

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
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	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造行业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

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

衣雅男¹, 侯战方^{1,2*}, 杨千才³, 刘晓迪¹, 李政¹, 孟静静^{1,2}, 燕丽⁴, 魏本杰¹, 伏梦璇¹

(1. 聊城大学环境与规划学院, 聊城 252000; 2. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061; 3. 聊城市环境监测中心, 聊城 252000; 4. 环境保护部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 为探讨泰安市夏季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类的化学组成及其来源, 于 2016 年 7~8 月进行 PM_{2.5} 样品采集, 对泰安市正构烷烃及糖类进行分析, 并利用主成分分析-多元线性回归模型 (PCA-MLR) 和后向轨迹模型对污染物进行来源解析. 结果表明, 2016 年泰安市夏季 PM_{2.5} 质量浓度为 (37.2 ± 11.5) μg·m⁻³, 是我国环境空气质量一级标准 (GB 3095-2012, 35 μg·m⁻³) 的 1.1 倍. 其中, 正构烷烃质量浓度为 (83.3 ± 34.7) ng·m⁻³, 碳优势指数 (CPI) 为 1.83, 植物蜡烷烃贡献率 (%WaxC_n) 为 34.7%~69.4%, 表明植物蜡是泰安市夏季正构烷烃的主要来源. 糖类化合物的质量浓度为 (73.4 ± 46.6) ng·m⁻³, 其中左旋葡聚糖、半乳聚糖和甘露聚糖是主要的糖类组分, 分别占糖类化合物总浓度的 64.0%、7.1% 和 6.3%, 表征生物质燃烧对泰安市糖类具有重要贡献. 由 PCA-MLR 模型结果表明, 泰安市夏季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物主要来自植物蜡、化石燃料燃烧和生物质燃烧. 后向轨迹分析表明, 泰安市夏季正构烷烃和糖类污染物主要来自山东本地源和南方内陆地区.

关键词: 正构烷烃; 糖类化合物; 来源; PM_{2.5}; 泰安市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1045-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907070

Chemical Compositions and Sources of *n*-Alkanes and Saccharides in PM_{2.5} from Taian City During the Summer

YI Ya-nan¹, HOU Zhan-fang^{1,2*}, YANG Qian-cai³, LIU Xiao-di¹, LI Zheng¹, MENG Jing-jing^{1,2}, YAN Li⁴, WEI Ben-jie¹, FU Meng-xuan¹

(1. School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 3. Liaocheng Environmental Monitoring Center, Liaocheng 252000, China; 4. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: To investigate the variations and sources of *n*-alkanes and sugars in Taian City during summer, PM_{2.5} samples were collected from July 22 to August 19, 2016. The identified *n*-alkane and sugar sources were investigated using a principal component analysis (PCA) multiple linear regression (MLR) model and a backward trajectory model. The results showed that the mass concentrations of PM_{2.5} during summer were (37.2 ± 11.5) μg·m⁻³. The mass concentrations of *n*-alkanes were (83.3 ± 34.7) ng·m⁻³, the carbon preference index (CPI) was 1.83, and the relative contribution of wax *n*-alkanes was 34.7%~69.4%, suggesting that contributions from terrestrial plants were more significant in Taian City. The results showed that the mass concentrations of sugars in Taian City during summer were (73.4 ± 46.6) ng·m⁻³. Levoglucan, galactosan, and mannosan were the main saccharides, accounting for 64.0%, 7.1%, and 6.3% of the total concentrations of sugars, respectively, indicating that biomass burning is much more significant in Taian City. The results of the PCA-MLR model suggested that *n*-alkanes and sugars in Taian City during summer were mostly from terrestrial plants, coal burning and biomass burning. The backward trajectory model showed that the pollution mostly came from the native sources of Shandong province and the inland cities in the south.

Key words: *n*-alkanes; saccharides; sources; PM_{2.5}; Taian City

有机气溶胶 (organic aerosols, OAs) 是城市大气颗粒物的重要组分, 占细颗粒物质量浓度的 10%~90%, 不仅严重危害人体健康及空气质量, 还对全球气候变化及生态系统具有重要影响^[1,2]. 大气中的 OAs 一方面来自煤炭燃烧、生物质燃烧、机动车尾气及植物活动等一次污染源的排放, 另一方面来自挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 经光化学氧化反应生成^[3,4]. 有研究表明^[5], 大气颗粒物中有机化合物种类繁多, 由上百种具有不同化学性质和热动力学性质的有机化合物构成, 不但可以改变大气气溶胶的物理化学性质 (如吸湿

性、反射率和氧化程度等), 而且与光化学烟雾、辐射强迫及次级粒子的形成密切相关. 另外, 绝大部分有机化合物 (如多环芳烃、正构烷烃和苯系物等) 具有“三致”效应 (致癌、致畸、致突变) 和遗传毒性, 一旦进入人类体内易于发生生物蓄积, 将严重影响

收稿日期: 2019-07-08; 修订日期: 2019-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41505112, 41702373); 山东省自然科学基金项目 (BS2015HZ002); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目 (SKLLQG1504); 大学生创新创业项目 (CXCY2017046)

作者简介: 衣雅男 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: yiyannan6902@163.com

* 通信作者, E-mail: houzhanfang@lcu.edu.cn

人体健康^[6].

其中,正构烷烃和糖类是 OAs 的重要组分^[7]. 正构烷烃作为一类饱和烃类有机化合物,具有非极性和稳定性等特征,且有危害性的高碳数正构烷烃更易吸附于细颗粒物表面,刺激人体呼吸系统,引起神经系统障碍,威胁人体健康^[8]. 有研究表明,正构烷烃的麻醉性随着其分子量的增大而增强,当正构烷烃的含碳数($C > 16$)不断增加时,出现皮肤损伤和皮肤癌变的风险就会增大^[7]. 糖类物质是主要的水溶性有机化合物(water-soluble organic compound, WSOC),可以改变颗粒物的吸湿性,对区域降水及灰霾的形成具有重要影响^[9]. 大气中的糖类化合物主要来自于生物质燃烧、土壤粉尘、生物活动以及原生生物气溶胶颗粒(primary biological aerosol particles, PBAPs)^[10],可用其来阐述大气颗粒物的来源、运输途径及评估大气中生物气溶胶的污染水平. 因此,研究 $PM_{2.5}$ 中正构烷烃、糖类等有机化合物对人体健康及大气污染问题具有重要意义.

目前,关于 OAs 的研究区域主要集中在长江三角洲^[11]、京津冀^[12]、广州^[13]和西安^[14]等大城市地区,对小城市的研究鲜见报道^[7],尤其在华北平原地区更是少之又少. 山东省作为华北平原大气污染最严重的省份之一,虽然国土面积仅占全国的 1.6%,但 $PM_{2.5}$ 、VOCs、 SO_2 和 NO_x 占全国总排放量的 9.1%、9.0%、10.0% 和 8.5%^[15,16]. 因此,关于山东省典型城市地区 $PM_{2.5}$ 的化学组成及来源的研究对华北地区制定有效的大气污染控制对策、改善空气质量至关重要. 泰安市位于山东省中部,是我国著名的旅游型城市之一. 近年来,泰安市大气环境污染问题不断加剧^[17]. 2016 年,泰安市旅游人数超过 7 000 万人,大部分游客的游览时间为夏季^[17],因此对泰安市夏季大气污染特征及其来源进行分析对降低当地居民和游客的健康威胁具有重要意义. 另外,关于泰安市 $PM_{2.5}$ 化学组分的研究主要集中于元素、碳质组分、无机离子和气体污染物等方面^[17,18],而对正构烷烃和糖类等有机化合物的研究尚未见报道. 因此,本研究对泰安市 2016 年夏季 $PM_{2.5}$ 中有机化合物的浓度水平与分子组成进行分析,结合主成分分析-多元线性回归模型(PCA-MLR)和后向轨迹模型,阐明泰安市 $PM_{2.5}$ 中有机化合物的来源,以期为泰安市乃至整个山东省的 $PM_{2.5}$ 污染治理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样地点设在山东省泰安市(图 1)山东农业大学附近居民区楼顶($117^{\circ}06'E$, $36^{\circ}12'N$),距地面约

20 m. 采样点位于城市北部,靠近泰山,周围是住宅区和旅游区,无明显污染排放源. 另外,采样点距离泰安市 3 个环境空气质量监测国控点(监测站、人口学校和电力学校)之间的距离在 10 km 以内,周边环境条件与 3 个国控点相似,可以客观反映泰安市的大气污染状况. 本研究于 2016 年 7 月 22 日~8 月 19 日分昼(07:00~18:50)和夜(19:00~次日 06:50)进行采样,所使用的采样仪器为青岛崂山电子仪器公司生产的中流量采样器(流量为 $100 L \cdot min^{-1}$),共采集 58 个 $PM_{2.5}$ 样品及 2 个环境空白样品. 所使用的滤膜(直径为 90 mm, Whatman, QM-A)在采样前均置于 $450^{\circ}C$ 的马弗炉中灼烧 6 h,以去除碳质污染物. 采样完成后,将滤膜用铝箔纸封装并置于 $-20^{\circ}C$ 冰箱内保存,以待分析.

