

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期

Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM_{2.5}时空特征与驱动因素分析 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)

郑州市大气PM_{2.5}中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)

宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)

上海城区PM_{2.5}中有机组分及硝基芳香化合物分布特征 庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)

南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新锋, 盖鑫磊 (1738)

春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化 江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)

重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势 李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)

珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)

基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)

基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源 韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)

基于SOA和O₃生成潜势的杭州市PM_{2.5}和O₃协同控制 林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)

超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响 王鹏程, 袁勃, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)

西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应 王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性 涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)

基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征 高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)

西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)

“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析 廖雅, 侯晓姝, 任晓红 (1853)

中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)

新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)

珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)

河套灌区浅层地下水NO₃⁻-N时空变化及驱动因素 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)

盐城地区地下水溶质来源及其成因分析 王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)

白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)

东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)

松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性 程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)

区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响 高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)

南水北调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)

千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价 弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)

蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)

基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价 李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)

小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响 张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)

不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)

南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析 岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)

老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)

碳化泡沫负载Co₃O₄活化过硫酸盐降解罗丹明B 王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)

低总氮浓度下Fe²⁺促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮 郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)

污水管道增强通风作用下氧气的传质特性 杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)

长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价 张义, 周心劝, 曾晓辉, 冯娇, 刘玉荣 (2062)

中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)

贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评估及控制因素 张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)

地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)

矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)

农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价 朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)

安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)

方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果 任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)

伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响 张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)

我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性 刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)

地膜覆盖和生物炭添加对菜地N₂O排放的影响 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)

氮肥运筹对稻田CH₄和N₂O排放的影响 郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)

松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性 王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)

棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)

pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)

生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)

有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)

九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征 黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)

碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)

《环境科学》征订启事(1929) 《环境科学》征稿简则(1975) 信息(1996, 2029, 2080)

基于隧道测试的机动车 VOCs 排放特征及源解析

刘鑫会¹, 朱仁成^{1*}, 金博强¹, 梅慧¹, 祖雷², 尹沙沙^{1,3}, 张瑞芹^{1,3}, 胡京南²

(1. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 郑州大学环境科学研究院, 郑州 450001)

摘要: 为探究以乙醇汽油(E10)为主要燃料的机动车尾气源和蒸发源挥发性有机物(VOCs)排放特征,于2019年12月在郑州市北三环隧道内展开了连续两周的VOCs采样,并对隧道内车流特征和环境参数等进行在线监测。首先,利用气相色谱/质谱(GC/MS)法定量出106种VOCs组分,然后采用正交矩阵因子分析(PMF5.0)-化学质量平衡(CMB8.2)复合模型对机动车尾气源和蒸发源VOCs排放的贡献率进行定量解析,最后采用最大增量反应活性(MIR)和气溶胶生成系数(FAC)分别测算了尾气源和蒸发源的臭氧生成潜势(OFP)和二次有机气溶胶生成潜势(SOAFP)。结果表明,采样期间隧道环境空气中 $\rho(\text{VOCs})$ 为 $(2794.5 \pm 147.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中卤代烃类的质量分数最高 $[(32.4 \pm 2.0)\%]$,其次为芳烃类 $[(27.5 \pm 0.6)\%]$ 和烷烃类 $[(23.3 \pm 0.8)\%]$;基于PMF5.0-CMB8.2复合模型的机动车源VOCs解析结果为:尾气排放(62.5%) > 蒸发排放(37.5%);机动车源VOCs排放的OFP贡献率为:尾气排放(71.9%) > 蒸发排放(28.1%),SOAFP贡献率为:尾气排放(75.8%) > 蒸发排放(24.2%);蒸发源OFP的优势组分有间/对-二乙苯、异戊二烯和反-2-戊烯等,蒸发源SOAFP的优势组分有间/对-二乙苯、间/对-二甲苯和1,2,3-三甲苯等,尾气源OFP的优势组分有间/对-二甲苯、1,2,4-三甲苯和1,3,5-三甲苯等,尾气源SOAFP的优势组分有间/对-二甲苯、间/对-二乙苯和1,3,5-三甲苯等。建议E10使用区域,在加强机动车尾气排放控制的同时,也应重视蒸发VOCs排放,尤其是其中芳烃类和烯烃类等高活性组分。

关键词: 隧道测试; 挥发性有机物(VOCs); 源解析; 蒸发排放; 尾气排放; 臭氧生成潜势(OFP); 二次有机气溶胶生成潜势(SOAFP)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1777-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108192

Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study

LIU Xin-hui¹, ZHU Ren-cheng^{1*}, JIN Bo-qiang¹, MEI Hui¹, ZU Lei², YIN Sha-sha^{1,3}, ZHANG Rui-qin^{1,3}, HU Jing-nan²

(1. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Institute of Environmental Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To explore the emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from vehicular exhaust sources and evaporative sources with ethanol gasoline (E10) as the main fuel, VOCs sampling campaigns were carried out in the north third ring tunnel of Zhengzhou city for two consecutive weeks in December 2019. In addition, the characteristics of traffic flow and environmental information were also monitored in the tunnel. Firstly, 106 VOCs were quantified using gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS), and then source apportionment of VOCs in the tunnel was carried out using a positive matrix factorization (PMF5.0)-chemical mass balance (CMB8.2) composite model. Finally, the ozone formation potential (OFP) and secondary organic aerosol formation potential (SOAFP) of vehicle exhaust sources and evaporative sources were analyzed using the maximum incremental reactivity (MIR) and fractional aerosol coefficient (FAC). The results showed that $\rho(\text{VOCs})$ in the tunnel was $(2794.5 \pm 147.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ during the experiment, among which halogenated hydrocarbons $[(32.4 \pm 2.0)\%]$ accounted for the highest proportion, followed by aromatic hydrocarbons $[(27.5 \pm 0.6)\%]$ and alkanes $[(23.3 \pm 0.8)\%]$. Source apportionment of vehicular VOCs showed that exhaust emissions (62.5%) > evaporative emissions (37.5%), whereas the contribution of OFP was that exhaust emissions (71.9%) > evaporative emissions (28.1%), and the contribution of SOAFP was that exhaust emissions (75.8%) > evaporative emissions (24.2%). The dominant components of OFP in evaporative sources were *m,p*-diethylbenzene, isoprene, and *trans*-2-pentene, whereas *m,p*-diethylbenzene, *m,p*-xylene, and 1,2,3-trimethylbenzene were the dominant components of SOAFP. The major components of OFP in exhaust sources were *m,p*-xylene, 1,2,4-trimethylbenzene, and 1,3,5-trimethylbenzene, whereas *m,p*-xylene, *m,p*-diethylbenzene, and 1,3,5-trimethylbenzene were the dominant components of SOAFP. In regions where ethanol gasoline is used, special attention should be paid not only to the exhaust emissions control but also to strengthening the emissions reduction of VOCs from vehicle evaporative sources, especially the high active components such as aromatic hydrocarbons and alkenes.

Key words: tunnel test; volatile organic compounds (VOCs); source apportionment; evaporative emissions; exhaust emissions; ozone formation potential (OFP); secondary organic aerosol formation potential (SOAFP)

近年来,臭氧(ozone, O_3)与细颗粒物(fine particulate matter, $\text{PM}_{2.5}$)协同控制成为提升我国环境空气质量的关键所在^[1]。作为大气 O_3 和二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)共同的关键前体物^[2,3],挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)的污染源排放特征、来源解析和

二次污染物生成潜势等逐渐成为国内外研究热点。北京^[4]、天津^[5]、河北^[6]、上海^[7]、厦门^[8]和西

收稿日期: 2021-08-17; 修订日期: 2021-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808507); 国家重点研发计划项目(2017YFC0212401)

作者简介: 刘鑫会(2000~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制理论与技术, E-mail: xinhui_liu@126.com

* 通信作者, E-mail: zhurc@zzu.edu.cn

安^[9]等地区 2014 ~ 2019 年间开展的大气 VOCs 源解析结果表明,机动车源的贡献率高达 23.1% ~ 48.4%,是城市大气 VOCs 的主要来源.因此,加强机动车 VOCs 排放控制是目前我国大气污染防治的重要组成部分.

