

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 模型天津减污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, 陆佳峰, 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, 程铖, 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价	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, 李晓艳, 郭蕾 (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)
高比表面疏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 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 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, 崔建升 (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、来源解析及风险评价	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价	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韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 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, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆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)
三峡库区消落带落叶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, 王一鸣, 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)	

2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变

孙露娜¹, 仲崇智², 孙世达³, 刘妍¹, 佟惠¹, 吴亚君¹, 宋鹏飞¹, 张丽娜⁴, 黄旭⁵, 吴琳^{1*}, 毛洪钧¹

(1. 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, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071; 2. 中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300; 3. 清华大学地球系统科学系, 地球系统数值模拟教育部重点实验室, 北京 100084; 4. 天津市生态环境科学研究院, 天津市大气污染防治重点实验室, 天津 300191; 5. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

摘要: 机动车排放已成为城市地区人为源挥发性有机物(VOCs)的重要来源, 排放清单是量化其环境影响的重要手段. 针对已有研究中存在的过程区分不清、排放因子测试不全和气象参数考虑不细等问题, 基于文献调研与实验测试完善了排放因子库, 在月尺度上提出了涵盖尾气排放和蒸发排放(包括运行损失、昼间排放、热浸排放和加油排放)的机动车全过程 VOCs 逐月排放清单构建方法, 并应用此方法建立了 2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放清单. 研究期内, 天津市机动车 VOCs 排放总量呈现出先缓慢上升后逐步下降的趋势, 2020 年排放总量为 2.14 万 t, 小型客车是对排放总量贡献最大的车型, 贡献率达 75.00%. 排放标准升级对不同过程 VOCs 排放的影响存在差异. 与尾气排放量的持续下降不同, 蒸发排放量呈现出先升后降的倒 U 型走势, 且对总排放量的贡献逐年上升, 2020 年时贡献率为 31.69%. 机动车排放的月度变化受活动水平与排放因子的双重影响. VOCs 排放量呈现出秋冬季高和春夏季低的特点, 2020 年新冠疫情期间, 封控措施限制了机动车活动水平, 使得 VOCs 排放量显著低于往年同期. 计算方法和数据结论可为大气污染防治工作提供技术参考与决策依据.

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 排放清单; 排放因子; 蒸发排放; 运行损失; 机动车

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1346-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205135

Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020

SUN Lu-na¹, ZHONG Chong-zhi², SUN Shi-da³, LIU Yan¹, TONG Hui¹, WU Ya-jun¹, SONG Peng-fei¹, ZHANG Li-na⁴, HUANG Xu⁵, WU Lin^{1*}, MAO Hong-jun¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Urban Transport Emission Research, State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300, China; 3. Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Tianjin Air Pollution Control Laboratory, Tianjin Academy of Eco-Environmental Sciences, Tianjin 300191, China; 5. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Vehicle emissions are an important source of anthropogenic volatile organic compound (VOCs) emissions in urban areas and are commonly quantified using vehicle emission inventories. However, most previous studies on vehicle emission inventories have incomplete emission factors and emission processes or insufficient consideration of meteorological parameters. Based on the localized full-process emission factors attained from tested data and previous studies, a method to develop a monthly vehicular VOC emission inventory of full process for the long-term was established, which covered exhaust and evaporative emissions (including running loss, diurnal breathing loss, hot soak loss, and refueling emission). Then, the method was used to develop a full-process vehicular VOC emission inventory in Tianjin from 2000 to 2020. The results showed that the total vehicular VOC emissions in Tianjin rose slowly and then gradually decreased. In 2020, the total emissions were 21 400 tons. The light-duty passenger vehicles were the dominant contributors and covered 75.00% of the total emissions. Unlike the continuous decline in exhaust emissions, evaporative emissions showed an inverted U-shaped trend with an increasing contribution to total emissions yearly, accounting for 31.69% in 2020. Monthly emissions were affected by both vehicle activity and emission factors. VOC emissions were high in autumn and winter and low in spring and summer. During the COVID-19 epidemic in 2020, vehicle activity was limited by closure and control, making VOC emissions significantly lower than those during the same period in previous years. The method and data in this study can provide technical reference and a decision-making basis for air pollution prevention and control.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); emission inventory; emission factors; evaporative emission; running loss; vehicle

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是二次有机气溶胶与臭氧生成的重要前体

收稿日期: 2022-05-11; 修订日期: 2022-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177084, 42107114); 天津市科技计划项目(20YFZCSN01000, 18PTZWHZ00120); 中央高校基本业务费专项资金(63221411); 江苏省双创博士基金项目(2020-30489)

作者简介: 孙露娜(1992 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为城市机动车 VOCs 排放观测和排放清单, E-mail: sln@mail.nankai.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wulin@nankai.edu.cn

物^[1,2],在京津冀和长三角区域开展的源解析研究表明,机动车排放是城市地区人为源 VOCs 的重要来源,贡献率可达 15.8%~48.8%^[3~5].准确和全面地评估机动车 VOCs 排放,对理解区域复合污染特征和制定精准管控策略至关重要.机动车排放清单用于定量描述特定区域、时间内机动车排放到大气中的污染物的种类与数量,是污染特征分析、空气质量模拟和减排措施制定的基础数据与重要依据^[6~8].近年来,我国学者已在国家^[9]、省域^[10,11]和城市^[6,12]多级尺度上建立了机动车 VOCs 排放清单.这些研究描述了机动车 VOCs 排放的趋势、结构和分布规律,为机动车污染防治提供了有益参考,但在排放计算的精细度方面,仍有较大的提升空间,可概括为排放过程区分度不够、排放因子测试不全和气象参数考虑不细这 3 方面的问题.

机动车 VOCs 排放有尾气排放和蒸发排放两个来源.尾气排放是指机动车运行过程中尾气管产生的排放,蒸发排放则指机动车行驶、驻车、加油过程中非尾气管(如燃油系统)等部分产生的排放.按照车辆使用和标准测试过程,蒸发排放可细分为 4 个过程:①运行损失,行驶过程中的油气蒸发;②热浸排放,发动机熄火后由热态转变为冷态过程中产生的油气排放,测试时定义为发动机熄火后 1 h 的油气排放;③昼间排放,停车过程中由于环境温度变化,油箱通气产生的排放;④加油排放,加油过程中由于油箱油气置换产生的排放.已有研究通常采用综合排放因子描述机动车 VOCs 排放,相关测试结果也集中在尾气排放上.事实上,从国 I 到国 V 标准,汽油车尾气非甲烷总烃的限值从 2.69 g·km⁻¹ 提高到 0.06 g·km⁻¹,降幅高达 97.77%,但蒸发排放的限值却维持在每次测试 2 g 不变^[1].这就使得尾气排放与蒸发排放对 VOCs 的贡献呈现出了较为明显的此消彼长态势.这种情形下,若仅采用综合排放因子计算机动车排放,而不对排放过程加以区分,计算结果就会包含较大的不确定性.

排放因子是排放清单的重要输入数据.对于尾气排放,已有研究在台架实验、车载实测和模型开发等方面均开展了较多工作.文献[13]中就融入了大量本地实测数据,其中尾气排放因子在车辆类型、燃料种类和排放标准这 3 个层级上进行了细分,在已有研究中得到了广泛应用^[14].而我国对蒸发排放控制研究起步较晚,实测研究相对匮乏.已有的少数研究对热浸排放、昼间排放和加油排放过程进行了实测,但缺乏系统性的整合.受测试水平限制,我国一直没有运行损失的实测结果,直接采用国外数据也会引入较大的不确定性^[15,16].此外,我国于 2020

年开始实施国 VI 标准,引入了车载油气回收系统(onboard refueling vapor recovery, ORVR),对昼间排放的测试要求从 24 h 提升到 48 h,将热浸与单昼间排放量之和的限值提高至每次测试 0.7 g^[17],并提出增加对加油排放控制的要求,限值为 0.05 g·L⁻¹,机动车的蒸发排放特征发生了较大变化.但已有研究的测试主要针对 2018 年以前的车辆^[15,16,18],考虑到政策环境与控制技术的变化,机动车 VOCs 排放的实测数据亟需更新升级.

