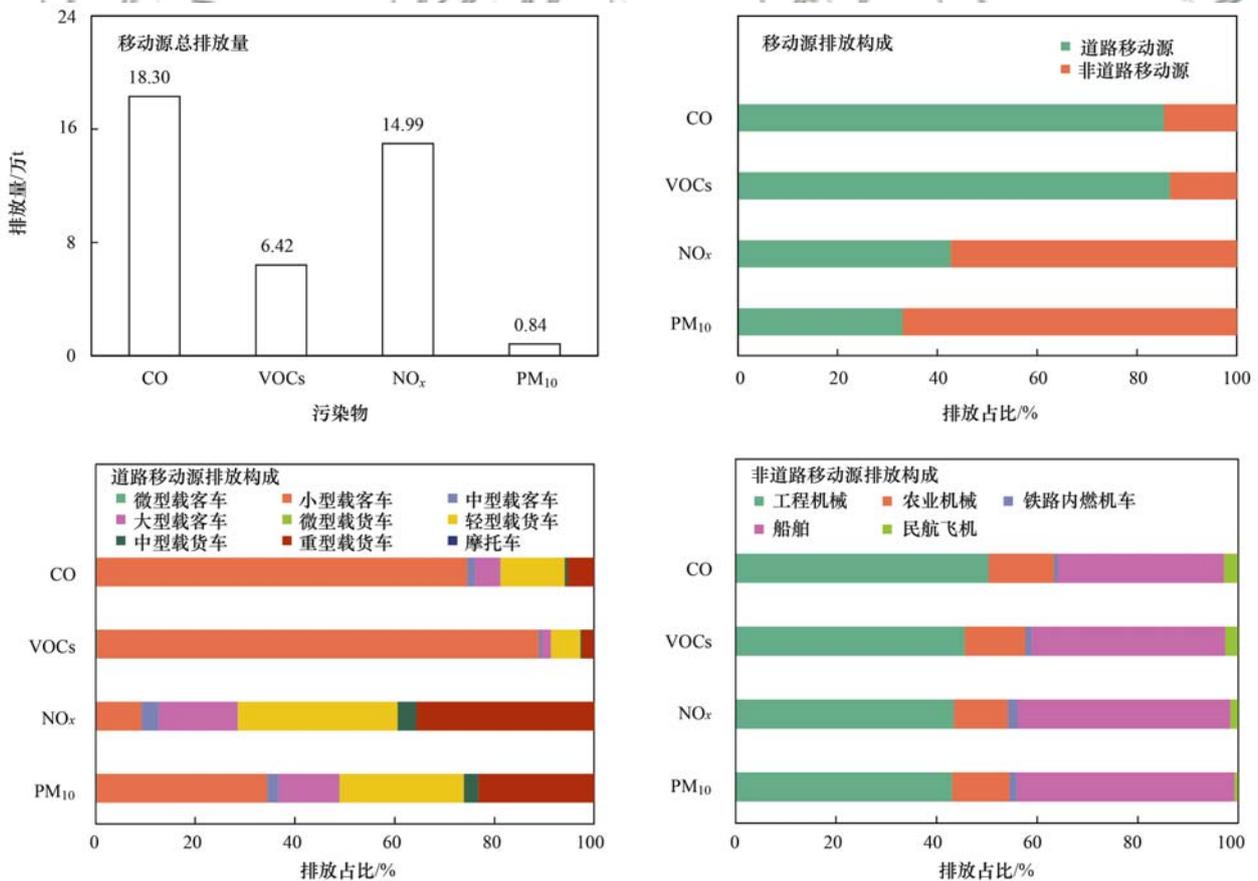


图3 天津市 2017 年移动源排放量与排放构成

Fig. 3 Amount and composition of mobile source emissions in Tianjin in 2017

分别为 15.63、5.56、6.40 和 0.28 万 t. 其中,小型载客车是 CO 和 VOCs 最主要的排放源,占比分别为 74.28% 和 88.51%. 小型载客车是车队构成的主体,占总保有量的 86.45%. 天津作为国内典型大城市,于 2013 年 12 月 16 日起开始实施购车摇号制度^[46]. 该政策有效抑制了小型载客车保有量的增长,对机动车污染物减排起到了积极作用^[18]. 在控制机动车保有量时应同步推进公共交通建设,注重发展和普及新能源公交^[47]. 轻型载货车与重型载货车均为 NO_x 和 PM_{10} 的重要排放源. 轻型载货车对 NO_x 和 PM_{10} 排放的贡献分别 31.96% 和 24.87%,重型载货车的贡献分别为 35.62% 和 23.17%. 载货车以柴油车为主体,占比达到了 87.86%. 柴油发动机通常具有燃烧温度高、燃烧均匀性差和控制技术落后等特点,这导致了较高的单车排放量. 加之其通常拥有较高的年均行驶里程,进一步推高了载货车的排放. 除传统的升级排放标准和淘汰老旧车外,运输结构调整也被认为是应对载货车排放的有效举措^[48].