采样期间的温度、相对湿度、风速及风向等气象数据(图 2)来自于中国空气质量在线监测平台($PM_{2.5}$ 真气网: www.aqistudy.cn).



图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Location of the sampling site

1.2 正构烷烃和糖类化合物分析

将 1/8 样品滤膜剪成碎片并放置于 15 mL 样品瓶中,加入体积比为 2:1 的二氯甲烷和甲醇混合溶液,超声萃取 $3 \times 15 min$. 超声萃取完成后,用巴氏滴管中玻璃棉将溶液过滤到梨形瓶中,随后将梨形瓶置于旋转蒸发器上将溶液真空浓缩,转移浓缩后的溶液至气相色谱瓶(GC)中,用纯氮气吹干,再加入 $60 \mu L$ N, O -双(三甲基硅基)-三氟乙酰胺:吡啶(pyridine)溶液,体积比为 5:1,将溶液置于 $70^{\circ}C$ 的干燥箱中进行 3 h 的衍生化反应. 经衍生化反应的溶液冷却后,加入 $40 \mu L$ 十三烷(tridecane)的内标,混合均匀后放置于冰箱中冷藏,留待检测.

预处理后的样品采用气相色谱-质谱联用仪(GC/MS, Agilent, 7890A-5975C)进行分析. 分析时采用 HP-5MS 熔融石英毛细管柱,气相色谱内炉温从 $50^{\circ}C$ (持续 2 min)以 $15^{\circ}C \cdot min^{-1}$ 升温至 $120^{\circ}C$,

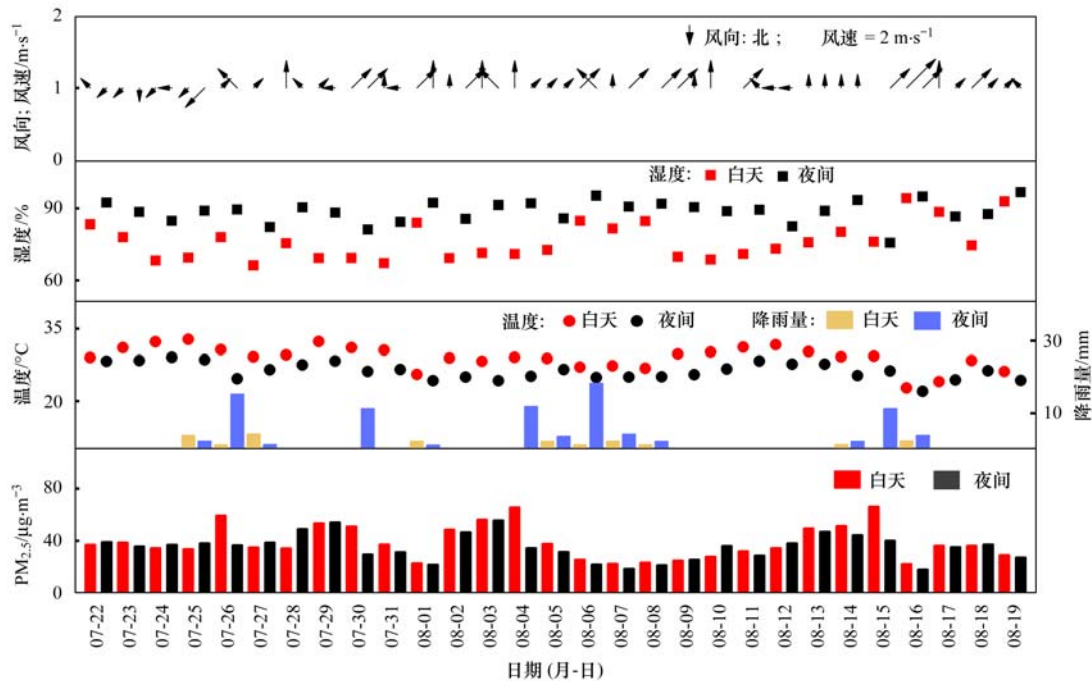


图 2 泰安市夏季 PM_{2.5} 质量浓度与气象参数

Fig. 2 Mass concentration and meteorological parameters of PM_{2.5} in Taian City during summer

再以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 持续 16 min. 最后使用进样针将 $2\text{ }\mu\text{L}$ 样品溶液注入进样口进行分析^[7].

1.3 数据分析

1.3.1 后向轨迹分析

为分析远距离高空气团的传输对泰安市夏季 PM_{2.5} 中正构烷烃、糖类化合物污染特征的影响, 本研究从美国国家海洋和大气管理局 (<https://ready.arl.noaa.gov/READYamet.php>) 上获取数据, 利用 HYSPLIT4.0 (混合单粒子拉格朗日综合轨迹) 模型和 TrajStat 分析软件, 对泰安市 2016 年夏季采样期间 500 m 高空的气团进行 72 h 的后向轨迹模拟, 并对轨迹模拟结果进行聚类分析.

1.3.2 PCA-MLR 模型

利用 SPSS 对泰安市大气气溶胶中的正构烷烃和糖类化合物的来源进行主成分分析 (principal component analysis, PCA), 然后再利用多元线性回归 (multiple linear regression, MLR) 模型定量分析不同污染源对泰安市正构烷烃和糖类化合物的贡献率^[19]. MLR 模型的基本方程为:

$$Y = \sum_{i=1}^n m_i X_i + b \quad (1)$$

式中, Y 表示样品中的化学物质, X_i 为 PCA 分析得到的因子得分变量, m_i 和 b 为 MLR 的回归系数. 为便于直接比较各来源的贡献, 通常对因变量 Y 标准化之后进行计算.

$$Z = \sum_{i=1}^n B_i X_i \quad (2)$$

式中, B_i 为 MLR 的新回归系数. 源 i 的平均贡献率的计算公式为:

$$\text{平均贡献率}(\%) = \left(B_i / \sum B_i \right) \times 100\% \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 的质量浓度分析

如表 1 所示, 泰安市 2016 年夏季 PM_{2.5} 质量浓度的变化范围为 $18.3 \sim 66.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均质量浓度为 $(37.2 \pm 11.5)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 未超过我国环境空气质量二级标准 (GB 3095-2012, $75\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 但高于我国环境空气质量一级标准 (GB 3095-2012, $35\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 1.1 倍. 在整个采样期间 (共 29 d), 有 18 d 的 PM_{2.5} 质量浓度超过国家一级标准, 超标率为 62%. 白天 PM_{2.5} 质量浓度 $[(39.5 \pm 12.7)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 略高于夜间 $[(35.2 \pm 9.9)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$, 昼夜差异不显著 (表 2, t 检验, $P > 0.05$). 虽然白天的风速 ($1.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 高于夜间 ($1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (图 2), 白天较好地大气扩散条件不易造成 PM_{2.5} 的积累. 但是, 降水时段多发生在夜间 (图 2), 白天的平均降雨量 (24.1 mm) 低于夜间 (87.9 mm), 由于湿沉降是大气颗粒物去除的主要方式, 所以白天 PM_{2.5} 的质量浓度均略高于夜晚. 由表 3 可知, 采样期间 PM_{2.5} 的质量浓度与 2015 年同期 [7 月 22 日 ~ 8 月 19 日, $(41.1 \pm 17.9)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 相比降低了 9.1%, 说明 2016 年夏季 PM_{2.5} 污染有所改善. 在与其他城市 PM_{2.5} 质量浓度对比发现, 泰安市 PM_{2.5} 质

量浓度低于北京、石家庄与太原等 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较重的城市,但高于南京、上海与广州等 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较轻的城市. 另外,据 366 个城市统计排名 (<https://www.aqistudy.cn>) 可知,采样期间泰安市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度排在第 346 位. 由此可知,泰安市作为我国旅游城市之一,夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染依然处于较高水平.