作为我国重要的综合交通枢纽和商贸物流中心,河南省省会郑州市目前机动车保有量已超过 400 万辆,在全国城市排名中位居第六^[10].为降低机动车污染排放,郑州市作为首批试点城市于 2004 年 12 月 1 日已实现了乙醇汽油(E10)的全面封闭式推广使用^[11].在减污降碳协同背景下,国家能源局已发布实施方案要求积极做好车用乙醇汽油推广的重点工作^[12].但由于 E10 汽油的含氧量和饱和蒸气压与普通汽油存在差异,其降污减排效果在实际应用过程中仍存在一定的不确定性^[13-16].例如,Wu 等^[13]的研究结果显示与普通汽油相比,E10 能降低尾气颗粒物排放,但对 THC 并无明显减排效果;Zhu 等^[14]的研究也发现常温下 E10 能降低大多数污染物排放,但是低温下 E10 的节能减排效果会显著下降;而 Koupal 等^[15]基于 MOVES-Mexico 模型研究则认为推广 E10 后城市区域 VOCs 将增加 13% ~ 18%,此外还会增加有毒污染物排放.

目前,用于机动车 VOCs 排放特征研究的测试方法主要有台架试验、车载实验、路边采样、遥感技术和隧道测试等.与其他方法相比,隧道测试可以反映车队实际运行状态下蒸发源与尾气源的综合排放水平,且具有光化学反应弱、受外源传输影响小等优点.我国上海^[17]、天津^[18]、广州^[19]、合肥^[20]、南京^[21]和成都^[22]等城市典型隧道已开展了相关测试研究,获得了本地化的机动车 VOCs 排放特征,但缺少对尾气源和蒸发源贡献率的进一步探究.此外,上述研究区域的车用燃油多为国五及以下标准的传统燃油,不能反映机动车使用我国目前大力推广的国六阶段乙醇汽油的 VOCs 排放特征.

为获得以 E10 为主要燃料的机动车 VOCs 排放特征,本研究于 2019 年 12 月在郑州市北三环隧道开展了连续两周的 VOCs 采样,利用气相色谱-火焰离子化检测器/质谱(gas chromatography-flame ionization detector/mass spectrometry, GC-FID/MS)方法对隧道内 106 种 VOCs 组分进行定量分析,结合正交矩阵因子分析(positive matrix factorization, PMF5.0)-化学质量平衡(chemical mass balance, CMB8.2)复合模型探究机动车尾气源与蒸发源 VOCs 排放贡献率,并采用最大增量反应活性(maximum incremental reactivity, MIR)和气溶胶生成系数(fractional aerosol coefficient, FAC)测算尾气源

与蒸发源的臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)和二次有机气溶胶生成潜势(secondary organic aerosols formation potential, SOAFP).本研究充分利用了隧道环境受外源传输影响小、光化学反应弱和机动车排放贡献大等优势,将隧道测试与受体模型源解析相结合,提高解析结果的准确性和可靠性,力图探明 E10 乙醇汽油车在实际行驶状态下尾气源和蒸发源 VOCs 排放的贡献率,以期制定科学有效的机动车 VOCs 管控政策提供依据.

1 材料与方法

1.1 样本采集

本研究基于郑州市北三环隧道(113°43'27" E, 34°48'50" N)开展连续两周的隧道环境空气 VOCs 采样.该隧道采用独立双孔箱涵形式,隧道单孔宽 13.5 m,单孔横截面积 83.3 m²,全长 4 520 m,是目前河南省最长的城市隧道.采样点布设在隧道南侧孔道入口 870 m 处,采样高度为 1.5 m,北三环隧道地理位置及采样点布设如图 1 所示.VOCs 样本采集时间为 2019 年 12 月 5 ~ 18 日早中晚 3 个时段(08:00 ~ 09:00、11:00 ~ 12:00 和 17:00 ~ 18:00),包含工作日和非工作日.采样期间隧道顶部设置的全射流式轴流风机处于关闭状态,除隧道进出口外无其他通风口,隧道附近无特别工业源,因此采样点 VOCs 主要来自机动车排放累积,受外源传输影响较小.

1.2 仪器设备

采用数字高清双雷达微波车辆检测器(Wavetronix, USA)结合摄像机录像获取采样期间车流量和车型占比等信息,采用便携式手持气象仪(YGY-QXY, China)对采样点处风速进行在线监测.VOCs 样本采用 3.2 L 内壁硅烷化、抽真空的 Summa 罐(Entech, USA)以 0.04 L·min⁻¹恒定流量采集,采样时间为 60 min. VOCs 样本浓缩除杂后进入 GC-FID/MS(Agilent, USA)进行检测分析.根据色谱保留时间和质谱图进行定性分析,以 EPA TO-15 和 PAMS 作为外标气体,以溴氯甲烷、1,2-二氯苯、氯苯-d5 和 4-溴氟苯作为内标气体进行定量分析,共检测出 106 种 VOCs 组分.为降低高反应活性组分的检测误差,所有样本于 15 d 内完成分析^[23].

1.3 分析方法

1.3.1 PMF5.0 模型

PMF5.0 模型的基本原理是将样本组分浓度矩阵分解为源贡献矩阵、源成分谱矩阵和残差矩阵,并使用多次迭代算法使目标函数 Q 最小化,进而确定最优解析结果,计算公式如式(1)所示:

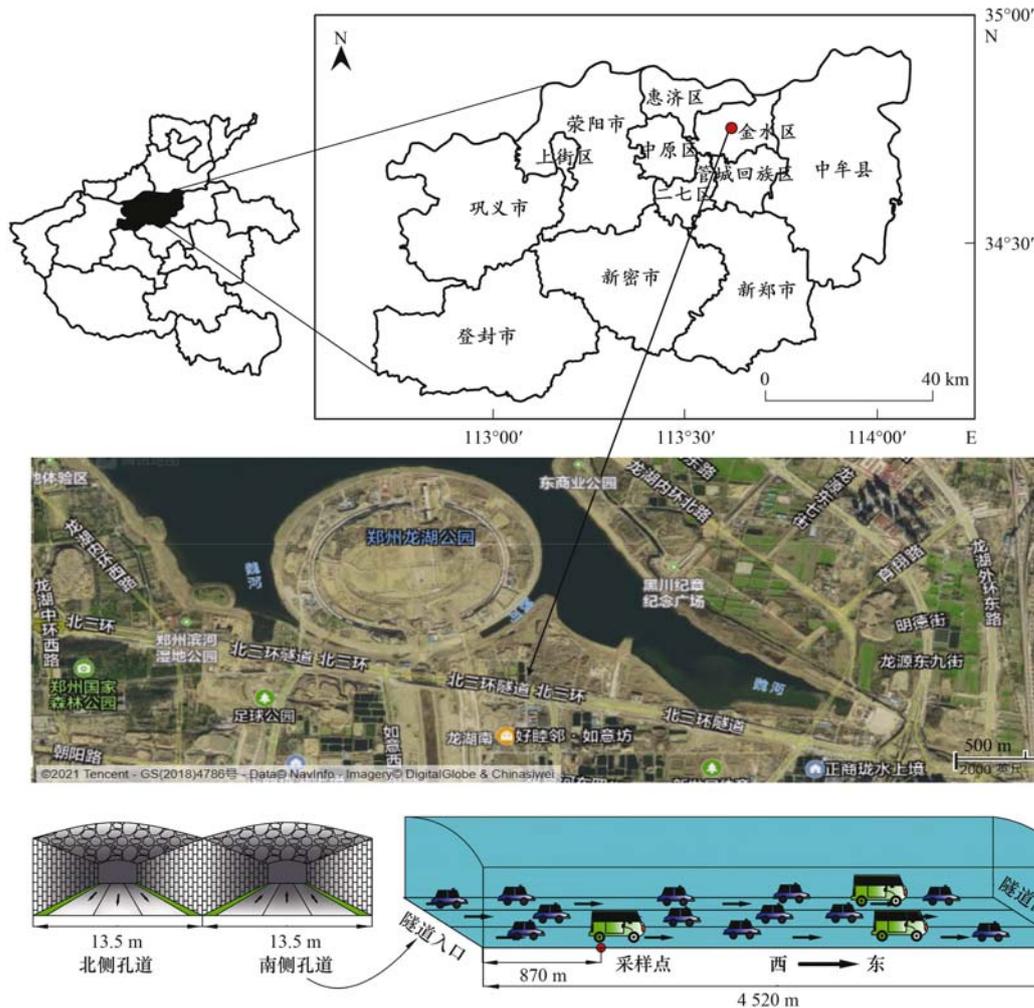


图1 北三环隧道地理位置及采样点布设示意

Fig. 1 Location of the north third ring tunnel and sampling site

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij}$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\left(x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \right) / u_{ij} \right]^2 \quad (1)$$