非道路移动源 CO、VOCs、 NO_x 和 PM_{10} 的排放量分别为 2.68、0.86、8.59 和 0.56 万 t. 其中,工程机械与船舶皆为主要排放源,对 CO 的贡献分别为 50.36% 和 32.99%,对 VOCs 分别为 45.58% 和

38.44%,对 NO_x 分别为 43.47% 和 42.26%,对 PM_{10} 分别为 43.10% 和 43.30%. 城市建筑业的迅速发展,使得工程机械被大量使用,导致其在非道路移动源排放中的高占比^[31]. 天津港是世界级人工深水港,2017 年货物吞吐量突破 5 亿 t,世界排名第九位. 发达的水运对区域经济发展有着积极推动作用,但船舶在港区的频繁活动也会带来大量的污染排放^[49]. 根据以往研究,船舶排放贡献在内陆地区通常较低,但在沿海沿江地区其排放占比会显著升高^[5, 31]. 农业机械为第三大排放源,对 CO、VOCs、 NO_x 和 PM_{10} 的贡献分别为 12.99%、12.08%、10.70% 和 11.41%. 事实上,农业机械在我国多数地区均为重要排放源,在京津冀^[38]、长三角^[14] 和四川省^[31] 开展的研究均得到过类似的结论. 铁路内燃机车和民航飞机的排放贡献较少. 铁路运输由于排放强度较低,被视为中国交通运输领域中较为理想的节能减排运输方式^[34]. 民航飞机的排放总量不大,但会集中在机场这一相对较小的范围内,因此需要关注机场污染对周边空气质量影响^[42].

2.2 时间变化

基于时变系数,得到天津市 2017 年移动源的逐月排放量(图 4). 移动源排放集中在 2 月最低,当月 CO、VOCs、 NO_x 和 PM_{10} 的排放量分别为 1.27、0.45、

