

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

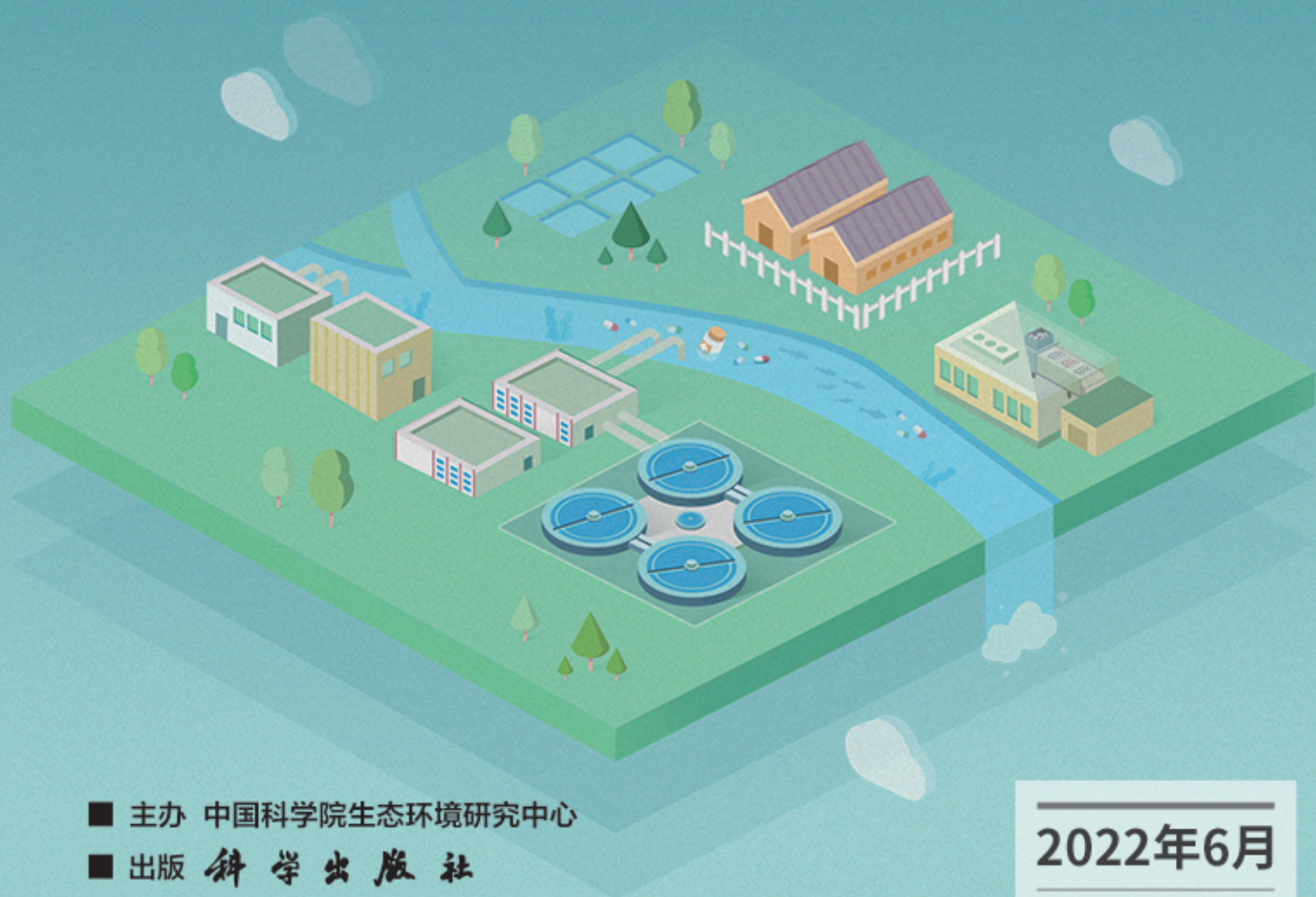
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁敏, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐露, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中铜的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学计量特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

广西十万大山背景点 $\text{PM}_{2.5}$ 中非极性有机气溶胶组成及来源解析

邢佳莉^{1,2,3}, 曹芳^{1,2,3*}, 王谦^{1,2,3}, 张煜娴^{1,2,3}, 章炎麟^{1,2,3}

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044; 3. 江苏省农业气象重点实验室, 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 大气细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)中的非极性化合物包括多环芳烃(PAHs)和正构烷烃(*n*-alkanes)等,通常用于识别污染来源,且对人体健康和环境有很重要的影响. 为探究广西背景点 $\text{PM}_{2.5}$ 中非极性有机气溶胶的污染特征及来源,于2017年11月至2018年10月,对野外采集的 $\text{PM}_{2.5}$ 样品分析了其中17种多环芳烃和20种正构烷烃. 结果表明,多环芳烃和正构烷烃全年的平均值分别为 $(4.28 \pm 4.25) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(13.7 \pm 14.72) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$; 季节变化规律均是:冬季 $[(7.86 \pm 5.19) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和 $(27.51 \pm 16.9) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ > 春季 $[(2.73 \pm 1.76) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和 $(7.64 \pm 4.71) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ > 秋季 $[(2.34 \pm 1.45) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和 $(7.01 \pm 4.55) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ > 夏季 $[(1.91 \pm 1.67) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和 $(3.98 \pm 3.12) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$. PAHs 中5环和6环的分子占比较大,超过60%,其次是中低环分子(4环和3环); *n*-alkanes 中高分子量占比较高($\text{C}_{29} > \text{C}_{31} > \text{C}_{27}$),且奇偶碳数有明显差异. 另外结合特征比值法、主成分分析法和后向轨迹相互验证发现:冬季非极性有机气溶胶中41.5%受港口船舶交通排放、海洋源输送影响,36.7%的污染贡献来自燃煤和局地生物质燃烧;春季污染气团中有25.2%来自生物质燃烧传输影响,45.0%来自研究区域南部的海洋输送,高等植物蜡排放污染较高;夏季53.4%气团污染来自船舶交通源传输,10.6%的污染来自西南泰国的跨境输送. 广西背景点有机气溶胶受到局地排放和传输源的共同影响.

关键词: 非极性化合物; 多环芳烃(PAHs); 正构烷烃(*n*-alkanes); 后向轨迹分析; 主成分分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-2895-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110031

Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi

XING Jia-li^{1,2,3}, CAO Fang^{1,2,3*}, WANG Qian^{1,2,3}, ZHANG Yu-xian^{1,2,3}, ZHANG Yan-lin^{1,2,3}

(1. International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEG), Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The non-polar compounds in atmospheric fine particles ($\text{PM}_{2.5}$) mainly include polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and normal alkanes (*n*-alkanes), etc., which are usually used to identify the source of the air pollution and have a great important impact on human health and the environment. To study the pollution characteristics and sources of non-polar organic aerosols in the background point $\text{PM}_{2.5}$ in Guangxi, from November 2017 to October 2018, 17 types of PAHs and 20 types of *n*-alkanes were analyzed on $\text{PM}_{2.5}$ samples collected in the field. It was found that the annual average concentrations of PAHs and *n*-alkanes were $4.28 \pm 4.25 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ and $13.7 \pm 14.72 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The seasonal change was as follows: winter $[(7.86 \pm 5.19) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ and $(27.51 \pm 16.90) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ > spring $[(2.73 \pm 1.76) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ and $(7.64 \pm 4.71) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ > autumn $[(2.34 \pm 1.45) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ and $(7.01 \pm 4.55) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ > summer $[(1.91 \pm 1.67) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ and $(3.98 \pm 3.12) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$. In PAHs, 5-ring and 6-ring molecules accounted for more than 60%, followed by low- and medium-ring molecules (4-ring and 3-ring). The high molecular weight of *n*-alkanes was relatively high ($\text{C}_{29} > \text{C}_{31} > \text{C}_{27}$), and the odd and even carbon numbers were significantly different. In addition, combined with the feature ratio method, principal component analysis method, and backward trajectory joint verification, it was found that 41.5% of non-organic aerosols in winter were affected by maritime traffic emissions and ocean source transportation, and 36.7% of the pollution was explained by the coal burning and local biomass burning; 25.2% of the pollution in spring came from biomass combustion and transportation, and 45.0% was attributed to marine transportation in the southern part of the study area and higher plant wax emissions pollution; 53.4% of pollution in summer came from polluted ship emissions, and 10.6% of pollution came from transportation in Southwest Thailand Source transportation. The organic aerosols at the background sites in Guangxi were affected by the combined effects of local emissions and transmission sources.