式中, x_{ij} 为样本 i 中组分 j 的浓度; p 为污染源个数; g_{ik} 为污染源 k 对样本 i 的贡献; f_{kj} 为污染源 k 中组分 j 的含量; e_{ij} 为残差; Q 为累计残差; u_{ij} 为 x_{ij} 的不确定度。

PMF5.0 模型需要受体点检测浓度和不确定度数据,当检测浓度低于方法检出限 (method detection limit, MDL) 时,浓度取 $(1/2)$ MDL,不确定度取 $(5/6)$ MDL; 当检测浓度高于 MDL 时,不确定度计算公式如式(2)所示^[24]:

$$Unc = \sqrt{(EF \times c)^2 + (0.5 \times MDL)^2} \quad (2)$$

式中, EF 为误差分数,以相对标准偏差 (relative standard deviation, RSD) 表示; c 为检测浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; MDL 为方法检出限, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1.3.2 CMB8.2 模型

CMB8.2 模型的基本原理是假设各污染源排放

组分与受体点检测组分遵循质量守恒原则,将受体点处各组分检测浓度分配至不同污染源中,并依据有效方差最小二乘法求解出模型拟合的最优解^[25],计算公式如式(3)所示:

$$c_{ik} = \sum_{j=1}^j a_{ij} S_{jk} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中, c_{ik} 为采样点处第 k 个样本中组分 i 的检测浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; a_{ij} 为第 j 个污染源成分谱中组分 i 的质量分数; S_{jk} 为第 j 个污染源对样本 k 的贡献。

CMB8.2 模型需要污染源成分谱和不确定度数据、受体点 VOCs 检测浓度和不确定度数据。成分谱数据的不确定度设为自身质量分数的 15%,受体点浓度数据的不确定度计算公式如式(4)所示:

$$\sigma_{c_{ik}} = \sqrt{(2MDL_i)^2 + (CV_i \times c_{ik})^2} \quad (4)$$

式中, $\sigma_{c_{ik}}$ 为第 k 个样本中组分 i 的不确定度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; MDL_i 为组分 i 的方法检出限, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; CV_i 为组分 i 的相对标准偏差; c_{ik} 为第 k 个样本中组分 i 的检测浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1.3.3 OFP 分析

采用 MIR 系数对机动车尾气源和蒸发源 VOCs 排放的 OFP 进行测算^[26], 计算公式如式(5)所示:

$$\text{OFP}_i = c_i \times \text{MIR}_i \quad (5)$$

式中, OFP_i 为组分 i 的臭氧生成潜势, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; c_i 为组分 i 的质量浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; MIR_i 为组分 i 的最大增量反应活性系数, $\mu\text{g} \cdot \mu\text{g}^{-1}$.

1.3.4 SOAFP 分析

采用 FAC 方法对机动车尾气源和蒸发源 VOCs 排放的 SOAFP 进行测算^[27,28], 计算公式如式(6)所示:

$$\text{SOAFP}_i = [c_i / (1 - F_{ri})] \times \text{FAC}_i \quad (6)$$

式中, SOAFP_i 为组分 i 的二次有机气溶胶生成潜势, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; c_i 为组分 i 的检测浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; FAC_i 为组分 i 的气溶胶生成系数, $\mu\text{g} \cdot \mu\text{g}^{-1}$; F_{ri} 为组分 i 参与反应的质量分数, %.

2 结果与讨论

2.1 测试参数日变化特征

对实验期间(包含工作日和非工作日各两天)的车流参数及风速日变化特征进行统计分析, 结果

如图 2 所示. 隧道内日均车流量达 $(43\,228 \pm 2\,643)$ $\text{veh} \cdot \text{d}^{-1}$, 并在上下班高峰期呈明显双峰分布特征. 隧道内日均风速为 (3.6 ± 0.1) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 日变化特征与车流量特征相近且白天风速显著高于夜晚, 这是由于白天车辆行驶促进了隧道内空气对流, 而夜晚仅受气象条件影响, 隧道内空气流通性较弱. 实验期间日均车型占比为: 小型车 $[(85.6 \pm 1.2)\%]$ > 中型车 $[(12.9 \pm 1.0)\%]$ > 大型车 $[(1.5 \pm 0.3)\%]$. 凌晨 03:00 附近大中型车占比较高, 主要是因为白天北三环隧道对大型货车限行, 而夜晚有少量大型货车与清扫车通过.

本实验期间 3 个 VOCs 采样时段的车流参数、风速和 $\rho(\text{VOCs})$ 平均变化特征汇总如表 1 所示. 下午风速略低于上午和中午, 主要是由于下午隧道内外温差略低于上午和中午. 中午小型车占比略高于上午和下午, 但车流量略低于上午和下午. 由于白天隧道内对大型货车限行且 3 个采样时段均为车流高峰期, 因此大型车占比均处于较低水平. $\rho(\text{VOCs})$ 呈早中晚逐渐升高趋势, 主要受隧道内机动车 VOCs 排放累积所致.

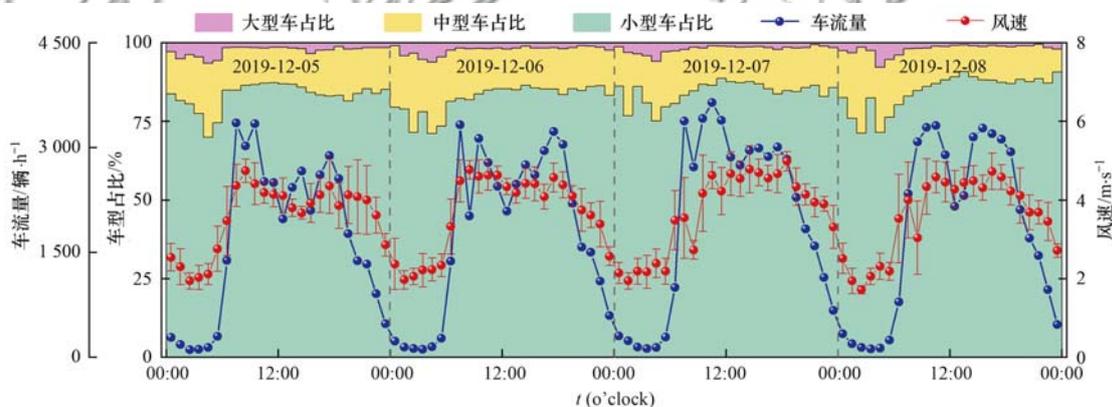


图 2 隧道内车流参数及风速日变化特征

Fig. 2 Daily change characteristics of traffic flow parameters and wind speed in the tunnel

表 1 不同采样时段的车流参数、风速及 VOCs 浓度变化特征

Table 1 Characteristics of traffic flow parameters, wind speed and VOCs concentration at different sampling periods

采样时间	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	小型车占比/%	中型车占比/%	大型车占比/%	车流量/ $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$	$\rho(\text{VOCs})/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
08:00 ~ 09:00	4.3 ± 0.4	85.0 ± 1.7	13.5 ± 1.6	1.5 ± 0.2	$2\,823 \pm 400$	$2\,666.4 \pm 253.2$
11:00 ~ 12:00	4.4 ± 0.5	87.8 ± 1.5	10.9 ± 1.3	1.3 ± 0.3	$2\,654 \pm 369$	$2\,745.1 \pm 330.7$
17:00 ~ 18:00	4.0 ± 0.5	85.9 ± 2.1	12.7 ± 1.7	1.4 ± 0.5	$2\,999 \pm 138$	$2\,848.1 \pm 339.3$