气象条件对机动车 VOCs 排放的影响在文献[7,8,16]中的考虑也不够精细.从根本上讲,也是计算过程中缺乏对排放过程的区分导致的.排放源的时间分布规律是空气质量模拟的重要依据,已有研究通常根据年均气象参数计算年排放量,再根据交通流量等参数进行时间分配,获取月排放量^[11,19].但由于不同月份的气象条件存在差异,尤其是我国北方属于温带季风气候与温带大陆性气候,四季分明,导致机动车的实际月排放水平变化较大,而现有的对气象参数的粗糙处理会引入不确定性,因此,在排放计算中需充分考虑温度和湿度等参数的变化.

综上所述,为解决现有机动车 VOCs 排放清单研究中过程区分不清、排放因子测试不全和气象参数考虑不细这些问题,本研究将从机动车 VOCs 排放的全过程视角,建立本地化排放因子库,开发机动车全过程 VOCs 逐月排放清单构建方法.同时,选取天津市这一社会经济高度发达、车队保有规模庞大而且污染防治形势严峻的典型城市作为研究区域,运用所开发的方法建立了 2000~2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放清单.本研究提出的机动车全过程 VOCs 逐月排放清单构建方法可以丰富排放清单的方法学体系,以期为天津以及全国同类城市的机动车污染防治工作提供决策依据.

1 材料与方法

1.1 排放清单构建

机动车全过程 VOCs 逐月排放清单构建的技术路线如图 1 所示.

根据计算体系不同,将机动车 VOCs 排放划分为尾气排放和蒸发排放两部分,公式如下:

$$E = E_{\text{ex}} + E_{\text{ev}} \quad (1)$$

式中, E 、 E_{ex} 和 E_{ev} 分别表示机动车 VOCs 的总排放量、尾气排放量与蒸发排放量, t. 需要指出的是,由于蒸发排放主要由油品挥发产生,本研究仅针对汽油车开展蒸发排放特征研究.

尾气排放的计算公式如下:

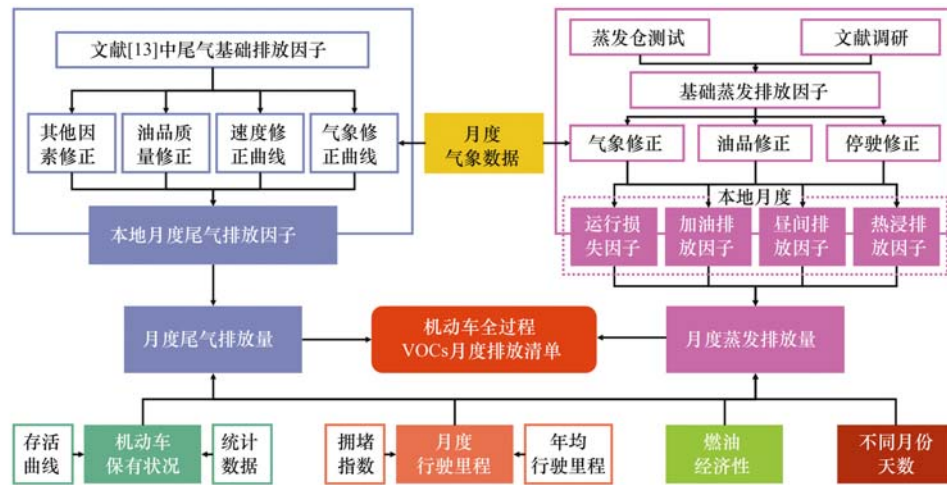


图1 技术路线示意

Fig. 1 Research framework

$$E_{ex,y} = \sum_{m,i,j,h} EF_{ex,y,m,i,j,h} \times VKT_{y,m,i} \times VP_{y,i,j,h} \quad (2)$$

式中, EF_{ex} 、 VKT 和 VP 分别表示尾气排放因子、行驶里程和机动车保有量, 单位分别为 $g \cdot km^{-1}$ 、 km 和辆; y 、 m 、 i 、 j 和 h 分别表示年份(2000~2020年)、月份(1~12月)、车辆类型(小型客车、大型客车、轻型货车、重型货车、摩托车)、燃料种类(汽油、柴油、其他)和排放标准(国I前、国I~国VI)。

蒸发排放是依据排放过程进行细分后的计算结果加和:

$$E_{ev} = E_{rl} + E_{re} + E_{hsl} + E_{dbl} \quad (3)$$

式中, E_{rl} 、 E_{re} 、 E_{hsl} 和 E_{dbl} 分别指运行损失、加油排放、热浸排放和昼间排放这4个过程的排放量。不同排放过程的计算公式有所差异, 以下分别进行叙述。

运行损失(E_{rl})的计算公式与尾气相同, 将运行损失排放因子($EF_{rl,y,m,i,j,h}$, $g \cdot km^{-1}$)代入公式(2)即可。

加油排放(E_{re})的计算不仅要考虑车辆本身与气象条件的影响, 还要考虑加油站已实施控制措施的影响, 公式如下:

$$E_{re,y} = \sum_{m,i,j,h} EF_{re,y,m,i,j,h} \times VKT_{y,m,i} \times FE_{y,i,j,h} \times VP_{y,i,j,h} \times (1 - RR_{gs}) \times PR_{y,gs} \quad (4)$$

式中, EF_{re} 为机动车的加油排放因子, $g \cdot L^{-1}$; FE 为燃油经济性, $L \cdot km^{-1}$, 取值参考 Huo 等^[20]的研究; RR_{gs} 和 PR_{gs} 分别为加油站油气回收系统的回收效率和普及率, 回收效率设定为 70%, 普及率依据文献^[21]设定。

热浸排放(E_{hsl})与昼间排放(E_{dbl})的计算公式如下:

$$E_{hsl/dbl,y} = \sum_{m,i,j,h} D_{y,m} \times EF_{hsl/dbl,y,m,i,j,h} \times VP_{y,i,j,h} \quad (5)$$

式中, $D_{y,m}$ 为 y 年 m 月的天数; $EF_{hsl/dbl}$ 为热浸/昼间排放因子, $g \cdot d^{-1}$ 。

1.2 尾气排放因子

文献^[13]中提供了按照车辆类型、燃料种类和排放标准划分的尾气基础排放因子, 并给出了排放因子本地化的详细方法论, 公式如下:

$$EF_{ex,y,m,i,j,h} = BEF_{ex,i,j,h} \times \varphi_{ex,y,m,i,j,h} \times \gamma_{ex,i,j,h} \times \theta_{ex,y,i,j,h} \quad (6)$$

式中, BEF 为机动车尾气 VOCs 基础排放因子, $g \cdot km^{-1}$, 代表了国内典型环境与行驶条件下的机动车排放水平; φ 、 γ 和 θ 为本地化修正因子, 分别表征了地理气象、行驶工况和油品质量对机动车排放的影响。对于地理气象, 典型参数是温度, 低温条件下冷启动排放量远高于常温条件, 推高了排放因子。对于行驶工况, 车速低时发动机负荷小, 燃料不能充分燃烧, 导致排放因子上升。对于油品质量, 烯烃含量和硫含量等会影响发动机燃烧和尾气处理效率, 油品提升能有效降低排放因子^[22,23]。地理气象数据来源于文献^[24,25], 行驶工况结合文献与实地调研设定, 油品质量参考文献^[26]设定。