在整个采样期间内(共 29 d),有 12.5 d 为雨天, 16.5 d 为非雨天. 其中,非雨天 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $[(43.0 \pm 10.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 是雨天的 $[(29.6 \pm 7.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 的 1.5 倍,表明夏季湿沉降对 $\text{PM}_{2.5}$ 有明显的去除作用. 有大量研究表明,湿沉降是使大气颗粒物浓度降低的主要方式之一^[20,21]. 由图 2 可知,采

样期间出现 4 次由白天至夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度骤减的现象,分别为 7 月 26 日、7 月 30 日、8 月 4 日及 8 月 15 日,这是因为在这 4 d 的夜晚均出现了降雨量较多的雷雨天气(图 2),白天的降雨量均在 1.3 mm 以下,而夜晚的降雨量均在 11.0 mm 以上,所以这 4 d 的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度昼夜差异明显是由降雨量昼夜差异较大导致的. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最小值分别出现在雨天 8 月 16 日 $(18.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 和 8 月 7 日 $(18.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$,相对湿度均大于 90%,最大值分别出现在非雨天 8 月 4 日 $(65.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 和 8 月 15 日 $(66.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 的白天,相对湿度在 80% 以下,进一步说明湿沉降是导致观测期间泰安市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度骤减的主要原因.

表 1 泰安市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度、气象参数、正构烷烃和糖类化合物浓度的昼夜变化特征

Table 1 Diurnal variations of mass concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, *n*-alkanes, and sugars in Taian City

项目	类型	白天($n=29$)	夜间($n=29$)	整个采样期($n=58$)
$\text{PM}_{2.5}$ 与气象参数	$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	39.5 ± 12.7	35.2 ± 9.9	37.2 ± 11.5
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	29.0 ± 2.4	26.1 ± 1.7	27.5 ± 2.5
	相对湿度/%	76.4 ± 8.1	89.2 ± 3.9	82.8 ± 9.0
	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.6 ± 0.3	1.2 ± 0.3	1.4 ± 0.4
	降雨量/mm	24.1 ± 1.2	87.9 ± 5.2	112 ± 3.9
低分子量正构烷烃	正十八烷(C_{18})	1.0 ± 0.9	0.7 ± 0.5	0.8 ± 0.7
	正十九烷(C_{19})	1.4 ± 0.6	1.0 ± 0.6	1.2 ± 0.6
	正二十烷(C_{20})	1.0 ± 0.5	0.9 ± 0.5	0.9 ± 0.5
	正二十一烷(C_{21})	3.0 ± 1.5	2.7 ± 1.5	2.9 ± 1.5
	正二十二烷(C_{22})	1.6 ± 1.0	1.4 ± 0.6	1.5 ± 0.8
	正二十三烷(C_{23})	2.1 ± 0.6	2.3 ± 1.1	2.2 ± 0.9
	正二十四烷(C_{24})	1.9 ± 0.8	2.1 ± 1.0	2.0 ± 0.9
	正二十五烷(C_{25})	5.5 ± 2.1	5.3 ± 2.7	5.4 ± 2.4
	正二十六烷(C_{26})	2.0 ± 1.0	1.9 ± 0.9	2.0 ± 0.9
	正二十七烷(C_{27})	5.9 ± 2.5	5.9 ± 2.9	5.9 ± 2.7
	正二十八烷(C_{28})	2.7 ± 1.1	2.5 ± 1.3	2.6 ± 1.2
	正二十九烷(C_{29})	12.8 ± 6.7	11.9 ± 5.6	12.3 ± 6.1
	正三十烷(C_{30})	4.3 ± 1.7	4.0 ± 2.2	4.2 ± 1.9
	正三十一烷(C_{31})	9.3 ± 4.2	8.5 ± 4.3	8.9 ± 4.2
	正三十二烷(C_{32})	5.0 ± 2.3	4.9 ± 2.8	5.0 ± 2.6
	正三十三烷(C_{33})	8.3 ± 5.5	7.1 ± 4.0	7.7 ± 4.8
高分子量正构烷烃	正三十四烷(C_{34})	6.8 ± 3.3	6.4 ± 3.6	6.6 ± 3.4
	正三十五烷(C_{35})	7.6 ± 3.0	7.5 ± 4.0	7.5 ± 3.5
	正三十六烷(C_{36})	3.8 ± 1.8	3.7 ± 1.7	3.8 ± 1.8
	合计	86.0 ± 34.3	80.7 ± 35.4	83.3 ± 34.7
糖类化合物/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$	半乳聚糖	5.4 ± 4.5	5.1 ± 2.9	5.2 ± 3.7
	脱水糖			
	甘露聚糖	4.8 ± 3.4	4.4 ± 2.9	4.6 ± 3.1
	左旋葡聚糖	46.7 ± 32.8	47.1 ± 39.3	46.9 ± 35.9
	糖			
	葡萄糖	5.4 ± 2.7	4.1 ± 2.1	4.8 ± 2.5
	果糖	4.3 ± 1.7	3.0 ± 1.8	3.7 ± 1.9
	蔗糖	2.1 ± 2.0	0.8 ± 0.7	1.5 ± 1.7
	海藻糖	1.0 ± 0.8	0.7 ± 0.5	0.9 ± 0.7
	糖醇			
	阿糖醇	2.1 ± 1.1	2.2 ± 1.1	2.1 ± 1.1
	甘露醇	3.0 ± 2.0	3.0 ± 2.5	3.0 ± 2.2
	肌醇	0.7 ± 0.4	0.6 ± 0.5	0.7 ± 0.5
	糖醇	5.8 ± 1.2	5.9 ± 1.2	5.8 ± 1.2
	合计	75.6 ± 44.7	71.1 ± 49.2	73.4 ± 46.6

表 2 泰安市夏季 PM_{2.5}、正构烷烃和糖类化合物
昼夜质量浓度差异的 *t* 检验

Table 2 Paired sample *t* test for the diurnal differences in
concentrations of PM_{2.5}, *n*-alkanes, and sugars in Taian City

化合物	<i>P</i>	化合物	<i>P</i>
PM _{2.5}	0.334	脱水糖	0.975
低分子量烷烃	0.589	糖	0.956
高分子量烷烃	0.518	糖类	0.993
正构烷烃	0.514		

2.2 正构烷烃的污染特征

如表 1 所示,本研究共检测到 19 种正构烷烃 (*n*-alkanes),其碳数组成为 C₁₈ ~ C₃₆,质量浓度变化范围为 19.3 ~ 166.5 ng·m⁻³,平均浓度值为 (83.3 ± 34.7) ng·m⁻³. 白天正构烷烃的质量浓度 [(86.0 ± 34.3) ng·m⁻³] 略高于夜间 [(80.7 ± 35.5) ng·m⁻³] (*t* 检验, *P* > 0.05),但昼夜变化特征不明显. 其中,非雨天采样期间正构烷烃质量浓度

表 3 泰安市 2016 年夏季 PM_{2.5} 与同期其他城市的对比/μg·m⁻³

Table 3 Comparison on mass concentrations of PM_{2.5} in Taian City with other cities during summer, 2016/μg·m⁻³