2.2 隧道环境空气 VOCs 成分谱特征

对测试期间采集的 42 个 VOCs 样品平均, 所得隧道环境空气 VOCs 成分谱如表 2 所示. 隧道内 $\rho(\text{VOCs})$ 的平均值为 $(2\,794.5 \pm 147.4)$ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 远高于天津五经路隧道 $(257.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 和南京富贵山隧道 $(225.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 的测试结果, 与 2005 年广州珠江隧道测试结果相近 $(2\,216.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ ^[18], 这

主要与隧道内车流量大且分析的 VOCs 组分多等因素有关. 在所检测的 106 种 VOCs 组分中, 卤代烃类的质量分数最高 $[(32.4 \pm 2.0)\%]$, 其后依次为芳烃类 $[(27.5 \pm 0.6)\%]$ 、烷烃类 $[(23.3 \pm 0.8)\%]$ 、含氧挥发性有机物 (oxygenated volatile organic compounds, OVOCs) $[(9.8 \pm 0.8)\%]$ 、烯烃类 $[(6.2 \pm 0.3)\%]$ 、二硫化碳 $[(0.6 \pm 0.1)\%]$ 和乙

炔 $[(0.2 \pm 0.1)\%]$ 。

卤代烃类的优势组分主要有 1,2-二氯丙烷、1,2,4-三氯苯和 1,1,2,3,4,4-六氯-1,3-丁二烯等,这些组分化学活性较低,可在外界环境中实现远距离输送^[29,30],主要来自外界氯化工业的气团传输和机动车排放^[31,32],其中氯甲烷等卤代烷烃可作为生物质燃烧示踪组分^[33],卤代烯烃主要来自石油化工排放^[34]。芳烃类的优势组分有间/对-二甲苯、间/对-二乙苯、1,2,4-三甲基苯和苯乙烯等,其中 BTEX(苯、甲苯、乙苯和二甲苯的统称)主要来自溶剂使用和机动车排放^[6,33]。烷烃类的优势组分有十二烷、十一烷、环己烷、正癸烷和正己烷等,其中长链烷烃是重型柴油车排放的特征组分,而 C4~C7 烷烃类主要来自机动车蒸发排放^[9,35]。OVOCs 的优

势组分有 2-己酮、乙酸乙烯酯、甲基丙烯酸甲酯和 4-甲基-2-戊酮等,其中乙醇和甲基叔丁基醚(methyl tert-butyl ether, MTBE)通常作为提高汽油辛烷值的添加剂,是蒸发排放的示踪性组分^[30,36],醛酮化物与 E10 汽油不完全燃烧排放有关^[13]。烯烃类化学反应活性较高,在外界环境中容易被消耗,因此受气团传输影响小,主要来自机动车排放累积,优势组分有 1-己烯、异戊二烯和 1-戊烯等,其中异戊二烯受外界植物排放和机动车排放的共同影响^[36,37],1,3-丁二烯可作为机动车尾气排放示踪组分^[34],C3~C4 烯烃类主要来自生物质燃烧^[35]。乙炔通常作为尾气排放示踪组分^[30,37]。综上所述,隧道环境空气 VOCs 主要受外源传输(背景源)、机动车尾气排放和蒸发排放这 3 个方面的贡献。

表 2 隧道环境空气 VOCs 成分谱特征

Table 2 Characteristics of VOCs composition profile in the north third ring tunnel

组分	质量分数/%	组分	质量分数/%	组分	质量分数/%
卤代烃类	32.4 ± 2.0	乙烷	0.5 ± 0.2	1-戊烯	0.7 ± 0.1
氯甲烷	0.3 ± 0.1	丙烷	0.3 ± 0.1	反-2-戊烯	0.6 ± 0.1
氯乙烷	0.4 ± 0.1	异丁烷	0.5 ± 0.1	顺-2-戊烯	0.6 ± 0.1
氯乙烷	0.4 ± 0.1	正丁烷	0.5 ± 0.1	1-己烯	0.8 ± 0.1
二氯甲烷	0.7 ± 0.2	环戊烷	0.7 ± 0.1	芳烃类	27.5 ± 0.6
溴甲烷	0.5 ± 0.1	异戊烷	0.8 ± 0.1	苯	1.4 ± 0.1
1,1-二氯乙烯	0.8 ± 0.1	正戊烷	0.7 ± 0.1	甲苯	1.3 ± 0.1
反-1,2-二氯乙烯	0.9 ± 0.1	甲基环戊烷	0.8 ± 0.1	苯乙烯	2.2 ± 0.1
顺-1,2-二氯乙烯	0.8 ± 0.1	环己烷	1.4 ± 0.1	乙苯	1.8 ± 0.1
1,1-二氯乙烷	0.7 ± 0.1	2,2-二甲基丁烷	0.8 ± 0.1	间/对-二甲苯	3.1 ± 0.1
1,2-二氯乙烷	0.8 ± 0.2	2,3-二甲基丁烷	0.6 ± 0.1	邻-二甲苯	1.5 ± 0.1
顺-1,3-二氯丙烷	1.0 ± 0.1	2-甲基戊烷	0.7 ± 0.1	异丙苯	0.9 ± 0.1
反-1,3-二氯丙烷	1.0 ± 0.1	3-甲基戊烷	0.7 ± 0.1	正丙苯	1.2 ± 0.1
氯苯	0.6 ± 0.1	正己烷	1.1 ± 0.1	间-乙基甲苯	1.1 ± 0.1
1,2-二氯丙烷	3.1 ± 1.1	甲基环己烷	0.6 ± 0.1	对-乙基甲苯	1.9 ± 0.1
三氯甲烷	0.7 ± 0.1	2,4-二甲基戊烷	0.6 ± 0.1	1,3,5-三甲基苯	1.8 ± 0.1
二氯二氟甲烷	0.4 ± 0.1	2-甲基己烷	0.5 ± 0.1	邻-乙基甲苯	1.1 ± 0.1
苄基氯	1.3 ± 0.1	2,3-二甲基戊烷	0.4 ± 0.1	1,2,4-三甲基苯	2.3 ± 0.1
三氯乙烷	0.6 ± 0.1	3-甲基己烷	0.6 ± 0.1	1,2,3-三甲基苯	1.3 ± 0.1
1,1,1-三氯乙烷	0.7 ± 0.1	正庚烷	1.0 ± 0.1	萘	1.5 ± 0.1
1,1,2-三氯乙烷	0.5 ± 0.1	2,2,4-三甲基戊烷	0.5 ± 0.1	间/对-二乙苯	3.1 ± 0.1
三氯一氟甲烷	0.7 ± 0.1	2,3,4-三甲基戊烷	0.8 ± 0.1	OVOCs	9.8 ± 0.8
1,3-二氯苯	1.0 ± 0.1	2-甲基庚烷	0.5 ± 0.1	乙醇	0.7 ± 0.3
1,4-二氯苯	1.2 ± 0.1	3-甲基庚烷	0.7 ± 0.1	2-丙烯醛	0.8 ± 0.2
1,2-二氯苯	1.3 ± 0.1	正辛烷	0.9 ± 0.1	丙酮	0.8 ± 0.2
四氯化碳	0.8 ± 0.1	正壬烷	1.0 ± 0.1	异丙醇	0.3 ± 0.1
一溴二氯甲烷	0.5 ± 0.1	正癸烷	1.1 ± 0.1	2-丁酮	0.8 ± 0.1
四氯乙烯	0.7 ± 0.1	十一烷	1.9 ± 0.1	四氢呋喃	0.8 ± 0.1
1,1,2,2-四氯乙烷	0.9 ± 0.1	十二烷	2.2 ± 0.1	1,4-二恶烷	0.7 ± 0.1
1,2-二氯-1,1,2,2-四氟乙烷	0.7 ± 0.1	烯炔类	6.2 ± 0.3	乙酸乙酯	1.0 ± 0.1
1,2,4-三氯苯	2.1 ± 0.1	乙烯	0.4 ± 0.2	乙酸乙酯	0.4 ± 0.1
1,1,2-三氯-1,2,2-三氟乙烷	0.9 ± 0.1	丙烯	0.5 ± 0.1	甲基叔丁基醚	0.8 ± 0.1
1,2-二溴乙烷	1.1 ± 0.1	1,3-丁二烯	0.5 ± 0.1	甲基丙烯酸甲酯	0.9 ± 0.1
一氯二溴甲烷	0.9 ± 0.1	1-丁烯	0.5 ± 0.1	4-甲基-2-戊酮	0.9 ± 0.1
三溴甲烷	1.5 ± 0.1	反-2-丁烯	0.4 ± 0.1	2-己酮	1.1 ± 0.1
1,1,2,3,4,4-六氯-1,3-丁二烯	2.0 ± 0.1	顺-2-丁烯	0.5 ± 0.1	乙炔	0.2 ± 0.1
烷烃类	23.3 ± 0.8	异戊二烯	0.7 ± 0.1	二硫化碳	0.6 ± 0.1

