

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响 胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019 ~ 2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析 王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略 郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015 ~ 2020 年中国城市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染时空演变特征 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区 PM_{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000 ~ 2020 年中国典型经济区 PM_{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系 徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析 赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征 刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM_{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势 罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征 王红磊, 刘思晗, 孙杰娟, 刘焕武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高空间分辨率的郑州市城镇居民 PM_{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估 李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单 刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析 陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势 张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析 贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O₃ 生成特征 俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应 李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减排协同控制情景模拟和效应评估 俞珊, 张双, 张增杰, 翟培芝, 刘桐珊 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO₂ 排放模拟 马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析 卓海华, 姜保锋, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价 李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析 吴喜军, 董颖, 赵健, 刘辉, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子 谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估 李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价 张静, 胡愈焯, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用 纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素 张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑娟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响 何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
亳清河水体细菌群落的结构和分布特征 王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (*Sinularia microclavata*) 共附生细菌群落结构和功能的影响 刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价 严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性 刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布 刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估 辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别 张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估 黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量 马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估 赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险 邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测 戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析 王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析 刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征 刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响 江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应 杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔鳧箭锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏卢璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响 王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响 刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
磷渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响 耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响 胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 薛利祥, 曹国帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响 储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价 付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征 薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展 胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望 李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910) 《环境科学》征稿简则(1984) 信息(2167, 2191, 2324)

青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析

贾智海¹, 顾瑶², 孔翠丽³, 宋江邦³, 孟赫⁴, 石来元⁴, 吴建会², 刘保双^{2*}

(1. 青岛市生态环境局崂山分局, 青岛 266061; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300350; 3. 青岛市生态环境局胶州分局, 青岛 266300; 4. 山东省青岛市生态环境监测中心, 青岛 266003)

摘要: 青岛市夏季臭氧浓度水平高且污染事件频发, 开展臭氧污染过程和非污染时期的挥发性有机物 (VOCs) 及其臭氧生成潜势 (OFP) 的精细化来源解析研究, 对于有效降低沿海城市的大气臭氧污染, 持续改善环境空气质量将会发挥重要的作用。因此, 利用青岛市 2020 年夏季 (6~8 月) 小时分辨率的在线 VOCs 监测数据, 分析臭氧污染过程和非臭氧污染时期环境 VOCs 的化学特征, 并通过正定矩阵因子分解 (PMF) 模型进行了环境 VOCs 及其 OFP 的精细化来源解析研究。结果表明, 青岛市夏季环境 ρ (TVOCs) 平均值为 $93.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 臭氧污染过程相较于非臭氧污染时期 TVOCs 浓度上升了 49.3%, 其中芳香烃浓度增加最显著, 增加了 59.7%。夏季环境 VOCs 总的 OFP 达到 $246.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 臭氧污染过程相较于非臭氧污染时期环境 VOCs 的总 OFP 增加了 43.1%; 其中烷烃增加最多, 增加了 58.8%。间-乙基甲苯和 2,3-二甲基戊烷是臭氧污染过程中 OFP 增加幅度最大的物种。青岛市夏季环境 VOCs 的主要贡献源为柴油车 (11.2%)、溶剂使用 (4.7%)、液化石油气及天然气 (27.5%)、汽油车 (8.9%)、汽油挥发 (26.6%)、燃烧及石化相关企业排放 (16.4%) 和植物排放 (4.8%)。相较于非臭氧污染时期, 臭氧污染过程中液化石油气及天然气浓度增加了 $16.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是增加量最大的源类; 而植物排放浓度增加了 88.6%, 是增加率最高的源类。另外, 燃烧及石化相关企业排放是青岛市夏季 OFP 最大的贡献源, 其 OFP 和贡献率分别达到 $38.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 24.5%; 其次为液化石油气及天然气以及汽油挥发。相较于非臭氧污染时期, 臭氧污染过程中液化石油气及天然气、汽油挥发和溶剂使用对总 OFP 升高量的贡献率之和达到 74.1%, 是最主要的贡献源类。

关键词: 夏季; 臭氧污染过程; 挥发性有机化合物 (VOCs); 正定矩阵因子分解 (PMF); 源解析

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-1962-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205040

Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao

JIA Zhi-hai¹, GU Yao², KONG Cui-li³, SONG Jiang-bang³, MENG He⁴, SHI Lai-yuan⁴, WU Jian-hui², LIU Bao-shuang^{2*}

(1. Laoshan Branch of Qingdao Ecology and Environment Bureau, Qingdao 266061, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 3. Jiaozhou Branch of Qingdao Ecology and Environment Bureau, Qingdao 266300, China; 4. Qingdao Eco-environment Monitoring Center of Shandong Province, Qingdao 266003, China)

Abstract: The ambient concentration of ozone is high in Qingdao, and ozone pollution episodes occur frequently in summer. The refined source apportionment of ambient volatile organic compounds (VOCs) and their ozone formation potential (OFP) during ozone pollution episodes and non-ozone pollution periods can play an important role in effectively reducing air ozone pollution in coastal cities and continuously improving ambient air quality. Therefore, this study applied the online VOCs monitoring data with hourly resolution in summer (from June to August) in 2020 in Qingdao to analyze the chemical characteristics of ambient VOCs during the ozone pollution episodes and non-ozone pollution periods and conducted the refined source apportionment of ambient VOCs and their OFP using a positive matrix factorization (PMF) model. The results showed that the average mass concentration of ambient VOCs in Qingdao in summer was $93.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and compared with that during the non-ozone pollution period, the mass concentration of ambient VOCs during the ozone pollution episodes increased by 49.3%, and the mass concentration of aromatic hydrocarbons increased by 59.7%. The total OFP of ambient VOCs in summer was $246.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Compared with that in the non-ozone pollution period, the total OFP of ambient VOCs in the ozone pollution episodes increased by 43.1%; that of alkanes increased the most, reaching 58.8%. M-ethyltoluene and 2,3-dimethylpentane were the species with the largest increase in OFP and its proportion during the ozone pollution episodes. The main contributors of ambient VOCs in Qingdao in summer were diesel vehicles (11.2%), solvent use (4.7%), liquefied petroleum gas and natural gas (LPG/NG) (27.5%), gasoline vehicles (8.9%), gasoline volatilization (26.6%), emissions of combustion- and petrochemical-related enterprises (16.4%), and plant emissions (4.8%). Compared with that in the non-ozone pollution period, the contribution concentration of LPG/NG in the ozone pollution episodes increased by $16.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, which was the source category with the largest increase. The contribution concentration of plant emissions increased by 88.6% in the ozone pollution episodes, which was the source category with the highest increase rate. In addition, emissions from combustion- and petrochemical-related enterprises were the largest contributor to the OFP of ambient VOCs in summer in Qingdao, with its OFP and contribution proportion being $38.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 24.5%, respectively, followed by that of LPG/NG and gasoline volatilization. Compared with the non-ozone pollution period, the total contributions of LPG/NG, gasoline volatilization, and solvent use to the increase in OFP for ambient VOCs in the ozone pollution episodes were 74.1%, which were the main contribution source categories.

Key words: summer; ozone pollution episodes; volatile organic compounds (VOCs); positive matrix factorization (PMF); source apportionment

收稿日期: 2022-05-05; 修订日期: 2022-07-15

基金项目: 国家大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG2021301); 天津市科技计划项目 (18PTZWHZ00120)

作者简介: 贾智海 (1981~), 男, 主要研究方向为环境监测与大气污染防治, E-mail: 126691788@qq.com

* 通信作者, E-mail: lbsnankai@foxmail.com

近年来,随着我国环境颗粒物浓度不断下降,空气质量持续改善^[1],但臭氧(O₃)污染形势却呈加剧态势^[2]. 挥发性有机化合物(VOCs)是臭氧的关键前体物之一^[3],通过与·OH、NO₃·和其它物质发生反应,促进臭氧生成与累积,加剧臭氧污染^[4]. 同时,VOCs还能刺激呼吸道,通过呼吸道、消化道和皮肤等途径影响人体健康^[5]. 因此,明确环境VOCs的化学组成特征及其来源,对于有效降低环境臭氧污染和保护人群健康具有重要作用.