相较于文献^[13]的原始模型, 本研究做出了两点改进。一是地理气象修正因子 φ 的取值细化到月份 m , 可以更加精细地刻画机动车尾气排放水平的逐月变化。二是在因子模拟中引入气象修正曲线与速度修正曲线^[6], 以获得更为动态连续的逐月尾气排放因子。

1.3 蒸发排放因子

蒸发排放因子的获取大致分为两步, 首先采用蒸发仓测试结合文献^[16,27]确定基础排放因子, 然后根据天津市实际环境状况完成排放因子的本地化。

本研究选择 3 辆国 V 和 10 辆国 VI 的轻型汽油

车,依据国家相关标准^[17,28],在中国汽车技术研究中心有限公司密闭仓(Imtech,德国)开展蒸发排放测试,分别得到车辆的热浸排放、昼间排放与加油排放因子。对于运行损失,目前我国缺乏相应标准,本研究基于美国环保署提出的方法^[29]对国 V 和国 VI 车辆开展了测试,获取相应的基础排放因子。对于其他排放标准车辆,受实验条件限制未能开展实测,基于文献调研的方式确定基础排放因子^[16,27,30]。在基础排放因子的应用过程中,本研究根据天津市的地理气象、油品质量和车辆停驶分布等条件对基础排放因子进行了本地化修正。地理气象和油品质量主要通过影响油气挥发影响蒸发排放^[31],车辆停驶分布则主要通过日均停车次数、停车时长分布和行驶时长等特征影响排放。不同排放过程的修正方法存在差别,其中运行损失排放因子受环境条件影响较小,无需进行额外修正^[30]。

加油排放因子的影响因素较为复杂,本研究首先采用 Reddy-Wade 公式^[32]分析标准测试环境与真实环境下排放因子的差异,据此对基础排放因子进行本地化修正。Reddy-Wade 公式如下:

$$EF_{RW, re} = A \times \left[\frac{f \times p_{atm}}{R \times T_d} + \frac{p_{atm} - p_{tank}}{R \times T_v} \right] \times \left[\frac{p_{disp}}{p_{atm} - p_{disp}} \right] \quad (7)$$

式中, $EF_{RW, re}$ 为公式模拟得到的加油排放因子; A 为与汽油蒸气分子量相关的常数,默认值为 18.2; f 为空气夹带系数, $0.2 \text{ g} \cdot \text{gal}^{-1}$; p_{atm} 、 p_{tank} 和 p_{disp} 分别为大气压、油箱内气压和加油枪内燃料蒸气压, psi; T_d 为加油枪内燃料温度, K; T_v 为油箱燃料温度, K; R 为通用气体常数, $0.3187 [(\text{gal} \cdot \text{psi}) \cdot (\text{g} \cdot \text{mol} \cdot \text{K})^{-1}]$ 。 p_{tank} 和 p_{disp} 根据以下公式进行计算:

$$p = 25.61 \times T \times RVP \times \exp\left(-\frac{2798.78}{T}\right) \quad (8)$$

式中, RVP 为汽油的里德蒸气压, psi; 将 T_v 和 T_d 分别代入公式即可得到 p_{tank} 和 p_{disp} 。

结合实测的基础排放因子,采用下式完成本地化修正:

$$EF_{re} = EF_{test, re} \times \frac{EF_{RW, re, real}}{EF_{RW, re, test}} \quad (9)$$

式中, EF_{re} 和 $EF_{test, re}$ 分别为本地化加油排放因子与基础排放因子, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $EF_{RW, re, real}$ 和 $EF_{RW, re, test}$ 分别指将真实世界与标准测试环境参数代入到公式(7)和公式(8)中得到的模拟排放因子。

热浸排放和昼间排放的修正主要考虑两方面因素:环境温度与停驶分布。对于环境温度的影响,本

研究提取了 COPERT 模型中热浸排放和昼间排放的温度修正曲线,如图 2 所示。随着温度增加,修正系数逐渐上升。将真实环境温度代入温度修正曲线,即可获取排放的温度修正系数。对于停驶分布的影响,需基于停驶数据进行本地化修正。天津市的停驶数据来源于 Liu 等^[16]的研究。

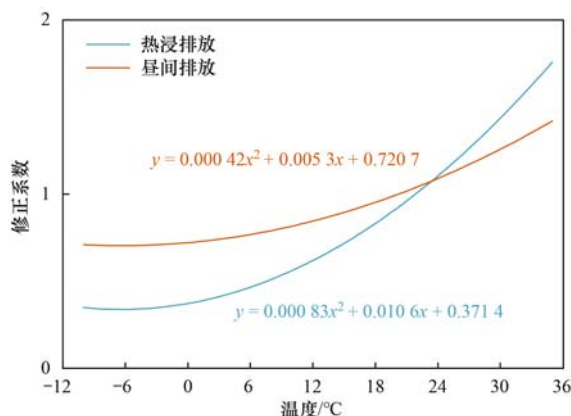


图2 热浸排放与昼间排放温度修正曲线

Fig. 2 Temperature correction curve for hot soak loss and diurnal breathing loss

综合考虑以上两方面因素的影响,热浸排放的本地化修正公式为:

$$EF_{hsl, m} = EF_{test, hsl} \times \varphi_{hsl, m, T} \times D_{hsl} \quad (10)$$

式中, $EF_{hsl, m}$ 为 m 月的本地化热浸排放因子, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; $EF_{test, hsl}$ 是热浸基础排放因子, $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$; $\varphi_{hsl, m, T}$ 表示 m 月温度为 T 时的热浸排放温度修正因子,基于图 2 中的公式计算; D_{hsl} 为每天发生热浸排放过程的停车时长, $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$,来自停驶数据。

对于昼间排放,按照测试标准的规定,将停车持续时间细分为 <24 、 $24 \sim 48$ 和 >48 h 的排放,结合环境温度与停驶数据获取本地化的昼间排放因子,公式如下:

$$EF_{dbl, m} = (EF_{test, dbl, <24} \times D_{<24} + EF_{test, dbl, 24 \sim 48} \times D_{24 \sim 48} + EF_{test, dbl, >48} \times D_{>48}) \times \varphi_{dbl, m, T} \quad (11)$$

式中, $EF_{dbl, m}$ 为 m 月的本地化昼间排放因子, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; $EF_{test, dbl, <24}$ 、 $EF_{test, dbl, 24 \sim 48}$ 和 $EF_{test, dbl, >48}$ 分别为实测得到的停车时长 <24 、 $24 \sim 48$ 和 >48 h 的昼间基础排放因子, $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$; D 为相应时段昼间排放过程的停车时长, h; $\varphi_{dbl, m, T}$ 表示 m 月温度为 T 时的昼间排放温度修正因子,基于图 2 中的公式计算。

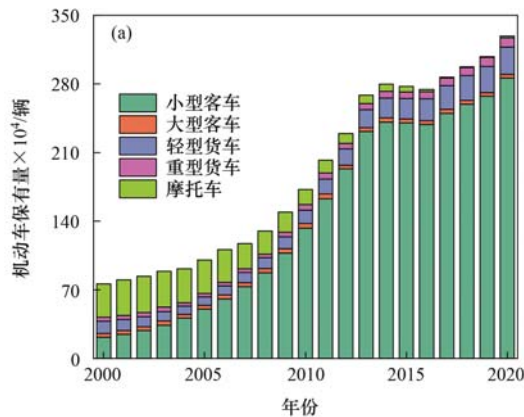
1.4 保有状况

机动车保有量与新增注册量数据从文献[25, 33]中获取。但依托公开渠道仅能得到车型构成状况,因此还需要结合存活曲线模拟车队的详细构成,该公式为^[19,34]:

$$VP_{y,i} = \sum_{ry} RP_{ry,i} \times SR_{i,y-ry} \quad (12)$$

式中 $VP_{y,i}$ 为 y 年车型 i 的机动车保有量; $RP_{y,i}$ 为 y 年车型 i 的新增注册量; $SR_{i,y-ry}$ 为车型 i 在车龄 $y-ry$ (研究年-注册年) 时的存活率。