采样点	采样日期(年-月-日)	白天	夜间	均值
北京	2016-07-22 ~ 2016-08-19	60.8 ± 39.9	57.7 ± 28.3	59.2 ± 29.1
石家庄	2016-07-22 ~ 2016-08-19	42.3 ± 28.3	35.9 ± 30.5	39.1 ± 27.4
太原	2016-07-22 ~ 2016-08-19	43.7 ± 19.8	39.9 ± 16.6	41.8 ± 16.5
济南	2016-07-22 ~ 2016-08-19	46.0 ± 21.1	42.4 ± 12.9	44.2 ± 14.4
南京	2016-07-22 ~ 2016-08-19	28.8 ± 12.4	29.9 ± 13.4	29.4 ± 12.0
上海	2016-07-22 ~ 2016-08-19	27.0 ± 16.7	23.2 ± 16.8	25.1 ± 16.1
广州	2016-07-22 ~ 2016-08-19	29.4 ± 15.8	31.3 ± 16.3	30.3 ± 14.5
泰安	2016-07-22 ~ 2016-08-19	39.5 ± 12.7	35.2 ± 9.9	37.2 ± 11.5
泰安	2015-07-22 ~ 2015-08-19	42.3 ± 17.5	39.9 ± 18.2	41.1 ± 17.9

[(86.7 ± 36.8) ng·m⁻³] 高于雨天的质量浓度 [(72.6 ± 30.7) ng·m⁻³],这是因为雨天湿沉降的去除作用致使正构烷烃浓度降低. 通过将泰安市夏季正构烷烃的质量浓度与我国夏季其他城市对比发现(表 4),泰安市正构烷烃的浓度低于北京、天津和唐山等北方城市,但高于南京、上海和三亚等南方城市. 另外,泰安市正构烷烃的浓度是三亚的 14.6

倍,是大陆背景点(青海湖)的 12.8 倍. 但是,泰安市正构烷烃的浓度低于泰山的夏季(2006 年 5 ~ 6 月,表 4),这是因为泰山夏季的正构烷烃受周边低海拔地区生物质燃烧的影响,且降雨量很小,致使泰山正构烷烃的浓度较高. 以上对比结果表明,泰安市夏季 PM_{2.5} 中正构烷烃的质量浓度在我国处于较高污染水平.

表 4 泰安市夏季正构烷烃与其他城市的对比

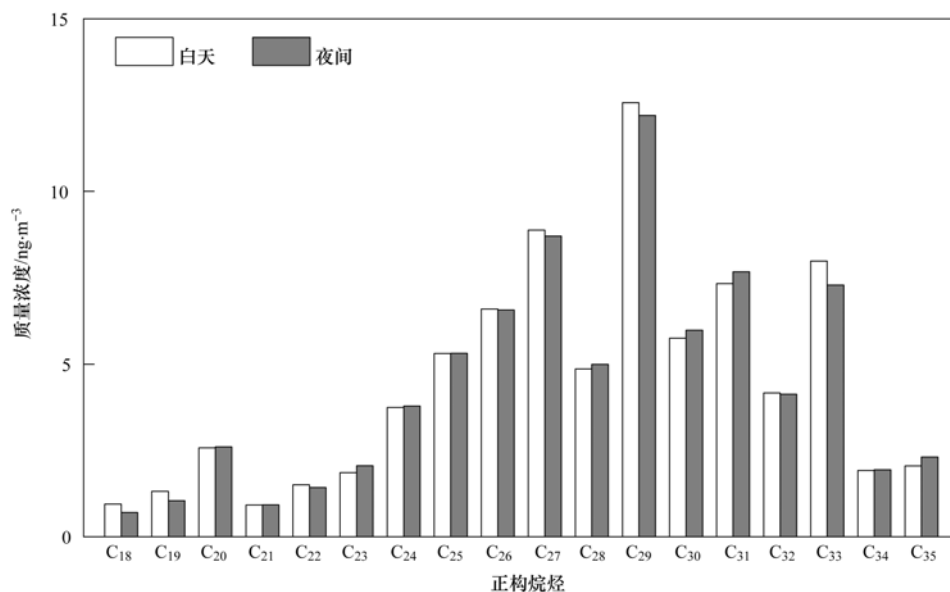
Table 4 Comparison of concentrations of *n*-alkanes during summer in Taian City with those in other cities

采样点	采样时间(年-月-日)	质量浓度/ng·m ⁻³	CPI	%WaxC _n	文献
北京	2004-06 ~ 2004-07	105.4	3.98	59.1	[22]
天津	2007-07	107.2	1.03	26.1	[23]
唐山	2011-06 ~ 2011-08	367.8	1.29	25.7	[24]
郑州	2015-07	89.0	1.3	18	[25]
南京	2014-06-24 ~ 2014-07-10	25.6	1.73	49.3	[26]
上海	2014-06-24 ~ 2014-07-10	26.3	1.42	41.1	[26]
三亚	2013-06-06 ~ 2013-07-25	5.7	1.20	14.2	[27]
广州	2012-06 ~ 2012-08	26.2	1.10	12.0	[28]
青海湖	2010-07-03 ~ 2010-08-26	6.5	4.10	— ¹⁾	[29]
泰山	2006-05-28 ~ 2006-06-28	178	4.52	—	[30]
泰山	2006-06-02 ~ 2006-06-05	199	3.90	—	[31]
泰安	2016-07-22 ~ 2017-08-19	83.3	1.83	49.7	本研究

1) “—”表示文章没有相关数据

有研究表明^[29],陆生植物蜡排放的正构烷烃以高分子量(high molecular weight, HMW) 烷烃(C₂₆ ~ C₃₆) 为主,而且奇数碳烷烃与偶数碳相比占绝对优势;化石燃料燃烧产生的正构烷烃以低分子量(low molecular weight, LMW) 烷烃(C₁₈ ~ C₂₅) 为主,且无明显碳烷烃优势. 因此,主峰碳的分布特征常被用于

区分生物源和人为源. 如图 3 所示,泰安市夏季正构烷烃碳数呈单峰后峰型分布,在 C₂₉ 和 C₃₁ 处达到峰值,在 C₂₇ ~ C₃₅ 分子组成中奇数碳占优势. HMW 正构烷烃(C₂₆ ~ C₃₆) 质量浓度占总正构烷烃浓度的 54.33% ~ 94.58%,表明生物源较人为源对泰安地区正构烷烃的贡献更显著. 另外,碳优势指数(carbon

图3 泰安市夏季PM_{2.5}中正构烷烃的昼夜质量浓度Fig. 3 Diurnal concentrations of *n*-alkanes in PM_{2.5} during summer in Taian City

preference index, CPI) 是奇数碳正构烷烃浓度之和与偶数碳正构烷烃浓度之和的比值, 被作为评估人为源和生物源对污染物贡献强度的重要参考指标. 当 CPI 接近于 1 时, 表征正构烷烃主要来自化石燃料燃烧和生物质燃烧等人为排放源; 当 $1 < \text{CPI} < 3$ 时, 表征正构烷烃受生物源 (如高等植物活动、细菌) 和人为源 (如化石燃料、机动车尾气) 的共同影响; 而生物源的贡献率随 CPI 值的增加而增加^[11]. 泰安市夏季 CPI 值的变化为 1.26 ~ 2.23, 平均值为 1.83, 表明泰安市 PM_{2.5} 中的正构烷烃受生物源与人为源的共同影响. 由表 4 可知, 泰安市 CPI 值明显低于青海湖地区 (4.1)、泰山地区 (5 月 28 日 ~ 6 月 28 日: 4.52, 6 月 2 日 ~ 6 月 5 日: 3.90) 及北京 (3.98), 但高于天津 (1.03)、三亚 (1.20)、广州 (1.10) 和上海 (1.42) 等城市地区. 另外, 泰安市夏季 CPI 值与南京 (1.73) 相当, 南京夏季的正构烷烃主要来自植物蜡源的排放. 由此可以得出, 泰安市夏季正构烷烃受植物蜡源的影响相较于人为源更大.

为定量分析高等植物蜡源对正构烷烃的贡献率, 使用植物蜡排放的正构烷烃对总正构烷烃的贡献率 (%WaxC_n) 进一步分析, 其计算公式如式 (4) 所示:

$$\% \text{WaxC}_n = \frac{C_n - 0.5(C_{n-1} + C_{n+1})}{C_n} \times 100\% \quad (4)$$

式中, C_n 为植物蜡正构烷烃浓度 (n 为奇数), C_{n-1} 和 C_{n+1} 为 C_n 左右相邻正构烷烃的浓度.

