

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



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
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	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)
《环境科学》征订启事 (547)	
《环境科学》征稿简则 (828)	
信息 (581, 933, 952)	

聊城市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析

刘晓迪¹, 孟静静^{1,2*}, 侯战方^{1,2}, 衣雅男¹, 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)

摘要: 为研究聊城市冬季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中正构烷烃和糖类化合物的分子组成、浓度水平及来源, 于2017年1~2月在聊城大学进行 $\text{PM}_{2.5}$ 样品采集, 对19种 ($\text{C}_{18} \sim \text{C}_{36}$) 正构烷烃和10种糖类化合物进行分析, 并采用主成分分析法 (PCA) 解析其来源。结果表明, 聊城市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中总正构烷烃的质量浓度为 $(456.9 \pm 252.5) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中, 灰霾期的质量浓度最高, 约为清洁天的2倍, 烟火 I 期与 II 期分别为清洁天的0.9倍和1.2倍。采样期间碳优势指数 (CPI) 值为 1.2 ± 0.1 , 植物蜡排放的正构烷烃对总正构烷烃的贡献率 (% Wax C_n) 为 3.1% ~ 36.0%, 表明化石燃料燃烧是聊城市大气中正构烷烃的主要来源。聊城市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中糖类化合物的总质量浓度为 $(415.5 \pm 213.8) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中左旋葡聚糖的浓度最高, 其次是半乳聚糖和甘露聚糖, 三者共占总糖的91.6%, 表明生物质燃烧源对聊城市大气气溶胶具有重要贡献。主成分分析 (PCA) 结果表明, 聊城市冬季大气气溶胶中正构烷烃和糖类化合物主要来自化石燃料的燃烧和生物质燃烧。

关键词: 正构烷烃; 糖类; 烟花爆竹; 聊城市; $\text{PM}_{2.5}$

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0548-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807132

Pollution Characteristics and Source Analysis of *n*-alkanes and Saccharides in $\text{PM}_{2.5}$ During the Winter in Liaocheng City

LIU Xiao-di¹, MENG Jing-jing^{1,2*}, HOU Zhan-fang^{1,2}, YI Ya-nan¹, 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)

Abstract: To investigate molecular composition, mass concentrations, and sources of *n*-alkanes and sugars which are adsorbed in ambient particulate matters in Liaocheng City during winter, $\text{PM}_{2.5}$ samples were collected from January 17 to February 15, 2017 at Liaocheng University. 19 kinds ($\text{C}_{18} \sim \text{C}_{36}$) of *n*-alkanes and 10 kinds of sugars were determined using GC-MS. The identification of *n*-alkane and sugar sources were investigated using principal component analysis (PCA). The results showed that the mass concentrations of total *n*-alkanes in $\text{PM}_{2.5}$ during the winter were $(456.9 \pm 252.5) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. During the haze period, the concentrations of *n*-alkanes were two times higher than those on clear days. Additionally, the concentrations of *n*-alkanes during fireworks event I and fireworks event II were 0.9 times and 1.2 times higher than those on clear days. During the sampling period, the Carbon preference index (CPI) was 1.2 ± 0.1 , and the contribution from plant wax concentrations for *n*-alkanes (% Wax C_n) was between 3.1% ~ 36.0%, indicating that fossil fuels were the major source of *n*-alkanes in Liaocheng City during the winter. The mass concentrations of saccharides in $\text{PM}_{2.5}$ during the winter were $(415.5 \pm 213.8) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. Levoglucosan was the most abundant species, followed by galactosan and mannosan, which accounted for more than 91.6% of total saccharides, indicating that biomass burning was much more significant in Liaocheng City. PCA further suggested that *n*-alkane and saccharide compounds in atmospheric aerosol during the winter in Liaocheng City were primarily derived from fossil fuel and biomass burning.