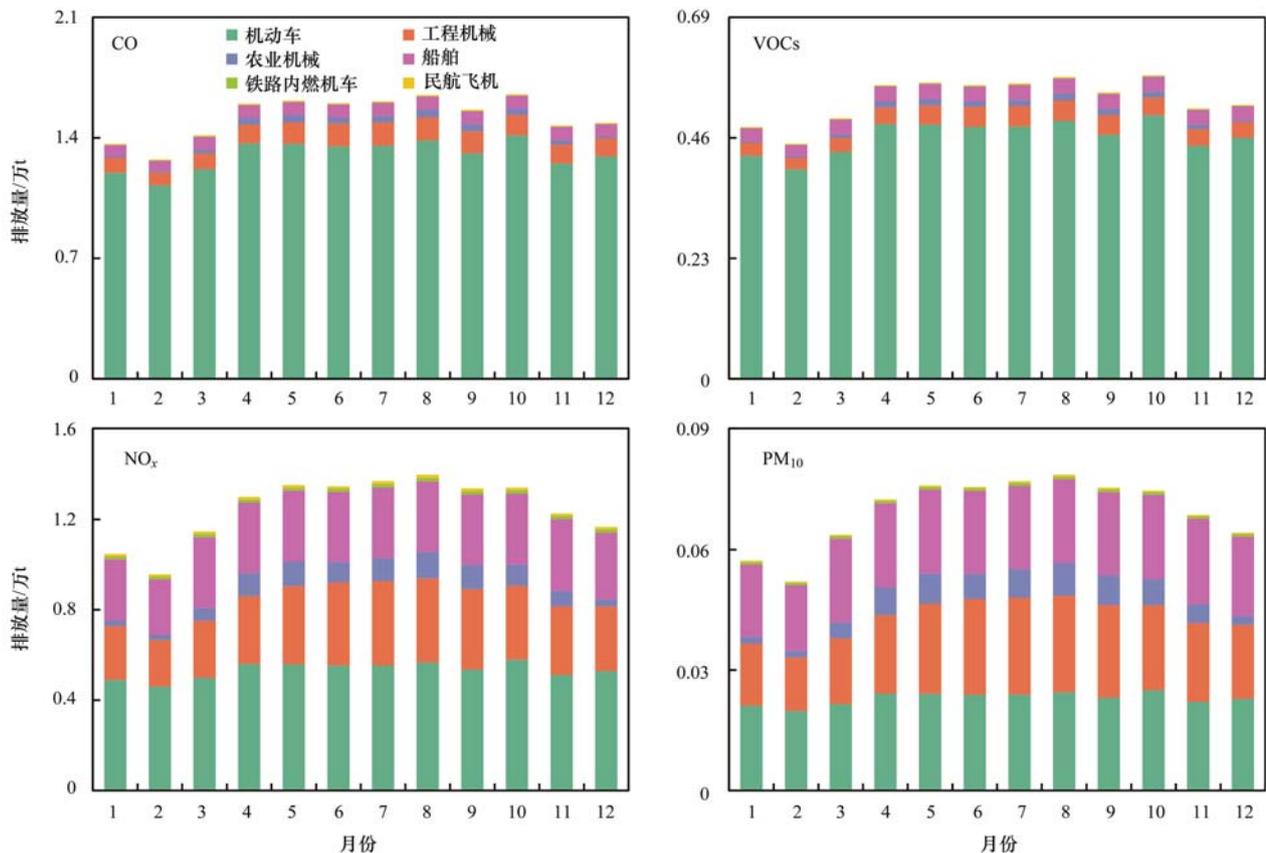


图 4 天津市 2017 年移动源逐月排放

Fig. 4 Monthly emissions of mobile sources in Tianjin in 2017

0.96 和 0.05 万 t, 比其他月份的均值分别低 17.67%、17.26%、24.96% 和 26.95%。这是因为 2 月包含了中国的农历春节假期, 在此期间移动源的活动水平会进入低谷, 尤其是工程机械和农业机械, 活动水平骤降。CO 和 VOCs 的最高排放量出现在 10 月, 排放量分别为 1.65 万 t 和 0.58 万 t, 比其他月份的均值分别高出 9.16% 和 9.15%。多数移动源, 如工程机械和农业机械的活动水平峰值并非出现在 10 月。但移动源的 CO 和 VOCs 排放是由机动车主导, 而机动车活动水平受国庆黄金周的影响^[37], 会在 10 月出现一个局部峰值, 因此推高了这 2 类污染物的排放。NO_x 和 PM₁₀ 的最高排放量出现在 8 月, 排放量分别为 1.40 万 t 和 0.08 万 t, 比其他月份的均值分别高出 13.15% 和 14.30%。工程机械、农业机械、铁路内燃机车和民航飞机的活动水平均在 8 月出现了局部峰值。这一时期建筑施工、农业耕作、货物运输与居民出行都相对活跃, 推高了移动源的整体排放水平。

不同类别移动源排放的月度变化状况也存在较大差异。机动车的排在 2 月最低, 10 月最高, 其月度排放的变化主要受居民出行意愿的影响, 而居民出行又与节假日(如春节和国庆节等)密切相关。因此, 在讨论机动车排放时间变化时, 应将节假日视为重要影响因素^[50]。工程机械月度排放总体呈现春夏高, 秋冬低的趋势, 排放集中在 5~9 月。农业机械的月度排放全年变化较大, 受农忙农闲时节的影响, 排放集中在 5 月和 8 月。船舶的月度排在 1~2 月较低, 在其余月份变化不大。此外, 受渤海禁渔期影响, 天津船舶排在 6~9 月会略有下降^[5]。铁路内燃机车和民航飞机的活动水平相对固定, 月度排放变化不大。但 7~9 月会相对突出, 这些月份为社会生产生活的活跃期, 货运和客运需求较其他月份均会有所上升^[31]。

2.3 空间分布

根据不同种类移动源的分布特点, 选取适用的空间代用参数对排放进行空间分配(图 5)。总体而言, CO 和 VOCs 排放主要集中于城区和车流量大的公路(高速路和国道)上, NO_x 和 PM₁₀ 在城区与港区均具有较高排放强度。不同污染物表现出的空间分布差异, 是由其主要贡献源的空间位置决定的。道路移动源和非道路移动源表现出了不同的空间分布情形。

道路移动源的排放分布有以下 3 个特点: ①聚集于市区, 且从市区至郊区排放强度逐渐下降; ②呈现明显的带状分布, 这与机动车行驶于道路上的真实状况相契合; ③不同等级道路上排放强度差