目前,国内外广泛使用的VOCs来源解析方法主要包括受体模型法、源模型法和源清单法等^[6],其中受体模型特别是正定矩阵因子分解(PMF)方法是应用最为广泛的源解析工具,主要是基于最小二乘法的原理,通过长时间序列中污染物组分的变化差异识别和量化排放源的贡献^[7,8]. 近年来,随着在线监测技术及仪器的不断发展,高时间分辨率(小于或等于1 h)的VOCs数据信息能够获得^[5],据此利用PMF模型进行来源解析研究,能够获得高时间分辨率的源解析结果,更好地捕捉排放源影响的变化特征. 例如,王艺璇等^[9]基于小时分辨率的VOCs监测数据,利用PMF模型解析了天津市臭氧污染和非污染时期和不同臭氧污染等级下VOCs的主要贡献源类及其对臭氧生成潜势(OFP)的贡献,发现石化工业及汽油挥发是臭氧污染时期的主要贡献源. 温肖宇等^[10]根据高时间分辨率的VOCs数据,利用PMF模型对运城市夏季环境VOCs进行了来源解析研究,发现机动车尾气排放源是贡献最大的源类. Song等^[11]基于时间分辨率为半小时的VOCs监测数据,通过PMF模型分析发现汽油相关源对北京市环境VOCs的贡献达到52%. Wang等^[12]基于多点位在线VOCs监测数据,利用物种特征比值分析发现煤燃烧是石家庄和邢台采暖季环境VOCs的重要来源. 另外,Fan等^[13]基于小时分辨率的VOCs物种浓度数据,利用PMF模型分析发现机动车排放对南京市环境VOCs的贡献达到23%. 可见,基于高时间分辨率的环境VOCs及其臭氧生成

潜势的精细化来源解析研究,对于有效管控其污染源,改善环境臭氧污染形势能够发挥重要的作用. 尽管如此,目前针对臭氧污染和非臭氧污染时期精细化的VOCs来源解析研究仍然是有限的.

青岛市处于山东半岛,近年来PM_{2.5}浓度显著下降,但臭氧污染非常凸显,2021年青岛臭氧日最大8 h浓度滑动平均值高于世界卫生组织标准100 μg·m⁻³的天数为64 d,占全年天数的17.5%^[14]. 精细化的解析环境VOCs来源对于青岛市臭氧污染改善至关重要. 2012~2013年薛莲等^[15]利用VOCs在线监测数据结合相关性分析和物种特征比值等方法,发现机动车源和工业源是青岛市环境VOCs的主要贡献源. Zhou等^[16]建立了青岛市高时空分辨率的人为源VOCs排放清单,发现工业排放、机动车和溶剂使用是排放量最大的源类. 但是,近年来基于高时间分辨率的数据的青岛市VOCs精细化来源解析的研究却十分有限. 同时,针对臭氧污染事件和非臭氧污染时期的环境VOCs及其臭氧生成潜势的来源解析研究也尚缺乏.

基于此,本研究结合2020年6~8月青岛市的高时间分辨率的环境VOCs在线监测数据,分析了青岛市夏季VOCs物种组成特征及其臭氧生成潜势,并利用PMF模型对VOCs及其臭氧生成潜势进行了精细化的来源解析研究. 同时,选择8次典型的臭氧污染过程与11次非臭氧污染时期,系统分析了VOCs及其臭氧生成潜势的来源及贡献,以期为青岛市环境臭氧污染的防控提供一定的数据支撑.

1 材料与方法

1.1 监测点位与采样时间

监测点位位于青岛胶州市九龙空气量子站(36.23°N,120.04°E,图1),处于胶州市城区南部,周围分布有居民区、水库、工业园和部分交通干道. 本研究的监测时期为2020年6~8月,期间主要盛行东南风(图2).《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中规定臭氧1 h浓度平均值二级标准为



图1 监测点位示意

Fig. 1 Map of monitoring site

200 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 据此,本研究选取小时 $\rho(\text{O}_3)$ 逐渐增加且峰值高于 200 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 后, O_3 逐渐降低的过程作为一次完整的臭氧污染过程; 本研究筛选出的 8 次典型臭氧污染过程见表 1 所示. 另外,非臭氧污染时期为时间序列中小时 $\rho(\text{O}_3)$ 低于 200 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的时间段,具体见表 1 所示.

1.2 VOCs 监测

本研究采用法国 Chromate-SUD 公司生产的 airmoVOC C2-C6/C6-C12 分析仪,针对环境 VOCs 物种浓度进行监测,时间分辨率为 1 h. 其中 C2 ~ C6 分析仪测定 C2 ~ C6 挥发性烃类,C6 ~ C12 分析仪测定 C6 ~ C12 物种. 该仪器使用 FID 检测器,并以氦气为载气. C2 ~ C6 分析仪使用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{SO}_4$ 色谱柱(柱长 25m),而 C6 ~ C12 分析仪使用 MXT 30CE 色谱柱(柱长 30m). 观测期间使用 VOCs 标准气体进行外部校正,每次校正使用 5 个质量浓度梯度验证,相关系数均在 0.9 以上. 此外,仪器每日进行内部校正,物种偏差低于 10%,物种检出限在 0.014-0.067 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间. 每天进行日常维护,峰窗漂移校准,并修正数据. 监测期间的气象参数见表 2 所示,其中温度、相对湿度和风速分别达到 24.8 $^{\circ}\text{C}$ 、82.6%和 1.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

1.3 臭氧生成潜势

VOCs 的 OFP 用来描述 VOCs 的化学反应活性,本研究采用 Carter^[17] 提出的最大增量反应活性(maximum incremental reactivity, MIR)法进行分析,计算公式为:

$$\text{OFP}_i = \text{MIR}_i \times [\text{VOC}]_i \quad (1)$$

$$\text{OFP} = \sum \text{OFP}_i \quad (2)$$

式中, OFP_i 为 VOCs 物种 i 的 OFP; MIR_i 为 VOCs 物种 i 的 MIR 系数,采用 Veneccek 等^[18] 的 MIR 数值(表 3); $[\text{VOC}]_i$ 表示 VOCs 物种的浓度. OFP 为全部 VOCs 物种的 O_3 生成潜势.

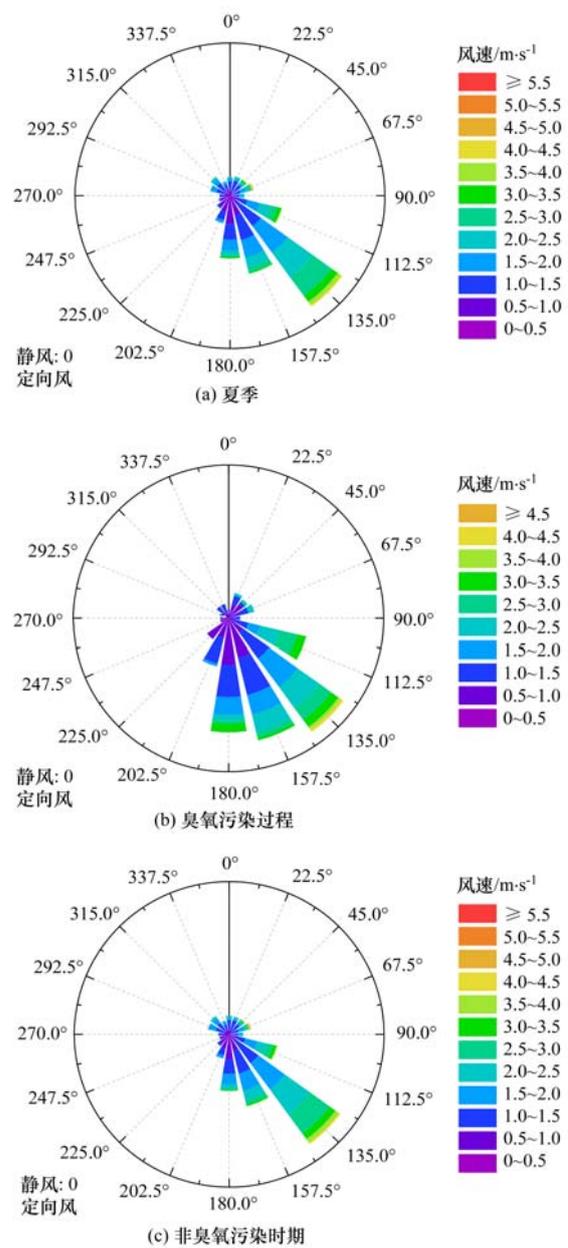


图 2 青岛市夏季、臭氧污染过程和非臭氧污染时期风向玫瑰图

Fig. 2 Wind roses in summer, ozone pollution episodes, and non-ozone pollution period in Qingdao