Key words: *n*-alkanes; saccharides; firecracker; Liaocheng City; $\text{PM}_{2.5}$

有机气溶胶 (organic aerosol, OA) 是颗粒物的重要组成部分, 城市地区 OA 占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 20% ~ 90%^[1], 在灰霾的形成过程中起着十分重要的作用, 对空气质量及人类身体健康产生不利影响^[2]. 糖类和正构烷烃是 OA 的重要组分, 其中, 糖类化合物是水溶性有机碳 (water soluble organic carbon, WSOC) 的组分之一, 在影响区域降水、改变地球辐射平衡等效应中发挥着重要作用^[3]. 有研究表明, 随着正构烷烃分子量的增大, 其麻醉性也随之增强. 当碳数大于 16 时, 正构烷烃对人体的危

害随含碳量的增多而增强, 不仅能严重损伤皮肤, 甚至还可以提高皮肤癌的发病率^[4]. 因此, 研究城市地区 $\text{PM}_{2.5}$ 中糖类及正构烷烃的化学组成及来源不仅对全球气候变化, 而且对人类健康具有重要意义.

收稿日期: 2018-07-17; 修订日期: 2018-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41505112); 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 (26312161016, CXCXY2017046)

作者简介: 刘晓迪 (1993 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: 1610140206@lcu.edu.cn

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

自 20 世纪 80、90 年代环境学者相继开展了对大气气溶胶中的有机物的研究^[5,6]。1984 年, Simoneit^[7]对汽车尾气和烟羽样品进行分析,得出气溶胶中的脂类化合物可以用来判断有机气溶胶的来源,主要来源包括生物源(花粉、细菌等)和人为排放(燃煤等)。后来的学者也对不同区域有机气溶胶的组成、分布特征及来源解析方面做了大量的研究工作,美国加利福尼亚大学的 Rogge 研究发现,城市大气的有机气溶胶来源非常复杂,包括机动车尾气排放^[8]、天然植物排放^[9]、木材燃烧^[10]、食物烹饪^[11]。我国从 90 年代末期开始,许多科学家陆续对城市大气颗粒物中有机物进行研究。如 Wang 等^[12]对我国沿海和内陆 14 个城市有机气溶胶进行了具体的空间和季节对比分析,研究发现城市气溶胶主要成分包括正构烷烃、糖类、脂肪酸和邻苯二甲酸。其中,除邻苯二甲酸和多元醇、多元酸外,其余有机物的质量浓度冬季比夏季高 2~15 倍,这是由于大量使用燃煤和大气逆温的增强。由于各地的经济、能源结构、地理环境和生活方式有很大差异,所以研究不同地区的有机气溶胶污染特征、来源及形成机制对我国城市颗粒物污染控制有着重要意义,也是我国迫切需要解决的问题。

聊城市位于山东省西部,被列为京津冀大气污染传输通道城市(“2+26”城市)之一,其空气质量在全国 367 个城市统计排名中,位于第 340 名之后(<https://www.aqistudy.cn/>)。目前,关于聊城市 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分及其来源的研究,主要侧重于无机离子、碳质成分及无机元素上^[13~15],而关于聊城市 $\text{PM}_{2.5}$ 中有机化合物的研究鲜见报道,尤其对于烟花爆竹对聊城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度及有机化合物的影响更是未见报道。另外,其他城市对于春节期间大气气溶胶的研究主要集中在水溶性无机离子及元素^[16~18]上,对有机物的研究相对较少。因此,本