Key words: non-polar compound; polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs); normal alkanes(*n*-alkanes); backward trajectory analysis; principal component analysis

$\text{PM}_{2.5}$ 是指大气颗粒物中动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的粒子,其来源和组成复杂,对人体健康和环境质量有很大的影响. 面对我国日趋严重的大气污染,近年来针对 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究已成为各部门关注的焦点. 其中,有机气溶胶(organic aerosols, OAs)是大气颗粒

收稿日期: 2021-10-08; 修订日期: 2021-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977185, 41977305, 41761144056); 江苏省双创团队; 江苏省杰出青年基金项目(BK20180040)

作者简介: 邢佳莉(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为非极性有机气溶胶, E-mail: 1430219647@qq.com

* 通信作者, E-mail: caofangle@163.com

物的重要组成部分,占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量的 20%~60%^[1,2],由来自不同源的化合物组成,有着不同的物理、化学特性^[3,4],在不同程度上影响着气候效应和人体健康^[5].

有机气溶胶组成复杂,多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 和正构烷烃 (normal alkanes, *n*-alkanes) 是其中重要的非极性化合物部分. 正构烷烃的主要来源是生物体的脂肪酸、蜡质和烃类物质^[6],水生藻类和微生物是碳数低于 20 的短链正构烷烃的主要贡献者^[7],而 C26~C36 这类高分子量正构烷烃来源于陆生高等植物蜡^[8]. 其中高分子量的正构烷烃危害性相对低分子量更高,更易吸附在细颗粒物表面,对人体呼吸系统有重要的影响^[9,10]. 多环芳烃占比虽然较低,却不容忽视,主要来源于生物质的不完全燃烧和化石燃料燃烧等人为过程^[9~11],另外也有自然排放,包括火山喷发等^[12,13],具有致癌、致毒和致畸性^[14,15]等特点,美国环保署 (U. S. Environmental Protection Agency, EPA) 将其列为优先控制的环境污染物,共 16 种^[16~18].

目前国内外对长三角、北京和东北等地区有机气溶胶的组成以及来源已有较多研究,采用多种分析方法,包括特征比值法^[19~22]、主成分分析法 (principal component analysis, PCA)^[23~25]、有机分子标志物法^[26,27]和同位素分析法等^[28]. Liu 等^[29]的研究利用生物质燃烧示踪剂与卫星数据结合以及模式运算的方式,发现长三角的生物质燃烧信号来自东南地区短时大面积的秸秆燃烧活动. Chen 等^[30]的研究综合运用特征比值法和正定矩阵因子分解 (positive matrix factorization, PMF),发现在观测期间青藏高原东南部受人为污染和自然排放的共同影响,冬季家庭采暖会排放大量正构烷烃. 本地多环芳烃来源依次为生物质燃烧、汽油燃烧、住宅燃烧和煤燃烧,另外,还受印度生物质燃烧传输的影响. Zheng 等^[31]研究了东南亚春季生物质燃烧对东京湾附近海洋有机气溶胶的影响,结合稳定碳同位素方法,分析了 5 类化合物发现:生物质燃烧是东京湾上空有机气溶胶的重要来源. 此外,左旋葡聚糖常与其他化合物进行相关性分析,是植物纤维素热解产生的一种脱水糖,作为生物质燃烧最常用的指示剂^[32].

大多有机气溶胶的研究集中在长三角、珠三角和京津冀等发达地区^[20,33,34],对于我国西南地区有机气溶胶的分析较少. 另外东南亚作为生物质燃烧旺盛区域,燃烧集中期在干燥的 3 月和 4 月,此时盛行偏西风^[31,35],广西不仅毗邻东南亚生物质燃烧旺

盛的地区,可能受到传输影响,还靠近珠三角经济发达的贸易区,可能受到船舶排放影响,选取广西作为采样点有十分重要的意义. 另外采样站点位于十万大山腹地,人烟稀少,受到本地人为排放污染小,可作为背景点参考. 因此,本研究在广西十万大山腹地布设站点,通过采集 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物,分析多环芳烃和正构烷烃的浓度变化特征及来源,结合后向轨迹和主成分分析法探讨污染物的潜在来源,对华南地区污染防控有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

采样点位于广西防城港市郊区南屏乡常隆村 (20°48'35"N, 107°38'02"E),海拔高度为 759 m,处在十万大山腹地,靠近东南亚生物质燃烧旺盛区域,并且临近珠三角经济发达的贸易区. 采样时间为 2017 年 11 月至 2018 年 10 月,一周采一次,流量为 $1.05 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,每次采样时长为 48 h (崂应 2031, 青岛崂山应用技术研究所). 共采集 45 个 $\text{PM}_{2.5}$ 样品,冬季 16 个,春季 10 个,夏季 11 个,秋季 8 个,采集完成后放入 -26°C 的环境中冷藏待测.

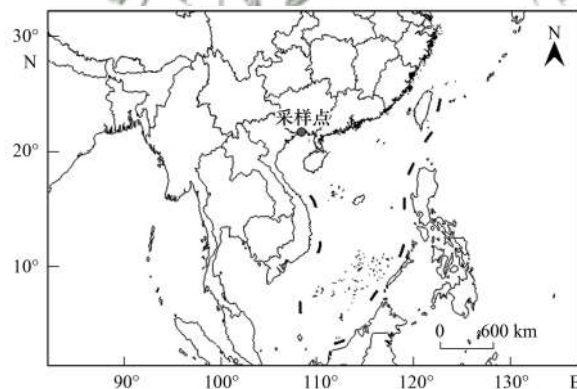


图 1 采样地点示意

Fig. 1 Sampling location indication

1.2 实验方法

1.2.1 OC/EC 测定

碳质组分的测定使用全自动半连续式 OC/EC 分析仪 (Sunset Laboratory, 美国),切取 1.5 cm^2 样品膜在石英炉纯氦气环境下经不同加热程序挥发有机碳 (OC),随后升温在氦氧混合气 (10% 氧气) 中氧化元素碳 (EC) 生成气态氧化物,两种气体经催化转化为 CO_2 ,后用非散射红外法定量. 每个样品测定后使用 CH_4/CO_2 标准气校正仪器,每日进样前使用蔗糖标准溶液定标.

1.2.2 左旋葡聚糖测定

左旋葡聚糖 (levoglucosan, Lev) 利用离子色谱 (ICS 5000+, Thermo Scientific) 进行测定,样品预处

理方法为:用打孔器(punch)切 1~2 片 20 mm 直径的样品膜,并加入 8 mL 超纯水(Milli-Q Reference, 美国),经过 30 min 的超声萃取,再用 0.22 μm 的过滤器(水相针式,聚四氟乙烯滤膜)过滤,最后进行仪器测定。

1.2.3 非极性化合物测定

采用安捷伦气相色谱质谱仪(Agilent GC7890B/MS 5977A)的热脱附(TD)方法测定 PAHs 和 *n*-alkanes 化合物浓度。使用 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm 规格的毛细管柱,用打孔器切下半径为 0.15 cm 的样品膜 2~3 片,放进 TD 内衬管,进样口初始温度为 35℃,运行 5 s,然后以 12℃·min⁻¹升温到 300℃;柱箱初始温度为 35℃,运行 3 min,然后以 10℃·min⁻¹升温到 120℃,运行 11.5 min,再以 4℃·min⁻¹升温到 146℃,运行 18 min,最后以 8℃·min⁻¹升温到 310℃,保持 16 min 并运行 54.5 min。高纯氦气作为载气的流速为 1.0 mL·min⁻¹,进样方式为分流比 5:1 的分流进样,进样体积为 1 μL,

将六甲基苯作为内标物质,采用内标法进行定量。共测定了 17 种 PAHs: 萘(Nap)、苊烯(Acy)、二氢苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Flua)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、䓛(Chry)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[e]芘(BeP)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)、茚并[1,2,3-cd]芘(IcdP)和苯并[g,h,i]芘(BghiP); 20 种 C16~C35 的 *n*-alkanes。

1.2.4 特征比值法分析

特征比值法常用于有机气溶胶的溯源研究中^[12,33,36]。*n*-alkanes 的诊断方法包括两种:最大碳数(C_{max})和碳偏好指数(carbon preference index, CPI),用来评估 *n*-alkanes 的相对贡献。CPI 为奇数碳烷烃与偶数碳烷烃浓度和的比值,常作为估量化石源和生物源排放贡献的一个定性指标:当 *n*-alkanes 以植物蜡源为主时 CPI 值通常较高(CPI > 5),而当 *n*-alkanes 以化石源排放为主时 CPI 值接近 1^[7,37]:

$$CPI = \frac{(C_{17} + C_{19} + C_{21} + C_{23} + C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35})}{(C_{16} + C_{18} + C_{20} + C_{22} + C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})} \quad (1)$$