表 1 监测期间 8 次臭氧污染过程和 11 次非臭氧污染时期

Table 1 Eight ozone pollution episodes and eleven non-ozone pollution period during the monitoring period									
臭氧污染过程			非臭氧污染时期						
序号	时间(年-月-日 T 时)		持续时	$\rho(\text{O}_3)$ 平均值	序号	时间(年-月-日 T 时)		持续时	$\rho(\text{O}_3)$ 平均值
	起始	结束	间/h	$/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		起始	结束	间/h	$/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
1	2020-06-03 05:00	2020-06-05 00:00	44	140.1	1	2020-06-01 00:00	2020-06-03 04:00	53	81.7
2	2020-06-07 09:00	2020-06-07 23:00	15	138.4	2	2020-06-05 01:00	2020-06-07 08:00	56	106.5
3	2020-06-15 06:00	2020-06-17 01:00	44	107.1	3	2020-06-08 00:00	2020-06-15 05:00	174	70.5
4	2020-06-19 06:00	2020-06-21 06:00	49	141.7	4	2020-06-17 02:00	2020-06-19 05:00	52	82.0
5	2020-07-01 05:00	2020-07-02 07:00	27	123	5	2020-06-21 07:00	2020-07-01 04:00	238	91.7
6	2020-08-10 04:00	2020-08-10 21:00	18	85.6	6	2020-07-02 08:00	2020-07-14 04:00	285	88.3
7	2020-08-24 02:00	2020-08-24 20:00	19	95.9	7	2020-07-16 07:00	2020-07-22 19:00	157	80.7
8	2020-08-28 03:00	2020-08-28 21:00	19	96.8	8	2020-07-25 02:00	2020-08-10 03:00	386	56.7
					9	2020-08-10 22:00	2020-08-24 01:00	316	71.6
					10	2020-08-24 21:00	2020-08-28 02:00	78	74.0
					11	2020-08-28 22:00	2020-08-31 23:00	74	68.6

1.4 正定矩阵因子分解法(PMF)

本研究使用目前广泛应用于环境 VOCs 来源解析研究的美国 EPA PMF 5.0 模型进行计算^[19].

$$\mathbf{X}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{G}_{ik} \cdot \mathbf{F}_{kj} + \mathbf{E}_{ij} \quad (3)$$

式中, \mathbf{X}_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个物种的浓度, \mathbf{G}_{ik} 为

表 2 监测期间气象参数

参数指标	夏季	非臭氧污染时期	臭氧污染过程
风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.5 ± 0.8	1.5 ± 0.8	1.4 ± 0.7
温度/ $^{\circ}\text{C}$	24.8 ± 4.4	24.5 ± 4.2	26.6 ± 5.3
湿度/%	82.6 ± 16.6	84.1 ± 15.3	70.4 ± 20.1

表 3 不同物种的 MIR 值^[18]

Table 3 MIR values of different species

物种	MIR / $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	物种	MIR / $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	物种	MIR / $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$
乙炔	0.944	2,2,4-三甲基戊烷	1.38	2-甲基-1-戊烯	4.73
乙烷	0.321	正庚烷	1.37	1-己烯	5.47
丙烷	0.563	甲基环己烷	1.86	苯	0.787
异丁烷	1.3	2,3,4-三甲基戊烷	1.2	甲苯	4.02
正丁烷	1.33	3-甲基庚烷	1.53	氯苯	0.351
环戊烷	2.37	正辛烷	1.15	乙苯	3.11
异戊烷	1.65	正壬烷	1.03	间/对-二甲苯	6.99
正戊烷	1.56	正癸烷	0.926	苯乙烯	1.7
甲基环戊烷	2.23	正十一烷	0.849	邻-二甲苯	7.17
2,3-二甲基丁烷	1.09	乙烯	8.64	异丙基苯	2.58
2,3-二甲基戊烷	1.55	丙烯	10.8	正丙基苯	2.15
2-甲基庚烷	1.37	反式-2-丁烯	12.5	间-乙基甲苯	6.7
2,2-二甲基丁烷	1.3	1-丁烯	9.3	对-乙基甲苯	4.28
2-甲基戊烷	1.77	顺-2-丁烯	12.2	1,3,5-三甲苯	9.35
3-甲基戊烷	2.09	1,3-丁二烯	11.5	邻-乙基甲苯	5.33
正己烷	1.55	反式-2-戊烯	9.74	1,2,4-三甲苯	7.88
2,4-二甲基戊烷	1.76	1-戊烯	6.92	1,2,3-三甲苯	9.86
环己烷	1.81	顺-2-戊烯	9.62	间-二乙基苯	6.3
2,3-二甲基戊烷+2-甲基己烷	—	异戊二烯	9.71	对-二乙基苯	4.18
3-甲基己烷	1.91				

第 k 个来源对第 i 个样本的贡献, \mathbf{F}_{kj} 为第 k 个来源中第 j 个物种的来源概况, \mathbf{E}_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个物种的残差, p 为来源数量.

通过最小化目标函数 Q 值推导出因子贡献和概况^[9], 公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{\mathbf{E}_{ij}}{\boldsymbol{\mu}_{ij}} \right]^2 \quad (4)$$

式中, $\boldsymbol{\mu}_{ij}$ 为第 i 个样本中第 j 个物种的不确定性; n 和 m 分别为样本数量和物种数量.

本研究中缺失值用相应物种的中位数代替, 其不确定性为 4 倍的中位数. 将小于或等于检出限 (MDLs) 的数据用检出限的一半代替, 其不确定性设置为 5/6 的 MDLs; 大于检出限的数据其不确定度 (Unc.) 的计算公式为:

$$\text{Unc.} = \left[(0.5 \times \text{MDL})^2 + (\text{error fraction} \times \text{concentration})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

式中, error fraction 为误差系数, concentration 为污染物浓度, 误差系数设置为 10%~50% 之间^[9].

1.5 臭氧生成潜势来源解析

本研究参考王艺璇等^[9]构建的方法, 估算不同

排放源的臭氧生成潜势. 首先是利用 PMF 计算的各因子贡献浓度乘以各因子谱中各 VOCs 物种含量, 获得不同因子对于 VOCs 物种的贡献浓度. 其次是根据因子中 VOCs 物种贡献浓度, 利用 1.3 节中臭氧生成潜势公式, 计算得到该因子中 VOC 物种的臭氧生成潜势, 所有物种臭氧生成潜势加和则代表该因子的臭氧生成潜势. 最后是基于第二步的结果, 获得臭氧污染过程和非臭氧污染时期中臭氧生成潜势的来源解析结果.

2 结果与讨论

2.1 环境中臭氧及 VOC 物种的变化特征

青岛市夏季环境受体中 $\rho(\text{O}_3)$ 平均值为 $81.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 而 $\rho(\text{TVOCs})$ 平均值达到 $93.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中烷烃浓度和占比最高, 分别达到 $69.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 73.6%. 相较于其它城市, 青岛市 $\rho(\text{TVOCs})$ 明显高于运城市 ($50.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)^[10]、太原市 ($48.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)^[20]、济南市 ($68.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)^[21] 和天津市 ($48.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)^[22], 但低于淄博市 (140.7

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[23]. 烯烃和芳香烃的浓度和占比分别达到 $13.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $8.8\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 14.1% 和 9.4% . 其中丙烷是浓度和占比最高的 VOCs 物种,其浓度和占比分别为 $15.6\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 16.6% ; 其次为正丁烷、正戊烷和异戊烷,分别占 TVOCs 的 14.5% 、 12.4% 和 10.2% . 以上物种主要来源于燃烧过程和汽油挥发^[24,25],可能说明这些源对青岛夏季环境受体中 TVOCs 的贡献较高. 除此之外,夏季环境受体中苯/甲苯 (B/T) 比值为 2.0,与机动车排放的标识比值 2.0 一致^[26],说明机动车排放可能是青岛市夏季主要的 VOCs 贡献源; 异戊烷/正戊烷 (I/N) 比值为 0.8,有研究发现石油和天然气中 I/N 比值接近 0.8^[27],说明夏季石油和天然气影响也不容忽视.

本研究选择了 8 次典型的臭氧污染过程,其中 O_3 、 NO_2 和 TVOCs 时间序列如图 3 所示. 臭氧污染过程和非臭氧污染时期 $\rho(\text{O}_3)$ 平均值分别为 $120.8\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $76.0\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 臭氧污染过程中 $\rho(\text{TVOCs})$ ($132.0\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 显著高于非臭氧污染时期 ($88.4\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) (Kruskal-Wallis 显著性检验, $P < 0.01$). 烷烃是臭氧污染过程中浓度 ($99.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和占比 (75.2%) 最高的物种,其次为烯烃和芳香烃,占比分别达到 12.6% 和 9.8% . 臭氧污染过程中浓度及占比排名前 10 的物种如图 4 所示,其中丙烷是浓度 ($24.0\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和占比 (18.2%) 最高的物种; 其次

为正丁烷和正戊烷,占比分别为 14.9% 和 12.1% . 这些物种均为汽油挥发和液化石油气的标志性物种^[28],说明这些源在臭氧污染过程中可能对 TVOCs 的贡献较高.