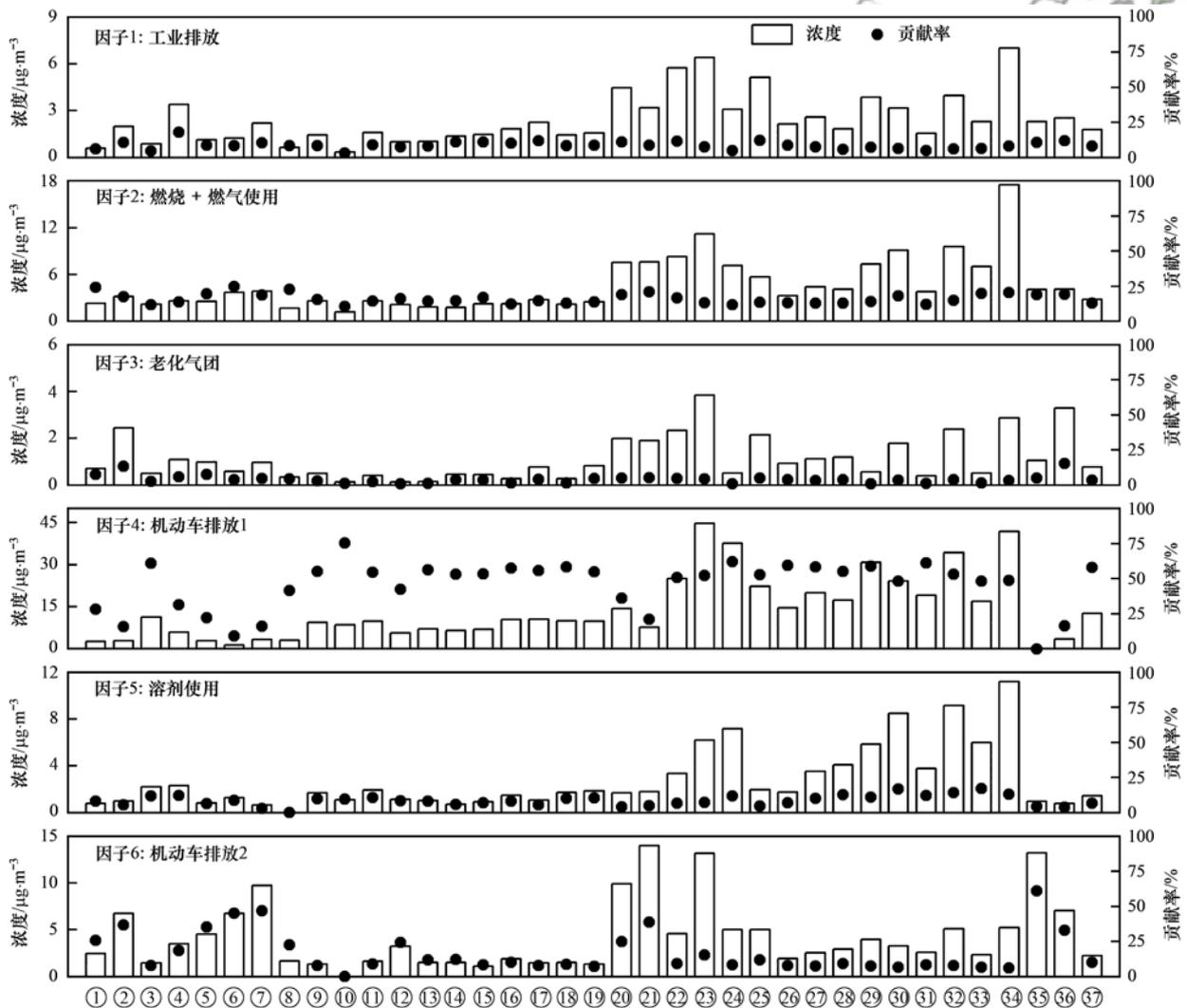
2.3 隧道环境空气 VOCs 源解析

2.3.1 PMF5.0 模型解析

为开展隧道内 VOCs 源解析,本研究筛选了 37 种 VOCs 组分并采用 PMF5.0 模型多次调试,解析结果如图 3 所示. 因子数为 6 时, Q 值发生突减,此后继续增加因子数 Q 值变化不大, $Q_{\text{true}} = Q_{\text{robust}}$,且解析结果稳定性较好,因此适宜因子个数为 6. 运行结果显示,所有组分模型的测算数据与实测数据的拟合优度 (R^2) 均超过 0.85.

因子 1 中优势组分有三氯甲烷、苯、间/对二甲苯、邻二甲苯和间/对二乙苯等,以上组分主要来自橡胶工业和有机合成等工业源^[38,39],将其识别为“工业排放”. 因子 2 中氯甲烷、二氯甲烷、正丁烷、异丁烷和丙烷的贡献率较高,其中氯甲烷和二氯甲烷是生物质燃烧示踪组分^[33],丙烷、正丁烷和

异丁烷主要来自居民日常生活中液化石油气 (LPG)/天然气 (NG) 等燃料的使用^[40],将其识别为“燃烧 + 燃气使用”. 因子 3 中丙酮和二氯甲烷的贡献率较高,这两种组分的化学反应活性较低,主要来自外界老化气团传输^[38],将其识别为“老化气团”. 因子 4 中烯烃类和芳烃类贡献率较高,其中 BTEX 和 1,3-丁二烯为机动车尾气排放特征组分^[5,33],甲基叔丁基醚为蒸发排放示踪组分^[36],将其识别为“机动车排放 1”. 因子 5 的优势组分主要是间/对二乙苯、苯乙烯、1,3,5-三甲基苯和 1,2,4-三甲基苯等芳烃类,主要来自油漆和涂料等溶剂使用^[34,39],将其识别为“溶剂使用”. 因子 6 中低碳烷烃、异戊烷、苯、甲苯和 2-丙烯醛等贡献率较高,为机动车排放的特征组分^[37,40,41],将其识别为“机动车排放 2”. 各因子累计贡献率分别为:机



① 氯甲烷, ② 二氯甲烷, ③ 1,1-二氯乙烷, ④ 三氯甲烷, ⑤ 异丁烷, ⑥ 正丁烷, ⑦ 异戊烷, ⑧ 丙烷, ⑨ 2,4-二甲基戊烷, ⑩ 2,3-二甲基戊烷, ⑪ 甲基环己烷, ⑫ 1-丁烯, ⑬ 1,3-丁二烯, ⑭ 反-2-丁烯, ⑮ 顺-2-丁烯, ⑯ 1-戊烯, ⑰ 异戊二烯, ⑱ 反-2-戊烯, ⑲ 顺-2-戊烯, ⑳ 苯, ㉑ 甲苯, ㉒ 乙苯, ㉓ 间/对二甲苯, ㉔ 苯乙烯, ㉕ 邻二甲苯, ㉖ 异丙苯, ㉗ 正丙苯, ㉘ 间-乙基甲苯, ㉙ 对-乙基甲苯, ㉚ 1,3,5-三甲基苯, ㉛ 邻-乙基甲苯, ㉜ 1,2,4-三甲基苯, ㉝ 1,2,3-三甲基苯, ㉞ 间/对二乙苯, ㉟ 2-丙烯醛, ㊱ 丙酮, ㊲ 甲基叔丁基醚

