

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析	刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性	梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素	高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃	金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征	段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征	梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性	姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析	武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例	姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系	董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响	张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价	张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估	王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 耿耕南 (1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险	张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素	孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制	肖晓, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用	李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响	陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)
NO ₃ ⁻ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响	姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响	李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响	丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响	刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)
紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用	徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用	王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)
树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟	陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响	朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律	桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋	周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性	金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)
Fe ⁽⁰⁾ -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素	吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较	李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响	范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析	杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)
嗜碱降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用	徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)
锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制	万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析	许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落	曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征	秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素	田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N ₂ O 排放的影响	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N ₂ O 的排放特征	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征	熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测	孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价	张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响	王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征	李秋言, 赵秀兰 (2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用	吴志娟, 毕二平 (2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制	王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)
牛粪源蛭蛭及其生物炭对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 的吸附特性	杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)
C ₃ N ₄ /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制	鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)
《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)	

南京工业区夏冬季节二次有机气溶胶浓度估算及来源解析

刘静达¹, 安俊琳^{1*}, 张玉欣¹, 师远哲¹, 林旭²

(1. 南京信息工程大学, 气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 杭州市环境监测中心站, 杭州 310007)

摘要: 采用2015年6月15日~7月15日及2015年12月16日~2016年1月15日期间GC5000在线气相色谱仪得到的挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)数据、DRI-2001A热/光碳分析仪对膜采样分析得到的EC(elemental carbon)、OC(organic carbon)数据,使用气溶胶生成系数法(fractional aerosol coefficient, FAC)、EC示踪法及正矩阵因子分析(positive matrix factorization, PMF)对南京工业区二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)浓度进行估算及来源解析。研究发现南京工业区SOA污染主要来源于芳香烃类物质,其对夏、冬季节SOA贡献率分别为80.39%、94.63%,主要贡献者为苯、甲苯、乙苯、二甲苯(benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, BTEX);对南京工业区SOA浓度进行估算,得到夏季SOA浓度值为 $5.84 \sim 20.88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均浓度为 $12.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,冬季为 $2.17 \sim 17.73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均浓度为 $6.91 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,冬季SOA浓度平均水平明显低于夏季。SOA浓度值随风速及降水量的增大而减小;使用PMF受体模型对VOCs进行源解析分析得到夏季SOA污染主要来源于涂料使用、石油加工及石油化工源,SOA贡献值分别为0.65、0.21、0.18 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。冬季SOA污染主要来自于涂料使用,SOA贡献值为0.94 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

关键词: VOCs; SOA浓度; FAC系数法; EC示踪法; PMF源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1733-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201610167

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District

LIU Jing-da¹, AN Jun-lin^{1*}, ZHANG Yu-xin¹, SHI Yuan-zhe¹, LIN Xu²

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Hangzhou Environmental Monitoring Center, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) were determined by GC5000, an automatic on-line Gas Chromatography-Flame Ionization Detector. Elemental carbon (EC) and organic carbon (OC) were determined by the thermal/optical method using DRI-2001A during the periods of June 15th-July 15th 2015 and December 16th 2015 - January 15th 2016. The concentration of secondary organic aerosol (SOA) was estimated by fractional aerosol coefficients (FAC) and EC tracer method. The source apportionment relied on the positive matrix factorization model (PMF). There were several conclusions: First, aromatic hydrocarbon was the main substance causing the SOA pollution in the Nanjing Industrial district, the contributions of aromatic hydrocarbon to SOA during summer and winter were 80.39% and 94.63%, respectively. The main contributors were benzene, toluene, ethylbenzene, *m*, *p*-xylene and *o*-xylene (BTEX). In the summer, SOA concentration ranged from $5.84 \sim 20.88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ with an average of $12.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and in the winter ranged from $2.17 \sim 17.73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in which the average concentration was $6.91 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Secondly, SOA concentration decreased when wind and precipitation increased. By using the PMF model, a total of 7 sources of SOA were determined in summer and 6 were determined in winter. There were 3 main sources in summer, including painting, petroleum processing and petrochemical industry, and the contributions to SOA were $0.65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $0.21 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $0.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. In winter, the most important SOA pollution was from painting, in which the contribution was $0.94 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); concentration of secondary organic aerosol; fractional aerosol coefficients (FAC); EC tracer method; positive matrix factorization model and source apportionment

收稿日期: 2016-10-24; 修订日期: 2016-11-23

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB05020206); 国家自然科学基金项目(91544229, 41305135); 江苏省高校“青蓝工程”项目; 江苏省江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 刘静达(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: nuistlj@163.com

* 通信作者, E-mail: junlinan@nuist.edu.cn

大气气溶胶 (particulate matter, PM) 是悬浮在大气中的微小的固体或液体微粒的总称。其中, 细颗粒物的环境效应远比粗颗粒物大, 它可以危害人体健康、降低能见度、影响气候变化等^[1~3]。有机气溶胶 (organic aerosol, OA) 包括污染源直接排放的一次有机气溶胶 (primary organic aerosol, POA) 以及二次转化形成的 SOA。一般认为在 $PM_{2.5}$ 中, OA 占到总质量浓度的 20% ~ 60%, 而 SOA 平均可以占到 OA 的 20% ~ 70%, 在光化学烟雾的条件下甚至可以占到 70% 以上^[4]。在中国, 颗粒物中 SOA 约占 OA 的 30% ~ 95%^[5~7]。

SOA 是挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 大气氧化的产物, 是大气细颗粒物的重要组成部分^[8]。VOCs 通过各种天然源和人为源排入大气。在城市地区大气中的主要是由各种人为活动如交通运输、工业生产等引起的排放, 进入大气中经过复杂的化学变化和物理过程产生 SOA。这些 SOA (包括一些脂类、酸类等) 对大气环境质量和人体健康产生更大的危害, 其引起的环境污染问题日益凸显。研究 SOA 的浓度值及其来源特征对揭示复合型大气污染的形成机制和人们健康影响都具有重要意义。

近 30 年来, 对 SOA 的估算工作得到了国内外学者的重视, 其中 Grosjean 等^[9,10] 提出的 FAC 法与 EC 示踪法为估算 SOA 浓度中较为常用的方法。FAC 方法的优势在于可以用来估算各种 VOC 对 SOA 生成潜势所占比率。对北京^[11]、美国南加州地区^[12]、加拿大英属哥伦比亚地区^[13] 等地进行分析, 一致认为 SOA 的主要来源为芳香烃类 VOCs 氧化生成的。EC 示踪法被广泛地应用于 SOA 生成潜势的