当 %WaxC_n 为负值时记为 0. 植物蜡正构烷烃的贡献率越高, 则表明生物源贡献越大. 泰安市植物蜡

正构烷烃的质量浓度为 $(66.5 \pm 29.8) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 由式 (4) 得到 %WaxC_n 范围为 34.7% ~ 69.4%, 均值为 49.7%. 如表 4 所示, 本研究植物蜡正构烷烃的贡献率明显高于天津 (26.1%)、唐山 (25.7%) 和广州 (12.0%), 与南京植物蜡贡献率 (49.3%) 相当. 泰安市具有“国家森林城市”的称号, 绿化率达 44.67%, 而且夏季温度较高且太阳辐射较强, 植物生长很旺盛, 释放出的植物蜡较多. 因此可以得出, 泰安市夏季正构烷烃受植物蜡源的影响较大, 而受人为源的影响较小.

2.3 糖类化合物的污染特征

如表 1 所示, 泰安市夏季 PM_{2.5} 中共检测出 10 种糖类化合物. 糖类化合物总浓度变化范围为 $9.4 \sim 247.1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 均值为 $(73.4 \pm 46.6) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 低于西安 ($420.2 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[14]、上海 ($267.5 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[32]、禹城 (白天: $177.9 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$; 夜间: $226.97 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[33], 但高于美国 ($52.4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[10]、北京 ($30.3 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[34]、韩国济州岛 ($47 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[35]. 另外, 泰安市夏季糖类物质的总浓度是青海湖 ($6.5 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[29] 地区的 11.2 倍, 表明泰安市糖类污染较严重. 但是, 泰安市夏季糖类物质的总浓度仅为泰山 2006 年夏季 (5 月 28 日 ~ 6 月 28 日: $720 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 6 月 2 日 ~ 6 月 5 日: $706 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$) 的 1/10^[30, 31], 表明生物质燃烧活动在泰安及其周边地区在急剧下降.

泰安市夏季 PM_{2.5} 中糖类昼夜质量浓度如图 4 所示, 昼夜变化特征不显著 (t 检验, $P > 0.05$). 无论在白天还是晚上, 左旋葡聚糖是脱水糖类化合物中质量浓度最高的组分, 占总糖浓度的 64.0%, 其次为

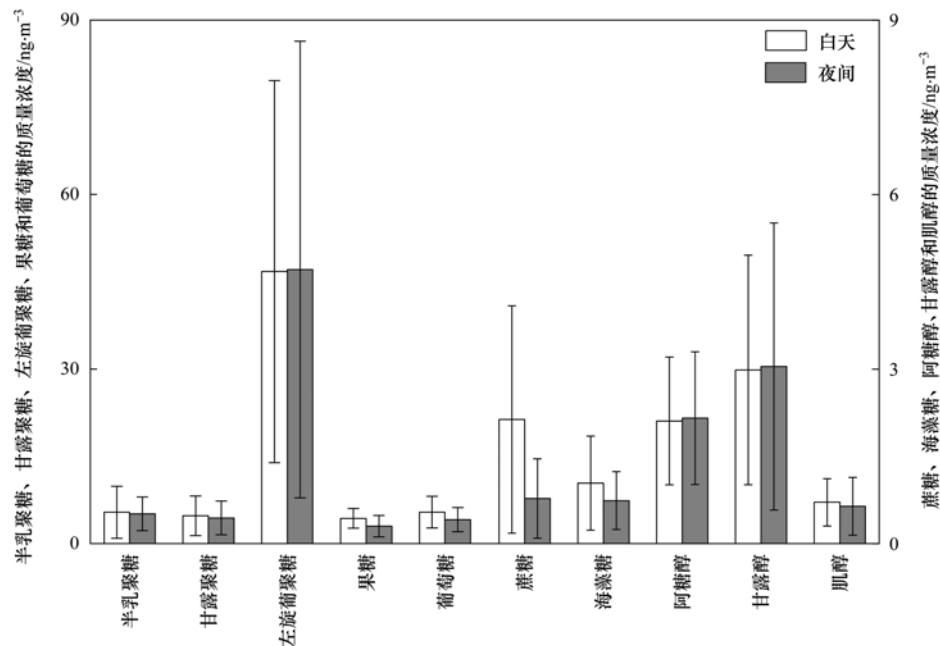


图4 泰安市夏季PM_{2.5}中糖类化合物的昼夜质量浓度

Fig. 4 Diurnal concentrations of sugars in PM_{2.5} during summer in Taian City

半乳聚糖和甘露聚糖,分别占总糖浓度的7.1%和6.3%。Simoneit等^[36]和Engling等^[37]认为左旋葡聚糖、半乳聚糖和甘露聚糖是生物质燃烧的示踪物。由外场检测^[38]和烟雾箱实验^[39]结果可知,左旋葡聚糖可与羟基自由基($\cdot\text{OH}$)在液相中发生氧化反应形成高分子量化合物,但与碳同位素和 K^+ 等生物质燃烧示踪剂相比,左旋葡聚糖作为纤维素燃烧裂解的产物,其化学性质非常稳定,且不能在化石燃料燃烧过程和微生物活动中形成,因此左旋葡聚糖可被作为较理想且被广泛使用的生物质燃烧示踪物。另外,半乳聚糖和甘露聚糖作为纤维素/半纤维素热解的产物,也可作为生物质燃烧示踪剂^[40]。因此,左旋葡聚糖、半乳聚糖和甘露聚糖三者之间的相关性很强($R>0.8$, $P<0.01$,表5)。

糖是植物储藏、累积和运输糖分的主要形

式^[41]。本研究中的糖由果糖、葡萄糖、蔗糖和海藻糖组成。果糖和葡萄糖是陆生植物中常见的单糖,质量浓度分别为 $(3.7\pm1.9)\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(4.8\pm2.5)\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,主要来自于植物叶片表层剥蚀脱落物、植物花粉及土壤微生物^[40]。由葡萄糖与左旋葡聚糖、半乳聚糖和甘露聚糖的相关系数(R^2 分别为0.61、0.56和0.64)可知,生物质燃烧对葡萄糖也有一定贡献。蔗糖和海藻糖是颗粒物中主要的二糖,质量浓度分别为 $(1.5\pm1.7)\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(0.9\pm0.7)\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 。蔗糖与植物花粉释放和农业活动有关,主要通过土壤的再悬浮作用进入大气,常被作为土壤再悬浮的示踪物^[36,42]。由图4可知,葡萄糖、果糖和蔗糖的白天质量浓度高于夜间,与Graham等^[43]的研究结果一致,这是因为白天能释放更多的花粉和蕨类等气溶胶。海藻糖是化学性质最稳定的非还原

表5 泰安市夏季PM_{2.5}中糖类组分的相关系数矩阵¹⁾

Table 5 Correlation analysis of sugars in PM_{2.5} during summer inTaian City

	半乳聚糖	甘露聚糖	左旋葡聚糖	果糖	葡萄糖	蔗糖	海藻糖	阿糖醇	甘露醇	肌醇	总糖
半乳聚糖	1.00										
甘露聚糖	0.84**	1.00									
左旋葡聚糖	0.86**	0.84**	1.00								
果糖	0.46**	0.51**	0.48**	1.00							
葡萄糖	0.56**	0.64**	0.61**	0.70**	1.00						
蔗糖	0.07	0.18	0.20	0.64**	0.55**	1.00					
海藻糖	0.28*	0.33*	0.27*	0.56**	0.71**	0.66**	1.00				
阿糖醇	0.51**	0.52**	0.56**	0.59**	0.76**	0.36**	0.62**	1.00			
甘露醇	0.25	0.23	0.19	0.38**	0.57**	0.29*	0.61**	0.67**	1.00		
肌醇	0.45**	0.48**	0.43**	0.80**	0.57**	0.46**	0.60**	0.53**	0.34**	1.00	
总糖	0.88**	0.88**	0.98**	0.59**	0.72**	0.30*	0.40**	0.68**	0.32*	0.53**	1.00

1) **表示在0.01级别(双尾)上相关性显著; *表示在0.05级别(双尾)上相关性显著

性糖,广泛存在于真菌、细菌和酵母等微生物及一些高等植物和无脊椎动物中,常被作为土壤悬浮颗粒的示踪剂^[7].阿糖醇和甘露醇在真菌孢子中含量丰富,与葡萄糖和海藻糖的相关性($R > 0.5$),说明土壤悬浮颗粒是其主要来源.肌醇与果糖的相关性高达 0.80,表明肌醇与果糖的来源相似,即植物源.