图 3(a) 展示了天津市机动车保有量的变化状况, 2000 ~ 2020 年间, 天津市的机动车保有量从 76.06 万辆快速攀升至 328.96 万辆, 增长了 3.33



倍。从车队构成来看, 2000 年时小型客车、大型客车、轻型货车、重型货车和摩托车的保有量贡献率分别为 26.07%、5.17%、18.05%、5.46% 和 45.26%, 2020 年时分别为 86.94%、1.20%、8.46%、2.89% 和 0.52%。摩托车在前期为车队的主要车型, 后期其主体地位逐步让渡给了小型客车。

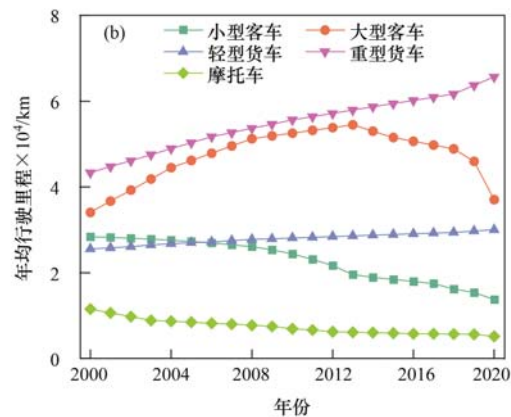


图 3 2000 ~ 2020 年天津市机动车保有量和年均行驶里程

Fig. 3 Vehicle population and annual average vehicle kilometers traveled in Tianjin from 2000 to 2020

1.5 行驶里程

本研究是在月度水平上计算机动车排放, 因此公式(2)的输入数据是月行驶里程数据 ($VKT_{y,m,i}$)。本研究首先推算出了各车型的年均行驶里程变化, 再根据月时变系数将其分解为逐月行驶里程。

目前尚无公开的官方统计资料报道天津市机动车的行驶里程状况, 本研究通过多源数据融合, 基于 3 个渠道确定行驶里程的逐年变化状况: ①天津市机动车环保检测数据, 据此提取出了 2018 年各车辆类型、燃料种类和排放标准的年均行驶里程数据, 反映了当地机动车的真实活动水平, 详细数据见 Sun 等^[12]的研究; ②已有的不同年份天津市机动车排放清单研究^[7,12,35~37]中, 年均行驶里程的取值反映了不同时期研究者对天津机动车活动水平的判断; ③时间序列年均行驶里程的推算结果, 主要参考 Cai 等^[38]建立的外推框架, 反映了各车型活动水平随社会经济指标(人均收入、城镇化率和客货周转量等)的变动趋势。

综合以上 3 个渠道的数据, 时间序列年均行驶里程的推算公式为:

$$VKT_{y,i} = VKT_{2018,i} \times \frac{SVKT_{y,i}}{SVKT_{2018,i}} \quad (13)$$

式中 $VKT_{y,i}$ 为 y 年车型 i 的年均行驶里程; $VKT_{2018,i}$ 为渠道①中获取的天津市 2018 年真实的年均行驶里程, 以此作为里程外推的基准; $SVKT_{y,i}$ 和 $SVKT_{2018,i}$ 是指渠道③模拟的天津市 y 年和 2018 年的行驶里程值, 是里程外推的依据。此外, 还会参

考渠道②中的文献调研值, 对里程在年尺度上的外推结果进行修正。

图 3(b) 展示了天津市各车型在不同年份的年均行驶里程值。2000 ~ 2020 年间, 小型客车和摩托车的年均行驶里程分别从 28 358 km 和 11 499 km 降至 13 757 km 和 5 172 km。小型客车年均行驶里程的下降与城市公共交通的发展密切相关。摩托车年均行驶里程的下降则与出行范围受限及居民生活水平提升等原因相关^[39]。轻型货车和重型货车的年均行驶里程分别从 2000 年的 25 507 km 和 43 330 km 增至 2020 年的 30 000 km 和 65 657 km。货车行驶里程的上升与日益发达的交通物流行业有关。尽管京津冀区域正在调整运输结构, 推动货物的“公转铁、公转水”^[40], 但在短期内公路运输仍为主要的货运方式。大型客车的年均行驶里程经历了先增后降的过程, 从 2000 年的 34 069 km 增至 2013 年的 54 472 km, 之后在 2020 年降至 37 051 km。近些年公路客运周转量进入了下行区间, 同期铁路周转量稳步上升^[41], 意味着居民出行方式的多元化, 越来越多人选择更为安全便捷的铁路出行, 挤压了公路客运的发展空间。2019 ~ 2020 年, 大型客车的行驶里程出现了骤降, 这与新冠疫情期间旅游业遭受冲击和人员流动减少等因素有关。

在年均行驶里程的基础上, 结合行驶里程的月度时变系数, 可将年行驶里程分解至各月份, 公式如下:

$$VKT_{y,m,i} = VKT_{y,i} \times TV_{y,m} \quad (14)$$

式中, $TV_{y,m}$ 为 y 年 m 月的行驶里程时变系数, %。月度时变系数可以根据车流量获取, 但车流量并非公开可得的数据。Zheng 等^[42] 提出可根据 TomTom 交通拥堵指数^[43] 推算机动车活动水平的变化。考虑到 2020 年新冠疫情对交通部门的冲击, 本研究根据 TomTom 交通拥堵指数设定 2020 年的月度时变系数, 根据刘庚等^[7] 的研究设定其他年份的时变系数。

2 结果与讨论

2.1 本地化排放因子

表 1 展示了本研究所测得的蒸发基础排放因子。总体而言, 基础排放因子随排放标准的升级呈现下降的趋势, 尤其是国 VI 标准, 因引入了 ORVR, 大幅加严了对各蒸发排放过程的控制, 其排放因子较国 V 标准下降了 54.54%~98.90%。

表 1 蒸发基础排放因子
Table 1 Basic evaporative emission factor

排放过程	停车时长/h	单位	排放因子						
			国 I 前	国 I	国 II	国 III	国 IV	国 V	国 VI
热浸排放		$\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	0.28	0.23	0.18	0.14	0.11	0.10	0.05
昼间排放	<24	$\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	0.10	0.08	0.07	0.05	0.04	0.03	0.008
	24~48	$\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	0.20	0.17	0.13	0.10	0.08	0.06	0.01
	>48	$\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	0.40	0.34	0.27	0.20	0.16	0.15	0.03
运行损失		$\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10	0.09	0.03
加油排放		$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.01

昼间排放因子随停车时间的增加而增大, 由于排放标准逐步加严控制要求, 各时段排放因子尤其是长时间停车 (>48 h) 排放因子下降明显。运行损失排放主要来自车辆运行过程中燃油系统温度升高产生的额外油气, 同时还有部分管路渗透排放。虽然我国机动车排放标准一直未对运行损失进行控制, 但近年来随着电控与喷油技术的进步, 车辆运行对油箱温度影响逐步降低, 渗透排放也随着管路材料与管路密封性等提升有所下降, 因而运行损失排放因子也在逐步下降。根据实测结果, 国 VI 车运行损失的平均排放因子为 $0.03 \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$, 与美国 Tier II 标准车辆排放结果较为接近 ($0.02 \sim 0.03 \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$)^[30]。对于加油排放, 我国在国 VI 标准之前并未对加油过程产生的油气进行控制。根据实测结果, 在无油气控制措施的情况下, 每加油 1 L 可产生 0.98 g 左右的油气排放。国 VI 机动车安装了 ORVR, 油气回收效率达到了 98% 以上, 使得加油排放因子