WaxC_n 为含碳数为 *n* 的正构烷烃的植物蜡源部分的浓度贡献:

$$WaxC_n = C_n - 0.5 \times [C(n-1) + C(n+1)] \quad (2)$$

WNA 为植物蜡的贡献率(%),计算如下:

$$WNA = \frac{C_n - 0.5 \times [C(n-1) + C(n+1)]}{C(n\text{-alkanes})} \times 100\% \quad (3)$$

FFNA(fossil fuel *n*-alkanes, FFNA)为化石燃料贡献率(%):

$$FFNA = 1 - WNA \quad (4)$$

1.2.5 主成分分析

主成分分析法(PCA)是一种最广泛的数据降维计算的统计学方法。现通常用来分析研究有机气溶胶组分的来源^[19,21,36,38],本研究使用 SPSS 25 进行计算,再通过因子旋转和回归分析,最后确定不同源的贡献率。

1.2.6 后向气流轨迹分析

本研究利用拉格朗日计算模型:HYSPLIT-4 进行后向轨迹分析,选择 500 m 高度上向后 48 h 轨迹模拟,每隔 6 h 输出一条轨迹,再进行聚类分析,气象数据是美国国家海洋和大气管理局(NOAA)在全球数据管理系统(GDAS)上发布的。火点数据从 FIRMS(fire information for resource management system)网站获得。

1.3 控制变量

每次采样前需对仪器状态进行检查,包括流速、流量和时间的检查,采样期间每周需要对切割头进行清洗,每个月进行一次野外空白采样,作为平行样品。实验过程中,每天需要打入一个 2 mg·L⁻¹的标准和一个空白,以此来检验仪器状态是否正常。每切一个样品膜之前需对镊子和打孔器进行清洗,使用二氯甲烷:甲醇体积比为 2:1 的混合溶液,减少实验误差。另外参考美国环境保护署(EPA)方法^[16],进行实验室回收率实验,并对所有样品进行空白校正,空白样品低于真实样品中对应目标化合物浓度的 20%,对后续目标化合物定量无明显影响。各化合物的标准曲线相关系数达 0.99 以上,满足后续测样要求,氘代内标的回收率为 70%~120%,满足定量分析的要求,所有物质均高于检测限。

2 结果与讨论

从 2017 年 11 月至 2018 年 10 月进行野外样品采集,分析了 PM_{2.5} 中的相关化学组分:PAHs 和 *n*-alkanes,其相关浓度见图 2 和表 1。采样期间,ρ(PM_{2.5})的年平均值为(35.31 ± 21.86) μg·m⁻³,变化范围在 13.9~91.2 μg·m⁻³,其中有 21 d 低于我国大气环境质量标准 24 h 日均一级浓度限值(35 μg·m⁻³)^[39],41 d 低于二级浓度限值(75 μg·m⁻³)。

研究区域的 OC 和 EC 年平均值分别是 $(2.90 \pm 2.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(0.41 \pm 0.34) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远远低于北京夏季农村地区^[40,41], PAHs 和 *n*-alkanes 的年平均值分别是 $(4.28 \pm 4.25) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(13.70 \pm 14.72) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于其他背景站点如长三角背景点临安

$[\rho(\text{PAHs}): 25 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}, \rho(n\text{-alkanes}): 60 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}]^{[42]}$, 高于其他城市地区如拉萨西郊 $[\rho(n\text{-alkanes}): (10 \pm 6.6) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}]^{[43]}$, 与喜马拉雅相当 $[\rho(\text{PAHs}): 5.57 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}]^{[44]}$, 表明该区域适宜作为背景点进行研究.

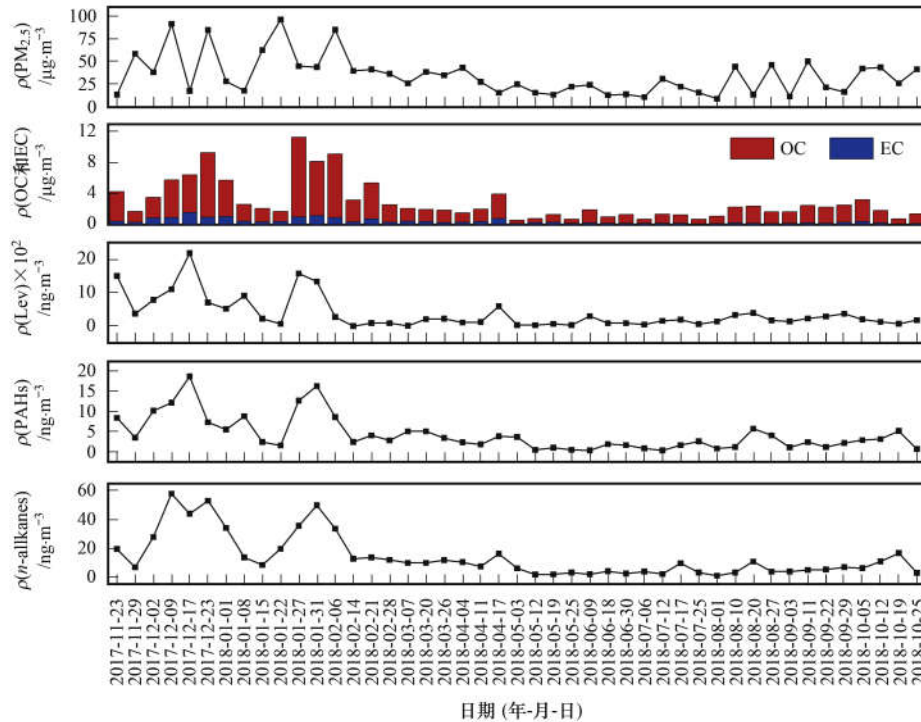


图2 采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中各组分浓度时间变化特征

Fig. 2 Temporal variation in the concentration of each component in $\text{PM}_{2.5}$ during the sampling period

OC 的主要来源是燃烧排放^[41,45], 也可以是植物孢子、花粉和藻类等微小生物直接排放形成气溶胶^[46], 在冬季明显高于其他季节, 但远低于东南亚地区^[45], 表明冬季相比其他季节受到的燃烧或者生物排放影响更大, 而整个地区受到的影响较小. 结合图2和表1可知, PAHs、*n*-alkanes、Lev、OC和EC的变化趋势一致, 其中 PAHs 和 *n*-alkanes 各季节的总浓度变化均为: 冬季 $[(7.86 \pm 5.19) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}, (27.51 \pm 16.9) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 春季 $[(2.73 \pm 1.76) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}, (7.64 \pm 4.71) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 秋季 $[(2.34 \pm 1.45) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}, (7.01 \pm 4.55) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 夏季 $[(1.91 \pm 1.67) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}, (3.98 \pm 3.12) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}]$. 具体来说, 中高环 PAHs (4~6 环) 的浓度高于低环 (2 环和 3 环) 浓度. 高分子量 (含碳数 > 25) 的 *n*-alkanes 浓度高于低分子量的浓度 (含碳数 < 20), 总体年平均值为 $(17.70 \pm 14.72) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, *n*-alkanes 整体浓度相较于 PAHs 要高出 3~4 倍, 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中所占含量极低, 仅 0.39%, 却不容忽视. Lev 作为生物质燃烧的常用示踪剂^[47], 在化合物中占有较高的数量级, 是植物热解产生的一种脱水糖^[32], 与 OC 有着较好的相关性 ($r=0.69$), 对研究该区域的污染

来源有一定的指示作用. 在春季的 Lev 浓度最低, 这与临安背景地点不同^[38], 表明在春季受到的生物质燃烧影响较低.