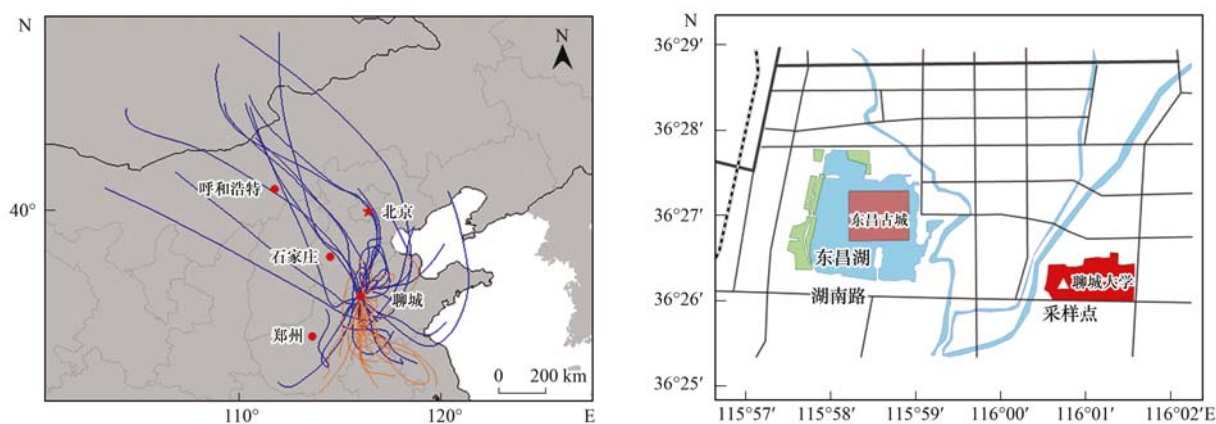
文对 2017 年聊城市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中正构烷烃和糖类典型有机化合物进行分析,包括典型事件(灰霾、春节和元宵节)时期的污染特征,结合主成分分析(PCA)和后向轨迹方法,阐明聊城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征及来源,以期聊城市进一步开展大气气溶胶化学组成特征分析及来源解析工作提供基础数据,并为聊城市乃至整个京津冀地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样地点设在聊城大学环境与规划学院实验楼(34.42°N, 116.01°E)楼顶(距离地面约 12 m),距其约 300 m 南面有一条交通主干道,东、西、北 1 km 内为聊城大学的校园,周围无高大建筑物且无明显污染排放源,能客观反映聊城市市区的大气污染状况。于 2017 年 1 月 17 日~2 月 16 日使用流量为 $100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的中流量采样器(青岛崂山电子仪器有限公司生产)分昼夜采集 $\text{PM}_{2.5}$ 样品,每个样品采集时间约为 11.8 h(08:00~19:50, 20:00~次日 07:50),共采集 60 个 $\text{PM}_{2.5}$ 样品及 2 个环境空白样品。所用石英滤膜采样前均置于马弗炉中 450℃ 灼烧 6 h 以去除有机污染物。采样后为了防止滤膜受到污染及化学物质的挥发,将滤膜冷藏于 -20℃ 冰箱中待分析。在样品采集及分析过程中,所使用的不锈钢镊子、玻璃器皿、剪刀必须用甲醇和二氯甲烷各淋洗 3 遍,防止样品相互污染及人为污染。所有预处理玻璃器皿在使用前均经过严格的清洗,并于马弗炉中 450℃ 灼烧 6 h 以上,确保器皿干净。最后空白样品中检出的量要远低于样品中的量(<5%)。

采样期间气象参数(温度、相对湿度、风速)的数据在聊城市环境保护局的网站平台上(<http://>



橙色曲线为灰霾天的后向轨迹模拟

图 1 采样期间后向轨迹模拟及采样点位置示意

Fig. 1 Air mass backward trajectories during sampling periods and distribution of sampling sites

www.lchbj.gov.cn) 获得, 时间分辨率为 1 h, 所用分析数据为 24 h 的日均值。为分析不同阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分及其来源, 本文把整个采样期间划分为 4 个阶段, 分别为清洁天、灰霾天、烟火 I 期和烟火 II 期。根据中国气象局发布的《霾的观测和预报等级》(QX/T 113-2010), 将相对湿度小于 80% 且能见度小于 10 km 的天气归为灰霾天。在 2017 年 1 月 27 日 (农历腊月三十) 的 20:00 至次日 (农历正月初一) 的 20:00 期间、2017 年 2 月 11 日 (农历正月十五) 的 08:00 至次日 08:00 期间, 因为有大量且集中的烟花爆竹燃放, 所以将其分别命名为烟火 I 期、烟火 II 期。除此之外, 本文将其归为清洁天。