出现骤降。

图 4 展示了天津市本地化的尾气排放与蒸发排放因子。为便于比较, 蒸发排放因子的单位全部换算为 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 。总体而言, 随着排放标准的提升, 尾气排放与蒸发排放因子均呈现下降趋势, 从国 I 前到国 VI 标准 (摩托车为国 IV), 二者的平均降幅分别为 98.28% 和 90.39%。但在排放标准升级的不同阶段, 尾气排放与蒸发排放因子的下降速度有所差异。尾气排在标准升级的前中期已经有了较大降幅。以小型客车为例, 国 I 前和国 III 的尾气排放因子分别为 $4.84 \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $0.38 \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$, 降幅达到了 92.16%, 而同时期蒸发排放因子的降幅仅为 12.95%~50.63%。这是因为国 VI 之前我国机动车排放一直沿用欧洲标准, 主要关注尾气排放的控制, 而蒸发排放的控制则相对滞后。

2.2 VOCs 总量排放特征

基于 1.1 节提出的方法, 建立了天津市机动车

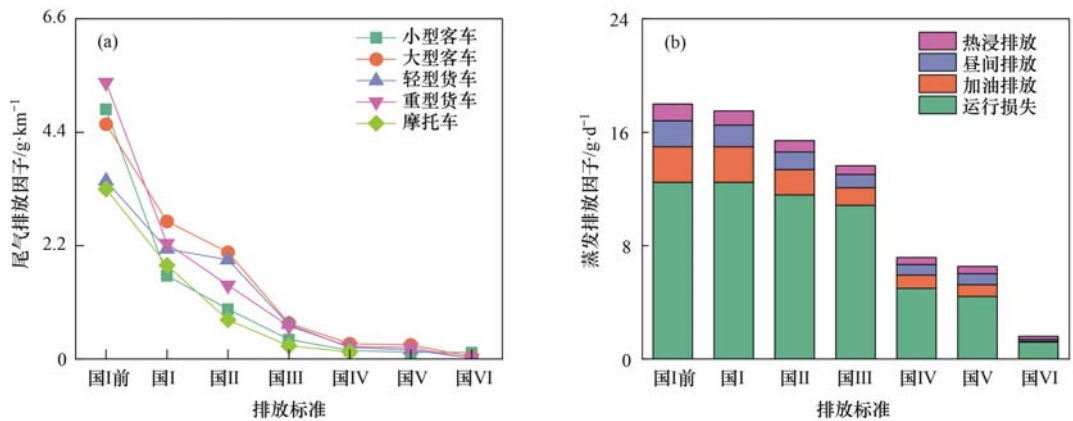


图 4 天津市机动车尾气与蒸发排放因子

Fig. 4 Exhaust and evaporative emission factor in Tianjin

全过程 VOCs 逐月排放清单. 图 5 展示了 2000 ~ 2020 年天津市机动车 VOCs 排放的演变状况, 其中

环形图表示相应研究时段内蒸发排放与尾气排放的比例.

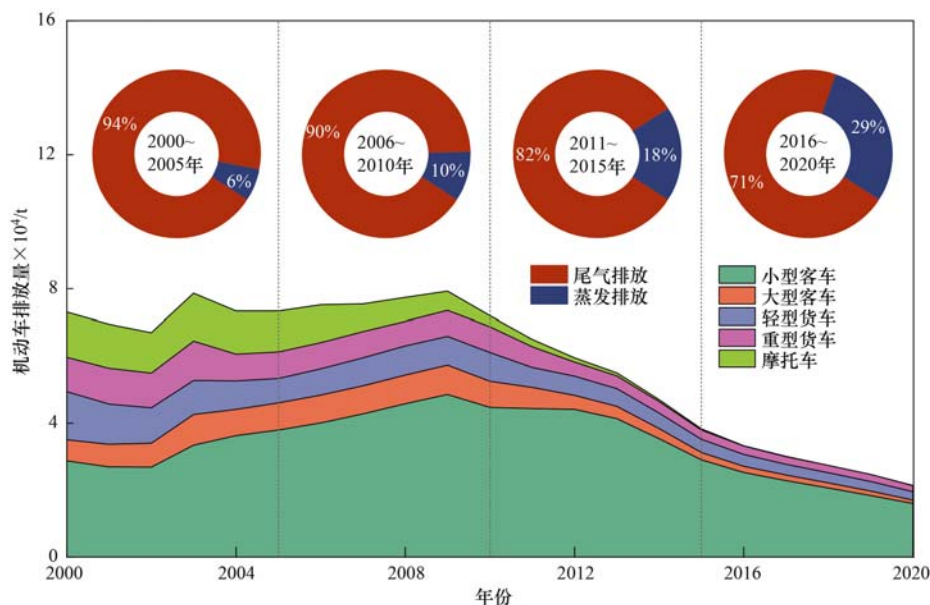


图 5 2000 ~ 2020 年天津市机动车 VOCs 排放量

Fig. 5 Vehicle VOCs emissions in Tianjin from 2000 to 2020

从总量变化而言, VOCs 排放呈现出先缓慢上升后逐步下降的趋势, 首先从 2000 年的 7.30 万 t 增至 2009 年的峰值 7.93 万 t, 然后逐步降至 2020 年的 2.14 万 t. 2002 ~ 2004 年 VOCs 排放量出现了一次快速的增减过程, 这与大型客车和重型货车保有量的波动有关. VOCs 排放量在 2009 年后进入下行区间, 得益于排放标准和油品标准升级两方面原因. 2008 年 7 月 1 日, 国Ⅲ排放标准全面实施, 同期, 汽油也升级至国Ⅲ标准, 燃料的苯和烯烃含量分别从 2.5% 和 35% 降至 1% 和 30%. 两类措施协同, 有效降低了机动车的 VOCs 排放因子. 不同时期排放量的削减速率也存在差异. 天津自 2013 年起控制机动车保有规模, 但 VOCs 的平均削减速率在 2014 ~ 2016 年间高达 15.40%, 在 2014 ~ 2019 年间却仅为 9.48%, 这与近些年单车排放水平下降速率变慢有关.

从车辆类型的角度来看, 2000 年时, 小型客车、大型客车、轻型货车、重型货车和摩托车的 VOCs 排放贡献率分别为 39.30%、8.63%、19.78%、14.02% 和 18.27%, 在 2020 年时, 分别为 75.00%、4.66%、11.74%、8.41% 和 0.19%. 小型客车一直是 VOCs 的首要贡献源, 轻型货车是 VOCs 的第二大排放源. 摩托车的贡献则被大幅压减, 这是因为过去 20 年间摩托车的保有量和活动水平均在大幅下降. 从燃料种类分担的角度看, 汽油车是 VOCs 最重要的排放源, 研究期内的贡献率一直在 80% 左右浮动. Sun 等^[12]和张意等^[35]认为天津市汽油车对机动车总 VOCs 排放的贡献率在 80% ~ 90% 之间, 与本

研究的结论具有较好的一致性.