估算, 有研究利用 EC 示踪法对全国 14 个城市站点进行冬、夏季同步观测, 并估算中国城市大气环境中 SOC (secondary organic carbon) 浓度^[14]。

由 Paatero 等^[15] 提出运用 PMF 模型解决源解析问题。PMF 模型是综合了数据中的误差估计来解决一个受限制加权最小二乘线性模型的矩阵分解法。由于 VOCs 是 SOA 的前体物, 因此通过 PMF 方法分析 VOCs 来源对 SOA 的贡献有重要意义。Sun 等^[16] 分析出北京大气中 VOCs 来源为车辆排放、溶剂使用、生物源、燃烧、化工产业及 CFC (氟利昂) 这 6 个排放源。林旭等^[17] 对南京北郊四季的 VOCs 进行源解析发现不同季节的源解析结果显示工业排放和汽车尾气是南京北郊最主要的 VOCs 污染源。

南京工业区集中了较多的发电、钢铁和石化等重工企业, 是典型的工业区。当地石油化工企业的生产、存储和运输等过程是大气中 VOCs 的重要来源, 其中高活性高浓度的 VOCs 也容易造成南京工业区 SOA 的浓度升高。国内目前对 SOA 的研究主要集中于北京、上海、深圳等地, 对南京工业区 SOA 的研究较少。本研究将利用 FAC 法估算南京工业区夏、冬季的 VOCs 对 SOA 的生成贡献情况, 利用 EC 法估算南京工业区 SOA 浓度情况并使用 PMF 受体模型法对 VOCs 进行源解析, 结合 FAC 法分析出对 SOA 浓度组成主要因子, 以期防治 SOA 污染提供建议。

1 材料与方法

1.1 观测时间及观测站点

本研究观测时间为 2015-06-15 ~ 07-15 及 2015-12-16 ~ 2016-01-15。如图 1 所示, 观测站点位



图 1 观测点地理位置及周围环境情况示意

Fig. 1 Geographical location and the surrounding environment of the observation station

于南京市浦口区南京信息工程大学气象楼楼顶(32°12'N, 118°43'E)海拔高度为 62 m. 观测点东边 500 m 处为南北走向的宁六线干路、双向六车道、江北快速路及地铁 S8 号线(高架). 观测点正东方向及东北方向 3~6 km 处有石油化工厂、钢铁厂及化工厂等, 观测点正南方为南京高新区, 西南部为龙王山风景区. 具体情况如图 1 所示. 观测点位置符合中国气象局发布的《大气成分站选址要求》^[18], 采样点附近排放源稳定, 观测资料能够反映典型城市工业区大气污染特点.

1.2 仪器及分析方法

1.2.1 仪器介绍

VOCs 观测采用由德国 AMA 公司提供的集自动采样、分析、富集于一体的 GC5000 在线气相色谱仪. 该系统主要包括 GC5000VOC(单级富集)和 GC5000BTX(两级富集)两台分析色谱仪, 可分别测量 C2~C6 的低沸点物种和 C4~C12 的高沸点物种, 检测器均为氢火焰离子化检测器(FID). 其测量原理: 环境空气样品通过采样经干燥后直接进入分析系统, 有机物在富集管的特殊材料中吸附解析后, 进入毛细管柱进行分离, 而后由 FID 检测有机物含量. 仪器可检测 C2~C12 共计 56 种挥发性有机物, 其中包括 29 种烷烃、10 种烯烃、16 种芳香烃和乙炔. 系统时间分辨率为 1 h. 仪器详细技术参数见文献[19]. 同时为了保证数据的有效性和可靠性, 观测期间利用 DIM200 校准模块(稀释 100 倍)进行 4 周左右一次的校正, 其中校正气体采用美国环保署认可的 Linde Gas North America LLC 提供的混合标气.

使用石英滤膜采集样品, 使用前在马弗炉中以 800℃ 焙烧 5 h, 冷却后放入恒温恒湿箱中平衡 24 h, 用 1×10^{-5} 的精密电子天平称重后放入冰箱中低温保存. 膜采样使用天虹 TH-150C(TSP)中流量空气总悬浮微粒采样器每天采集样品两次, 每个样品连续采集 11.5 h, 自 08:00~19:30 及 20:00~07:30. 采样结束称重后将样品低温保存在冰箱中直至分析.

DRI-2001A 热/光碳分析仪是一款应用热光法测量原理、设计精良、非常成熟的分析仪, 可适用于美国 IMPROVE_A, NIOSH, 加拿大 MSC1 和中国香港 EPD-TOT 等方法, 使用膜采样工作后得到的石英膜进行分析, 测量大气颗粒物样品中的有机碳(OC)和元素碳(EC)含量. 该型仪器是目前世界上最先进的测量大气样品中 OC/EC 的分析仪器. 样品分析开始、结束和每 15 个样品间都采用 He/CH₄

标注气体对一起进行校准, 确保初始和最后 FID 信号漂移在 ± 3 以内、校准峰面积相对偏差在 5% 以内. 实验开始前, 对仪器检漏, 5 s 内样品炉的压力不变即为不漏气. 分析样品前, 高温烘烤并做仪器空白确保已除去所残留杂质. 为确保数据精确可靠, 对每套样品的空白膜进行平行分析, 前后误差在 10% 内可再进行后续样品分析.

气象资料观测: 依托南京信息工程大学气象综合观测场, 自动气象站记录的全天候连续观测的主要气象要素资料(风速、降水量), 其采样间隔为 1 h, 剔除明显的异常值.

1.2.2 分析方法

(1) FAC 方法

本研究基于 Grosjean 的烟雾箱实验, 采用 FAC 方法来估算环境大气中 VOCs 的 SOA 生成潜势^[9,10]:

$$\text{SOA}_p = \text{VOC}_{s_0} \times \text{FAC} \quad (1)$$

式中, SOA_p 是 SOA 生成潜势; VOC_{s_0} 是排放源排出的初始浓度; FAC 是 SOA 的生成系数. 考虑到受体点测得的 VOCs 往往是经过氧化后的浓度 VOC_{s_t} , 它与排放源排出的初始度 VOC_{s_0} 之间的关系可通过下式表示:

$$\text{VOC}_{s_t} = \text{VOC}_{s_0} \times (1 - \text{FVOCr}) \quad (2)$$

式中, FVOCr 为 VOCs 物种参与反应的分数(%). Grosjean 假设 SOA 只在白天生成(08:00~17:00), 且 VOCs 只与·OH 发生反应生成 SOA.