相较于非臭氧污染时期,臭氧污染过程中 TVOCs 上升了 49.3% ,其中芳香烃浓度增幅最高,达到 59.7% ; 其次为烷烃和炔烃,分别增加了 52.6% 和 46.1% ; 而烯烃浓度增幅最低,仅为 32.9% . 相比于非臭氧污染时期,臭氧污染过程中间-乙基甲苯和 2,3-二甲基戊烷的浓度分别增加了 5 倍和 2 倍,增幅显著高于其它物种,其中间-乙基甲苯属于 C9 芳香烃,主要来源于油漆和溶剂使用^[29],2,3-二甲基戊烷属于支链烷烃,主要来源于机动车排放^[30],可能表明这两类源的贡献在臭氧污染过程中明显增加. 丙烷、正丁烷和异丁烷是臭氧污染过程中浓度增加量最高的物种,分别占 TVOCs 浓度增加量的 18.5% 、 13.4% 和 11.5% ,这些物种是液化石油气的标志性物种^[31,32],说明液化石油气在臭氧污染过程中的贡献可能较为明显. 臭氧污染过程中和非臭氧污染时期 T/B 分别为 1.5 和 2.2,相较于臭氧污染过程,非臭氧污染时期中该比值更接近 2,可能说明臭氧污染过程中机动车的影响有所降低; 而臭氧污染过程和非臭氧污染时期 I/N 均为 0.8,说明石油和天然气的贡献可能无明显变化.

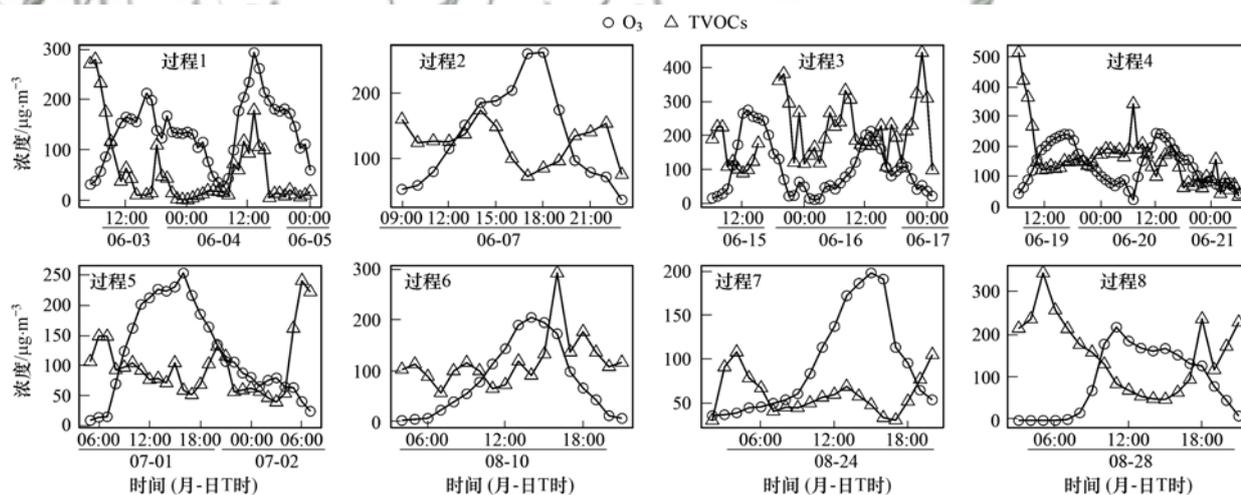


图 3 监测期间 8 次臭氧污染过程中 O_3 及 TVOCs 浓度的时间序列

Fig. 3 Time series of concentrations of ambient O_3 and TVOCs in eight ozone pollution episodes during the monitoring period

2.2 VOC 物种臭氧生成潜势变化特征

夏季环境受体中 TVOCs 的 OFP 平均值为 $246.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中烯烃是 OFP 最高的物种,达到 $109.5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占总 OFP 的 44.5% ; 其次为烷烃和芳香烃,分别占总 OFP 的 34.0% 和 20.4% . 这与在天津市的研究结果一致^[9,33],但与宿迁市、运城市和大连市夏季的研究结果不同,其中宿迁市和大连

市芳香烃在总 OFP 中的占比最高^[34,35],而运城市环境中氧化性 VOCs (OVOCs) 在总 OFP 中的占比最高^[10]. 对于不同物种来说,乙烯是夏季环境受体中 OFP 和占比最高的物种,分别达到 $35.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 14.3% ; 其次为间/对-二甲苯、2-甲基-1-戊烯和正戊烷,其 OFP 分别占总 OFP 的 8.5% 、 7.5% 和 7.4% . 以上物种主要来源于溶剂使用、工业过程

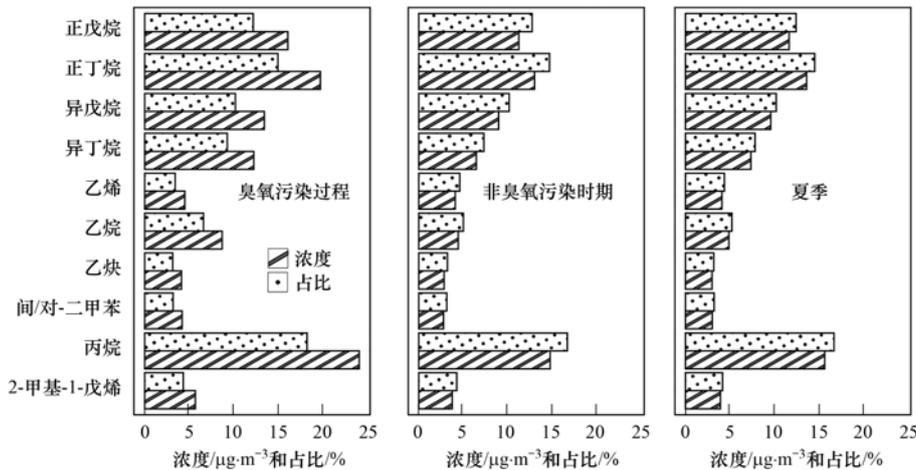


图4 非臭氧污染时期和臭氧污染过程中浓度及占比最高排前10的VOC物种

Fig. 4 Top-ten VOC species with the highest concentrations and percentages during the non-ozone pollution period and ozone pollution episodes

或机动车排放等^[29,36,37],说明这些源可能是青岛夏季臭氧形成的主要贡献源类。

臭氧污染过程和非臭氧污染时期的总 OFP 分别为 $330.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $230.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。烯烃在臭氧污染过程中的 OFP ($133.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 及其占比 (40.3%) 最高, 其次为烷烃和芳香烃, 其占比分别达到 37.7% 和 20.8%。臭氧污染过程中 OFP 及其占比排名前 10 的物种如图 5 所示, 其中乙烯是 OFP ($38.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和占比 (11.7%) 最高的物种; 其次为间/对-二甲苯和 2-甲基-1-戊烯, 其占比分别为 8.8% 和 8.1%。排名前 10 的物种中乙烯、丙烯和顺-2-丁烯等与汽油车排放相关^[38], 正丁烷、异戊烷、正戊烷和异丁烷与液化石油气和汽油挥发相关^[39]; 除此之外, 间/对-二甲苯为溶剂使用的标志性物种^[38], 可能表明汽油车排放、液化石油气和汽油挥发及溶剂使用源在臭氧污染过程中对于臭氧形成有重要的贡献。