图 3 PMF5.0 模型解析结果

Fig. 3 Source apportionment results of PMF5.0 model

动车排放(62.4%) > 燃烧 + 燃气使用(15.8%) > 溶剂使用(9.5%) > 工业排放(8.4%) > 老化气团(3.9%)。

3 个采样时段的 PMF5.0 模型解析结果如图 4 所示。“机动车排放”的贡献率特征为:下午 > 上午 > 中午,与车流量变化特征一致。“老化气团”的贡献率与“机动车排放”特征相反,这主要是受隧道内光化学反应弱且机动车 VOCs 排放逐渐累积等因素影响。“燃烧 + 燃气使用”的贡献率在中午最高,这主要受周围餐饮业燃气使用等因素影响。“工业排放”和“溶剂使用”的贡献率相近。与郑州市环境空气 VOCs 来源解析结果相比^[38,39],本研究中“机动车排放”的贡献率显著上升,这主要与隧道内车流量大且空间相对密闭有关,而其余源(如工业排放和溶剂使用等)的相对贡献率较为相符,说明解析结果基本可信。

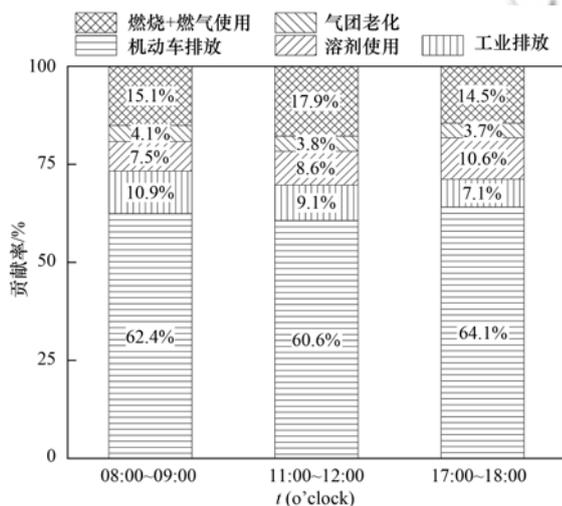


图 4 不同采样时段 PMF5.0 模型解析结果

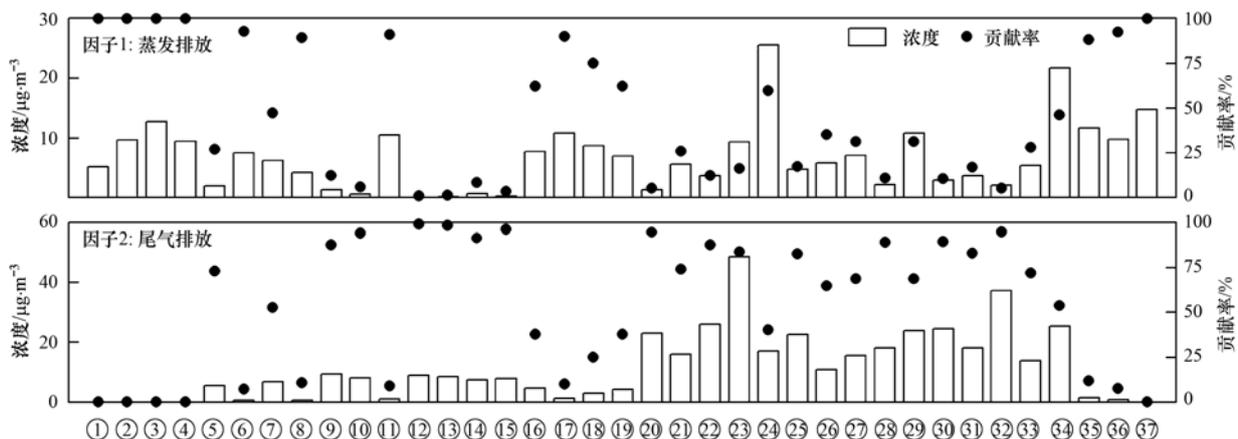
Fig. 4 Source apportionment results of PMF5.0 model at different sampling periods

2.3.2 CMB8.2 模型解析

由于机动车尾气源与蒸发源的成分谱相近,本研究中 PMF5.0 模型无法将二者有效分离。Shi 等^[42]的研究采用 PMF-CMB 复合模型对郑州市 PM_{2.5} 进行源解析,发现该法可较好解决共线性问题。因此,本研究将 PMF5.0 模型解析所得机动车源成分谱纳入 CMB8.2 模型,对尾气源与蒸发源 VOCs 排放的贡献率进行深入解析。

结合成分谱数据库^[41,43],采用 CMB8.2 模型进行多次调试并筛除共线性较强的源成分谱,解析结果如图 5 所示。蒸发排放与尾气排放的贡献值均为正,浓度平衡值(% MASS)达 84.5%,模型拟合效果较优。蒸发源和尾气源 VOCs 排放的贡献率分别为 37.5% 和 62.5%,其中蒸发源贡献率略高于 Liu 等^[44]基于排放清单的测算结果(31.8%),明显高于高丹丹等^[45]测算的河南省 2016 年机动车排放清单中汽油车蒸发源 VOCs 的排放占比(24.6%),这主要与 2018 年 7 月以后河南省实现国六车用乙醇汽油的全面供应等因素有关。考虑到本研究采样时间为低温冬季,年均蒸发排放水平较本研究结果更高,因此未来应进一步加强对 E10 乙醇汽油车蒸发源 VOCs 排放的管控力度。

在早、中、晚这 3 个采样时段基于 CMB8.2 模型的机动车源 VOCs 解析结果如图 6 所示。08:00 ~ 09:00 时段蒸发排放贡献率略高,可能与早高峰期间车流量大,交通拥堵,导致车辆怠速行驶等因素有关。11:00 ~ 12:00 时段蒸发排放贡献率高于 17:00 ~ 18:00 时段,主要是由于中午温度升高使机动车蒸发排放强度略有增加。综合来看,蒸发源与尾气源 VOCs 排放的贡献率变化波动较小,主要与 3 个采样时段的车型占比相对稳定有关。需要说明的是,本研究 CMB8.2 模型采用了国外的尾气源谱数据,由于



横坐标符号含义同图 3

图 5 CMB8.2 模型解析结果

Fig. 5 Source apportionment results of CMB8.2 model

国内外机动车排放标准与发动机工况存在差异,会给本研究的解析结果带来一定的不确定性,未来可进一步加强基于国内汽车燃用 E10 汽油的 VOCs 排放源谱的完善和更新,为源解析研究提供支持.

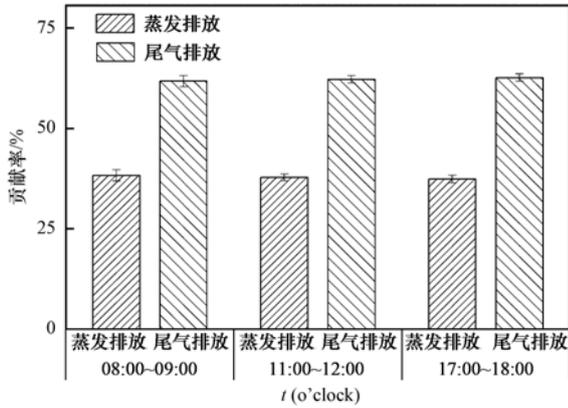


图 6 不同采样时段 CMB8.2 模型解析结果
Fig. 6 Source apportionments of CMB8.2 model at different sampling periods