公式(1)和(2)中用到的 FAC 和 FVOCr 由烟雾箱实验获得.

(2) EC 示踪法

元素碳 EC 来自化石燃料和生物质等含碳燃料不完全燃烧的直接排放; 一次燃烧排放 EC 的同时也伴随产生有机碳 OC(organic carbon, OC). 因此, EC 可作为指示燃烧排放 OC 的示踪物种^[20,21]. 根据 EC 可估算一次有机碳和二次有机碳.

$$\text{SOA} = \text{SOC} \times \text{Coef}_{\text{SOA/SOC}}$$

$$\text{SOC} = \text{TOC} - \text{EC} \times (\text{OC/EC})_{\min}$$

式中, $\text{Coef}_{\text{SOA/SOC}}$ 为 SOC 向 SOA 的转化系数; $(\text{OC/EC})_{\min}$ 为 OC/EC 比值的最小值. 详细方法见文献[22,23].

(3) PMF 受体模型

PMF 由芬兰赫尔辛基大学的 Dr. Paatero 在 20 世纪 90 年代中期开发^[24], 详细方法见文献[20].

其原理为: 假设 X 为 $n \times m$ 矩阵, n 为样品数, m 为化学成分数目, 那么 X 可以分解为 $X = GF + E$,

其中 G 为 $n \times p$ 的矩阵, F 为 $p \times m$ 的矩阵, p 为主要污染源的数目, E 为残数矩阵. 定义:

$$e_{ij} = X_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \\ (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m; k = 1, \dots, p)$$

$$Q(E) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (e_{ij}/s_{ij})^2$$

式中, X_{ij} 为第 i 个样本中第 j 种物质的浓度; g_{ik} 为第 k 个因子对第 i 个样本的贡献; f_{kj} 为第 j 种物质在第 k 个因子中的百分数; e_{ij} 为第 i 个样本中第 j 种物质的残余; s_{ij} 为第 i 个样本中第 j 种物质的不确定值估计.

本文的 PMF 源解析使用 EPA PMF5.0 模型. 将信噪比在 2.0 ~ 3.0 之间的物质定义为弱 (week), 不确定 (UNC) 扩大 3 倍, 降低计算权重. 信噪比小于 2.0 的物质定为差 (bad), 模式计算不采用. 大于

3.0 的定为强 (strong), 模式直接使用.

2 结果与讨论

2.1 夏、冬季节 VOCs 的体积分数

本研究对南京工业区夏、冬季节 VOCs 情况进行综合分析. 观测期间, 共得到 56 种 VOCs 物种, 包含 29 种烷烃, 10 种烯烃, 16 种芳香烃以及乙炔. 其中夏季 VOCs 小时体积分数为 37.54×10^{-9} , 烷烃为 18.32×10^{-9} , 芳香烃为 9.52×10^{-9} , 烯烃为 7.20×10^{-9} , 乙炔为 2.50×10^{-9} . 冬季 VOCs 小时体积分数为 47.67×10^{-9} , 烷烃为 24.53×10^{-9} , 芳香烃 8.32×10^{-9} , 烯烃为 10.25×10^{-9} , 乙炔为 2.50×10^{-9} , 占比情况如图 2 所示. 对比可以发现, 冬季 VOCs 小时体积分数明显大于夏季, 但芳香烃类占比减少, 夏季芳香烃体积分数为冬季的 1.14 倍.

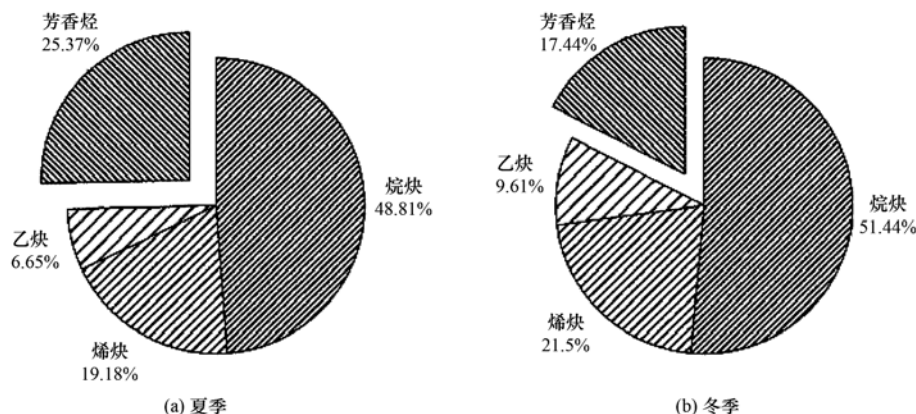


图 2 夏、冬季节各类 VOC 占比

Fig. 2 VOC percentages during summer and winter

2.2 夏、冬季节 VOCs 对 SOA 生成贡献

FAC 估算的 SOA 生成潜势虽然偏低, 但是仍能给出 SOA 生成的大致数量级, 并指明各 SOA 前体物的相对贡献^[11]. 对 SOA 生成潜势有贡献的 VOCs 主要包括 12 种非芳香烃类物质及 13 种芳香烃类物质. 通过 FAC 法计算得出表 1, 其中给出 VOCs 对 SOA 的生成贡献潜势值, 其中芳香烃类在夏、冬季分别占 TVOCs 的 25.37%、17.44%, 对 SOA 的贡献高达到 80.39%、94.63%, 非芳香烃对 SOA 的贡献率仅占 19.61%、5.37%. 说明芳香烃类物质是 SOA 的主要前体物. 吕子峰等^[11] 利用 FAC 法对北京市夏季 SOA 生成潜势进行估算, 结果芳香烃对 SOA 生成潜势为 76%; 希腊雅典环境大气中 60% ~ 90% 的 SOA 来自芳香烃^[21]; 在加拿大英属哥伦比亚地区, 这个比例约为 80%^[13]. 与本文结论基本一致, 因此认为城市中 SOA 污染的主要来源为芳香烃

物质. 通过与这些城市进行对比可以发现南京工业区芳香烃物质在 VOCs 中所占比率较其他城市高. 这是由于芳香烃物质化学活性较强且浓度高, 造成对 SOA 的生成贡献较其他城市高.