相较于非臭氧污染时期, 臭氧污染过程中总 OFP 增加了 43.1%, 其中烷烃增加最多, 增加率达到 58.8%; 其次为芳香烃和炔烃, 分别增加了 46.9% 和 46.1%。相比之下, 天津市夏季臭氧污染时期 OFP 较非臭氧污染时期增加了 19.6%^[9], 淄博市 7 月臭氧污染日较清洁日 OFP 也明显增加^[40], 与本研究结果基本一致。相比于非臭氧污染时期, 臭氧污染过程中间-乙基甲苯和 2,3-二甲基戊烷的 OFP 在总 OFP 中的占比分别增加 3.3 倍和 1.4 倍, 是增加幅度最大的物种。它们主要来源于溶剂使用和机动车排放^[29,30], 可能说明臭氧污染期间这些源对于臭氧生成的贡献会增加。臭氧污染过程中大部分 VOCs 物种的 OFP 均明显升高, 其中间/对-二甲苯、2-甲基-1-戊烯和正丁烷对总 OFP 增加量的贡献最大, 分别为 9.8%、9.1% 和 8.9%, 而这些物种是液化石油气和溶剂使用的标志性物种^[41]。

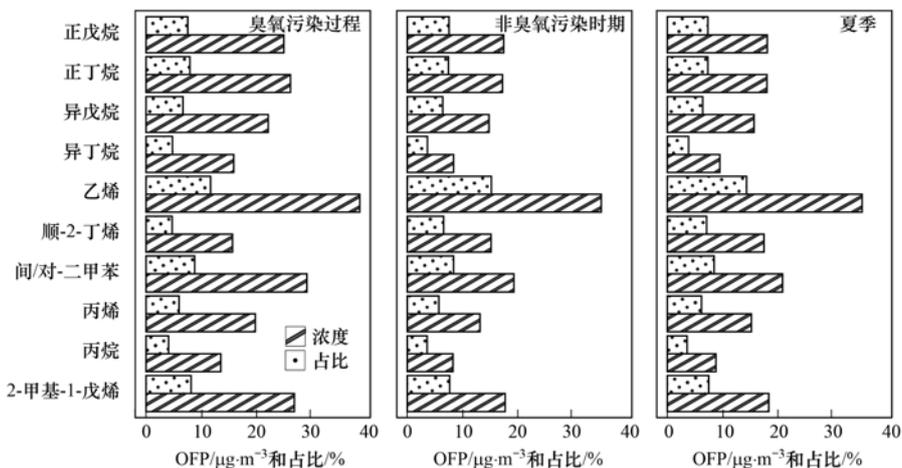


图5 非臭氧污染时期和臭氧污染过程中 OFP 及占比排名前10的VOC物种

Fig. 5 Top-ten VOC species with the highest OFP and percentages during the non-ozone pollution period and ozone pollution episodes

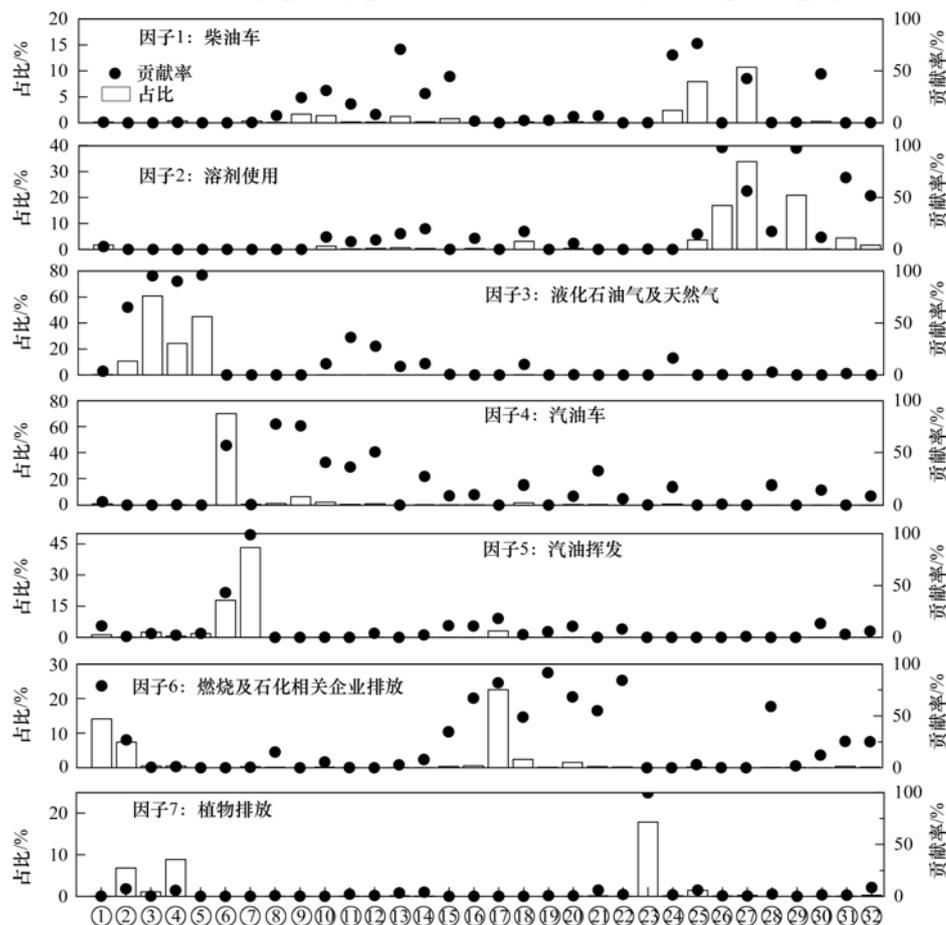
2.3 VOCs 及臭氧生成潜势来源解析

2.3.1 因子数选择及因子识别

本研究使用美国 EPA PMF 5.0 对夏季环境受体中 VOCs 进行来源解析. 参考文献[42,43], 将 TVOCs 纳入 PMF 作为总变量, 并选取 32 个 VOC 物种纳入模型进行分析, 主要选择标准为: ①选取具有较强来源指示性的物种; ②选取具有较高浓度的物种; ③选取大气光化学反应活性相对较弱的物种. 根据实际排放源调研和 PMF 模型的多次运算调整, 最终选取 7 个因子作为输入因子数进行运算. 本研究计算结果的 $Q_{\text{true}}/Q_{\text{exp}}$ 为 1.02, 同时, 计算和实测 VOC 浓度的相关系数 (R^2) 达到 0.76, 说明结果是合理的.

PMF 模型计算的因子谱如图 6 所示. 因子 1 中正辛烷的贡献率最高, 而苯和间/对-二甲苯是占比最高的两个物种. 其中正辛烷是柴油车排放的标志性物种^[44], 同时柴油车会排放苯和间/对-二甲苯等^[45,46]; 因此, 该因子被识别为柴油车. 因子 2 中

芳香烃的贡献率均较高, 其中乙苯和邻-二甲苯的贡献率最高, 间/对-二甲苯和邻-二甲苯的占比最高, 这些物种均主要来源于溶剂使用^[36,47~49]; 因此, 因子 2 被识别为溶剂使用. 因子 3 中乙烷、丙烷、异丁烷和正丁烷是贡献率和占比最高的 4 个物种, 其中乙烷和丙烷是天然气的主要组成成分^[50,51], 而异丁烷和正丁烷都是液化石油气的标志性物种^[52,53]; 因此, 因子 3 被识别为液化石油气及天然气. 因子 4 中 2,3-二甲基戊烷和 2-甲基戊烷是贡献率最高的两个物种, 而异戊烷是占比最高的物种. 以上物种中 2-甲基戊烷是汽油车排放的标志性物种^[44,54], 而 2,3-二甲基戊烷主要来源于机动车^[44,55~57], 异戊烷是汽油的组成成分也来源于汽油车排放^[37]. 除此之外, 因子 4 中还含有少量燃烧 (如机动车排放过程) 的标志性物种乙炔^[58,59]; 故因子 4 被识别为汽油车. 因子 5 中异戊烷和正戊烷为贡献率和占比最高的物种, 二者均为汽油的主要成分^[60], 故因子 5 被识别为汽油挥发. 因子 6 中乙炔和乙烯的贡献率



①乙炔, ②乙烷, ③丙烷, ④异丁烷, ⑤正丁烷, ⑥异戊烷, ⑦正戊烷, ⑧2,3-二甲基戊烷, ⑨2-甲基戊烷, ⑩正己烷, ⑪3-甲基己烷, ⑫正庚烷, ⑬正辛烷, ⑭正壬烷, ⑮正癸烷, ⑯正十一烷, ⑰乙烯, ⑱丙烯, ⑲顺-2-丁烯, ⑳反-2-丁烯, ㉑1-戊烯, ㉒顺-2-戊烯, ㉓异戊二烯, ㉔苯, ㉕甲苯, ㉖乙苯, ㉗间/对-二甲苯, ㉘苯乙炔, ㉙邻-二甲苯, ㉚1,3,5-三甲苯, ㉛1,2,4-三甲苯, ㉜1,2,3-三甲苯

图 6 青岛市夏季 PMF 计算的因子谱

Fig. 6 Factor profiles calculated by PMF in Qingdao in summer

和占比均最高,同时正十一烷、部分 C5 烯烃和苯乙烯等苯系物的贡献率也较高. 其中乙炔是燃烧的标志性物种^[45], 乙烯主要来源于不完全的燃烧过程或石化企业排放^[61,62], 而苯乙烯则主要来源于石化企业排放^[63], 故因子 6 被识别为燃烧及石化相关企业排放. 研究期间盛行东南风, 且观测点东南方向分布着石化企业聚集区(图 1), 可能是因子 6 的潜在来源. 因子 7 中植物排放的标志性物种异戊二烯^[64]的贡献率和占比均最高; 因此, 该因子被识别为植物排放.