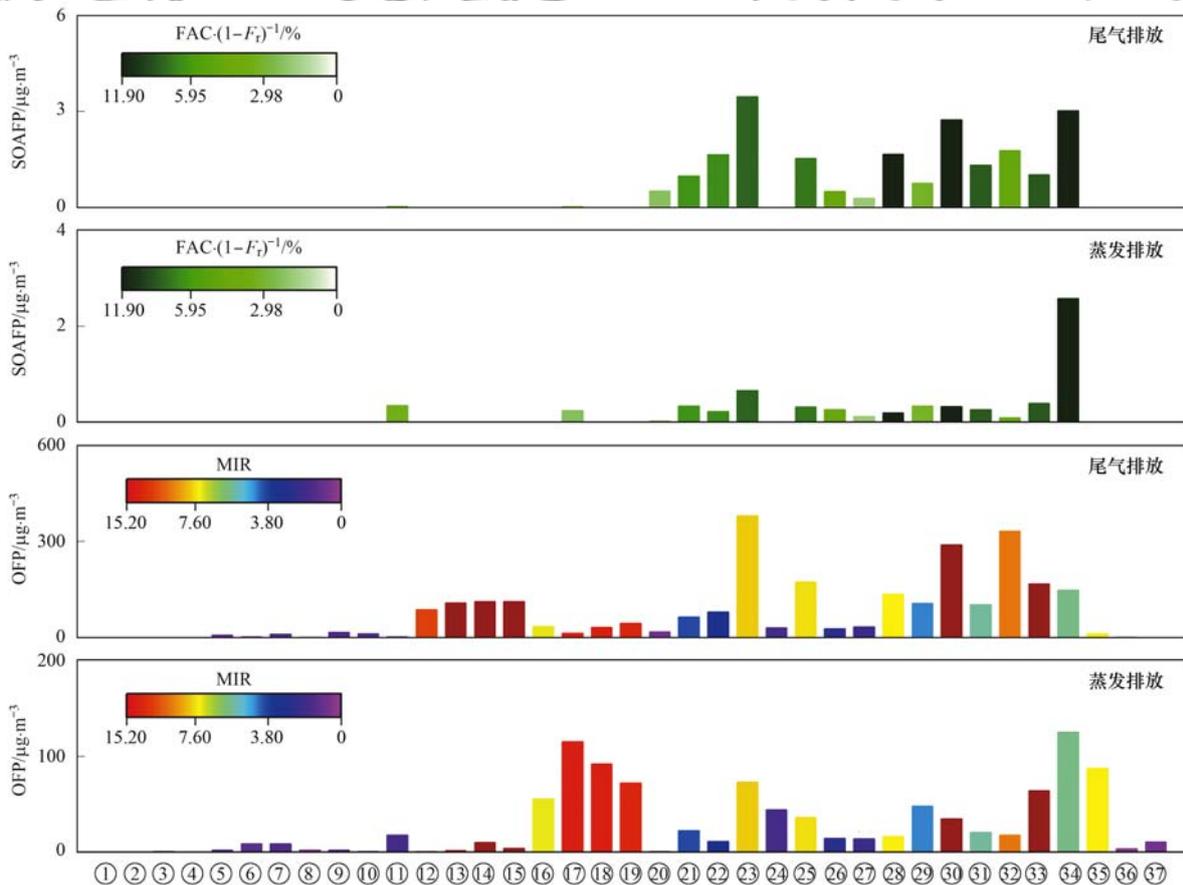
2.4 尾气源与蒸发源二次污染特征分析

为判断机动车尾气源和蒸发源 VOCs 排放对 O₃ 和 SOA 二次生成的优势组分和贡献率,根据 PMF5.0-CMB8.2 复合模型的解析结果,采用 MIR

和 FAC 方法对两源中各组分和各类别的 OFP 和 SOAFP 的贡献特征展开分析,如图 7 和图 8 所示.

所解析 37 种组分的总 OFP 为 3 707.2 μg·m⁻³,其中蒸发源和尾气源的贡献率分别为 28.1% 和 71.9%.蒸发源 OFP 贡献较高的前 5 种组分及其贡献率为:间/对-二乙苯 (12.0%)、异戊二烯 (11.0%)、反-2-戊烯 (8.8%)、2-丙烯醛 (8.4%) 和间/对-二甲苯 (7.0%),各类别贡献率为:芳烃类 (52.2%) > 烯炔类 (33.8%) > OVOCs (9.7%) > 烷炔类 (4.1%) > 卤代炔类 (0.2%).尾气源 OFP 贡献较高的前 5 种组分及其贡献率为:间/对-二甲苯 (14.2%)、1,2,4-三甲基苯 (12.4%)、1,3,5-三甲基苯 (10.8%)、邻-二甲苯 (6.5%) 和 1,2,3-三甲基苯 (6.2%),各类别贡献率为:芳烃类 (77.7%) > 烯炔类 (20.2%) > 烷炔类 (1.7%) > OVOCs (0.4%).

所解析 37 种组分的 SOAFP 共计 28.0 μg·m⁻³,其中蒸发源与尾气源的贡献率分别为 24.2% 和 75.8%.蒸发源 SOAFP 贡献较高的前 5 种组分及其贡献率为:间/对-二乙苯 (37.9%)、间/对-二甲苯 (9.8%)、1,2,3-三甲基苯 (5.8%)、甲基环己烷



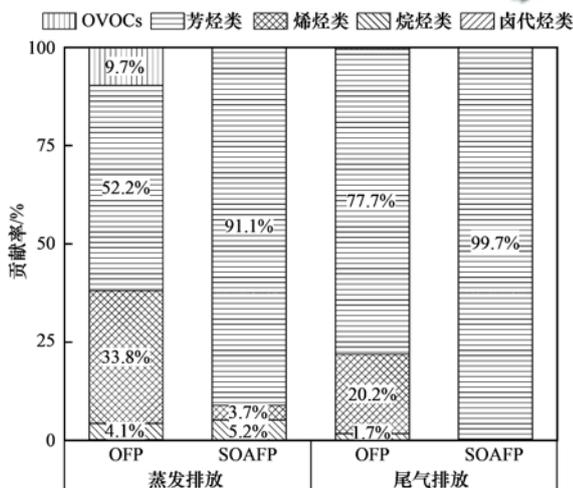
横坐标符号含义同图 3

图 7 尾气排放与蒸发排放各组分的 OFP 和 SOAFP

Fig. 7 OFP and SOAFP of various VOCs species in exhaust emissions and evaporative emissions

(5.2%)和对-乙基甲苯(5.1%),各类别贡献率为:芳烃类(91.1%)>烷烃类(5.2%)>烯烃类(3.7%)。尾气源 SOAFP 贡献较高的前 5 种组分及其贡献率为:间/对-二甲苯(16.3%)、间/对-二乙苯(14.2%)、1,3,5-三甲基苯(12.9%)、1,2,4-三甲基苯(8.4%)和间-乙基甲苯(7.8%),各类别贡献率为:芳烃类(99.7%)>烷烃类(0.2%)>烯烃类(0.1%)。

与蒸发源和尾气源 VOCs 排放的贡献率对比可知,蒸发源 VOCs 活性低于尾气源,这是由于高反应活性的 C9 芳烃类和 C4 烯烃类主要来自尾气排放,而低反应活性的烷烃类及卤代烃类在蒸发源中占比较高。综上可知,着重加强尾气源中芳烃类的减排力度是治理郑州市冬季雾-霾污染与夏季臭氧污染的重中之重。此外,考虑到夏季高温会大大增加蒸发源的排放强度,因此蒸发源中芳烃类和烯烃类等高活性组分也应引起高度重视。



贡献率低于 1% 的类别数据已隐藏标签

图 8 尾气排放与蒸发排放各类别的 OFP 和 SOAFP

Fig. 8 OFP and SOAFP of different groups in exhaust emissions and evaporative emissions

3 结论

(1) 测试期间隧道环境空气的 ρ (VOCs) 为 $(2794.5 \pm 147.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中卤代烃类和芳烃类的贡献率较高, 成分谱的优势组分有 1,2-二氯甲烷、间/对-二乙苯、间/对-二甲苯、1,2,4-三甲基苯和十二烷等。

(2) PMF5.0-CMB8.2 复合受体模型的解析结果为尾气源(62.5%)>蒸发源(37.5%), 由于采样时间为低温冬季, 蒸发排放强度低于年均水平, 因此未来在加严机动车尾气排放标准的同时, 蒸发排放管控同样不容忽视。

(3) 尾气源和蒸发源 VOCs 排放的 OFP 贡献率

分别为 71.9% 和 28.1%, SOAFP 贡献率分别为 75.8% 和 24.2%, 其中芳烃类在尾气源和蒸发源中对 OFP 和 SOAFP 的贡献率均居于首位, 是汽油车 VOCs 排放的优先控制组分。

(4) 由于采样点选取在车流量大、空间相对密闭且光化学反应弱的隧道内, 基于 PMF5.0 模型解析的机动车源贡献率显著高于郑州市环境空气中 VOCs 的解析结果, 而工业排放和溶剂使用等来源的相对贡献率与前人研究结论相符。