表 1 为夏、冬季节 VOCs 对 SOA 生成潜势情况, 可发现 BTEX 为夏、冬季节主要贡献物, 但也存在夏、冬贡献差异. 其中夏季 BTEX 对 SOA 生成潜势为 $1.43 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 贡献率为 65.96%, 非 BTEX 的芳香烃对 SOA 生成潜势为 $0.31 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占比 14.43%. 冬季 BTEX 对 SOA 生成潜势为 $0.82 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 贡献率高达 81.97%, 非 BTEX 对 SOA 生成潜势为 $0.12 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 贡献率 12.66%. 说明南京工业区 SOA 污染的主要物质为 BTEX, BTEX 是与石油化工产品、产业相关的常见单环芳烃类物质^[21]. 其中夏季正十一烷对 SOA 的贡献率达至 15.04%, 但在冬季贡献率仅为 1.71%. 正十一烷用

表 1 夏、冬季 VOCs 对 SOA 的生成潜势
Table 1 Potential formation of VOCs to SOA during summer and winter

类别	物种名称	FAC/%	Fvoc _r /%	夏季浓度 平均值 × 10 ⁻⁹	夏季 SOA × 10 ⁻² /μg·m ⁻³	夏季 SOA 贡献率 /%	冬季浓度 平均值 × 10 ⁻⁹	冬季 SOA × 10 ⁻² /μg·m ⁻³	冬季 SOA 贡献率 /%
非芳香烃类	甲基环戊烷	0.17	10	0.13	0.10	0.04	0.15	0.10	0.06
	环己烷	0.17	14	0.47	0.41	0.16	0.20	0.15	0.09
	正庚烷	0.06	14	0.14	0.05	0.02	0.17	0.05	0.03
	甲基环己烷	2.70	20	0.09	1.41	0.60	0.10	1.50	0.90
	2-甲基庚烷	0.50	10	0.30	0.72	0.39	0.09	0.25	0.15
	3-甲基庚烷	0.50	10	0.04	0.08	0.05	0.03	0.08	0.05
	正辛烷	0.06	17	0.09	0.04	0.02	0.11	0.04	0.02
	正壬烷	1.50	20	0.03	0.22	0.16	0.01	0.11	0.06
	正癸烷	2.00	22	0.06	0.90	0.45	0.12	1.91	1.15
	正十一烷	2.50	25	1.41	32.93	15.04	0.12	2.85	1.71
	正十二烷	3.00	26	0.13	4.04	1.87	0.05	1.69	1.01
	异戊二烯	2.00		0.89	1.78	0.82	0.11	0.22	0.13
总计				3.78	42.58	19.61	1.26	8.96	5.37
芳香烃类	苯	2.00	10	2.49	19.28	8.88	2.18	16.85	10.09
	甲苯	5.40	12	2.39	60.27	27.75	2.88	72.61	43.48
	乙苯	5.40	15	1.28	38.54	17.75	1.25	37.66	22.55
	间/对-二甲苯	4.70	34	0.44	14.96	6.89	0.27	9.09	5.45
	邻二甲苯	5.00	26	0.32	10.18	4.69	0.06	1.98	1.18
	异丙苯	4.00	13	0.06	1.49	0.69	0.04	1.02	0.61
	正丙苯	1.60	12	0.04	0.42	0.19	0.16	1.54	0.92
	对-乙基甲苯	2.50	21	0.22	3.67	1.69	0.11	1.88	1.13
	间-乙基甲苯	6.30	31	0.06	2.88	1.33	0.04	2.18	1.30
	1,3,5-三甲基苯	2.90	74	0.05	2.88	1.33	0.03	1.68	1.01
	邻-乙基甲苯	5.60	23	0.11	4.47	2.06	0.12	4.79	2.87
	1,2,4-三甲基苯	2.00	58	0.54	13.85	6.38	0.18	4.56	2.73
	1,2,3-三甲基苯	3.60	51	0.04	1.69	0.77	0.06	2.18	1.30
总计				8.06	174.59	80.39	7.38	158.01	94.63

于制造制冷剂、杀虫剂、润滑剂、油漆等^[22],这与夏、冬季节使用的溶剂种类不同有关.

2.3 气象要素变化对 SOA 浓度的影响

利用 EC 示踪法对南京工业区 SOA 浓度进行估算,分析风速与降水量与 SOA 浓度的关系(如图 3),研究发现夏季 SOA 浓度为 5.84 ~ 20.88 μg·m⁻³,平均浓度为 12.15 μg·m⁻³;冬季 SOA 浓度为 2.17 ~ 17.73 μg·m⁻³,平均浓度为 6.91 μg·m⁻³.

气象条件是影响 SOA 浓度值大小的重要因素. 静稳条件下往往造成气态污染物的累积从而导致二次颗粒物的生成. 夏季中 SOA 浓度最小值出现在 6 月 27 日,当日平均风速达 2.33 m·s⁻¹,降水量达 5.88 mm,而 7 月 2 日 SOA 浓度高达 20.88 μg·m⁻³,平均风速为 0.98 m·s⁻¹,无降水. 发现 SOA 浓度值随降雨量和风速的增大而减小. 此现象在冬季中也有良好体现,其中 SOA 浓度最小值出现在 1 月 5 日,其中 1 月 4 日 20:00 至 1 月 5 日 07:00 有强降水过程,累计雨量达 2.52mm,当日平均风速

为 2.61 m·s⁻¹.