1.2 颗粒物质量浓度分析

$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度采用重量分析法, 使用电子微量天平 (Mettler M3, Switzerland, 灵敏度 1 μg) 对采样前后的滤膜进行称重。所有滤膜在称重前都必须在恒温恒湿箱 (T : 20 ~ 23 $^{\circ}\text{C}$, RH : 35% ~ 45%) 中平衡 24 h 以上。每张滤膜至少称重两次, 且两次称量误差分别小于 15 μg (空白滤膜) 和 20 μg (采样滤膜), 如果超过规定范围需要重新称量。所有样品的质量均需减去环境空白的质量。

1.3 正构烷烃和糖类化合物的分析

参照 Wang 等^[19] 对有机化合物的分析方法, 取 1/8 滤膜剪碎并置于 15 mL 样品瓶中, 加入二氯甲烷 (dichloromethane, DCM) 与甲醇 (methanol) 混合溶液 (体积比为 2:1) 至滤膜被完全浸没, 超声萃取 3 次, 每次 15 min。萃取后溶液用巴氏滴管经玻璃棉过滤至梨形瓶中。将梨形瓶中过滤液置于旋转蒸发仪上, 经真空浓缩至少量, 并转移至气相色谱瓶

内。浓缩后溶液用氮气吹扫仪吹干, 并加入 60 μL N , O -双 (三甲基硅基) 三氟乙酰胺 [N , O -bis-(trimethylsilyl) trifluoroacetamide, BSTFA]: 吡啶 (pyridine, 体积比为 5:1) 溶液, 置于 70 $^{\circ}\text{C}$ 干燥箱中衍生反应 3 h。反应后溶液待冷却后加入 40 μL 十三烷 (tridecane, 1.512 $\text{ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$) 作为内标, 混合均匀后于冰箱中保存以待检测。

预处理后样品采用气相色谱-质谱联用仪分析, 使用仪器为 Agilent 公司生产的 7890A 气相色谱仪串联 5975C 质谱检测器。分析时采用 HP-5MS 熔融石英毛细管柱, 气相色谱内炉温在 50 $^{\circ}\text{C}$ 下维持 2 min 后, 以 15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 120 $^{\circ}\text{C}$, 再以 5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 300 $^{\circ}\text{C}$, 维持 16 min。用针管向进样口注入 2 μL 处理后样品溶液, 等待仪器分析。

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征

2017 年聊城市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均质量浓度为 (140.9 ± 64.5) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 变化范围为 40.6 ~ 342.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 约为国家空气质量二级标准 (GB 3095-2012, 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 1.9 倍, 其中有 28 d 超过国家二级标准, 超标率高达 93%。如图 2 所示, 整个采样期间夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均质量浓度 [(144.7 ± 67.3) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$] 略高于白天 [(138.2 ± 60.9) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$], 昼夜差异不显著 (t 检验, $P > 0.05$)。如表 1 所示, 灰霾天 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度 [(181.2 ± 61.0) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 为清洁天 [(95.6 ± 32.1) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 的 1.9 倍, 表明聊城市冬季大气污染相当严重。另外, 通过后向轨迹 (图 1) 可知, 灰霾天的污染物主要来自本地