从排放来源的角度讲, 2000 年时, 尾气排放和蒸发排放的贡献率分别为 94.54% 和 5.46%. 之后尾气排放的贡献率逐渐降低, 蒸发排放的贡献率逐渐升高. 到 2020 年, 尾气排放和蒸发排放的贡献率分别为 68.31% 和 31.69%, 其中小型客车尾气排放与蒸发排放的贡献率分别为 59.30% 和 40.70%, 蒸发排放贡献显著高于车队平均水平. Liu 等^[15]的研究指出, 我国机动车蒸发排放有望取代尾气排放, 成为机动车 VOCs 排放的主要来源, 而本研究的结果表明, 尽管蒸发排放的贡献率逐年上升, 但在相当长一段时期内, 中国大部分城市的机动车尾气仍将是 VOCs 的主要来源. 在国Ⅳ标准实施之前, 随着排放标准升级, 尾气排放因子降幅大, 蒸发排放因子降幅较小. 但后续标准的实施大幅提高了蒸发排放的控制水平, 将有效抑制机动车蒸发排放的增长势头. 事实上, 蒸发排放的贡献率增幅近年来已经有所放缓. 2011 ~ 2015 年, 蒸发排放的贡献率从 14.65% 增至 24.05%, 上升了 9.40 个百分点. 2016 ~ 2020 年, 蒸发排放的贡献率从 25.86% 增至 31.69%, 仅上升了 5.82 个百分点.

排放标准升级是机动车污染治理的重要措施. 本研究期内, 机动车的排放标准从国 I 前升级至国Ⅵ, 共计 7 个阶段. 2000 年时, 仅有国 I 前和国 I 两个阶段的排放标准, 贡献率分别为 97.87% 和 2.13%. 而到了 2020 年, 国Ⅲ和国Ⅳ车成为了排放主体, 贡献率分别为 30.37% 和 29.79%. 从 2.1 节

的研究来看,排放标准升级对于尾气排放和蒸发排放的作用有所差异,因此本研究在 2.3 节中对两种来源的排放分别进行讨论。

2.3 尾气排放与蒸发排放特征

图 6(a) 展示了 2000~2020 年天津市机动车 VOCs 尾气排放的变化状况。本研究期内,尾气 VOCs 年排放量从 6.90 万 t 降至 1.46 万 t,减排了 5.44 万 t。将减排量进行分解,发现小型客车、摩托车与轻型货车的减排量分别为 1.74、1.20 和 1.15 万 t,是尾气 VOCs 减排的主要贡献车型。2020 年国 II 及以下、国 III、国 IV、国 V 和国 VI 机动车的保有量贡献率分别为 6.97%、18.80%、39.38%、22.78% 和 12.07%,对尾气排放 VOCs 的贡献率分别为 22.80%、31.34%、27.01%、14.82% 和 4.03%,国 II 及以下和国 III 的保有量贡献率高于其排放贡献率,是机动车污染防治的重点。此外,尾气 VOCs 排放的降幅正在逐步收窄。除去受疫情影响的 2020 这一特殊年份,分析 2013 年以后尾气 VOCs 的变化,发现 2014~2016 这 3 年间的排放降幅为 33.63%,而 2017~2019 这 3 年间的降幅收窄至

20.40%。这期间是国 IV 至国 V 的过渡期,两个排放标准间尾气排放因子的削减幅度弱于之前的排放标准。考虑到国 VI 尾气排放因子相对于国 V 的下降也较为有限,说明随着机动车排放控制的推进,未来传统燃油车的减排难度可能会进一步增大。因此,推广新能源汽车,应成为未来机动车污染防治的重要方向。

蒸发排放与尾气排放的 VOCs 总量趋势存在较大差异[图 6(b)]。蒸发排放呈现出较为明显的倒 U 型走势,从 2000 年的 0.40 万 t 增至 2013 年的 1.00 万 t,之后于 2020 年降至 0.68 万 t,蒸发排放峰值出现的时间晚于尾气排放。这是因为从国 I 前到国 III 的过程中,蒸发排放因子的降低极为有限。但国 IV、国 V 标准的实施,有效控制了机动车的蒸发排放水平。此外,近些年蒸发排放量一直维持着较快的下降速率,并未同尾气排放一样出现降幅衰减的问题。由此趋势推断,随着国 III 以下老旧车辆的淘汰,以及对蒸发排放控制力度更大的国 VI 车辆占比的提升,未来一段时期内天津市机动车蒸发排放 VOCs 仍将维持下降态势。

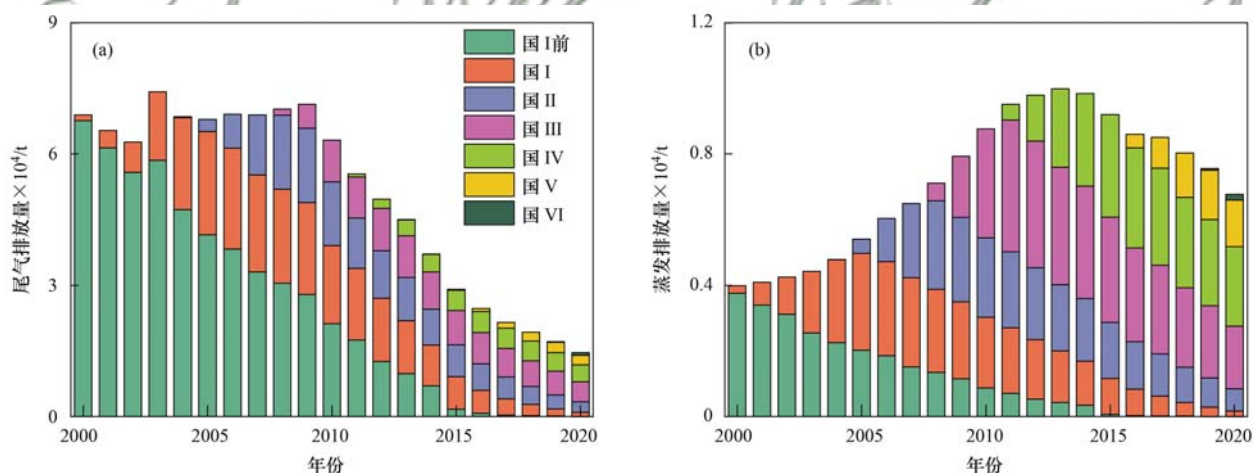


图 6 2000~2020 年天津市不同排放标准机动车 VOCs 尾气排放量和蒸发排放量

Fig. 6 Vehicle VOC exhaust emissions and evaporative emissions by emission standard in Tianjin from 2000 to 2020

2.4 月排放特征

鉴于 2020 年新冠疫情对机动车排放的影响,不能作为常态进行分析,本研究以 2019 年为例(图 7),详细展示了天津市机动车尾气排放、运行损失、加油排放、昼间排放和热浸排放全过程的月变化状况。

不同过程的排放月度变化存在一定差异。尾气排放放在低温时的排放量显著升高,12 月为最高点,占全年排放的 11.32%,高温时则有所回落,7 月为最低点,贡献率为 6.55%。这是因为低温冷启动的排放量显著高于常温冷启动^[44,45],推升了机动车的尾气排放量。运行损失主要发生在机动车热稳定运行的过程中,其排放变化主要与活动水平有关,受温

度影响不大,最高点发生在 10 月,贡献率为 9.05%,是由国庆黄金周期间居民出行量的增长所致。加油排放、昼间排放和热浸排放放在高温时排放量显著上升,最高点均出现在 7 月,贡献率依次为 10.35%、10.95% 和 14.21%,最低点均出现在 2 月,贡献率依次为 6.25%、5.92% 和 3.60%,这与燃料在不同温度下的挥发性有关。

将蒸发排放作为整体来看,最高点与最低点分别出现在 7 月和 2 月,贡献率依次是 9.50% 和 6.69%。总体而言,尾气排放放在冬季高、蒸发排放放在夏季高。但由于当前机动车 VOCs 排放仍由尾气主导,因此 VOCs 总排放呈现出秋冬季高、春夏季低