Xu 等^[23]利用 EC 示踪法对北京市 2009 年 8 月至 2011 年 8 月的数据进行分析,对 SOC 估算得到夏季 SOC 浓度值为 1 ~ 3 μg·m⁻³,冬季 SOC 浓度值为 2 ~ 6 μg·m⁻³. 由于北京冬季供暖需求大,污染物排放增多,造成冬季 SOC 污染较夏季严重. Khan 等^[24]估算出意大利东北部地区 Veneto 的 SOC 浓度平均值为 3.8 μg·m⁻³. Lonati 等^[25]对 Milan 的 SOC 进行估算,估算结果为 4.36 μg·m⁻³,Harrison 等^[26]对 Birmingham 的 SOC 进行估算,估算出夏季 SOC 浓度值为 0.6 μg·m⁻³,冬季为 1.2 μg·m⁻³,由 SOC 向 SOA 转化过程中的转化系数一般为 1.2 ~ 1.6,在城市中一般为 1.6^[27],将各地区 SOC 与转化系数相乘,得出各地区 SOA 浓度值. 与南京工业区 SOA 浓度值进行对比发现,南京冬季 SOA 浓度明显低于夏季,这是由于冬季光照强度较夏季弱、光化学反应时间较夏季短^[28,29]及风速大等一系列原因综合导致的. 对比分析其他城市冬季 SOA 浓度值明显高

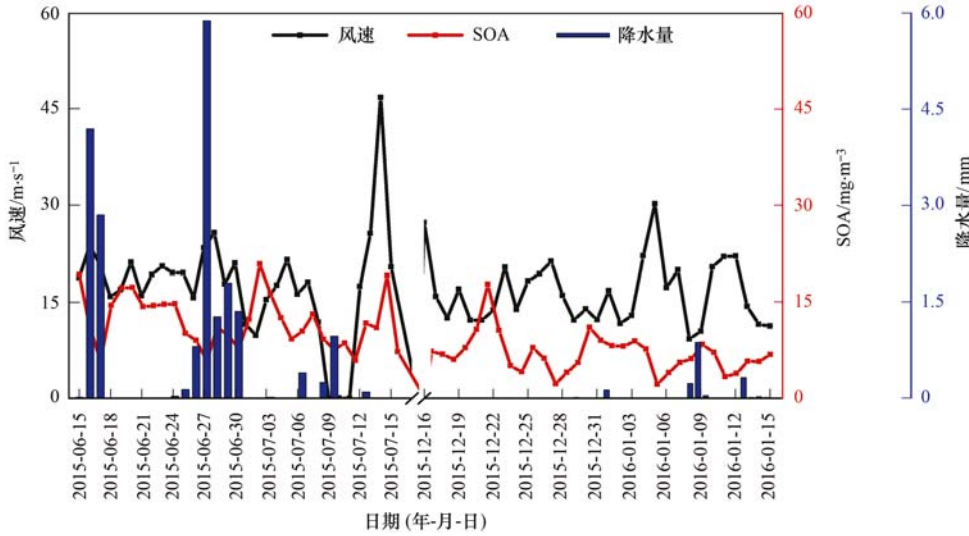


图3 风速与降水量对 SOA 浓度的影响

Fig. 3 Effect of wind speed and precipitation on SOA concentration

于夏季,这与冬季供暖,污染源排放的 VOCs 浓度增大有关.

2.4 PMF 受体模型源解析

本文最终对夏季中 42 种 VOCs,冬季 32 种 VOCs 进行源解析. 解析结果的残数值大部分在 $-3.0 \sim 3.0$ 之间,随着因子数的调整,计算结果趋于稳定. 本文的选取原则详见文献[30].

2.4.1 夏季 PMF 源解析结果分析

PMF 经过多次运行,最终确定为 7 个因子,其中 6 个为人为源,1 个为生物源. 从图 4 各排放源对 VOCs 的贡献可以看出,因子(a)中乙苯、二甲苯、苯乙烯等苯系物贡献值较大,这些物质为涂料使用的主要成分^[31]. 异戊二烯是生物排放的主要示踪物,由于观测点紧邻龙王山,且夏季树木茂盛造成异