2.3.2 VOCs 来源解析结果

液化石油气及天然气是夏季环境受体中 TVOCs 的主要贡献源类(图 7), 其浓度和贡献率分别达到 $23.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 27.5%; 其次为汽油挥发($22.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、26.6%) 和燃烧及石化相关企业排放($14.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、16.4%). 臭氧污染过程中, 液化

石油气及天然气、汽油挥发和燃烧及石化相关企业排放是贡献最高的源类, 其浓度分别为 38.3 、 33.3 和 $14.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 贡献率分别为 31.2%、27.1% 和 11.6%. 相较于非臭氧污染时期, 臭氧污染过程中各源类浓度均明显增加; 其中液化石油气及天然气浓度增加了 $16.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是增加量最大的源类; 而植物排放、液化石油气及天然气和溶剂使用分别增加了 88.6%、74.8% 和 71.1%, 是增加率最快的源类. 这是由于臭氧污染过程中太阳辐射增强, 使得植物排放的 VOCs 浓度升高; 同时较高的温度使得液化石油气及天然气和溶剂使用挥发出的 VOCs 增加而造成的. 对于贡献率来说, 臭氧污染过程中除柴油车和燃烧及石化相关企业排放的贡献率降低外, 其它源类均升高; 其中液化石油气及天然气贡献率增加了 4.2%, 明显高于其它源类.

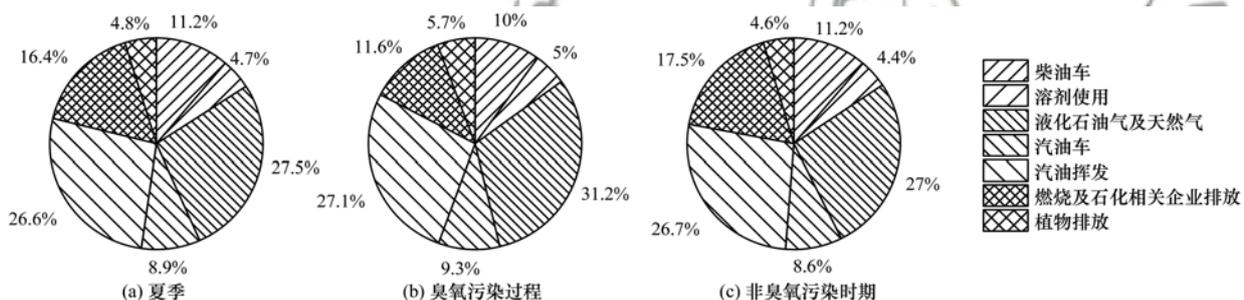


图 7 青岛市夏季、非臭氧污染时期和臭氧污染过程中 VOCs 源解析结果

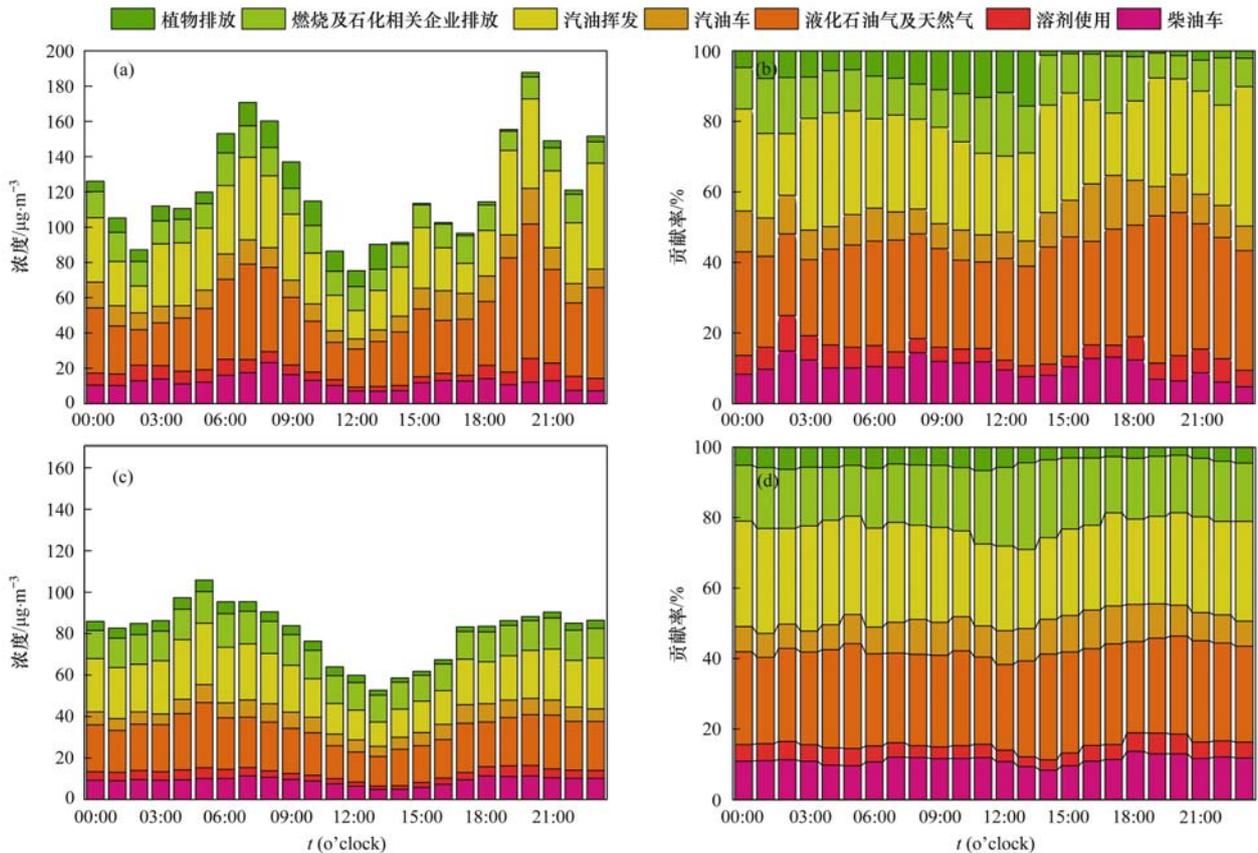
Fig. 7 Source apportionment results of ambient VOCs in summer, non-ozone pollution period, and ozone pollution episodes in Qingdao

臭氧污染过程和非臭氧污染时期环境 VOCs 源浓度和贡献率的日变化如图 8 所示. 相比于非臭氧污染时期, 臭氧污染过程中各源类的贡献率波动较大. 臭氧污染过程中柴油车贡献率在 08:00 达到峰值, 23:00 达到谷值, 其浓度和贡献率均表现出明显的早晚高峰特征. 溶剂使用浓度和贡献率分别在 06:00 和 20:00 出现峰值, 且夜间保持相对较高的水平. 这可能与溶剂使用的相关工业企业采取夜间生产措施, 使其排放浓度明显升高有关. 液化石油气及天然气的贡献率日变化趋势较为平缓, 在 19:00~20:00 达到峰值; 而汽油车浓度在 20:00 达到峰值. 汽油挥发的贡献率变化不大, 而燃烧及石化相关企业排放浓度和贡献率分别在 06:00 和 12:00 达到峰值. 植物排放浓度和贡献率分别在 09:00 和 13:00 达到峰值, 随后明显下降.