异显著, 对不同细分道路类型上车流量及其构成的考虑提升了空间分配精度。从结果来看, 本研究采用的“标准道路长度”方法可以较好地反映机动车排放的空间分布情形, 与自下而上方法建立的更加精细化的排放清单所呈现出的分布状况有着较好的一致性^[51]。

非道路移动源的排放分布有以下 5 个特点: ①工程机械排放在建成区高度集中, 可能带来更大的人群健康风险损失; ②农业机械排放相对分散, 因为大面积的耕地相对拉低了其排放强度; ③船舶排放在港区相对集中, 对沿海城市而言其较高的排放对局地空气质量的影响不容忽视; ④铁路内燃机车排放呈现带状分布, 这与机动车排放的分布状况较为类似; ⑤民航飞机排放聚集于机场区域, 应关注其给机场周边大气环境带来的污染。总体而言, 本研究针对不同非道路移动源提出了差异化的代用参数, 丰富了该类源空间分配的方法论, 优化了其空间分配精度。

2.4 不确定性

在建立移动源排放清单的过程中, 涉及的基础数据多、计算方法多、影响因素多, 因此排放清单不可避免地存在一些不确定性。而这其中, 非道路移动源的不确定性又大于道路移动源。以下分别讨论道路移动源和非道路移动源的不确定性来源。

对于道路移动源, 相关基础数据较为全面, 已有研究也相对成熟。机动车排放基于保有量、年均行驶里程和排放因子这 3 类数据进行估算。其中, 保有量数据来自官方统计年鉴, 不确定性较小。但是燃料种类和排放标准分布采用模拟得到, 会引入一定的不确定性。年均行驶里程数据综合考虑了文献[19]推荐值与当地已有研究。但年均行驶里程并未细化到燃料种类与排放标准, 因此仍然有着较高的不确定性。排放因子数据借助文献[19]推荐方法获取, 本地化程度较高, 不确定性相对较低。总而言之, 道路移动源采用了详实的车队构成、本地的行驶里程和精细的排放因子, 这些均有助于降低计算结果的不确定性。

对于非道路移动源, 无论是活动水平还是排放因子, 都有待完善。一方面, 精细化的活动水平获取困难。不同排放标准的工程机械和农业机械, 排放水平存在较大差异。但由于相关的登记备案制度尚不完善, 难以获取详细的活动水平数据, 因此只能基于燃料消耗量和平均排放因子进行估算, 不确定性较大。船舶和铁路内燃机车在不同的工况下排放水平有着较大差异, 但是详细的活动水平难以获取。因此, 二者均采用客货周转量推算的燃料消耗数据计