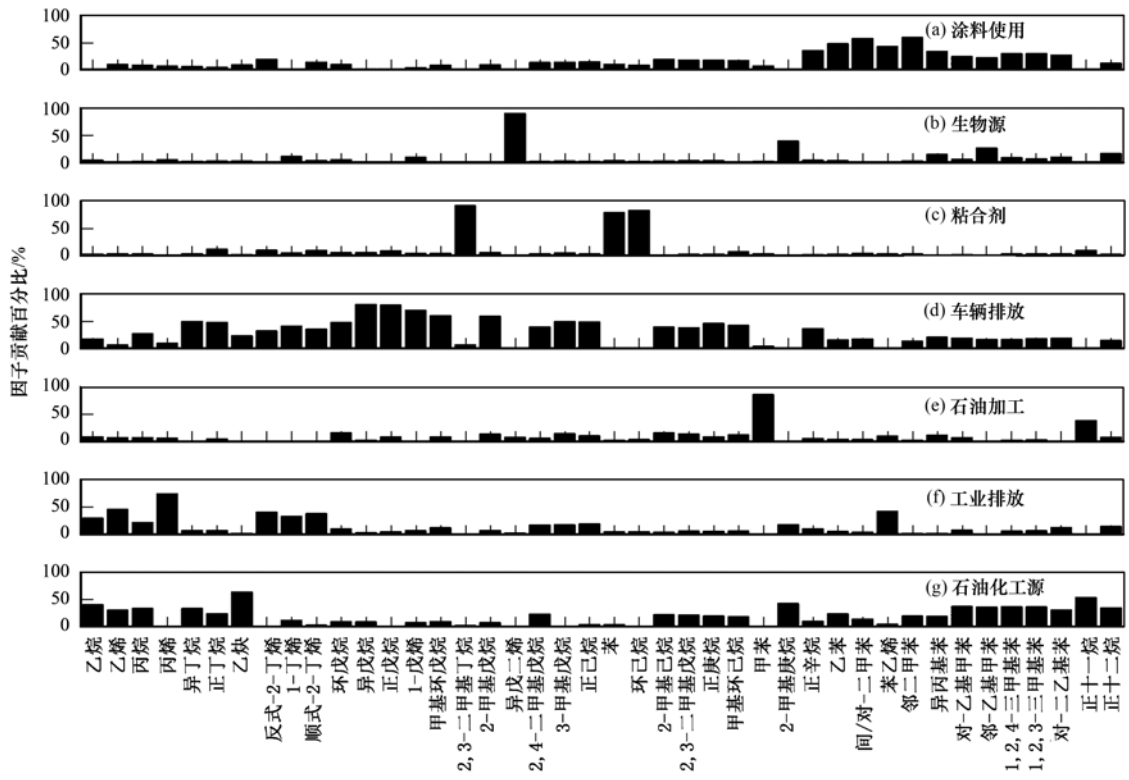


图4 夏季源解析结果

Fig. 4 Result of source apportionment in summer

戊二烯排放量较大,因此将因子(b)定为生物源^[32]. 苯、正己烷对因子(c)贡献较大,这两种物质主要来源于粘合剂的使用^[33],2,3-二甲基丁烷主要来源于有机合成过程^[34]. 异戊烷、正戊烷主要来源于因子(d)的贡献,这两种物质为汽油未完全燃烧的产物,正丁烷及异丁烷为汽油挥发产物^[35,36],因此将其归纳为车辆排放源. 因子(e)中主要贡献物为甲苯,甲苯可从石油加工中的芳构化过程制得,由粗苯精制可以得到甲苯^[37];正十一烷主要用于石油研究和有机合成,因此将其定义为石油加工. 丙烯、反式-2-丁烯、1-丁烯及顺式-2-丁烯在因子(f)中占比较大,为工业源的排放的典型 VOCs^[31]. 因子(g)中乙烯、乙炔、丙烯及苯系物含量较高,这些物种均为石油工业源排放的 VOCs 特征组分,常来源于制鞋、家具、羽毛类产品、印刷、家居和其他一些工业生产过程^[38],将其定义为石油化工源.

2.4.2 冬季 PMF 源解析结果分析

图 5 为对冬季 PMF 源解析的结果,共解析出 6 种人为源. 其中将因子(a)定义为涂料使用,是因为苯系物及正辛烷对其贡献较大,这些物质均为涂料使用的主要来源^[39]. 因子(b)中,主要贡献物为环己烷及间/对-二甲苯. 环己烷主要用于制备尼龙 6 及尼龙 66,主要用作纤维素醚、树脂、蜡、油脂、沥

青、橡胶等物质的优良溶剂^[40],间/对-二甲苯为进一步生产不饱和聚酯、塑料、树脂固化剂、纤维、树脂的原料^[41],因此将其定义为溶剂使用. 苯来源于石油加工的芳构化过程或通过焦化工业中的粗苯精制得到^[42],因此将因子(c)定义为石油加工,苯为其产物. 其余 3 种人为源与夏季工业排放、车辆排放及石油化工源吻合性强,因此认为是相同排放源.

2.4.3 夏、冬季源解析结果对比分析

在 PMF 源解析过程中,可以发现,夏季与冬季的排放源情况基本稳定,但在 SOA 贡献比率上存在差异.

在涂料使用一项中,冬季与夏季的涂料使用组成成分及对 SOA 生成潜势的贡献存在差异. 甲苯的化学活性较强、对 SOA 生成潜势贡献大,而冬季涂料使用源中排放的甲苯含量较高,造成其对 SOA 生成潜势贡献明显增大. 冬季并未解析出生物源,这是由于冬季龙王山植被减少. 冬季并未解析出生物源及粘合剂源,前者是由于冬季龙王山植被减少,后者是因为其在冬季排放出的 VOCs 类物质浓度较低及冬季风速较大等综合原因. 冬季解析出的溶剂使用源主要来源于轮胎加工厂、皮革制造厂等. 其他源并未存在明显的冬夏差异.

利用 FAC 法估算的冬季排放的 SOA 生成潜势

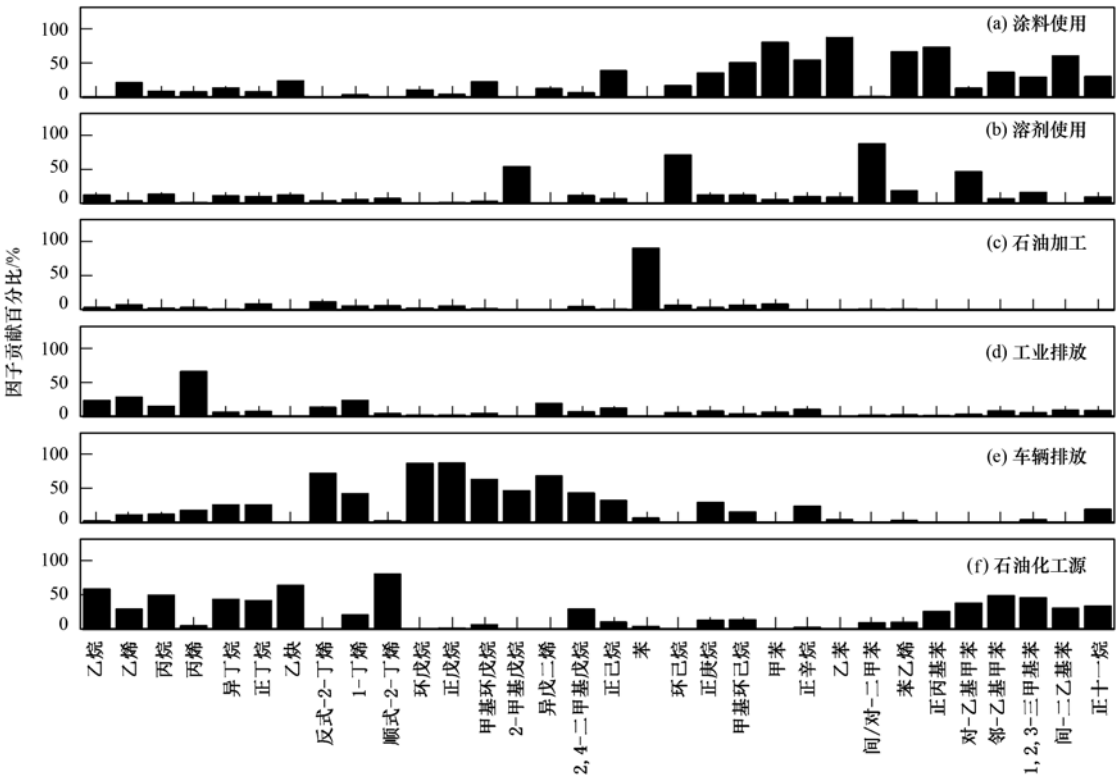


图 5 冬季源解析结果

Fig. 5 Result of source apportionment in winter

远小于夏季,这与 EC 示踪法估算结果趋势相一致.