为探究研究区域不同季节下有机污染物的传输模式, 对四季进行后向轨迹分析. 结果如图3所示, 冬季气团轨迹分成了5个聚类, 其中聚类2和聚类3分别占了20%和30%, 有50%的气团污染来自低空海洋传输, 采样点靠近广西最南部的北部湾, 临近港口, 既沿海又沿边, 与东盟各国海陆相连, 经济贸易加速发展中, 推测有交通运输的影响. 聚类1占比24%, 主要来自采样点附近, 结合图2, 12月22日 OC 浓度较高, 且该日前后在本地有极明显的火点, 属于本地源排放, 聚类4和5共占26%, 来自北方高空远距离传输. 春季有5个聚类, 有69%来自海洋传输, 有8%的气团来自泰国, 图2中显示在4月16日污染较高, 通过检查火点数据发现该日前后有密集的生物质燃烧, 且从单气流轨迹可知是来自泰国、越南和老挝等地, 还有19%来自本地源排放. 夏季, 在季风的影响下有37%气溶胶来自泰国, 此外还有19%的气溶胶来自港口地区, 18%来自东部南海, 26%来自广西中部地区. 秋季有4个聚类, 43%

表 1 采样期间不同组分不同季节的平均值¹⁾
Table 1 Average concentrations of different components in different seasons during sampling period

项目	冬季	春季	夏季	秋季	全年
OC	5.17 ± 3.01	1.66 ± 0.99	1.41 ± 0.57	1.99 ± 0.77	2.90 ± 2.53
EC	0.73 ± 0.38	0.34 ± 0.18	0.16 ± 0.04	0.20 ± 0.09	0.41 ± 0.34
PM _{2.5}	50.03 ± 26.91	26.4 ± 10.08	23.52 ± 13.17	31.75 ± 14.4	35.31 ± 21.86
Lev	7.32 ± 6.5	1.42 ± 1.75	1.79 ± 1.16	2.01 ± 0.94	3.71 ± 4.78
∑ PAHs	7.86 ± 5.19	2.73 ± 1.76	1.91 ± 1.67	2.34 ± 1.45	4.28 ± 4.25
∑ <i>n</i> -alkanes	27.51 ± 16.9	7.64 ± 4.71	3.98 ± 3.12	7.01 ± 4.55	13.7 ± 14.72
Nap(2)	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0	0.01 ± 0	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01
Ace(3)	0.01 ± 0.01	0 ± 0	0 ± 0	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01
Acy(3)	0.01 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Flu(3)	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0.01 ± 0
Phe(3)	0.18 ± 0.22	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.02	0.07 ± 0.15
Ant(3)	0.03 ± 0.03	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0	0.01 ± 0	0.02 ± 0.02
Flua(4)	0.6 ± 0.7	0.09 ± 0.06	0.04 ± 0.02	0.09 ± 0.1	0.26 ± 0.48
Pyr(4)	0.58 ± 0.68	0.1 ± 0.07	0.04 ± 0.02	0.11 ± 0.12	0.26 ± 0.47
BaA(4)	0.57 ± 0.51	0.13 ± 0.09	0.08 ± 0.09	0.14 ± 0.13	0.28 ± 0.38
Chr(4)	0.8 ± 0.67	0.2 ± 0.14	0.11 ± 0.11	0.19 ± 0.16	0.39 ± 0.51
BbF(5)	1.05 ± 0.61	0.43 ± 0.32	0.29 ± 0.3	0.35 ± 0.21	0.6 ± 0.54
BkF(5)	0.51 ± 0.3	0.21 ± 0.17	0.15 ± 0.16	0.18 ± 0.11	0.3 ± 0.27
BeP(5)	0.76 ± 0.42	0.31 ± 0.23	0.23 ± 0.24	0.26 ± 0.14	0.44 ± 0.38
BaP(5)	0.61 ± 0.43	0.21 ± 0.13	0.15 ± 0.12	0.19 ± 0.15	0.33 ± 0.34
DahA(5)	0.1 ± 0.05	0.04 ± 0.03	0.03 ± 0.03	0.03 ± 0.02	0.06 ± 0.05
IcdP(6)	0.93 ± 0.49	0.42 ± 0.31	0.34 ± 0.32	0.33 ± 0.19	0.57 ± 0.45
BghiP(6)	1.11 ± 0.43	0.54 ± 0.3	0.4 ± 0.29	0.41 ± 0.17	0.68 ± 0.46
C16	0.78 ± 1.03	0.08 ± 0.03	0.06 ± 0.03	0.08 ± 0.05	0.33 ± 0.69
C17	0.29 ± 0.21	0.12 ± 0.06	0.09 ± 0.07	0.12 ± 0.09	0.17 ± 0.16
C18	0.12 ± 0.07	0.05 ± 0.02	0.04 ± 0.03	0.15 ± 0.29	0.09 ± 0.13
C19	0.1 ± 0.05	0.11 ± 0.09	0.09 ± 0.08	0.69 ± 1.34	0.2 ± 0.58
C20	0.14 ± 0.12	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.13 ± 0.23	0.09 ± 0.13
C21	0.31 ± 0.27	0.09 ± 0.06	0.08 ± 0.08	0.23 ± 0.26	0.19 ± 0.22
C22	0.55 ± 0.57	0.07 ± 0.06	0.04 ± 0.02	0.11 ± 0.14	0.24 ± 0.41
C23	1 ± 0.89	0.26 ± 0.14	0.07 ± 0.06	0.11 ± 0.05	0.45 ± 0.67
C24	1.14 ± 0.83	0.19 ± 0.1	0.09 ± 0.05	0.13 ± 0.07	0.49 ± 0.69
C25	1.81 ± 1.1	0.47 ± 0.29	0.22 ± 0.14	0.34 ± 0.11	0.86 ± 0.98
C26	1.89 ± 1.14	0.44 ± 0.27	0.29 ± 0.25	0.41 ± 0.18	0.91 ± 1.01
C27	2.99 ± 1.84	0.87 ± 0.61	0.41 ± 0.3	0.68 ± 0.28	1.48 ± 1.61
C28	2.34 ± 1.51	0.63 ± 0.4	0.38 ± 0.33	0.71 ± 0.4	1.19 ± 1.28
C29	3.65 ± 2.39	1.4 ± 1.02	0.54 ± 0.38	0.9 ± 0.56	1.9 ± 2.02
C30	1.98 ± 1.32	0.56 ± 0.42	0.36 ± 0.34	0.56 ± 0.32	1.02 ± 1.1
C31	3.41 ± 2.25	1.16 ± 0.77	0.46 ± 0.39	0.71 ± 0.46	1.71 ± 1.9
C32	1.49 ± 1.01	0.41 ± 0.29	0.24 ± 0.26	0.32 ± 0.23	0.74 ± 0.84
C33	1.84 ± 1.2	0.44 ± 0.29	0.24 ± 0.23	0.32 ± 0.27	0.87 ± 1.03
C34	0.86 ± 0.59	0.13 ± 0.09	0.14 ± 0.16	0.15 ± 0.1	0.4 ± 0.5
C35	0.81 ± 0.67	0.13 ± 0.11	0.12 ± 0.14	0.18 ± 0.11	0.38 ± 0.52

1) OC、EC 和 PM_{2.5} 的单位为 μg·m⁻³, 其余的单位为 ng·m⁻³, 括号内的数字表示 PAHs 的环数

来自广东西部地区短距离传输, 27% 来自广西北部
的湖南, 另外还有来自海洋上污染排放的影响. 总体
来说, 采样点的污染源分为海洋源, 远距离传输和本
地源.

2.1 正构烷烃来源解析

本研究测定了 20 种 *n*-alkanes (C16 ~ C35), 表
1 给出了这些化合物不同季节以及年平均值. 从图 4
(a) 中 *n*-alkanes 的季节变化规律和图 4(b) 中不同

碳数 *n*-alkanes 的占比可知, 冬季和春季平均 *n*-
alkanes 占比较高, 别占到 59.6% 和 16.6%, 其次是
秋季和夏季, 占 15.2% 和 8.6%. 其中, 全年含量最
高的是 C29, 其次是 C31 和 C27, 各季节的 C_{max} 为
冬季 (C31)、春季 (C29)、夏季 (C29) 和秋季
(C31), 体现了植物源的排放特征^[8]. C19 在秋季有
明显较高的占比, Tian 等^[48] 的研究指出燃煤和锅炉
燃烧会在 C16 ~ C19 产生一个较高的峰值. *n*-