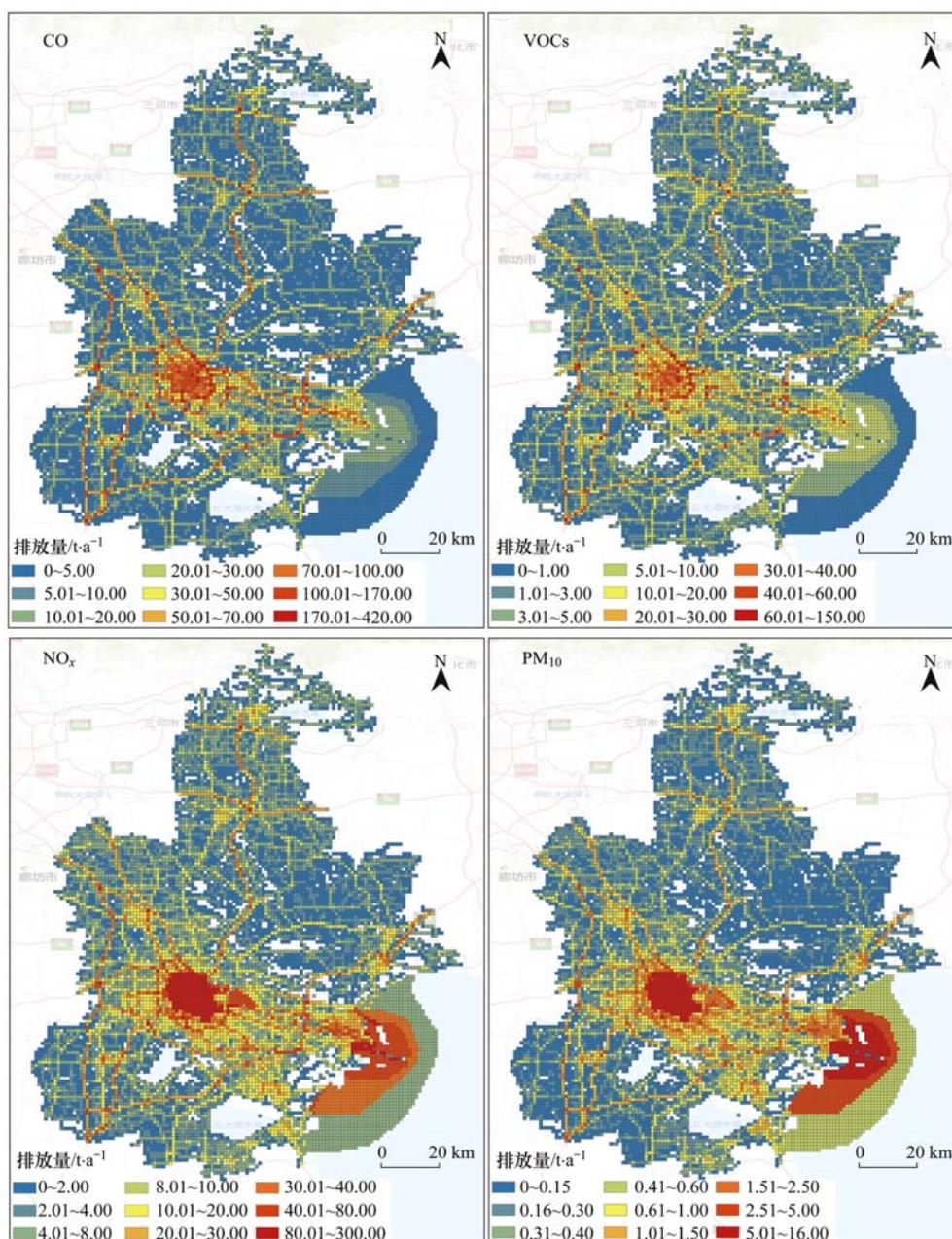


图5 2017年天津市移动源排放空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of mobile source emissions in Tianjin in 2017

算排放,不确定性也相对较高。飞机排放基于LTO循环计算,事实上不同机型的LTO循环中的排放水平是存在差异的。然而,目前很难获取到分机型的LTO循环次数。因此只能基于理想平均的LTO排放水平进行估算。此外,受数据可得性限制,本研究涵盖的源类别不够全面,例如未考虑小型通用机械和柴油发电机组的排放,这会使非道路移动源的总体排放被低估。另一方面,本地化的排放因子十分匮乏。尽管通过汇总已有研究,确定了不同非道路移动源的排放因子。但现阶段我国对于非道路移动源排放因子的研究工作仍处于起步阶段,尚未提出一套系统性的、被广泛认同的排放因子。已有研究中的排

放因子数据基本来源于国外,难以准确反映国内的控制技术、运行工况和劣化程度下的排放水平,这也是导致不确定性的重要因素。

尽管不确定性难以避免,但通过与其他研究的对比,可以检验排放清单的不确定性是否被控制在合理范围内。清华大学开发的中国多尺度排放清单模型(multi-resolution emission inventory for China, MEIC)是目前应用较为广泛的排放清单,其中包含了交通源(transportation)排放^[52],该源类的计算口径与本研究移动源类似^[53]。从对比结果可知(表3),本研究移动源VOCs排放与MEIC较为接近,其他污染物排放量虽然有一定差异,但总体来看一致

性较好.对于道路移动源而言,排放结果与已有研究^[18,23]具有可比性;而非道路移动源排放与以往多数研究^[5]差异较大,这是由该源类排放估算过程中包含的高度不确定性导致的.其中,袁远等^[42]采用精细调研数据建立的 2016 年天津市机场排放清单,所得到的计算结果与本研究一致性较好.本研究与

其他研究的差异可归因于两个方面.一是因为研究年不同,这使得排放源实际活动水平存在差别,进而导致了排放量的差异.二是因为计算方法和排放因子不同.目前我国学者已开始着手构建国内适用的排放清单技术体系^[2],但建成科学性、规范性和实用性兼备的体系仍需时日.