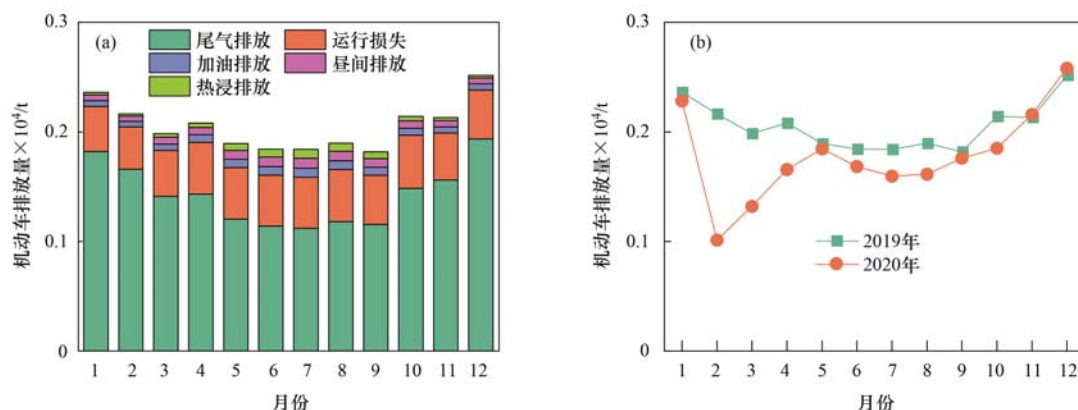


图7 天津市2019年机动车VOCs全过程排放量月变化以及2020年变化趋势对比

Fig. 7 Monthly variation in full-process vehicular VOC emissions in 2019 and comparison with 2020 in Tianjin

的特点,最高点出现在12月,贡献率为10.19%,最低点出现在9月,贡献率为7.37%。9月的温度适中,正处于尾气排放因子与蒸发排放因子均相对较低的时点,从而导致了较低的整体排放水平。

VOCs排放的月度变化受活动水平与排放因子两方面因素影响。若仅考虑机动车在不同月份的活动水平,就难以准确反映机动车的月度变化特征。已有研究通常以车流量为依据,将机动车排放分配至月。2月天数少且存在春节假期的问题,因此该月份车流量往往为全年低点,有研究据此认为2月是机动车全年排放的低点^[19]。事实上,若同步考虑冬季机动车尾气排放水平显著上升这一因素,那么2月是全年机动车排放月度低点这一结论便失偏颇。但活动水平的剧烈波动仍然会对机动车排放造成显著影响。图7(b)展示了2019年和2020年两年的天津市机动车VOCs排放月度变化状况。2020年的2月和3月,为应对新冠疫情,中国多数城市实施了封控措施,采取了交通管制。在此期间,机动车的活动水平大幅下降,直到4月和5月才出现了较为明显的反弹,恢复到了2019年的水平。2月和3月是2020年机动车VOCs排放最低的两个月,仅占全年总量的4.74%和6.18%。Zheng等^[42]讨论了新冠疫情期间中国人为源的排放变化状况,同样认为交通源是VOCs下降的重要驱动力,与本研究的结论有较好的一致性。根据以上分析可知,机动车排放的时间变化是受多因素影响的复杂过程集合,单纯考虑活动水平或排放因子变化,均无法准确解析排放变化。直接套用已有文献中固定的时变系数进行排放的时间分配,会引起较大的不确定性,应根据本地气象条件与车辆出行特征,因地制宜地设定时变系数。

2.5 不确定性分析

机动车排放清单的构建过程中,受方法固有缺陷以及数据可得性的限制,不确定性难以避免,以下

将从方法和数据两个层面进行讨论。

从方法层面来看,本研究采用自上而下法,基于区域机动车保有量计算排放,无法考虑车辆跨境流动带来的影响。此外,现实世界中,机动车的行驶工况处于动态变化中,本研究中对动态交通数据的运用还有提升空间。但本研究也引入一些新手段改进原有方法,以降低排放计算的不确定性。一是考虑了不同月份气象条件与车辆出行的变化,将传统自上而下法的精度从年细化至月,提升了机动车排放计算的时间分辨率。二是细化了机动车蒸发排放的算法,将其分解为运行损失、热浸、昼间和加油排放这4个过程,分别匹配适用的计算手段,提升了排放计算的过程解析度。

从数据层面来看,本研究计算长时间序列的机动车排放,车队构成根据新车注册量和存活曲线推算,与基于车辆注册数据库开展的研究相比仍有较高不确定性。不同年份车辆的年均行驶里程根据社会经济指标推算,也会存在一定误差。此外,蒸发排放因子本地化中,各类车型的停驶数据均依照小型客车的出行规律进行推算,后续应补充更多调研数据。但总体而言,本研究的基础数据具有较高的本地化程度。保有量与注册量数据来自官方统计年鉴,本身不确定性较小。基准年均行驶里程提取自机动车环保检测线数据,可以充分反映本地车辆的活动水平。尾气排放因子基于文献[13]模型获取与修正,蒸发排放因子基于实测获得,均可以较好的反映本地车辆的VOCs整体排放水平。

为验证本研究中排放清单的不确定性是否被控制在合理范围内,将计算结果与已有研究进行了对比。表2展示了2013~2020年不同研究中天津市机动车的排放结果,与本研究的计算结果进行了逐年对比。

尽管本研究构建的是长时间序列排放清单,但

表 2 已有研究中天津市机动车 VOCs 排放量 $\times 10^4/t$
Table 2 Vehicle emissions of VOCs in Tianjin
in previous studies $\times 10^4/t$

年份	本研究排放量	已有研究排放量	文献
2020	2.14	4.52	[42]
2019	2.47	2.23	[26]
2018	2.73	2.02	[12]
2017	3.00	5.56	[7]
2016	3.33	3.40	[37]
2015	3.83	2.77	[9]
2014	4.70	3.28	[36]
2013	5.50	5.29	[35]

计算结果与已有研究在不同年份上普遍具有较好的一致性,体现了本研究所建立计算方法的稳健性以及所采用基础数据的可靠性,但在个别年份与已有研究存在一定差异,可能是基础数据与模型算法的不同所导致。文献[42]中 2020 年的移动源 VOCs 排放清单结果为本研究的 2.11 倍,这是因为该研究报告涵盖了机动车和非道路移动机械多种源类的排放。文献[7]中 2017 年的机动车 VOCs 排放量为本研究的 1.85 倍,主要是因为基础数据不同,小型客车是 VOCs 的首要排放源,但该研究为小型客车设定的年均行驶里程为 21 248 km,显著高于本研究中来自于环保检测线的数据(17 436 km)。由于排放清单构建所需的基础数据庞杂,且不少数据难以通过公开渠道获得,对于非公开数据,不同研究有各自的搜集、实测与推算方法。未来政府相关部门以及研究者们可在数据共享方面开展更多工作,以期在基础数据方面获取更多共识。

3 结论

(1)机动车 VOCs 排放总量呈现出先缓慢上升后逐步下降的趋势,2009 年排放总量最高,为 7.93 万 t,2020 年最低,为 2.14 万 t。小型客车是对排放总量贡献最大的车型,贡献率达 39.30%~75.00%。蒸发排放对总排放贡献率逐渐升高,从 2000 年的 5.46% 增至 2020 年的 31.69%。国 VI 标准的实施大幅加严了蒸发排放的控制水平,将有效抑制机动车蒸发排放的增长势头,尾气仍将是 VOCs 的主要来源。

(2)蒸发排放与尾气排放的 VOCs 总量趋势存在着较大差异。2000~2020 年,尾气 VOCs 排放量从 6.90 万 t 降至 1.46 万 t,降幅达 78.84%;蒸发排放则呈现出了较为明显的倒 U 型走势,排放量从 2000 年的 0.40 万 t 增至 2013 年的 1.00 万 t,之后于 2020 年降至 0.68 万 t。差异产生的主要原因是排放标准对尾气与蒸发排放的控制力度有所差别。近年

来,尾气排放降幅逐步收窄,而蒸发排放在未来一段时期内仍将维持较快降幅。

(3)不同排放过程的月度变化存在一定差异,受活动水平与排放因子两方面因素的影响。机动车 VOCs 总排放呈现出秋冬季高、春夏季低的特点。尾气排放在低温时的排放较高,运行损失排放主要与活动水平有关,加油排放、昼间排放和热浸排放在高温时排放较高。2020 年疫情期间,封控措施使得机动车的活动水平大幅波动,排放变动状况与往年相比存在较大差异。

参考文献:

[1] Sun L N, Zhong C Z, Peng J F, *et al.* Refueling emission of volatile organic compounds from China 6 gasoline vehicles[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **789**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147883.