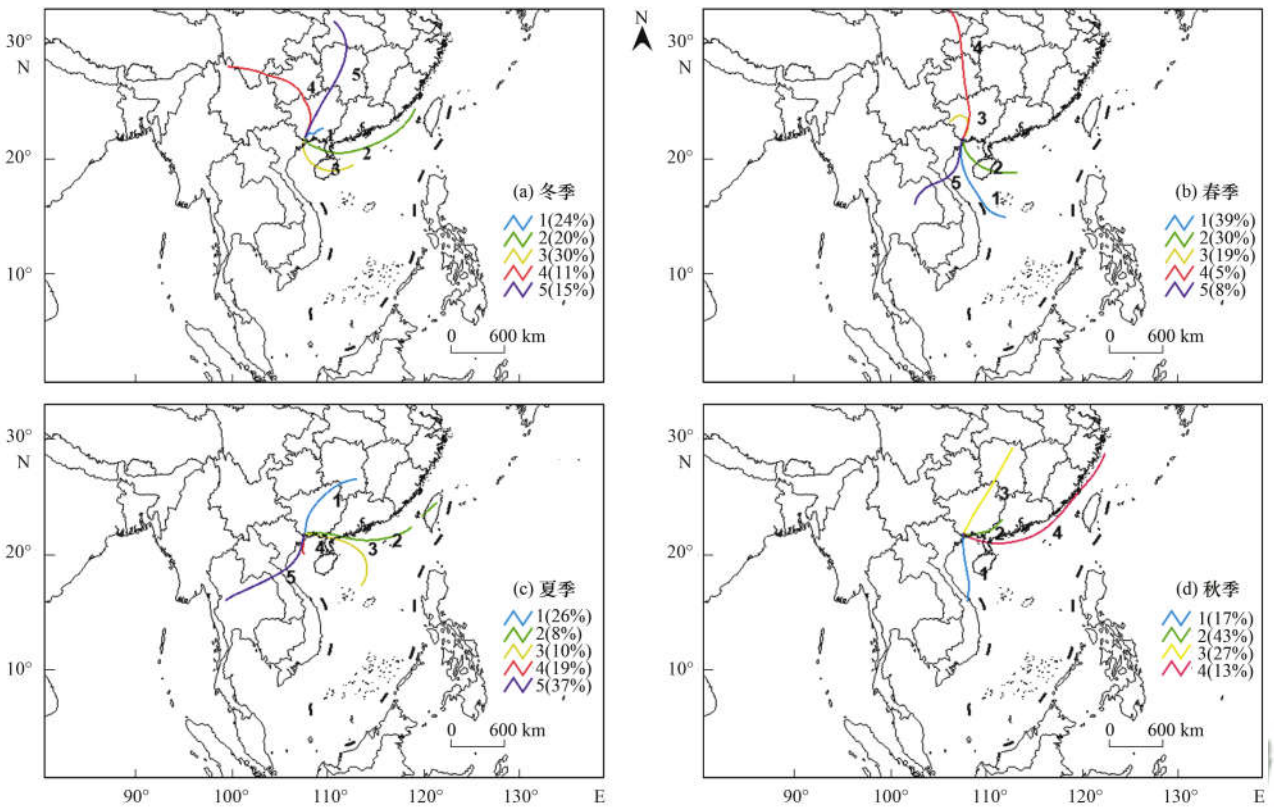


图 3 采样点 2018 年 48 h 后向轨迹
Fig. 3 Sampling point 48-hour backward trajectory in 2018

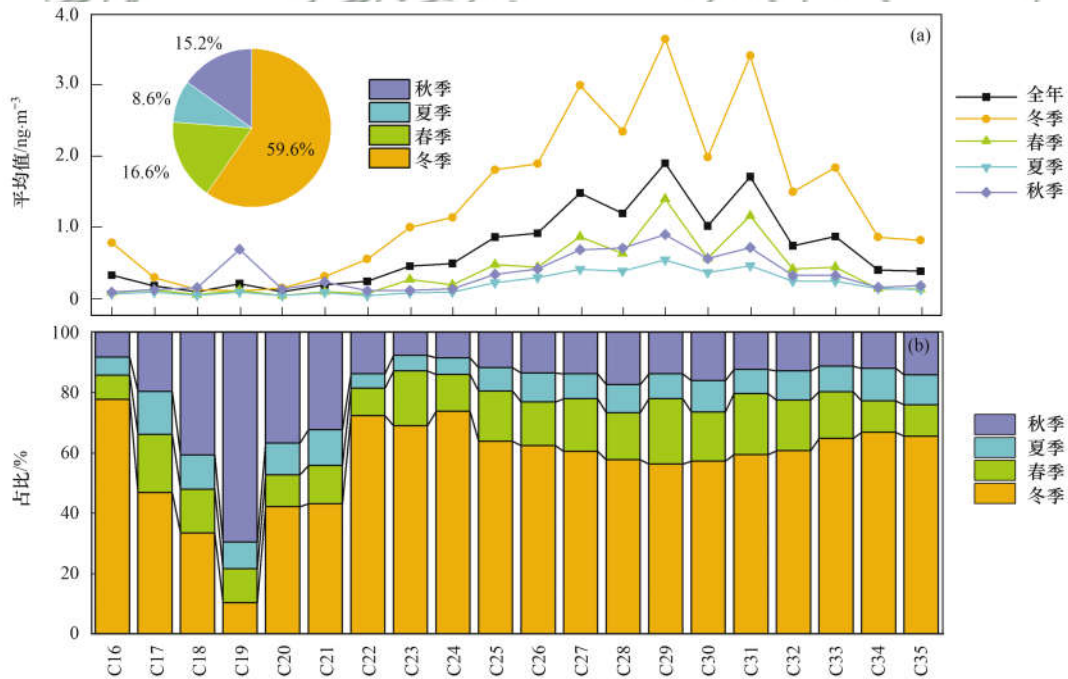


图 4 正构烷烃的平均值及各季节占比
Fig. 4 Average of *n*-alkanes and the percentage of each season

alkanes 随碳数的变化在四季有一定的相似规律,其来源贡献可以解释丰度变化模式,从 C26 开始有明显的奇偶差异,且奇数碳烷烃高于偶数碳烷烃,表明高等植物蜡的排放强于人为排放的影响^[49].

有研究表明,人为源和生物源均是大气中 *n*-

alkanes 的来源^[36,37],人为源主要贡献包括化石燃料燃烧和生物质燃烧^[8],而植物蜡排放、花粉和生物体内的脂肪酸是生物源的主要贡献者^[24].化石燃料燃烧主要排放含碳数低于 25 的 *n*-alkanes^[28];而高等陆生植物主要排放含碳数高于 26 的 *n*-alkanes,奇

数碳烷烃的含量远高于偶数碳的含量^[50]. 该采样点作为广西背景点, 不仅受到本地源的影响, 还有远距离输送带来的人为污染影响. 同时采样点处在十万大山腹地, 植被茂盛, 因此会释放大量的脂肪族化合物^[33]. 为比较化石源和自然源的相对贡献, 本研究计算了 CPI、WNA 和 FFNA^[1,13,37], 结果如表 2 显示.

观测期间, 冬季 CPI 值为 1.45, 春季 1.90, 夏季 1.50, 秋季 1.53, 这表明采样期间正构烷烃是由化石源和自然源共同作用的^[49]. 春季 CPI 值接近 2, 表

明在春季生物源的贡献会相对较高, 在冬季化石燃料燃烧等人为排放影响较大; 各季节生物源的贡献分别为: 春季 (30.6%) > 秋季 (20.6%) > 夏季 (19.2%) > 冬季 (18.9%), 这与 CPI 值的研究结果一致. 在春季植物生长旺盛, 此外东南亚处于生物质燃烧旺盛的季节, 图 3 中后向轨迹发现有小部分气团污染来自泰国等地, 影响了春季高等植物蜡的排放贡献. 夏季气团较为干净, 但化石源占比较高, 结合后向轨迹发现, 来自海洋传输, 推测是船舶交通运输的影响.

表 2 采样点不同季节 PM_{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的诊断值

Table 2 Diagnostic ratios of <i>n</i> -alkanes and PAHs in PM _{2.5} in different seasons at sampling site						
项目	冬季	春季	夏季	秋季	全年	文献数据
Cmax	C31	C29	C29	C31	C29	
CPI	1.45 ± 0.23	1.9 ± 0.24	1.5 ± 0.37	1.53 ± 0.26	1.58 ± 0.32	1.35 ± 0.43 ^[36]
WNA/%	18.93 ± 6.06	30.6 ± 4.82	19.21 ± 10.48	20.59 ± 7.35	21.89 ± 8.57	
FFNA/%	81.07 ± 6.06	69.4 ± 4.82	80.79 ± 10.48	79.41 ± 7.35	78.11 ± 8.57	
IcdP/(IcdP + BghiP)	0.44 ± 0.05	0.4 ± 0.08	0.41 ± 0.1	0.42 ± 0.08	0.42 ± 0.08	0.5 ~ 0.57 (冬) ^[51]
BaA/(BaA + Chr)	0.4 ± 0.05	0.4 ± 0.05	0.44 ± 0.02	0.4 ± 0.03	0.41 ± 0.05	0.2 ~ 0.35 ^[37]
Flua/(Flua + Pyr)	0.51 ± 0.02	0.48 ± 0.03	0.45 ± 0.02	0.47 ± 0.05	0.48 ± 0.04	0.46 ~ 0.48 (冬) ^[51]
BaP/BghiP	0.49 ± 0.23	0.36 ± 0.12	0.33 ± 0.11	0.43 ± 0.19	0.41 ± 0.19	0.9 ~ 6.6 ^[37]
(BaP + BeP)/BghiP	1.14 ± 0.38	0.86 ± 0.28	0.81 ± 0.3	1.05 ± 0.31	0.98 ± 0.35	1.2 ~ 1.7 ^[52]
BeP/(BeP + BaP)	0.59 ± 0.08	0.58 ± 0.06	0.58 ± 0.05	0.61 ± 0.08	0.59 ± 0.07	0.73 ^[33]

2.2 多环芳烃来源解析

大气中 PAHs 是一种混合物^[8], 主要由煤和石油等化石燃料及木材和烟草等含碳化合物不完全燃烧或热解所形成^[51]. 本研究测定了 17 种 PAHs 在颗粒物样品中的丰度, 并确定了每种物质在不同季节的浓度变化情况. 从表 1 和图 5(a) 可知, 其中浓度大小顺序为: BghiP (6 环) > BbF (5 环) > IcdP (6

环) > BeP (5 环) > BaP (5 环), 从图 5(b) 和 5(c) 可知, 各物质在冬季中含量最高, 表明在冬季受到的燃烧影响最大, 总 PAHs 在各季节中的占比分别为冬季 (53%) > 春季 (18.4%) > 秋季 (15.7%) > 夏季 (12.9%). 从图 5(d) 可知, 各季节中 5 环 PAHs 的占比最高, 其次是 6、4、3 和 2 环.