表 3 天津市移动源排放清单对比/万 t

Table 3 Comparison of mobile source emission inventory in Tianjin/10⁴ t

研究年份	源类别	CO	VOCs	NO _x	PM ₁₀	文献
2017	移动源	18.30	6.42	14.99	0.84	本研究
2016	移动源	40.96	7.20	8.29	0.44	[52]
2017	道路移动源	15.63	5.56	6.40	0.28	本研究
2016	道路移动源	25.91	3.40	5.51	0.34	[18]
2013	道路移动源	22.78	5.29	6.74	0.32	[23]
2017	非道路移动源	2.68	0.86	8.59	0.56	本研究
2015	非道路移动源	0.62	0.25	2.90	0.15	[5]
2017	农业机械	0.35	0.10	0.92	0.06	本研究
2010	农业机械	—	—	0.35	0.03	[28]
2017	船舶	0.88	0.33	3.63	0.24	本研究
2006	船舶	0.07	0.02	0.43	0.02	[32]
2017	民航飞机	0.08	0.02	0.14	0.005	本研究
2016	民航飞机	0.12	0.01	0.15	0.004	[42]

3 结论

(1)天津市 2017 年移动源 CO、VOCs、NO_x 和 PM₁₀ 的排放量分别为 18.30、6.42、14.99 和 0.84 万 t.道路移动源是 CO 和 VOCs 的主要贡献源,占比分别为 85.38% 和 86.60%.非道路移动源是 NO_x 和 PM₁₀ 的主要贡献源,占比分别为 57.32% 和 66.95%.

(2)从时间变化来看,移动源所有污染物排在 2 月均为最低,CO 和 VOCs 在 10 月排放最高,而 NO_x 和 PM₁₀ 则在 8 月排放最高.节假日(如春节和国庆节等)对移动源排放的时间变化影响显著.春、夏、秋季为社会生产生活的活跃期,这期间移动源的排放水平也会相应升高.

(3)从空间分布来看,CO 和 VOCs 排放主要集中在城区和车流量大的公路(高速路和国道)上,NO_x 和 PM₁₀ 在城区与港区均具有较高排放强度.不同子源采用了差异化的分配方法和代用参数,提升了空间分配精度,较好的反映了移动源排放的整体分布状况.

参考文献:

[1] 生态环境部.生态环境部发布《中国移动源环境管理年报(2019)》[EB/OL].北京:生态环境部. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/201909/t20190904_732374.html, 2019-09-24.

[2] 贺克斌,王书肖,张强,等.城市大气污染物排放清单编制技术手册[M].北京:清华大学,2015.103-116.

[3] 张景文,咸月,陈报章.南昌市移动源排放清单研究[J].环

境科学学报, 2017, 37(7): 2449-2458.

Zhang J W, Xian Y, Chen B Z. Study on the emission inventory from mobile source in Nanchang [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(7): 2449-2458.

- [4] Lang J L, Cheng S Y, Zhou Y, *et al.* Air pollutant emissions from on-road vehicles in China, 1999-2011 [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 496: 1-10.
- [5] 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.
- [6] 北京市环境保护局.最新科研成果新一轮北京市 PM_{2.5} 来源解析正式发布 [EB/OL].北京:北京市环境保护局. <https://www.antpedia.com/news/27/n-2210027.html>, 2019-09-30.
- [7] Jia T, Li Q, Shi W Z. Estimation and analysis of emissions from on-road vehicles in mainland China for the period 2011-2015 [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 191: 500-512.
- [8] Lang J L, Cheng S Y, Wei W, *et al.* A study on the trends of vehicular emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 62: 605-614.
- [9] 金嘉欣,孙世达,王芑,等.辽宁省 2000~2030 年机动车排放清单及情景分析[J]. *环境科学*, 2020, 41(2): 665-673.
- Jin J X, Sun S D, Wang P, *et al.* Vehicle emission inventory and scenario analysis in Liaoning from 2000 to 2030 [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 665-673.
- [10] Zhang S J, Wu Y, Wu X M, *et al.* Historic and future trends of vehicle emissions in Beijing, 1998-2020: a policy assessment for the most stringent vehicle emission control program in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 89: 216-229.
- [11] 李荔,张洁,赵秋月,等.基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率[J]. *环境科学*, 2018, 39(9): 3976-3986.
- Li L, Zhang J, Zhao Q Y, *et al.* Vehicle exhaust emission