[2] Liu Y, Zhong C Z, Peng J F, *et al.* Evaporative emission from China 5 and China 6 gasoline vehicles: emission factors, profiles and future perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **331**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129861.

[3] Yang T, Liu B S, Yang Y, *et al.* Improved positive matrix factorization for source apportionment of volatile organic compounds in vehicular emissions during the Spring Festival in Tianjin, China[J]. *Environmental Pollution*, 2022, **303**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119122.

[4] Qin J J, Wang X B, Yang Y R, *et al.* Source apportionment of VOCs in a typical medium-sized city in North China Plain and implications on control policy[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **107**: 26-37.

[5] Zhang Z N, Man H Y, Qi L J, *et al.* Measurement and minutely-resolved source apportionment of ambient VOCs in a corridor city during 2019 China International Import Expo episode[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **798**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149375.

[6] 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**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105514.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 孙世达, 金嘉欣, 吕建华, 等. 基于精细化年均行驶里程建立机动车排放清单[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 2018-2029.

[10] Sun S D, Jin J X, Lv J H, *et al.* Developing vehicle emission inventory based on refined annual average vehicle kilometers travelled[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 2018-2029.

[11] 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.

[12] Jiang P Y, Zhong X, Li L Y. On-road vehicle emission inventory and its spatio-temporal variations in North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115639.

[13] Liu G, Sun S D, Zou C, *et al.* Air pollutant emissions from on-

- road vehicles and their control in Inner Mongolia, China [J]. *Energy*, 2022, **238**: 121724, doi: 10.1016/j.energy.2021.121724.
- [12] Sun S D, Sun L N, Liu G, *et al.* Developing a vehicle emission inventory with high temporal-spatial resolution in Tianjin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **776**: 145873, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145873.
- [13] 生态环境部. 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]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm, 2022-04-11.
- [14] Deng F Y, Lv Z F, Qi L J, *et al.* A big data approach to improving the vehicle emission inventory in China [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 2801, doi: 10.1038/s41467-020-16579-w.
- [15] 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.
- [16] Liu H, Man H Y, Cui H Y, *et al.* An updated emission inventory of vehicular VOCs and IVOCs in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(20): 12709-12724.
- [17] GB 18352.6-2016, 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段) [S].
- [18] Man H Y, Liu H, Xiao Q, *et al.* How ethanol and gasoline formula changes evaporative emissions of the vehicles [J]. *Applied Energy*, 2018, **222**: 584-594.
- [19] 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.
- [20] Huo H, He K B, Wang M, *et al.* Vehicle technologies, fuel-economy policies, and fuel-consumption rates of Chinese vehicles [J]. *Energy Policy*, 2012, **43**: 30-36.
- [21] GB 20952-2007, 加油站大气污染物排放标准 [S].
- [22] 张孟珠, 郝春晓, 葛蕴珊, 等. 车用汽油及含氧燃料的环境效应 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(4): 1545-1551.
- Zhang M Z, Hao C X, Ge Y S, *et al.* Environmental impacts of gasoline and oxygenated fuels when used on light-duty vehicles [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(4): 1545-1551.
- [23] Dai P P, Ge Y S, Lin Y M, *et al.* Investigation on characteristics of exhaust and evaporative emissions from passenger cars fueled with gasoline/methanol blends [J]. *Fuel*, 2013, **113**: 10-16.
- [24] 中国气象局. 中国气象年鉴 [M]. 北京: 气象出版社, 2020.
- [25] 天津市统计局. 天津统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2000.
- [26] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报(2020年) [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202008/P020200811521365906550.pdf>, 2020-08-12.
- [27] Li J C, Ge Y S, Wang X, *et al.* Evaporative emission characteristics of high-mileage gasoline vehicles [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **303**: 119127, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119127.
- [28] GB 18352.5-2013, 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段) [S].
- [29] Haskew H, Eng K, Liberty T, *et al.* Running loss emissions from in-use vehicles [R]. SAE Technical Paper 1464, 1999. 1-25.
- [30] U.S. EPA. Evaporative emissions from onroad vehicles in MOVES3 [R]. North Carolina: Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency, 2020.
- [31] 樊守彬, 田灵娣, 张东旭. 基于 COPERT 模式的北京市汽油车蒸发 VOCs 排放清单 [J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(6): 3091-3096.
- Fan S B, Tian L D, Zhang D X. Emission inventory of gasoline evaporation from vehicles in Beijing based on COPERT model [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(6): 3091-3096.
- [32] Reddy S. Mathematical models for predicting vehicle refueling vapor generation [R]. SAE Technical Paper 1279, 2010. 1-9.
- [33] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据 [EB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/>, 2022-04-28.
- [34] 郝瀚, 王贺武, 欧阳明高, 等. 我国汽车存活规律研究 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, **41**(3): 301-305.
- Hao H, Wang H W, Ouyang M G, *et al.* Vehicle survival patterns in China [J]. *Science China (Technological Sciences)*, 2011, **54**(3): 625-629.
- [35] 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*, 2017, **50**(1): 90-96.
- [36] 杨雯, 王学军, 张倩茹. 基于高精度清单的京津冀机动车排污政策研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(8): 2803-2810.
- Yang W, Wang X J, Zhang Q R. Vehicle pollution control policy study on the Beijing-Tianjin-Hebei region, based on a high-precision emission inventory [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 2803-2810.
- [37] 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.
- [38] Cai H, Xie S D. Tempo-spatial variation of emission inventories of speciated volatile organic compounds from on-road vehicles in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(18): 6983-7002.
- [39] 天津市公安局. 天津市公安局关于对《天津市公安局关于确定摩托车禁止通行区域的通告(征求意见稿)》公开征求意见的通知 [EB/OL]. http://ga.tj.gov.cn/xxfb/tztg/202107/t20210705_5496515.html, 2021-07-05.
- [40] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院办公厅印发《推进多式联运发展优化调整运输结构工作方案(2021-2025年)》 [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/07/content_5666976.htm, 2022-01-07.
- [41] Tong H, Peng J F, Zhang Y J, *et al.* Environmental benefit analysis of "road-to-rail" policy in China based on a railway tunnel measurement [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **316**: 128227, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128227.
- [42] Zheng B, Zhang Q, Geng G N, *et al.* Changes in China's anthropogenic emissions and air quality during the COVID-19 pandemic in 2020 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, **13**(6): 2895-2907.
- [43] TomTom. TOMTOM Traffic Index [EB/OL]. https://www.tomtom.com/en_us/TrafficIndex/, 2020-04-10.
- [44] 张铁臣. 汽油车冷启动挥发性有机物排放及生成机理的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [45] Suarez-Bertoa R, Pavlovic J, Trentadue G, *et al.* Effect of low ambient temperature on emissions and electric range of plug-in hybrid electric vehicles [J]. *ACS Omega*, 2019, **4**(2): 3159-3168.

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-da, <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 photeinocarpan</i> and <i>Pterocypsla 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)