2.5 夏、冬季节各源对 SOA 生成潜势结果估算

综合 FAC 法结合 PMF 源解析方法,得到各因子中 VOCs 对 SOA 的生成潜势及各因子对 SOA 的贡献值,如图 6. 从中可以得到,夏季 SOA 生成潜势值为 $2.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中 BTEX 及 1,2,4-三甲基苯为南京工业区夏季 SOA 污染的主要贡献者,其中石油加工、涂料使用及石油化工源为三大污染源,造成这种现象的原因,是因为这 3 种源主要排放的为

VOCs 活性较强的芳香烃类物质. 三者对 SOA 生成潜势分别为 0.65 、 0.50 及 $0.30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,分别占总 SOA 浓度的 32.46% 、 25.24% 及 15.09% . 冬季 SOA 生成潜势值为 $1.48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,冬季 SOA 生成潜势影响最大的物质仍主要为 BTEX,主要贡献源为涂料使用、石油加工及溶剂使用,生成潜势分别为 0.94 、 0.21 和 $0.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,分别占总 SOA 浓度的 63.57% 、 14.45% 及 12.16% . 其中涂料使用中仅甲苯的 SOA 生成潜势就达 $0.56 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

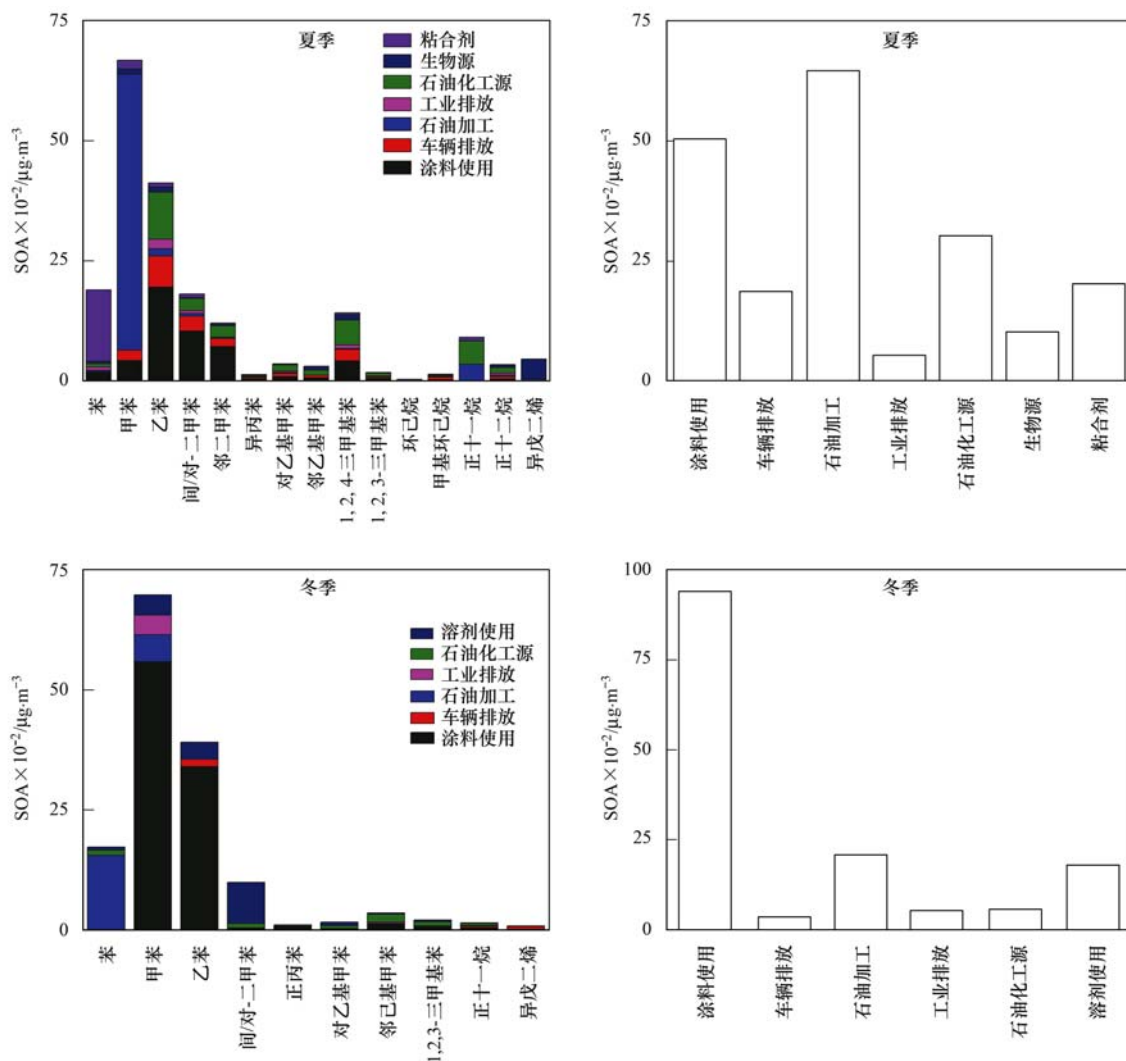


图 6 夏、冬季各因子对主要 VOCs 及 SOA 贡献率

Fig. 6 Main VOCs factors and SOA contribution percentages during summer and winter

3 结论

(1)南京工业区夏季 VOCs 的体积分数明显小于冬季,但夏季芳香烃体积分数为冬季的 1.14 倍. SOA 污染主要来源于芳香烃类物质,造成南京工业区夏季 SOA 浓度值高于冬季. 芳香烃物质对夏、冬季节 SOA 的贡献率分别为 80.39% 、 94.63% ,主要

贡献者为 BTEX.

(2)对南京工业区进行 SOA 估算,发现夏季 SOA 浓度值为 $5.84 \sim 20.88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均浓度为 $12.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;冬季为 $2.17 \sim 17.73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均浓度为 $6.91 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 冬季 SOA 浓度平均水平明显低于夏季. SOA 浓度值随风速及降水量的增加而减小.