- characteristics and their contributions in Jiangsu province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 3976-3986.
- [12] 陶双成, 邓顺熙, 郝艳召, 等. 关中城市群道路移动源气态污染物排放特征[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 542-553.
- Tao S C, Deng S X, Hao Y Z, *et al.* Vehicle emission characteristics of gaseous pollutants in Guanzhong urban agglomeration [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 542-553.
- [13] 杨静, 尹佩玲, 叶斯琪, 等. 深圳市船舶排放清单与时空特征研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1217-1226.
- Yang J, Yin P L, Ye S Q, *et al.* Marine emission inventory and its temporal and spatial characteristics in the city of Shenzhen [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1217-1226.
- [14] 鲁君, 黄成, 胡馨遥, 等. 长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2738-2746.
- Lu J, Huang C, Hu Q Y, *et al.* Air pollutant emission inventory of non-road machineries in typical cities in eastern China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2738-2746.
- [15] 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.
- [16] 徐文文, 许雪记, 殷承启. 江苏省非道路移动源大气污染排放清单研究[J]. *能源环境保护*, 2019, **33**(2): 59-64.
- Xu W W, Xu X J, Yin C Q. Study on non-road mobile source emission inventory for Jiangsu province [J]. *Energy Environmental Protection*, 2019, **33**(2): 59-64.
- [17] 孙露娜, 刘妍, 赵静波, 等. 天津隧道机动车 VOCs 污染特征与排放因子[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 104-113.
- Sun L N, Liu Y, Zhao J B, *et al.* Pollution characteristics and emission factors of VOCs from vehicle emissions in the Tianjin tunnel [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 104-113.
- [18] 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.
- [19] 环境保护部. 关于发布《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》等 5 项技术指南的公告[EB/OL]. 北京: 环境保护部. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm? COLLCC = 4091198132&, 2019-09-23.
- [20] 天津市统计局. 天津统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. 305-318.
- [21] 中国汽车技术研究中心. 中国汽车工业年鉴[M]. 天津: 《中国汽车工业年鉴》期刊社, 2018. 474-488.
- [22] Huo H, Zhang Q, He K B, *et al.* Vehicle-use intensity in China: current status and future trend [J]. *Energy Policy*, 2012, **43**: 6-16.
- [23] 张意, 吴琳, 毛洪钧, 等. 天津市机动车污染物排放清单及控制对策研究[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2017, **50**(1): 90-96.
- Zhang Y, Wu L, Mao H J, *et al.* Research on vehicle emission inventory and its management strategies in Tianjin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis (Natural Science Edition)*, 2017, **50**(1): 90-96.
- [24] 孙世达, 姜巍, 高卫东. 青岛市机动车排放清单与空间分布特征[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(1): 49-59.
- Sun S D, Jiang W, Gao W D. Vehicle emission inventory and spatial distribution in Qingdao [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 49-59.
- [25] 唐伟, 杨强, 黄成, 等. 基于大数据分析和 IVE 模型的杭州市机动车污染物排放变化特征研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(1): 71-78.
- Tang W, Yang Q, Huang C, *et al.* Study on characteristics of pollutant emission from motor vehicles in Hangzhou based on large data analysis and IVE model [J]. *Acta Scientiarum Circumstantiae*, 2018, **38**(1): 71-78.
- [26] Huang C, Tao S K, Lou S R, *et al.* Evaluation of emission factors for light-duty gasoline vehicles based on chassis dynamometer and tunnel studies in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **169**: 193-203.
- [27] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. 134-139.
- [28] 金陶胜, 陈东, 付雪梅, 等. 基于油耗调查的 2010 年天津市农业机械排放研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(8): 2148-2152.
- Jin T S, Chen D, Fu X M, *et al.* Estimation of agricultural machinery emissions in Tianjin in 2010 based on fuel consumption [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(8): 2148-2152.
- [29] 中国机械工业年鉴编辑委员会, 中国农业机械工业协会. 中国农业机械工业年鉴[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018. 214-235.
- [30] 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)[EB/OL]. 北京: 环境保护部. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm, 2020-02-18.
- [31] 范武波, 陈军辉, 李媛, 等. 四川省非道路移动源大气污染物排放清单研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(12): 4460-4468.
- Fan W B, Chen J H, Li Y, *et al.* Study on the non-road mobile source emission inventory for Sichuan province [J]. *China Environmental Science*, **38**(12): 4460-4468.
- [32] 金陶胜, 殷小鸽, 许嘉, 等. 天津港运输船舶大气污染物排放清单[J]. *海洋环境科学*, 2009, **28**(6): 623-625.
- Jin T S, Yin X G, Xu J, *et al.* Air pollutants emission inventory from commercial ships of Tianjin harbor [J]. *Marine Environmental Science*, 2009, **28**(6): 623-625.
- [33] 北京市统计局. 北京统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. 337.
- [34] 徐雨晴, 何吉成, 王长科. 33 年来中国铁路运输行业的大气污染物排放[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1217-1223.
- Xu Y Q, He J C, Wang C K. Air pollutants emissions of locomotives in China railways in recent 33 years [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(5): 1217-1223.
- [35] 中国民航局. 2017 年民航机场生产统计公报[EB/OL]. 北京: 中国民航局. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201803/t20180307_55600.html, 2020-02-19.
- [36] 宋翔宇, 谢绍东. 中国机动车排放清单的建立[J]. *环境科学*, 2006, **27**(6): 1041-1045.
- Song X Y, Xie S D. Development of vehicular emission inventory in China [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(6): 1041-1045.
- [37] Gong M M, Yin S S, Gu X K, *et al.* Refined 2013-based vehicle emission inventory and its spatial and temporal characteristics in Zhengzhou, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 1149-1159.
- [38] 隗潇. 京津冀非道路移动源排放清单的建立[A]. 见: 2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷)[C]. 昆明: 中国环境科学学会, 2013. 1631-1637.