2.3.3 臭氧生成潜势来源解析结果

夏季环境受体中对臭氧生成潜势贡献最大的源类是燃烧及石化相关企业排放, 其 OFP 达到 $38.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占总 OFP 的 24.5% (图 9); 其次为液化石

油气及天然气和汽油挥发, 其 OFP 分别为 $31.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $30.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别占总 OFP 的 20.4% 和 19.7%. 非臭氧污染时期各源类的浓度与夏季整体基本一致, 而臭氧污染过程中则表现出明显差别. 液化石油气及天然气混合源是臭氧污染过程中对 OFP 贡献最大的源类, 其 OFP 和贡献率分别达到 $51.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 23.7%; 其次为汽油挥发和燃烧及石化相关企业排放混合源, 其贡献的 OFP 分别为 $44.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $38.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别占总 OFP 的 20.5% 和 17.7%. 相比于非臭氧污染时期, 臭氧污染过程中除柴油车 OFP 降低外, 其它源类均升高; 其中植物排放的 OFP 升高最多, 升高了 88.6%; 其次为液化石油气及天然气和溶剂使用, 其 OFP 分别升高了 74.8% 和 71.7%. 相比于非臭氧污染时期, 臭氧污染过程中各排放源的 OFP 共升高了 $69.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中液化石油气及天然气、汽油挥发和溶剂使用 OFP 升高量之和占总 OFP 升高量的 74.1%, 说明它们是臭氧污染过程中臭氧生成的主要贡献源.



(a) 臭氧污染过程不同源贡献浓度; (b) 臭氧污染过程不同源贡献率;
(c) 非臭氧污染时期不同源贡献浓度; (d) 非臭氧污染时期不同源贡献率

图 8 青岛市非臭氧污染时期和臭氧污染过程 VOCs 源贡献及占比的日变化

Fig. 8 Diurnal variations in source contributions of ambient VOCs during non-ozone pollution period and ozone pollution episodes in Qingdao

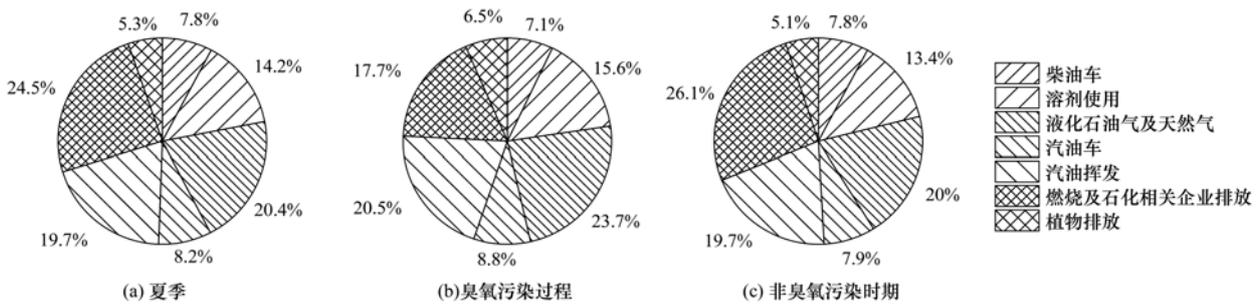


图 9 青岛市夏季、非臭氧污染时期和臭氧污染过程中 VOCs 排放源类对 OFP 的贡献率

Fig. 9 Contribution percentages of VOCs sources to OFP in summer, non-ozone pollution period, and ozone pollution episodes in Qingdao

3 结论

(1) 青岛市夏季环境 ρ (TVOCs) 平均值为 $93.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 非臭氧污染时期和臭氧污染过程 ρ (TVOCs) 分别为 $88.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $132.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 臭氧污染过程相较于非臭氧污染时期 TVOCs 浓度上升了 49.3%, 其中芳香烃、烷烃、炔烃和烯烃浓度分别上升了 59.7%、52.6%、46.1% 和 32.9%, 间-乙基甲苯和 2,3-二甲基戊烷是浓度上升幅度最大的物种。

(2) 相较于非臭氧污染时期, 臭氧污染过程中

VOCs 的总 OFP 增加了 43.1%, 其中烷烃 OFP 增加最多, 增加了 58.8%, 其次为芳香烃和炔烃, 分别增加了 46.9% 和 46.1%。间-乙基甲苯和 2,3-二甲基戊烷是 OFP 增加幅度最大的物种。

(3) 青岛市夏季环境 VOCs 的主要贡献源是柴油车(11.2%)、溶剂使用(4.7%)、液化石油气及天然气(27.5%)、汽油车(8.9%)、汽油挥发(26.6%)、燃烧及石化相关企业排放(16.4%)和植物排放(4.8%)。相较于非臭氧污染时期, 臭氧污染过程中液化石油气及天然气是增加量最大的源类, 而植物排放是增加率最高的源类。

(4) 燃烧及石化相关企业排放是青岛市夏季环境 VOCs 对 OFP 贡献最大的源类, 其对 OFP 的贡献和占比分别达到 $38.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 24.5%。相较于非臭氧污染时期, 臭氧污染过程中液化石油气及天然气、汽油挥发和溶剂使用对总 OFP 升高量的贡献率之和达到 74.1%, 是最主要的贡献源类。

参考文献:

- [1] Huang J, Pan X C, Guo X B, *et al.* Health impact of China's air pollution prevention and control action plan: an analysis of national air quality monitoring and mortality data[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2018, **2**(7): e313-e323.
- [2] 王男, 刘闯, 林宏, 等. 沈阳市环境空气中挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(5): 41-52.
Wang N, Liu M, Lin H, *et al.* Pollution characteristic and source apportionment of VOCs in Shenyang[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(5): 41-52.
- [3] Chameides W L, Fehsenfeld F, Rodgers M O, *et al.* Ozone precursor relationships in the ambient atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(D5): 6037-6055.
- [4] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 2063-2101.
- [5] Zhou B, Zhao T Y, Ma J, *et al.* Characterization of VOCs during nonheating and heating periods in the typical suburban area of Beijing, China: sources and health assessment[J]. *Atmosphere*, 2022, **13**(4), doi: 10.3390/atmos13040560.
- [6] Kitayama K, Morino Y, Yamaji K, *et al.* Uncertainties in O₃ concentrations simulated by CMAQ over Japan using four chemical mechanisms [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **198**: 448-462.
- [7] 虞雄, 杨凌霄, 张婉, 等. 海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM_{2.5} 污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2284-2293.
Tuo X, Yang L X, Zhang W, *et al.* Characteristics and source analysis of PM_{2.5} in Qingdao in winter under the action of sea-land-atmosphere convergence [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2284-2293.
- [8] 张远远, 戴维, 华楠, 等. 基于不同周期 PM_{2.5} 组成高时间分辨观测的 PMF 源解析研究[J]. *环境科学学报*, 2022, **42**(2): 308-317.
Zhang Y Y, Dai W, Hua N, *et al.* PMF source apportionment based on high time-resolved measurements of PM_{2.5} components during different observation periods [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(2): 308-317.
- [9] 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 等. 天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5644-5655.
Wang Y X, Liu B S, Wu J H, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment with temporal refinement for VOCs in Tianjin suburb in summer[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5644-5655.
- [10] 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 等. 运城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*, 2022, **43**(6): 2979-2986.
Wen X Y, Zhao W T, Luo S Z, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of atmospheric volatile organic compounds in summer in Yuncheng city [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 2979-2986.
- [11] Song Y, Shao M, Liu Y, *et al.* Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(12): 4348-4353.
- [12] Wang Z S, Wang H Y, Zhang L, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) based on multisite observations in Hebei province in the warm season in 2019[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **256**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118435.
- [13] Fan M Y, Zhang Y L, Lin Y C, *et al.* Source apportionments of atmospheric volatile organic compounds in Nanjing, China during high ozone pollution season[J]. *Chemosphere*, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128025.
- [14] 中国环境监测总站. 空气质量在线监测平台[EB/OL]. <https://www.aqistudy.cn/historydata/>, 2022-01-08.
- [15] 薛莲, 王静, 冯静, 等. 青岛市环境空气中 VOCs 的污染特征及化学反应活性[J]. *环境监测管理与技术*, 2015, **27**(2): 26-30.
Xue L, Wang J, Feng J, *et al.* Pollution characteristics and chemical reactivity of ambient VOCs in Qingdao [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2015, **27**(2): 26-30.
- [16] Zhou M M, Jiang W, Gao W D, *et al.* A high spatiotemporal resolution anthropogenic VOC emission inventory for Qingdao City in 2016 and its ozone formation potential analysis[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, **139**: 147-160.
- [17] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [18] Venecsek M A, Carter W P L, Kleeman M J. Updating the SAPRC maximum incremental reactivity (MIR) scale for the United States from 1988 to 2010[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2018, **68**(12): 1301-1316.
- [19] EPA. PMF [EB/OL]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1001W74.txt>, 2022-01-08.
- [20] 李如梅, 闫雨龙, 王成, 等. 太原市城区夏季 VOCs 来源及其对 O₃ 生成的贡献[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(6): 2515-2525.
Li R M, Yan Y L, Wang C, *et al.* Source apportionment of VOCs and its contribution to O₃ production during summertime in urban area of Taiyuan[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(6): 2515-2525.
- [21] 桑博, 魏凤霞. 济南市区大气中 VOCs 的浓度、来源及健康风险评估[J]. *中国科学院大学学报*, 2019, **36**(2): 169-177.
Sang B, Wei F X. Investigation on the concentration, source, and health risk assessment of atmospheric VOCs in urban Jinan [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2019, **36**(2): 169-177.
- [22] 高璟贻, 肖致美, 徐虹, 等. 2019 年天津市挥发性有机物污染特征及来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 55-64.
Gao J Y, Xiao Z M, Xu H, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric VOCs in Tianjin in 2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 55-64.
- [23] 王帅, 王秀艳, 杨文, 等. 淄博市城区臭氧超标期间的 VOCs 污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1277-1285.
- [24] Wang S, Wang X Y, Yang W, *et al.* Characteristics and source analysis of VOCs pollution during the period of ozone exceeding the standard in Zibo city[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1277-1285.
- [24] Niu Z Z, Kong S F, Zheng H, *et al.* Temperature dependence of source profiles for volatile organic compounds from typical volatile emission sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2021,