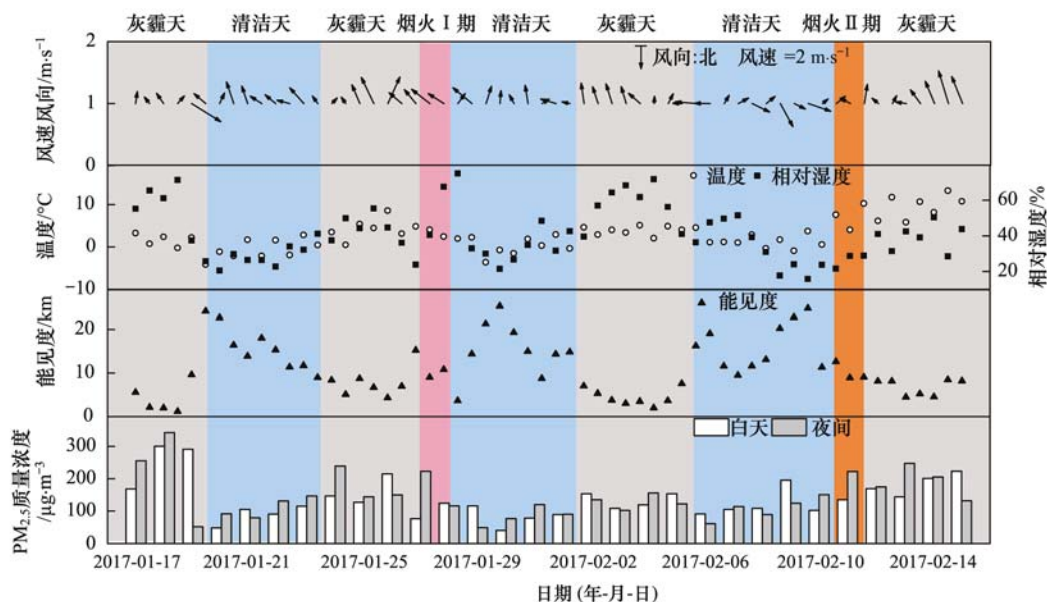


图 2 采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与气象条件的时间序列

Fig. 2 $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and meteorological conditions during sampling periods

源. 有研究表明, 烟花爆竹是 PM_{2.5} 污染的重要来源之一, 不仅排放出大量的无机离子(如 K⁺、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 等)和重金属元素(如 Mg、K 和 Ba 等)还能排放出大量的含碳物质(元素碳、有机碳)及有机化合物(如芳烃、醛酮和呋喃等)^[20]. 烟火 I 期和烟火 II 期的 PM_{2.5} 质量浓度分别为 (173.7 ± 49.1) μg·m⁻³ 和 (178.6 ± 43.5) μg·m⁻³, 分别为清洁天

的 1.8 倍和 1.9 倍. 在与其他城市同年春节期间 PM_{2.5} 质量浓度对比(表 2)发现, 聊城市 PM_{2.5} 质量浓度高于上海、广州、天津、南京、太原和济南, 低于北京、石家庄, 表明聊城市春节期间 PM_{2.5} 污染在我国处于较高水平. 这是由于传统节日期间大量燃放烟花爆竹, 导致大气中细颗粒物浓度急剧增加, 从而影响聊城市的环境空气质量.

表 1 聊城市冬季 PM_{2.5}、正构烷烃和糖类的浓度水平Table 1 Concentrations of PM_{2.5}, *n*-alkanes and sugars in Liaocheng City during the winter