- [39] 郑君瑜, 车汶蔚, 王兆礼. 基于交通流量和路网的区域机动车污染物排放量空间分配方法[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(4): 815-821.
Zheng J Y, Che W W, Wang Z L. Traffic flow and road network-based spatial allocation of regional mobile source emission inventories[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(4): 815-821.
- [40] Tang G Q, Chao N, Wang Y S, *et al.* Vehicular emissions in China in 2006 and 2010[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, **48**: 179-192.
- [41] 中国科学院地理科学与资源研究所. 资源环境数据云平台[EB/OL]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所. <http://www.resdc.cn/>, 2020-02-20.
- [42] 袁远, 吴琳, 邹超, 等. 天津机场飞机污染排放及其特征研究[J]. 环境工程, 2018, **36**(9): 81-86, 58.
Yuan Y, Wu L, Zou C, *et al.* Air pollutants emission of Tianjin airport and its characteristics[J]. Environmental Engineering, 2018, **36**(9): 81-86, 58.
- [43] Sun S D, Jiang W, Gao W D. Vehicle emission trends and spatial distribution in Shandong province, China, from 2000 to 2014[J]. Atmospheric Environment, 2016, **147**: 190-199.
- [44] Liu H, Man H Y, Tschantz M, *et al.* VOC from vehicular evaporation emissions: status and control strategy [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(24): 14424-14431.
- [45] Yang Y, Ji D S, Sun J, *et al.* Ambient volatile organic compounds in a suburban site between Beijing and Tianjin: concentration levels, source apportionment and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2019, **695**: 133889.
- [46] 天津市人民政府. 天津市人民政府批转市交通港口局市公安局拟定的天津市小客车总量调控管理办法(试行)的通知[EB/OL]. 天津: 天津市人民政府. http://www.tj.gov.cn/zw/zfgh/qk/2014/1_3302/201811/t20181116_3636226.html, 2020-02-21.
- [47] Peng B B, Du H B, Ma S F, *et al.* Urban passenger transport energy saving and emission reduction potential: a case study for Tianjin, China[J]. Energy Conversion and Management, 2015, **102**: 4-16.
- [48] Sun S D, Jin J X, Xia M, *et al.* Vehicle emissions in a middle-sized city of China: current status and future trends [J]. Environment International, 2020, **137**: 105514.
- [49] 孙世达, 姜巍, 高卫东. 中国港口时空格局演变及影响因素分析[J]. 世界地理研究, 2016, **25**(2): 62-71.
Sun S D, Jiang W, Gao W D. Spatio-temporal pattern evolution and factorial analysis on ports in China [J]. World Regional Studies, 2016, **25**(2): 62-71.
- [50] Liu Y H, Ma J L, Li L, *et al.* A high temporal-spatial vehicle emission inventory based on detailed hourly traffic data in a medium-sized city of China[J]. Environmental Pollution, 2018, **236**: 324-333.
- [51] Jing B Y, Wu L, Mao H J, *et al.* Development of a vehicle emission inventory with high temporal-spatial resolution based on NRT traffic data and its impact on air pollution in Beijing-part 1: development and evaluation of vehicle emission inventory [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(5): 3161-3170.
- [52] 清华大学. 中国多尺度排放清单模型[EB/OL]. <http://meicmodel.org/>, 2020-02-25.
- [53] 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.

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area(“2+26” Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPERS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101(Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvo-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)