2.4 正构烷烃及糖类化合物的来源解析

2.4.1 PCA-MLR 模型

为探究泰安市夏季 $PM_{2.5}$ 中正构烷烃及糖类化合物的来源,运用 PCA-MLR 模型对其进行分析.如表 6 所示,经过筛选测试,PCA 结果共提取 4 个主成分.在主成分 1 中, $C_{26} \sim C_{36}$ 具有较高的载荷值 (>0.6),因为 HMW 正构烷烃主要来自于高等植物蜡排放,所以主成分 1 表征植物蜡排放源.在主成分 2 中,LMW 正构烷烃 ($C_{18} \sim C_{25}$)、脱水糖(半乳聚糖、甘露聚糖、左旋葡聚糖)和葡萄糖具有较高的载荷值 (>0.5), $C_{18} \sim C_{25}$ 主要来源于化石燃料燃烧,而脱水糖和部分葡萄糖则来自于生物质燃烧,且 LMW 烷烃与左旋葡聚糖存在一定相关性(图 5, $R^2 > 0.5$),因此主成分 2 表征化石燃料燃烧和生物质燃烧的混合源.在主成分 3 中,蔗糖、果糖、葡萄糖和肌醇具有较高的因子载荷值 (>0.5).蔗糖是植物韧皮部的主要糖分,在发芽过程中起着重要的作用,被认为是花粉的示踪剂^[40],广泛储存于植物体内.葡萄糖是植物树皮和叶子中主要的水溶性碳水化合物,肌醇可以从植物碎屑物和花粉中释放出来^[35,44],因此主成分 3 表征植物花粉和碎屑物.海藻糖、阿糖醇和甘露醇在主成分 4 中具有较高的载荷值 (≥ 0.7),海藻糖被认为是沙尘传输及土壤悬浮颗粒的重要分子示踪物^[45],说明该因子主要来自土壤粉尘源.

为定量分析各来源对正构烷烃及糖类化合物的贡献率,将表 6 中的因子得分作为自变量,将标准化后的化合物总浓度作为因变量,利用 SPSS 进行多元线性回归 (MLR),得出回归方程,如式(5)所示:

$$Z_1 = 0.713F_1 + 0.390F_2 + 0.233F_3 + 0.187F_4$$

$(R^2 = 0.89)$

(5)

式中, F_i 为源 i 的因子得分变量,再利用式(3)求得最终源贡献率.

PCA-MLR 模型结果表明,泰安市夏季 $PM_{2.5}$ 中正构烷烃和糖类和化合物污染源主要来自于植物蜡、化石燃料燃烧和生物质燃烧,贡献率分别为 46.8% 和 25.6%.植物花粉和碎屑物源及土壤沙尘源对 $PM_{2.5}$ 的贡献相对较小,贡献率分别为 15.3% 和 12.1%.

表 6 泰安市夏季 $PM_{2.5}$ 中正构烷烃和糖类的主成分分析

Table 6 Principal component analysis (PCA) of n -alkanes and sugars in $PM_{2.5}$ during summer in Taian City

项目	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
C_{18}	0.01	0.80	0.23	0.33
C_{19}	0.20	0.82	0.23	0.20
C_{20}	0.16	0.76	0.49	0.08
C_{21}	0.37	0.73	0.36	0.03
C_{22}	0.18	0.91	0.14	0.19
C_{23}	0.31	0.69	0.31	-0.05
C_{24}	0.42	0.75	0.26	-0.12
C_{25}	0.65	0.73	0.45	-0.09
C_{26}	0.64	0.55	0.24	-0.02
C_{27}	0.94	0.33	0.34	0.19
C_{28}	0.89	0.49	0.16	-0.12
C_{29}	0.89	0.17	0.02	0.09
C_{30}	0.87	0.18	0.23	0.08
C_{31}	0.94	0.11	0.08	0.09
C_{32}	0.95	0.05	0.18	0.08
C_{33}	0.80	-0.12	0.10	0.19
C_{34}	0.96	0.06	0.09	0.11
C_{35}	0.87	0.21	0.29	0.13
C_{36}	0.83	0.46	0.39	0.04
半乳聚糖	0.22	0.87	0.12	0.21
甘露聚糖	0.09	0.85	0.16	0.28
左旋葡聚糖	0.19	0.87	0.14	0.21
果糖	0.29	0.25	0.68	0.42
葡萄糖	0.08	0.54	0.72	0.32
蔗糖	0.02	-0.15	0.91	0.44
海藻糖	0.01	0.09	0.46	0.82
阿糖醇	0.17	0.42	0.19	0.70
甘露醇	0.11	0.09	-0.07	0.85
肌醇	0.26	0.38	0.59	0.22
累计贡献方差/%	43.8	65.4	80.9	92.7
来源	植物蜡	化石燃料燃烧 + 生物质燃烧	植物花粉和碎屑物	土壤粉尘
贡献率/%	46.8	25.6	15.3	12.1

1) 黑体字表示绝对值大于 0.5 的数据

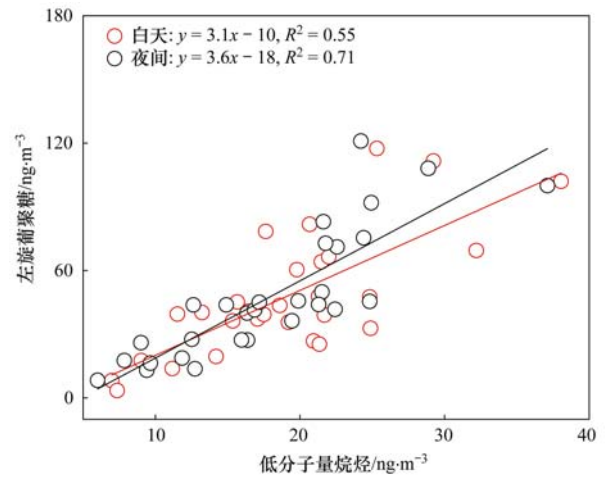


图 5 低分子量烷烃与左旋葡聚糖相关性分析
Fig. 5 Correlation analysis of low-molecular-weight (LMW) n -alkanes and levoglucosan

2.4.2 后向轨迹分析

为探讨风及大气扩散等引起的气团传输对泰安市 PM_{2.5} 及有机化合物组分的影响,本研究利用 HYSPLIT4.0 模型和 TrajStat 软件进行后向轨迹分析(图 6). Andreae^[46] 指出大气中气溶胶的存在周期约为 3~10 d,因此本研究选取的后向反演时间为 72 h,高度为 500 m.由图 6 可知,采样期间到达泰安市的气团共分为 3 类,分别占总气团的 39.7%、36.2% 和 24.1%.气团 1 起源于湖北,经河南、安徽及山东省(菏泽、济宁)达到泰安,正构烷烃和糖类的质量浓度分别为 74.4 ng·m⁻³ 和 72.4 ng·m⁻³;气团 2 起源于山东省东偏南地区,经青岛、日照和临沂到达泰安,正构烷烃和糖类的质量浓度分别为 96.6 ng·m⁻³ 和 88.2 ng·m⁻³;气团 3 起源于我国东南黄海海域,经江苏中北部及山东省南部到达泰安,正构烷烃和糖类的质量浓度分别为 76.8 ng·m⁻³ 和 49.9 ng·m⁻³.气团 2 中正构烷烃的浓度分别为气团 1 和气团 3 的 1.29 倍、1.26 倍,气团 1 和气团 3 质量浓度相似[图 7(a)],说明泰安市正构烷烃主要受山东省本地源的影响.气团 2 中糖类化合物的浓度分别为气团 1 和气团 3 的 1.22 倍、1.77 倍,而左

旋葡聚糖的相对含量在 3 个气团中均较高(>59.7%)且差异较小[图 7(b)],说明受山东本地源生物质燃烧的影响较大.从总体上来说,泰安市正构烷烃和糖类污染物主要来自山东本地源,显示出小范围、短距离运输的特点;其次为南方内陆地区,途径地区城市数量多,为中短途距离传输;而东南方向气团长距离传输的影响较小,主要为来自海洋地区的清洁气团.