项目	整个采样期	清洁天	灰霾天	烟火Ⅰ期	烟火Ⅱ期	
PM _{2.5} /μg·m ⁻³	140.9±64.5	95.6±32.1	181.2±61.0	173.7±49.1	178.6±43.5	
正构烷烃 /ng·m ⁻³	正十八烷(C ₁₈)	3.6±2.8	3.5±2.9	5.5±1.1	1.8±0.2	2.9±0.5
	正十九烷(C ₁₉)	6.6±4.5	6.5±4.5	10.4±4.6	3.1±0.5	6.8±1.2
	正二十烷(C ₂₀)	12.8±8.5	12.2±8.1	23.5±8.9	6.7±1.0	11.8±2.1
	正二十一烷(C ₂₁)	24.7±16.6	22.7±14.5	55.4±17.5	13.6±2.4	23.7±1.2
	正二十二烷(C ₂₂)	33.8±24.3	30.5±20.0	85.1±26.8	19.7±3.1	30.1±2.3
	正二十三烷(C ₂₃)	38.2±26.9	34.4±22.0	95.5±29.0	23.7±6.3	35.5±4.8
	正二十四烷(C ₂₄)	34.5±24.5	30.9±20.1	86.2±27.6	22.0±5.9	33.0±5.6
	正二十五烷(C ₂₅)	36.4±24.6	33.0±20.9	85.0±27.3	24.2±6.7	37.0±6.2
	正二十六烷(C ₂₆)	24.1±16.4	21.7±13.7	56.8±19.2	16.7±4.6	26.6±5.2
	正二十七烷(C ₂₇)	29.1±18.2	26.8±16.3	58.9±21.3	21.4±7.1	36.1±5.6
	正二十八烷(C ₂₈)	17.9±10.4	16.5±9.4	33.3±13.1	15.7±4.5	24.8±4.8
	正二十九烷(C ₂₉)	38.8±21.7	36.0±19.1	69.6±32.4	33.3±13.4	51.7±9.3
	正三十烷(C ₃₀)	16.2±8.1	15.6±8.0	22.9±8.2	16.0±3.5	20.0±5.2
	正三十一烷(C ₃₁)	25.4±11.6	24.5±11.6	33.1±12.2	26.5±6.4	30.8±4.5
	正三十二烷(C ₃₂)	14.4±7.5	14.1±7.8	16.1±6.8	15.9±1.8	16.3±4.2
	正三十三烷(C ₃₃)	21.3±10.5	20.5±10.4	27.4±13.1	24.6±3.8	25.9±5.3
	正三十四烷(C ₃₄)	18.6±9.9	18.4±10.4	18.2±7.4	22.3±1.5	21.3±5.7
	正三十五烷(C ₃₅)	26.3±15.0	25.8±15.6	26.2±12.1	35.6±1.6	31.5±4.1
	正三十六烷(C ₃₆)	34.4±20.0	33.2±20.3	38.9±21.0	48.0±3.3	42.0±9.6
	小计	456.9±252.5	426.8±230.4	848.1±297.7	391.0±77.6	508.0±87.5
植物蜡烷烃(plant wax <i>n</i> -alkanes)	55.6±31.2	52.0±28.5	97.2±41.5	46.1±20.5	72.5±2.0	
化石燃料烷烃(fossilfuel <i>n</i> -alkanes)	401.3±223.9	374.8±204.6	750.9±257.1	344.8±57.2	435.5±85.5	
碳优势指数(CPI)	1.2±0.1	1.2±0.1	1.2±0.0	1.1±0.1	1.2±0.1	
糖类 /ng·m ⁻³	半乳聚糖(galactosan)	49.4±36.8	43.8±29.0	120.5±60.2	37.6±10.1	61.2±4.3
	甘露聚糖(mannosan)	26.5±21.8	23.2±17.2	67.1±37.4	23.1±6.6	31.7±4.3
	左旋葡聚糖(levoglucosan)	304.7±146.3	283.4±136.9	498.8±150.2	280.9±84.2	394.7±47.7
	阿糖醇(arabitol)	8.4±5.7	7.6±4.7	18.0±9.3	6.7±2.0	10.3±0.0
	果糖(flucose)	5.5±3.1	5.3±3.0	9.0±2.7	3.5±0.6	5.7±0.2
	葡萄糖(glucose)	10.1±5.8	9.6±5.4	16.1±5.6	6.4±1.8	14.8±7.1
	甘露醇(mannitol)	3.6±3.6	3.5±3.7	5.5±3.1	1.3±0.5	3.8±0.9
	肌醇(inositol)	1.3±0.7	1.2±0.6	2.8±1.0	0.6±0.2	1.2±0.0
	蔗糖(sucrose)	3.6±3.3	3.7±3.5	3.0±1.2	1.6±0.6	4.1±0.4
	海藻糖(trehalose)	2.4±2.6	2.4±2.8	2.5±0.6	0.7±0.4	3.5±1.3
	小计	415.5±213.8	383.7±191.5	743.3±267.5	362.4±107.0	531.1±61.3