(3)使用 PMF 受体模型对 VOCs 进行源解析分析得到夏季共有 7 个 SOA 污染源,其中主要污染源为涂料使用、石油加工及石油化工源,SOA 浓度值分别为 0.94 、 0.21 、 $0.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。冬季共有 6 个污染源,主要污染源为涂料使用,SOA 贡献值为 $0.94 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。冬季与夏季的源解析结果存在差异,但主要贡献源排放情况稳定。

参考文献:

- [1] Donaldson K, Li X Y, MacNee W. Ultrafine (nanometre) particle mediated lung injury [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998, **29**(5-6): 553-560.
- [2] Kleeman M J, Eldering A, Hall J R *et al.* Effect of emissions control programs on visibility in southern California [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(23): 4668-4674.
- [3] Maria S F, Russell L M, Gilles M K, *et al.* Organic aerosol growth mechanisms and their climate-forcing implications [J]. *Science*, 2004, **306**(5703): 1921-1924.
- [4] Pandis S N, Harley R A, Cass G R, *et al.* Secondary organic aerosol formation and transport [J]. *Atmospheric Environment*. Part A. General Topics, 1992, **26**(13): 2269-2282.
- [5] Dan M, Zhuang G S, Li X X, *et al.* The characteristics of carbonaceous species and their sources in $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(21): 3443-3452.
- [6] Ding X, Wang X M, Gao B, *et al.* Tracer-based estimation of secondary organic carbon in the Pearl River Delta, south China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(D5): D05313.
- [7] Guo S, Hu M, Guo Q F, *et al.* Primary sources and secondary formation of organic aerosols in Beijing, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(18): 9846-9853.
- [8] Castro L M, Pio C A, Harrison R M, *et al.* Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres; estimation of secondary organic carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(17): 2771-2781.
- [9] 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.
- [10] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. *Atmospheric Environment*, 1989, **23**(8): 1733-1747.
- [11] 吕子峰, 郝吉明, 段青春, 等. 北京市夏季二次有机气溶胶生成潜势的估算 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(4): 969-975.
- Lv Z F, Hao J M, Duan J C, *et al.* Estimate of the formation potential of secondary organic aerosol in Beijing summertime [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(4): 969-975.
- [12] Morris R E, Koo B, Guenther A, *et al.* Model sensitivity evaluation for organic carbon using two multi-pollutant air quality models that simulate regional haze in the southeastern United States [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(26): 4960-4972.
- [13] Barthelmie R J, Pryor S C. Secondary organic aerosols: formation potential and ambient data [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **205**(2-3): 167-178.
- [14] Saylor R D, Edgerton E S, Hartsell B E. Linear regression techniques for use in the EC tracer method of secondary organic aerosol estimation [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(39): 7546-7556.
- [15] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values [J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [16] Sun J, Wu F K, Hu B, *et al.* VOC characteristics, emissions and contributions to SOA formation during hazy episodes [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **141**: 560-570.
- [17] 林旭, 朱彬, 安俊琳, 等. 南京北郊 VOCs 对臭氧和二次有机气溶胶潜在贡献的研究 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 976-986.
- Lin X, Zhu B, An J L, *et al.* Potential contribution of secondary organic aerosols and ozone of VOCs in the northern suburb of Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 976-986.
- [18] QX/T 174-2012, 大气成分站选址要求 [S].
- [19] 安俊琳, 朱彬, 王红磊, 等. 南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4454-4464.
- An J L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the northern suburb of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4454-4464.
- [20] Shao P, An J L, Xin J Y, *et al.* Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **176-177**: 64-74.
- [21] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学 [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [22] 周公度. 化学辞典 [M]. (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [23] Xu Z J, Wen T X, Li X R, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosols in Beijing based on two-year observation [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2015, **6**(2): 202-208.
- [24] Khan M B, Masiol M, Formenton G, *et al.* Carbonaceous $\text{PM}_{2.5}$ and secondary organic aerosol across the Veneto region (NE Italy) [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 172-181.
- [25] Lonati G, Ozgen S, Giugliano M. Primary and secondary carbonaceous species in $\text{PM}_{2.5}$ samples in Milan (Italy) [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(22): 4599-4610.
- [26] Harrison R M, Yin J X. Sources and processes affecting carbonaceous aerosol in central England [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(7): 1413-1423.
- [27] Turpin B J, Lim H J. Species contributions to $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations; revisiting common assumptions for estimating organic mass [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **35**(1): 602-610.
- [28] Kroll J H, Ng N L, Murphy S M, *et al.* Secondary organic aerosol formation from isoprene photooxidation under high- NO_x conditions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(18): L18808.
- [29] Kroll J H, Ng N L, Murphy S M, *et al.* Secondary organic aerosol formation from isoprene photooxidation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(6): 1869-

- 1877.
- [30] Yakovleva E, Hopke P K, Wallace L. Receptor modeling assessment of particle total exposure assessment methodology data [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33** (20): 3645-3652.
- [31] Guo H, Wang T, Louie P K K. Source apportionment of ambient non-methane hydrocarbons in Hong Kong: application of a principal component analysis/absolute principal component scores (PCA/APCS) receptor model [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **129** (3): 489-498.
- [32] 高蒙, 安俊琳, 杭一纤, 等. PMF 和 PCA/APCS 模型对南京北郊大气 VOCs 源解析对比研究 [J]. *气象与环境学报*, 2014, **30** (1): 43-50.
- Gao M, An J L, Hang Y Q, *et al.* Comparison of PMF and PCA/APCS for VOCs source apportionment in north suburb of Nanjing [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2014, **30** (1): 43-50.
- [33] 《环境科学大辞典》编辑委员会. 环境科学大辞典 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991.
- [34] 马世昌. 化学物质辞典 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999.
- [35] Harrison R M, Smith D J T, Luhana L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U. K. [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30** (3): 825-832.
- [36] Song Y, Dai W, Shao M, *et al.* Comparison of receptor models for source apportionment of volatile organic compounds in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156** (1): 174-183.
- [37] Greenberg R A, Griswold R M, Lin S B, *et al.* Dual cure, low-solvent silicone pressure sensitive adhesives [P]. US: US 6387487, 2002-05-14.
- [38] Chan L Y, Chu K W, Zou S C, *et al.* Characteristics of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in industrial, industrial-urban, and industrial-suburban atmospheres of the Pearl River Delta (PRD) region of south China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111** (D11), doi: 10.1029/2005JD006481.
- [39] 申泮文, 王积涛. 化合物词典 [M]. 上海: 上海辞书出版社, 2002.
- [40] 安家驹. 实用精细化工辞典 [M]. (第二版). 北京: 中国轻工业出版社, 2000.
- [41] 顾翼东. 化学词典 [M]. 上海: 上海辞书出版社, 2003.
- [42] 中国冶金百科全书总委员会. 中国冶金百科全书: 炼焦化工 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)