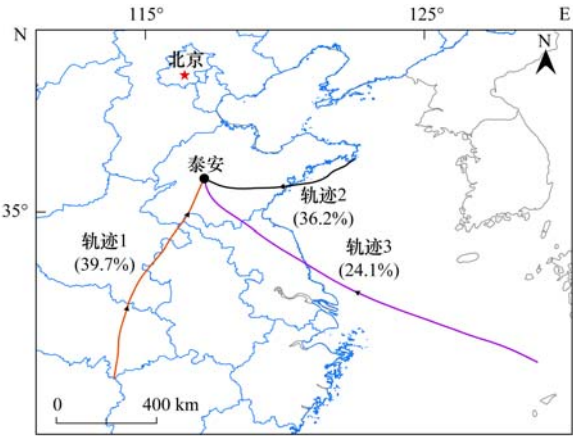


图 6 泰安市夏季 72 h 后向轨迹
Fig. 6 The 72 h backward trajectory in Taian City during summer

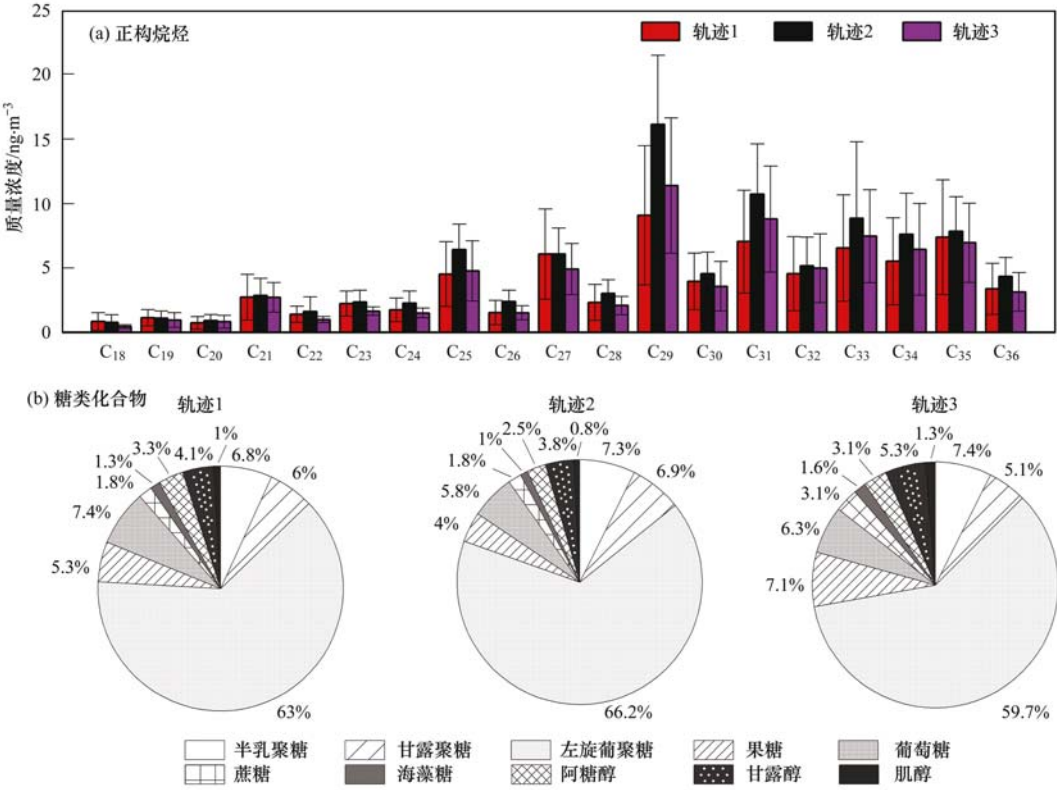


图 7 后向轨迹分析中正构烷烃和糖类化合物的组成差异

Fig. 7 Difference in compositions of *n*-alkanes and sugars in the backward trajectory analysis

3 结论

(1) 泰安市夏季 PM_{2.5} 质量浓度是国家一级标

准的 1.1 倍,有 18 d 超过国家一级标准,超标率为 62%.采样期间有 12.5 d 为降雨天,晴天 PM_{2.5} 质量浓度是雨天浓度的 1.5 倍,表明湿沉降对 PM_{2.5} 有明

显的去除作用。

(2) 正构烷烃碳数范围为 $C_{18} \sim C_{36}$, HMW 正构烷烃具有明显奇偶优势, C_{max} 为 C_{29} 和 C_{30} , CPI 值为 1.83, %Wax C_n 均值为 49.7%, 表明正构烷烃受植物蜡源的影响相较于人为源更大。

(3) 在泰安市检测到的 8 种糖类化合物中, 脱水糖占总糖的 77.4%, 左旋葡聚糖占比 (64.0%) 最高, 其次为半乳聚糖 (7.1%) 和甘露聚糖 (6.3%), 表明生物质燃烧是糖类化合物的主要来源。

(4) 由 PCA-MLR 模型结果可知, 泰安市正构烷烃和糖类主要来自于植物蜡排放、化石燃料燃烧和生物质燃烧, 贡献率分别为 46.8% 和 25.6%, 而植物源和土壤粉尘源的贡献率相对较低, 分别为 15.3% 和 12.1%。后向轨迹结果表明, 泰安市夏季主要受山东省本地源和南方内陆地区气团传输的影响。

参考文献:

- [1] Jacobson M C, Hansson H C, Noone K J, *et al.* Organic atmospheric aerosols: review and state of the science [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, **38**(2): 267-294.
- [2] An Z S, Huang R J, Zhang R Y, *et al.* Severe haze in northern China: a synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(18): 8657-8666.
- [3] Shivani R G, Sharma S K, Mandal T K, *et al.* Levels and sources of organic compounds in fine ambient aerosols over national capital region of India [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(31): 31071-31090.
- [4] Li J J, Wang G H, Wu C, *et al.* Characterization of isoprene-derived secondary organic aerosols at a rural site in North China Plain with implications for anthropogenic pollution effects [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 535.
- [5] Saxena P, Hildemann L M. Water-soluble organics in atmospheric particles: a critical review of the literature and application of thermodynamics to identify candidate compounds [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1996, **24**(1): 57-109.
- [6] Alves C, Vicente A, Pio C, *et al.* Organic compounds in aerosols from selected European sites-Biogenic *versus* anthropogenic sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **59**: 243-255.
- [7] 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 等. 聊城市冬季 $PM_{2.5}$ 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 548-557.
Liu X D, Meng J J, Hou Z F, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of *n*-alkanes and saccharides in $PM_{2.5}$ during the winter in Liaocheng City [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 548-557.
- [8] 李宏姣. CAREBEIJING-NCP 观测期间北京市典型城区大气细粒子中有机化合物的污染特征 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Li H J. Pollution characteristics of organic compounds in $PM_{2.5}$ during 2013 CAREBEIJING-NCP campaign in a Typical urban area of Beijing [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [9] Kanakidou M, Seinfeld J H, Pandis S N, *et al.* Organic aerosol and global climate modelling: a review [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(4): 1053-1123.
- [10] Jia Y L, Clements A L, Fraser M P. Saccharide composition in atmospheric particulate matter in the southwest US and estimates of source contributions [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2010, **41**(1): 62-73.
- [11] 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 等. 上海夏季 $PM_{2.5}$ 中有机物的组分特征、空间分布和来源 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 1978-1986.
Gao Y Q, Wang H L, Jing S A, *et al.* Chemical characterization, spatial distribution, and source identification of organic matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 1978-1986.
- [12] Xing L, Wu J R, Elser M, *et al.* Wintertime secondary organic aerosol formation in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH): contributions of HONO sources and heterogeneous reactions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(4): 2343-2359.
- [13] Wang J Z, Ho S S H, Ma S X, *et al.* Characterization of $PM_{2.5}$ in Guangzhou, China: uses of organic markers for supporting source apportionment [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **550**: 961-971.
- [14] Wang X, Shen Z X, Liu F B, *et al.* Saccharides in summer and winter $PM_{2.5}$ over Xi'an, northwestern China: sources, and yearly variations of biomass burning contribution to $PM_{2.5}$ [J]. *Atmospheric Research*, 2018, **214**: 410-417.
- [15] Gao X M, Yang L X, Cheng S H, *et al.* Semi-continuous measurement of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ in Jinan, China: temporal variations and source apportionments [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(33): 6048-6056.
- [16] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 5131-5153.
- [17] Liu B S, Song N, Dai Q L, *et al.* Chemical composition and source apportionment of ambient $PM_{2.5}$ during the non-heating period in Taian, China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **170**: 23-33.
- [18] 杨佳美, 刘保双, 毕晓辉, 等. 泰安市环境受体 $PM_{2.5}$ 组分特征与来源解析 [J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(9): 153-160.
Yang J M, Liu B S, Bi X H, *et al.* Chemical composition characteristics and source apportionment of ambient $PM_{2.5}$ in Tai'an [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(9): 153-160.
- [19] Meng J J, Wang G H, Li J J, *et al.* Seasonal characteristics of oxalic acid and related SOA in the free troposphere of Mt. Hua, central China: implications for sources and formation mechanisms [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **493**: 1088-1097.
- [20] 耿天召, 童欢欢, 赵旭辉, 等. 江淮地区湿沉降对颗粒物清除能力的影响 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(2): 273-283.
Geng T Z, Tong H H, Zhao X H, *et al.* Effect of wet deposition on the removal efficiency of particulate matter in the Yangtze-Huaihe region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(2): 273-283.
- [21] Niu Y W, Li X L, Pu J Q, *et al.* Organic acids contribute to rainwater acidity at a rural site in eastern China [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2018, **11**(4): 459-469.
- [22] Duan F K, He K B, Liu X D. Characteristics and source identification of fine particulate *n*-alkanes in Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(7): 998-1005.
- [23] Li W F, Peng Y, Bai Z P. Distributions and sources of *n*-alkanes in $PM_{2.5}$ at urban, industrial and coastal sites in Tianjin, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(10): 1551-

- 1557.
- [24] 程玲珑, 李杏茹, 徐小娟, 等. 唐山市大气气溶胶中正构烷烃污染特征及来源分析[J]. 环境化学, 2016, **35**(9): 1808-1814.
- Cheng L L, Li X R, Xu X J, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of *n*-alkanes in atmospheric aerosol of Tangshan [J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(9): 1808-1814.
- [25] Wang Q, Jiang N, Yin S S, *et al.* Carbonaceous species in PM_{2.5} and PM₁₀ in urban area of Zhengzhou in China: seasonal variations and source apportionment[J]. Atmospheric Research, 2017, **191**: 1-11.
- [26] Hong Z Y, Hong Y W, Zhang H, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of PM_{2.5}-Bound *n*-Alkanes in the Yangtze River Delta, China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(8): 1985-1998.
- [27] Wang J Z, Ho S S H, Cao J J, *et al.* Characteristics and major sources of carbonaceous aerosols in PM_{2.5} from Sanya, China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **530-531**: 110-119.
- [28] Wang Q Q, Feng Y M, Huang X H H, *et al.* Nonpolar organic compounds as PM_{2.5} source tracers: Investigation of their sources and degradation in the Pearl River Delta, China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, **121**(19): 11862-11879.
- [29] Li J J, Wang G H, Wang X M, *et al.* Abundance, composition and source of atmospheric PM_{2.5} at a remote site in the Tibetan Plateau, China [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2013, **65**(1): 20281.
- [30] Fu P Q, Kawamura K, Okuzawa K, *et al.* Organic molecular compositions and temporal variations of summertime mountain aerosols over Mt. Tai, North China Plain [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, **113** (D19): D19107, doi: 10.1029/2008jd009900.
- [31] Fu P Q, Kawamura K, Chen J, *et al.* Diurnal variations of organic molecular tracers and stable carbon isotopic compositions in atmospheric aerosols over Mt. Tai in North China Plain: an influence of biomass burning [J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2012, **12**(4): 9079-9124.
- [32] Xiao M X, Wang Q Z, Qin X F, *et al.* Composition, sources, and distribution of PM_{2.5} saccharides in a Coastal Urban Site of China[J]. Atmosphere, 2018, **9**(7): 274.
- [33] 李杏茹, 李东, 刁贺玲, 等. 山东禹城夏季 PM_{2.5} 中碳质组分污染特征[J]. 环境化学, 2017, **36**(10): 2194-2205.
- Li X R, Li D, Diao H L, *et al.* Pollution characteristics of carbonaceous components in summer PM_{2.5} in Yucheng, Shandong province [J]. Environmental Chemistry, 2017, **36** (10): 2194-2205.
- [34] Kang M J, Ren L J, Ren H, *et al.* Primary biogenic and anthropogenic sources of organic aerosols in Beijing, China: insights from saccharides and *n*-alkanes [J]. Environmental Pollution, 2018, **243**: 1579-1587.
- [35] Fu P Q, Kawamura K, Kobayashi M, *et al.* Seasonal variations of sugars in atmospheric particulate matter from Gosan, Jeju Island: Significant contributions of airborne pollen and Asian dust in spring[J]. Atmospheric Environment, 2012, **55**: 234-239.
- [36] Simoneit B R T, Elias V O, Kobayashi M, *et al.* Sugars-dominant water-soluble organic compounds in soils and characterization as tracers in atmospheric particulate matter[J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38** (22): 5939-5949.
- [37] Engling G, Lee J J, Tsai Y W, *et al.* Size-resolved anhydrosugar composition in smoke aerosol from controlled field burning of rice straw[J]. Aerosol Science and Technology, 2009, **43**(7): 662-672.
- [38] Mochida M, Kawamura K, Fu P Q, *et al.* Seasonal variation of levoglucosan in aerosols over the western North Pacific and its assessment as a biomass-burning tracer [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(29): 3511-3518.
- [39] Hoffmann D, Tilgner A, Iinuma Y, *et al.* Atmospheric stability of levoglucosan: a detailed laboratory and modeling study [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(2): 694-699.
- [40] Fu P Q, Zhuang G S, Sun Y L, *et al.* Molecular markers of biomass burning, fungal spores and biogenic SOA in the Taklimakan desert aerosols [J]. Atmospheric Environment, 2016, **130**: 64-73.
- [41] 梁林林, Engling G, 段凤魁, 等. 北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 3935-3942.
- Liang L L, Engling G, Duan F K, *et al.* Composition and source apportionments of saccharides in atmospheric particulate matter in Beijing[J]. Environmental Science, 2015, **36** (11): 3935-3942.
- [42] Dahlman L, Persson J, Näsholm T, *et al.* Carbon and nitrogen distribution in the green algal lichens *Hypogymnia physodes* and *Platismatia glauca* in relation to nutrient supply [J]. Planta, 2003, **217**(1): 41-48.
- [43] Graham B, Mayol-Bracero O L, Guyon P, *et al.* Water-soluble organic compounds in biomass burning aerosols over Amazonia I. Characterization by NMR and GC-MS[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2002, **107** (D20): 8047, doi: 10.1029/2001JD000336.
- [44] Verma S K, Kawamura K, Chen J, *et al.* Thirteen years of observations on primary sugars and sugar alcohols over remote Chichijima Island in the western North Pacific[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(1): 81-101.
- [45] Rogge W F, Medeiros P M, Simoneit B R T. Organic marker compounds in surface soils of crop fields from the San Joaquin Valley fugitive dust characterization study [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(37): 8183-8204.
- [46] Andreae M O. Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels[J]. World Survey of Climatology, 1995, **16**: 347-398.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvio-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)