- 751**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141741.
- [25] Song C B, Liu Y, Sun L N, *et al.* Emissions of volatile organic compounds (VOCs) from gasoline- and liquified natural gas (LNG)-fueled vehicles in tunnel studies [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **234**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117626.
- [26] Jia C H, Mao X X, Huang T, *et al.* Non-methane hydrocarbons (NMHCs) and their contribution to ozone formation potential in a petrochemical industrialized city, northwest China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **169**: 225-236.
- [27] Wilde S E, Dominutti P A, Allen G, *et al.* Speciation of VOC emissions related to offshore North Sea oil and gas production [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(5): 3741-3762.
- [28] McCarthy M C, Akilu Y A, Brown S G, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds measured in Edmonton, Alberta [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 504-516.
- [29] Yuan B, Shao M, Lu S H, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(15): 1919-1926.
- [30] 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.
- [31] Tsai W Y, Chan L Y, Blake D R, *et al.* Vehicular fuel composition and atmospheric emissions in south China: Hong Kong, Macau, Guangzhou, and Zhuhai [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3281-3288.
- [32] Lau A K H, Yuan Z B, Yu J Z, *et al.* Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Hong Kong [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(19): 4138-4149.
- [33] 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 等. 天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 75-87.
- Luo R X, Liu B S, Liang D N, *et al.* Characteristics of ozone and source apportionment of the precursor VOCs in Tianjin suburbs in summer [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 75-87.
- [34] 蔡乐天, 许满锋, 许纯领, 等. 宿迁市 VOCs 污染特征和来源解析 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(11): 4341-4352.
- Cai L T, Xu X F, Xu C L, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in Suqian, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(11): 4341-4352.
- [35] 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 等. 大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 3944-3952.
- Zhu K X, Liu L Z, Liu H W, *et al.* Chemical reaction activity and sources apportionment of atmospheric VOCs in summer in Dalian [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 3944-3952.
- [36] Zhu H L, Wang H L, Jing S G, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) along the mid-lower Yangtze River in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **190**: 232-240.
- [37] Wang M, Qin W, Chen W T, *et al.* Seasonal variability of VOCs in Nanjing, Yangtze River delta: implications for emission sources and photochemistry [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117254.
- [38] Yuan Z B, Lau A K H, Shao M, *et al.* Source analysis of volatile organic compounds by positive matrix factorization in urban and rural environments in Beijing [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, **114**(D2), doi: 10.1029/2008JD011190.
- [39] Huang C, Wang H L, Li L, *et al.* VOC species and emission inventory from vehicles and their SOA formation potentials estimation in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(19): 11081-11096.
- [40] 秦涛, 李丽明, 王信梧, 等. 典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 3934-3943.
- Qin T, Li L M, Wang X W, *et al.* Characteristics and reactivity of VOCs in typical industrial city in summer [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 3934-3943.
- [41] Ling Z H, Guo H. Contribution of VOC sources to photochemical ozone formation and its control policy implication in Hong Kong [J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, **38**: 180-191.
- [42] Gu Y, Liu B S, Dai Q L, *et al.* Multiply improved positive matrix factorization for source apportionment of volatile organic compounds during the COVID-19 shutdown in Tianjin, China [J]. *Environment International*, 2022, **158**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106979.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Liu Y F, Song M D, Liu X G, *et al.* Characterization and sources of volatile organic compounds (VOCs) and their related changes during ozone pollution days in 2016 in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113599.
- [46] Borbon A, Fontaine H, Locoge N, *et al.* Developing receptor-oriented methods for non-methane hydrocarbon characterisation in urban air—Part I: source identification [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(29): 4051-4064.
- [47] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* VOC characteristics, chemical reactivity and sources in urban Wuhan, central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **224**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117340.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] Lyu X P, Chen N, Guo H, *et al.* Ambient volatile organic compounds and their effect on ozone production in Wuhan, central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 200-209.
- [51] Vinciguerra T, Yao S, Dadzie J, *et al.* Regional air quality impacts of hydraulic fracturing and shale natural gas activity: evidence from ambient VOC observations [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **110**: 144-150.
- [52] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* Characteristics, source apportionment and contribution of VOCs to ozone formation in Wuhan, central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **192**: 55-71.

- [53] Yan Y L, Peng L, Li R M, *et al.* Concentration, ozone formation potential and source analysis of volatile organic compounds (VOCs) in a thermal power station centralized area: a study in Shuozhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 295-304.
- [54] Chiang H L, Hwu C S, Chen S Y, *et al.* Emission factors and characteristics of criteria pollutants and volatile organic compounds (VOCs) in a freeway tunnel study[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **381**(1-3): 200-211.
- [55] Brown S G, Frankel A, Hafner H R. Source apportionment of VOCs in the Los Angeles area using positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(2): 227-237.
- [56] Batterman S A, Peng C Y, Braun J. Levels and composition of volatile organic compounds on commuting routes in Detroit, Michigan[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(39-40): 6015-6030.
- [57] Shin H J, Roh S A, Kim J C, *et al.* Temporal variation of volatile organic compounds and their major emission sources in Seoul, Korea [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(12): 8717-8728.
- [58] Huang Y S, Hsieh C C. VOC characteristics and sources at nine photochemical assessment monitoring stations in western Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117741.
- [59] Li J, Zhai C Z, Yu J Y, *et al.* Spatiotemporal variations of ambient volatile organic compounds and their sources in Chongqing, a mountainous megacity in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1442-1452.
- [60] Watson J G, Chow J C, Fujita E M. Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(9): 1567-1584.
- [61] Buzcu-Guven B, Fraser M P. Comparison of VOC emissions inventory data with source apportionment results for Houston, TX [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(20): 5032-5043.
- [62] Guo H, Zou S C, Tsai W Y, *et al.* Emission characteristics of nonmethane hydrocarbons from private cars and taxis at different driving speeds in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(16): 2711-2721.
- [63] Kim S J, Kwon H O, Lee M I, *et al.* Spatial and temporal variations of volatile organic compounds using passive air samplers in the multi-industrial city of Ulsan, Korea [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(6): 5831-5841.
- [64] Rantala P, Järvi L, Taipale R, *et al.* Anthropogenic and biogenic influence on VOC fluxes at an urban background site in Helsinki, Finland [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(12): 7981-8007.



CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i>	(1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qi, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i>	(1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i>	(1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i>	(1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i>	(1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling	(1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i>	(1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i>	(1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i>	(1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i>	(1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i>	(1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ling, <i>et al.</i>	(1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i>	(1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i>	(1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i>	(1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i>	(1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi	(1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i>	(1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i>	(2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i>	(2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i>	(2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i>	(2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i>	(2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i>	(2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i>	(2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	Ji Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i>	(2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i>	(2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen	(2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i>	(2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi	(2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i>	(2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu	(2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i>	(2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i>	(2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i>	(2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i>	(2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i>	(2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i>	(2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i>	(2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi	(2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i>	(2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i>	(2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i>	(2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i>	(2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i>	(2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i>	(2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i>	(2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i>	(2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i>	(2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i>	(2395)