为了确定 PAHs 的来源, 采用诊断率来进行具

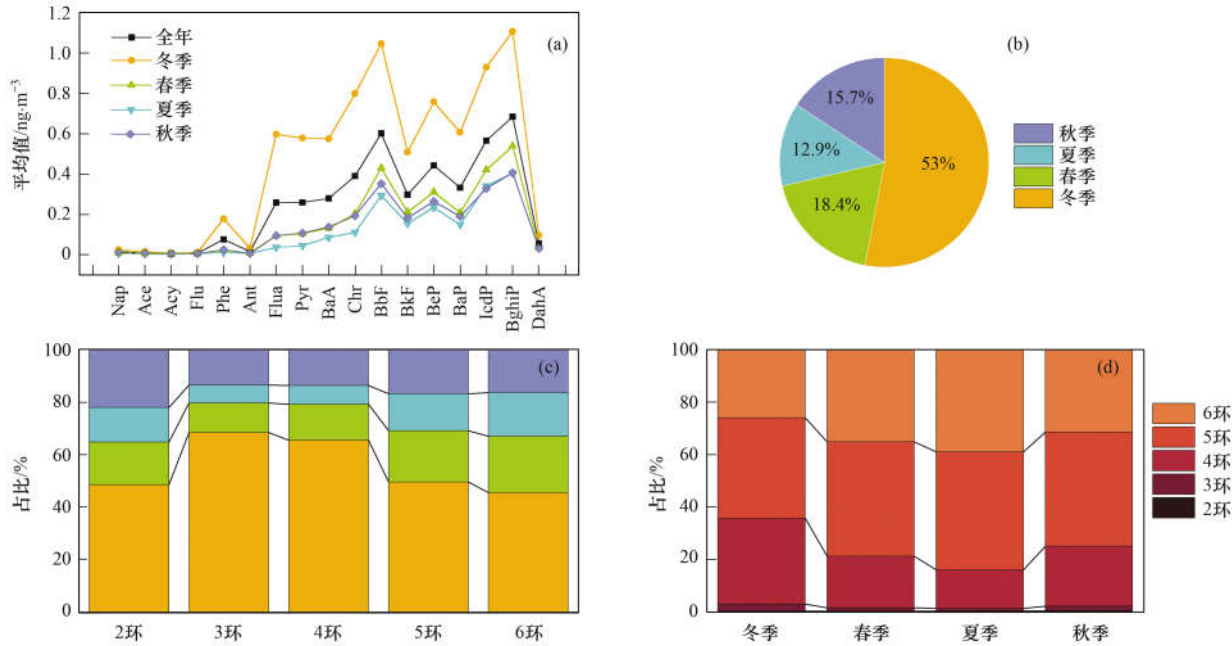


图 5 PAHs 的平均值和占比
Fig. 5 Average and percentage of PAHs

体解析,本研究通过计算 $\text{IdcP}/(\text{IdcP} + \text{BghiP})$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 、 $\text{Flua}/(\text{Flua} + \text{Pyr})$ 、 $(\text{BaP} + \text{BeP})/\text{BghiP}$ 和 BaP/BghiP 来探究广西背景点不同季节中多环芳烃的潜在来源污染,具体计算结果见表 2. 当 $\text{IdcP}/(\text{IdcP} + \text{BghiP}) < 0.2$ 时,代表石油源,在 $0.2 \sim 0.5$ 之间表示污染来自石油燃烧和燃煤的混合源, > 0.5 时表示生物质燃烧^[13]; 当 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr}) < 0.2$ 时代表了石油源, $0.2 \sim 0.35$ 时表示燃煤源和汽油源, $0.35 \sim 0.5$ 来自燃煤排放, > 0.5 时表示生物质燃烧^[11]; 当 $\text{Flua}/(\text{Flua} + \text{Pyr}) < 0.4$ 时代表了石油源, $0.4 \sim 0.5$ 代表了化石燃料燃烧, > 0.5 时表示生物质燃烧^[37].

本研究 $\text{IdcP}/(\text{IdcP} + \text{BghiP})$ 四季的均值在 0.4 左右,表明 IdcP 和 BghiP 多来源于燃煤以及化石燃料燃烧; $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 也在 0.4 左右,表明这两种污染物多由燃煤排放; $\text{Flua}/(\text{Flua} + \text{Pyr})$ 四季均在 0.5 左右波动,是化石燃料、燃煤、生物质燃烧的混合源. 另外,通过计算 $\text{BeP}/(\text{BaP} + \text{BeP})$ 来判断气溶胶的光解老化程度^[9], BeP 光学性质稳定,不易老化分解, BaP 更容易光解老化,比值越大说明老化程度越大. 本研究中 $\text{BeP}/(\text{BaP} + \text{BeP})$ 四季均在 0.6 左右,说明本次研究中气溶胶老化程度相对较高. 冬季和秋季污染程度相对较高,气溶胶光解老化程度相对较低,冬季和秋季 BghiP 主要由生物质不完全燃烧产生. 而夏季清洁大气加上高温加速了气溶胶光解老化,导致 $(\text{BaP} + \text{BeP})/\text{BghiP}$ 和 BaP/BghiP 相对冬季和春季要低,主要是交通排放污染. 而春季气溶胶受远距离污染输送的影响,光解老化

程度升高, $(\text{BaP} + \text{BeP})/\text{BghiP}$ 和 BaP/BghiP 也是相对较低,这与上文所得的结论一致.

2.3 主成分分析(PCA)

特征比值法只能定性表征污染潜在来源,为了更有效识别不同季节下污染源的贡献,利用 SPSS 25 对研究区域不同季节进行主成分分析(PCA). 其中 2 环和 3 环的 PAHs 浓度过低,且在传输过程中易降解^[44], BaP 易光解氧化^[13],因此选取了中高环的多环芳烃进行分析; 低碳数的 *n*-alkanes 受温度影响较大^[53],各季节中 C_{max} 贡献较高的是 C_{29} 和 C_{31} ,因此选取典型低分子量 C_{23} 和 C_{24} 以及高分子量 C_{29} 和 C_{31} 进行分析. 另外 Lev 作为典型的生物质燃烧示踪剂^[32],增加了结论的可靠性. 由于秋季样品量过少,导致分析结果出现较大误差,这里就不予讨论.

PCA 结果如表 4 所示,提取了特征值大于 1 的物质,并进行旋转,各季节的因子均能解释总变量的 90% 以上. 其中冬季提取了 3 个因子,因子 1 解释了总变量的 41.5%,其中载荷较高的化合物是 BbF 、 BkF 、 BeP 、 IcdP 、 DahA 和 BghiP , BbF 和 BkF 作为柴油排放的指示物^[37], BeP 、 IcdP 和 BghiP 作为汽油燃烧排放指示物^[51],此外采样点靠近北部湾,与东盟国家进行经济贸易,船舶运输较多,结合后向轨迹结果分析[图 3(a)]和表 2 可知:有 50% 的气团来自东部和南部的海洋, CPI 为 1.45, $\text{IdcP}/(\text{IdcP} + \text{BghiP})$ 的值为 0.44,是石油和化石燃料燃烧的混合源,也验证了之前的猜想,因此因子 1 解释为汽油和柴油燃烧;因子 2 载荷较高的是 Flua 、 Pyr 、 BaA 和