致谢: 感谢郑州市生态环境局为本研究顺利开展工作提供的大力支持和帮助; 感谢郑州市郑东新区龙湖区隧道管理中心为隧道内大气 VOCs 采样提供的实验条件和安全保障措施。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2020 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/>, 2021-05-26.
- [2] 陈文泰, 邵敏, 袁斌, 等. 大气中挥发性有机物(VOCs)对二次有机气溶胶(SOA)生成贡献的参数化估算[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 163-172.
Chen W T, Shao M, Yuan B, et al. Parameterization of contribution to secondary organic aerosol (SOA) formation from ambient volatile organic compounds (VOCs)[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1): 163-172.
- [3] Rohrer F, Lu K D, Holzumahaus A, et al. Maximum efficiency in the hydroxyl-radical-based self-cleansing of the troposphere [J]. Nature Geoscience, 2014, 7(8): 559-563.
- [4] Wang G, Cheng S Y, Wei W, et al. Characteristics and source apportionment of VOCs in the suburban area of Beijing, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2016, 7(4): 711-724.
- [5] Liu B S, Liang D N, Yang J M, et al. Characterization and source apportionment of volatile organic compounds based on 1-year of observational data in Tianjin, China [J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 757-769.
- [6] Song C B, Liu B S, Dai Q L, et al. Temperature dependence and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) at an urban site on the north China plain [J]. Atmospheric Environment, 2019, 207: 167-181.
- [7] Liu Y H, Wang H L, Jing S G, et al. Characteristics and sources of volatile organic compounds (VOCs) in Shanghai during summer: implications of regional transport [J]. Atmospheric Environment, 2019, 215, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116902.
- [8] Hu B Y, Xu H, Deng J J, et al. Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds for different functional zones in a coastal city of southeast China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018, 18(11): 2840-2852.
- [9] Sun J, Shen Z X, Zhang Y, et al. Profiles and source apportionment of nonmethane volatile organic compounds in winter and summer in Xi'an, China, based on the hybrid environmental receptor model [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(1): 116-131.
- [10] 中华人民共和国公安部. 2021 年一季度新注册登记机动车 966 万辆 [EB/OL]. <https://www.mps.gov.cn/n7944517/n7944597/n7945888/c7829360/content.html>, 2021-04-06.
- [11] 河南省人民政府. 河南省车用乙醇汽油管理办法 [EB/OL].

- <http://www.henan.gov.cn/zwgk/system/2007/01/18/010020281.shtml>, 2004-11-17.
- [12] 国家能源局. 关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2017-09/13/c_136606035.htm, 2017-09-13.
- [13] Wu X, Zhang S J, Guo X, *et al.* Assessment of ethanol blended fuels for gasoline vehicles in China: fuel economy, regulated gaseous pollutants and particulate matter [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **253**: 731-740.
- [14] Zhu R C, Hu J N, He L Q, *et al.* Effects of ambient temperature on regulated gaseous and particulate emissions from gasoline-, E10- and M15-fueled vehicles [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2021, **15**(1), doi: 10.1007/s11783-020-1306-1.
- [15] Koupal J, Palacios C. Impact of new fuel specifications on vehicle emissions in Mexico [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **201**: 41-49.
- [16] Zhu R C, Hu J N, Bao X F, *et al.* Investigation of tailpipe and evaporative emissions from China IV and Tier 2 passenger vehicles with different gasolines [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, **50**: 305-315.
- [17] Tang J Y, Li Y J, Li X L, *et al.* Intermediate volatile organic compounds emissions from vehicles under real world conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **788**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147795.
- [18] 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.
- [19] Zhang Y L, Yang W Q, Simpson I, *et al.* Decadal changes in emissions of volatile organic compounds (VOCs) from on-road vehicles with intensified automobile pollution control: case study in a busy urban tunnel in South China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 806-819.
- [20] Deng C X, Jin Y J, Zhang M, *et al.* Emission characteristics of VOCs from on-road vehicles in an urban tunnel in eastern China and predictions for 2017-2026 [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18**(12): 3025-3034.
- [21] Zhang Q J, Wu L, Fang X Z, *et al.* Emission factors of volatile organic compounds (VOCs) based on the detailed vehicle classification in a tunnel study [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 878-886.
- [22] Feng M, Hu X, Zhou L, *et al.* Real-world vehicle volatile organic compound emissions and their source profile in Chengdu based on a roadside and tunnel study [J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(7), doi: 10.3390/atmos12070861.
- [23] Jin B Q, Zhu R C, Mei H, *et al.* Volatile organic compounds from a mixed fleet with numerous E10-fuelled vehicles in a tunnel study in China: emission characteristics, ozone formation and secondary organic aerosol formation [J]. *Environmental Research*, 2021, **200**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111463.
- [24] United States Environmental Protection Agency. EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [EB/OL]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-02/documents/pmf_5.0_user_guide.pdf, 2014-04-01.
- [25] Coulter C T. EPA-CMB8.2 Users Manual [EB/OL]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/epa-cmb82manual.pdf>, 2004-12-01.
- [26] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [EB/OL]. <http://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/barcu/regact/2009/mir2009/mir10.pdf>, 2010-01-28.
- [27] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1989, **23**(8): 1733-1747.
- [28] Grosjean D. *In situ* organic aerosol formation during a smog episode: estimated production and chemical functionality [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26**(6): 953-963.
- [29] 赵金帅, 于世杰, 王楠, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4436-4445.
- Zhao J S, Yu S J, Wang N, *et al.* Evolution and evaluation of O₃ and VOCs in Zhengzhou during the national traditional games of ethnic minorities period [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4436-4445.
- [30] Han L X, Chen L H, Li K W, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) during ozone polluted days in Hangzhou, China [J]. *Atmosphere*, 2019, **10**(12), doi: 10.3390/atmos10120780.
- [31] 邵敏, 袁斌, 王鸣, 等. 挥发性有机物(VOCs)来源及其大气化学作用 [M]. 北京: 科学出版社, 2020. 158-159.
- [32] Wang M L, Li S Y, Zhu R C, *et al.* On-road tailpipe emission characteristics and ozone formation potentials of VOCs from gasoline, diesel and liquefied petroleum gas fueled vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117294.
- [33] Guan Y N, Wang L, Wang S J, *et al.* Temporal variations and source apportionment of volatile organic compounds at an urban site in Shijiazhuang, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **97**: 25-34.
- [34] Liu Y, Shao M, Fu L L, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: part I [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6247-6260.
- [35] Gu Y, Liu B S, Li Y F, *et al.* Multi-scale volatile organic compound (VOC) source apportionment in Tianjin, China, using a receptor model coupled with 1-hr resolution data [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115023.
- [36] 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5316-5324.
- Xu C X, Chen J H, Jiang T, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds pollution in summer in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5316-5324.
- [37] 王成辉, 陈军辉, 韩丽, 等. 成都市城区大气 VOCs 季节污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3951-3960.
- Wang C H, Chen J H, Han L, *et al.* Seasonal pollution characteristics and analysis of the sources of atmospheric VOCs in Chengdu urban area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3951-3960.
- [38] 张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 等. 郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4372-4381.
- Zhang Y X, Yin S S, Yuan M H, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in spring in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4372-4381.
- [39] 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 等. 郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3500-3510.

- Li Y D, Yin S S, Zhang R Q, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs at different pollution levels during the winter in an urban area in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3500-3510.
- [40] 叶露, 邵菁菁, 俞华明. 汽车工业区大气挥发性有机物 (VOCs) 变化特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 624-633.
- Ye L, Tai Q Q, Yu H M. Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the automobile industrial park of Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 624-633.
- [41] George I J, Hays M D, Herrington J S, *et al.* Effects of cold temperature and ethanol content on VOC emissions from light-duty gasoline vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(21): 13067-13074.
- [42] Shi G L, Li X, Feng Y C, *et al.* Combined source apportionment, using positive matrix factorization-chemical mass balance and principal component analysis/multiple linear regression-chemical mass balance models [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(18): 2929-2937.
- [43] Yue T T, Yue X, Chai F H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from the evaporative emissions of modern passenger cars [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **151**: 62-69.
- [44] 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.
- [45] 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.



CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-ni, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xiao-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Julong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)