表 4 不同季节中多环芳烃和正构烷烃的旋转因子载荷¹⁾

Table 4 Rotation factor loading of PAHs and *n*-alkanes

项目	冬季			春季			夏季		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Flua	0.34	0.86	0.32	0.21	0.95	0.22	0.89	—	—
Pyr	0.35	0.86	0.31	0.23	0.92	0.31	0.83	—	—
BaA	0.60	0.78	0.11	0.59	0.63	0.48	0.76	—	0.24
Chr	0.57	0.78	0.19	0.67	0.64	0.35	0.79	—	0.24
BbF	0.82	0.41	0.39	0.94	0.27	0.18	0.99	—	0.04
BkF	0.88	0.41	0.21	0.96	0.27	0.12	0.98	—	0.01
BeP	0.87	0.40	0.28	0.95	0.25	0.17	0.99	—	0.02
IcdP	0.91	0.35	0.22	0.96	0.20	0.22	0.98	0.01	—
DahA	0.86	0.46	0.21	0.97	0.20	0.13	0.98	0.05	—
BghiP	0.89	0.24	0.23	0.88	0.21	0.43	0.98	—	—
C ₂₃	0.28	0.85	0.37	0.35	0.62	0.65	0.90	—	0.34
C ₂₄	0.38	0.74	0.52	0.34	0.61	0.67	0.73	0.39	0.19--
C ₂₉	0.30	0.28	0.90	0.38	0.30	0.85	0.66	0.69	—
C ₃₁	0.20	0.25	0.94	0.39	0.53	0.67	0.72	0.63	—
Lev	0.62	0.70	0.03	0.00	0.18	0.96	0.39	0.48	0.62
累计贡献方差/%	41.5	78.1	96.6	45.0	71.9	97.1	53.4	81.9	92.5
来源	交通源	燃煤、生物质燃烧 1	自然源	交通源	燃煤	生物质燃烧 1	交通源	自然源	生物质燃烧 2

1) “—”表示载荷为负,不显示;黑体字表示相对载荷较高的值

Chr, 这 4 种物质通常用来指示燃煤排放^[48], 且表 2 显示 Flua/(Flua + Pyr) 的值为 0.51, 表明是生物质燃烧的影响, 另外低分子量的 *n*-alkanes 与 Lev 的荷载也相对较高, 主要是生物质燃烧排放, 因此因子 2 归为燃煤源以及生物质燃烧源; 因子 3 中高分子量 *n*-alkanes 的荷载较高, 然而 PAHs 的荷载都较低, 左旋葡聚糖与之相关性也不高, 因此因子 3 解释为本地自然源排放, 主要包括植物蜡排放。

春季提取了 3 个因子, 因子 1 和 2 与冬季相似, 但在因子 2 中左旋葡聚糖与其他物质相关性不高, 因此因子 2 解释为燃煤源; 因子 3 中多环芳烃的贡献较低, 其大气寿命小于左旋葡聚糖^[32], C29 和 C31 与左旋葡聚糖荷载较高, 相关性也好, 图 3(b) 中显示有 8% 的气团来自泰国和老挝地区, 表明本地受到了远距离传输的影响, 在传输过程中低环的多环芳烃降解, 另外春季是东南亚生物质燃烧旺盛的季节^[35,54], 燃烧也会产生高分子量的 *n*-alkanes, 因此因子 3 解释为生物质燃烧, 解释了变量的 26.1%, 这与上文结论一致。

夏季提取了 3 个因子, 因子 1 解释了变量的 53.4%, 后向轨迹结果中显示有 37% 来自海洋传输 [图 3(c)], 与冬季相似, 柴油排放的指示物的荷载较高, 且结合表 2 结果: IdcP/(IdcP + BghiP) 的值为 0.41, 因此因子 1 归为交通源; 因子 2 中荷载较高的是 C29 和 C31, 左旋葡聚糖与之相关性不高, 表明来自高等植物蜡排放, 因此解释为自然源; 因子 3 中除左旋葡聚糖荷载较高外, 其余贡献较低, 图 3(c) 显示聚类 5 有 37% 来自泰国和老挝地区, 此时处于非生物质燃烧旺盛的季节, 是在季风的影响下, 气团污染传输到本地, 虽然传输量大, 但影响较小, 解释了变量的 10.6%, 因此因子 3 归为生物质燃烧传输影响(生物质燃烧 2)。综合表明, 广西郊区的空气污染主要来源于燃煤、交通排放、生物质燃烧以及植物排放。

3 结论

(1) 2018 年广西 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年平均值为 $(35.31 \pm 21.86) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 平均值依次为 $(2.9 \pm 2.53) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(0.41 \pm 0.34) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占 PM_{2.5} 的 8.7% 和 1.8%。左旋葡聚糖是重要的生物质燃烧示踪剂, 在冬季有较高的浓度。多环芳烃和正构烷烃的季节变化规律一致, 均是冬季和春季浓度高, 秋季和夏季浓度低。PAHs 中 5 环和 6 环的分子占比较大, 超过 60%, 其次是中低环分子(4 环和 3 环); *n*-alkanes 中高分子量占比较高(C29 > C31 > C27), 且奇偶碳数有明显差异。其在 PM_{2.5} 颗

粒中虽占比较低, 不足 1%, 但由于较大的危害性而不容忽视。

(2) 综合运用特征比值法、正定矩阵因子分解法和后向轨迹发现: 冬季非极性有机气溶胶中 41.5% 受港口船舶交通排放、海洋源输送影响, 36.7% 的污染贡献来自燃煤和局地生物质燃烧; 春季, 污染气团中有 25.2% 来自生物质燃烧传输影响, 45.0% 来自研究区域南部的海洋输送, 高等植物蜡排放污染较高; 夏季, 53.4% 气团污染来自船舶交通源传输, 10.6% 的燃烧污染来自西南泰国的跨境输送; 秋季燃煤占比较高。广西虽然靠近东南亚生物质燃烧旺盛区域, 但在春季受到的影响较低。因靠近珠三角地区, 受海上船舶排放的传输影响较高。

参考文献:

- [1] Song Y, Zhang Y, Dai W. PM_{2.5} Sources and their effects on human health in China: case report [A]. In: Nriagu J (Ed.). Encyclopedia of Environmental Health (2nd ed.) [M]. Amsterdam: Elsevier, 2019.
- [2] Shang J, Khazestani R B, Tian J Y, et al. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} personal exposure of two cohorts living in urban and suburban Beijing [J]. Environmental Pollution, 2019, **246**: 225-236.
- [3] Li J J, Li J, Wang G H, et al. Molecular characteristics of organic compositions in fresh and aged biomass burning aerosols [J]. Science of the Total Environment, 2020, **741**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140247.
- [4] Bhattarai H, Saikawa E, Wan X, et al. Levoglucosan as a tracer of biomass burning: recent progress and perspectives [J]. Atmospheric Research, 2019, **220**: 20-33.
- [5] 王丽萍, 谢栓栓, 王昌惠. PM_{2.5} 对呼吸系统疾病的影响及其相关机制 [J]. 临床肺科杂志, 2019, **24**(1): 148-151.
- [6] 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 等. 泰安市夏季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 [J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1045-1055.
- [7] Yi Y N, Hou Z F, Yang Q W, et al. Chemical compositions and sources of *n*-alkanes and saccharides in PM_{2.5} from Taian City during the summer [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1045-1055.
- [8] Hernández-Guzmán F A, Macías-Zamora J V, Ramírez-Álvarez N, et al. Source identification of *n*-alkanes and isoprenoids using diagnostic ratios and carbon isotopic composition on crude oils and surface waters from the Gulf of Mexico [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, **193**(10), doi: 10.1007/s10661-021-09440-0.
- [9] Medić A, Lješević M, Inui H, et al. Efficient biodegradation of petroleum *n*-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons by polyextremophilic *Pseudomonas aeruginosa* strain with multidegradative capacity [J]. RSC Advances, 2020, **10**(24): 14060-14070.
- [10] Dat N D, Chang M B. Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies [J]. Science of the Total Environment, 2017, **609**: 682-693.
- [11] Ghanavati N, Nazarpour A, Watts M J. Status, source, ecological and health risk assessment of toxic metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust of Abadan, Iran [J]. CATENA, 2019, **177**: 246-259.

- [11] Lamichhane S, Krishna K C B, Sarukkalige R. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) removal by sorption: a review [J]. *Chemosphere*, 2016, **148**: 336-353.
- [12] Zhang K, Yang L M, Li Q, *et al.* Hourly measurement of PM_{2.5}-bound nonpolar organic compounds in Shanghai: characteristics, sources and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **789**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148070.
- [13] Li Y Z, Juhasz A L, Ma L Q, *et al.* Inhalation bioaccessibility of PAHs in PM_{2.5}: implications for risk assessment and toxicity prediction [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 56-64.
- [14] Ho S S H, Li L J, Qu L L, *et al.* Seasonal behavior of water-soluble organic nitrogen in fine particulate matter (PM_{2.5}) at urban coastal environments in Hong Kong [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2019, **12**(4): 389-399.
- [15] Ji Y M, Zhao J, Terazono H, *et al.* Reassessing the atmospheric oxidation mechanism of toluene [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, **114**(31): 8169-8174.
- [16] Li J L, Wang Y X, Zhang C X, *et al.* The source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the topsoil in Xiaodian sewage irrigation area, North of China [J]. *Ecotoxicology*, 2014, **23**(10): 1943-1950.
- [17] Kumar V, Kothiyal N C, Saruchi, *et al.* Sources, distribution, and health effect of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)-current knowledge and future directions [J]. *Journal of the Chinese Advanced Materials Society*, 2016, **4**(4): 302-321.
- [18] Nassar H F, Tang N, Toriba A, *et al.* Environmental carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): concentrations, sources and hazard effects [J]. *International Journal of Advanced Research*, 2015, **3**(10): 511-524.
- [19] Wang F W, Lin T, Li Y Y, *et al.* Comparison of PM_{2.5} carbonaceous pollutants between an urban site in Shanghai and a background site in a coastal East China Sea island in summer: concentration, composition and sources [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2017, **19**(6): 833-842.
- [20] Wang Q Q, He X, Zhou M, *et al.* Hourly measurements of organic molecular markers in urban Shanghai, China: primary organic aerosol source identification and observation of cooking aerosol aging [J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2020, **4**(9): 1670-1685.
- [21] Liu D, Vonwiller M, Li J, *et al.* Fossil and non-fossil fuel sources of organic and elemental carbonaceous aerosol in Beijing, Shanghai, and Guangzhou: seasonal carbon source variation [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, **20**(11): 2495-2506.
- [22] Lin C S, Huang R J, Xu W, *et al.* Comprehensive source apportionment of submicron aerosol in Shijiazhuang, China: secondary aerosol formation and holiday effects [J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2020, **4**(6): 947-957.
- [23] Lanzafame G M, Srivastava D, Favez O, *et al.* One-year measurements of secondary organic aerosol (SOA) markers in the Paris region (France): concentrations, gas/particle partitioning and SOA source apportionment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **757**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143921.
- [24] Langner J, Gidhagen L, Bergström R, *et al.* Model-simulated source contributions to PM_{2.5} in Santiago and the central region of Chile [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, **20**(5): 1111-1126.
- [25] Hu R L, Xu Q C, Wang S X, *et al.* Chemical characteristics and sources of water-soluble organic aerosol in Southwest suburb of Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **95**: 99-110.
- [26] Drosatou A D, Skyllakou K, Theodoritsi G N, *et al.* Positive matrix factorization of organic aerosol: insights from a chemical transport model [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(2): 973-986.
- [27] Booyens W, Beukes J P, van Zyl P G, *et al.* Assessment of polar organic aerosols at a regional background site in Southern Africa [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2019, **76**(2): 89-113.
- [28] 李存林, 马素萍, 常福宣, 等. 青藏高原北部土壤正构烷烃氢同位素及物源意义 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 2095-2105.
- Li C L, Ma S P, Chang F Y, *et al.* *n*-Alkanes hydrogen isotopes in soil from the Northern region, Tibetan Plateau: implications for sources of organic matter [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 2095-2105.
- [29] Liu X Y, Zhang Y L, Peng Y R, *et al.* Impacts of regional-transported biomass burning emissions on chemical and optical properties of carbonaceous aerosols in Nanjing, East China [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2019, doi: 10.5194/acp-2018-1029.
- [30] Chen Y, Cao J J, Zhang J, *et al.* *n*-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in total suspended particulates from the Southeastern Tibetan Plateau: concentrations, seasonal variations, and sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 9-18.
- [31] Zheng L S, Yang X Y, Lai S C, *et al.* Impacts of springtime biomass burning in the Northern Southeast Asia on marine organic aerosols over the Gulf of Tonkin, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **237**: 285-297.
- [32] Li Y M, Fu T M, Yu J Z, *et al.* Impacts of chemical degradation on the global budget of atmospheric levoglucosan and its use as a biomass burning tracer [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(8): 5525-5536.
- [33] 薛国艳, 王格慧, 吴灿, 等. 长三角背景点夏季大气 PM_{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 554-563.
- Xue G Y, Wang G H, Wu C, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of *n*-alkanes and PAHs in summertime PM_{2.5} at background site of Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 554-563.
- [34] Xie Q R, Su S H, Chen S, *et al.* Molecular characterization of size-segregated organic aerosols in the urban boundary layer in wintertime Beijing by FT-ICR MS [J]. *Faraday Discussions*, 2021, **226**: 457-478.
- [35] 姚媛, 贺欣, 朱君. 云贵高原昆明站点不同气溶胶污染个例下气溶胶特征对比研究 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(6): 1976-1986.
- Yao Y, He X, Zhu J. Contrastive aerosol characteristics during different aerosol pollution cases in Kunming site of Yunnan-Guizhou Plateau [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(6): 1976-1986.
- [36] Sun N, Li X D, Ji Y D, *et al.* Sources of PM_{2.5}-associated PAHs and *n*-alkanes in Changzhou China [J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(9), doi: 10.3390/atmos12091127.
- [37] Kang M, Kim K, Choi N, *et al.* Recent occurrence of PAHs and *n*-alkanes in PM_{2.5} in Seoul, Korea and characteristics of their sources and toxicity [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(4), doi: 10.3390/ijerph17041397.

- [38] Liang L L, Engling G, Cheng Y, *et al.* Biomass burning impacts on ambient aerosol at a background site in East China: insights from a yearlong study [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **231**, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104660.
- [39] 付晓燕. 我国环境空气质量标准发展及现状 [J]. *环境与可持续发展*, 2014, **39**(3): 41-43.
Fu X Y. Development and current situation of ambient air quality standard in China [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2014, **39**(3): 41-43.
- [40] Xu J S, Srivastava D, Wu X F, *et al.* An evaluation of source apportionment of fine OC and PM_{2.5} by multiple methods: APHH-Beijing campaigns as a case study [J]. *Faraday Discussions*, 2021, **226**: 290-313.
- [41] Wu X F, Chen C R, Vu T V, *et al.* Source apportionment of fine organic carbon (OC) using receptor modelling at a rural site of Beijing: insight into seasonal and diurnal variation of source contributions [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115078.
- [42] Feng J L, Hu J C, Xu B H, *et al.* Characteristics and seasonal variation of organic matter in PM_{2.5} at a regional background site of the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 288-297.
- [43] Chen P F, Kang S C, Li C L, *et al.* Source apportionment and risk assessment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Lhasa, Tibet, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18**(5): 1294-1304.
- [44] Chen P F, Li C L, Kang S C, *et al.* Characteristics of particulate-phase polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the atmosphere over the central himalayas [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(12): 2942-2954.
- [45] Kalita G, Kunchala R K, Fadnavis S, *et al.* Long term variability of carbonaceous aerosols over Southeast Asia via reanalysis: association with changes in vegetation cover and biomass burning [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **245**(4), doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105064.
- [46] Florou K, Papanastasiou D K, Pikridas M, *et al.* The contribution of wood burning and other pollution sources to wintertime organic aerosol levels in two Greek cities [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(4): 3145-3163.
- [47] Liang L L, Engling G, Du Z Y, *et al.* Seasonal variations and source estimation of saccharides in atmospheric particulate matter in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2016, **150**: 365-377.
- [48] Tian Y Z, Liu X, Huo R Q, *et al.* Organic compound source profiles of PM_{2.5} from traffic emissions, coal combustion, industrial processes and dust [J]. *Chemosphere*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130429.
- [49] Ambade B, Sankar T K, Kumar A, *et al.* Characterization of PAHs and n-alkanes in atmospheric aerosol of jamshedpur City, India [J]. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2020, **24**(2), doi: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000490.
- [50] Wang D X, Kang X, Gu Y, *et al.* Electronic tuning of Ni by Mo species for highly efficient hydroisomerization of *n*-alkanes comparable to Pt-based catalysts [J]. *ACS Catalysis*, 2020, **10**(18): 10449-10458.
- [51] Zhu C S, Li L J, Huang H, *et al.* *n*-alkanes and PAHs in the southeastern Tibetan Plateau: characteristics and correlations with brown carbon light absorption [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, **125**(19), doi: 10.1029/2020JD032666.
- [52] 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 等. 长春秋季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3438-3446.
Wu X, Cao F, Zhai X Y, *et al.* Molecular composition and source apportionment of fine organic aerosols in autumn in Changchun [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3438-3446.
- [53] Li J J, Li J, Wang G H, *et al.* Effects of atmospheric aging processes on *in vitro* induced oxidative stress and chemical composition of biomass burning aerosols [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **401**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123750.
- [54] 张玉治, 杨迎春, 李杰, 等. 东南亚生物质燃烧对我国春季 PM_{2.5} 质量浓度影响的数值模拟 [J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(7): 952-962.
Zhang Y Q, Yang Y C, Li J, *et al.* Modeling the impacts of biomass burning in Southeast Asia on PM_{2.5} over China in spring [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(7): 952-962.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, GONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)