2.2 正构烷烃的污染特征及来源

本次采样区域的样品中检测到的正构烷烃的碳数组成范围为 C₁₈ ~ C₃₆(表 1), 总质量浓度为 (456.9 ± 252.5) ng·m⁻³, 变化范围为 142.8 ~ 1 250.9 ng·m⁻³. 其中, 灰霾天正构烷烃的质量浓度为 (848.1 ± 297.7) ng·m⁻³, 为清洁天的 2 倍, 这是因为灰霾天风速较小且相对湿度较大(图 2), 不利于污染物的扩散, 致使正构烷烃的浓度显著增

加. 烟火 I 期 [(391.0 ± 77.6) ng·m⁻³] 与烟火 II 期 [(508.0 ± 87.5) ng·m⁻³] 正构烷烃的质量浓度分别为清洁天的 0.9 倍和 1.2 倍, 这是由于烟火 I 期大部分工厂停产及机动车出行减少, 使得正构烷烃的人为来源(化石燃料燃烧)减少, 导致正构烷烃的浓度大幅度降低. 而在烟火 II 期, 人类生产、生活活动恢复正常及不利的气象因素(如风速)导致正构烷烃的浓度上升^[18]. 另外, 正构烷烃在烟火期间与

清洁天的比值小于同期 $\text{PM}_{2.5}$ 与清洁天的比值,表明烟火期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中正构烷烃的增长率远小于其他污染物的增长率,从此可以推论出烟花爆竹的燃放不是大气颗粒物中正构烷烃的排放来源. 聊城市冬季正构烷烃的质量浓度与同季节其他城市的对比如表 3 所示,聊城市正构烷烃的质量浓度高于北京和南方城市(如上海、杭州、台州),但低于北方的重污染城市(如西安、保定),说明聊城市正构烷烃质量浓度在全国范围内处于较高水平,污染较严重.

聊城市冬季不同污染期间正构烷烃各碳数的昼夜质量浓度如图 3 所示,正构烷烃各碳数夜间的质量浓度均高于相应白天的质量浓度,由于夜晚的平均风速 $[(1.2 \pm 0.5) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}]$ 低于白天 $[(1.6 \pm 0.6)$

表 2 春节期间(烟火 I 期)聊城市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与其他城市的对比¹⁾

Table 2 Comparison of concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ during the Spring Festival in Liaocheng City with other cities			
采样年份	采样点	$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	变化范围/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
2017	北京	206.5	65 ~ 348
2017	上海	35.5	27 ~ 44
2017	广州	68	49 ~ 87
2017	天津	117.5	53 ~ 182
2017	南京	58	48 ~ 68
2017	石家庄	218.5	153 ~ 284
2017	太原	128.5	55 ~ 202
2017	济南	73	55 ~ 91
2017	聊城	173.7	40.6 ~ 342.2

1) 所列城市(聊城除外)的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均来自于 $\text{PM}_{2.5}$ 真电网(www.aqistudy.cn)

表 3 冬季聊城市正构烷烃质量浓度与其他城市的对比¹⁾

Table 3 Comparison of concentrations of <i>n</i> -alkanes during the winter in Liaocheng City with other cities				
采样点	采样日期(年-月)	总正构烷烃/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$	CPI	文献
北京	2006-12	402 ± 110	1.20 ± 0.07	[21]
上海	2003-01	259	—	[12]
杭州	2008-12 ~ 2009-01	105 ± 31.8	1.4 ± 0.2	[22]
台州	2007-01	269.52 ± 72.6	1.31	[23]
西安	2009-01 ~ 2009-02	874 ± 438	—	[24]
保定	2010-12 ~ 2011-02	496.2	0.83	[4]
聊城	2017-01 ~ 2017-02	456.9 ± 252.5	1.2 ± 0.1	本研究

1) “—”表示文章中没有相关数据

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$,且夜间边界层高度降低^[18],致使夜晚大气的扩散能力较差,导致了正构烷烃在夜晚的浓度比白天高. Simoneit 等^[25]最初将碳优势指数(carbon preference index, CPI)做为污染物的人为来源和天然来源的参考指标, CPI 是奇数碳的正构烷烃浓度之和与偶数碳的正构烷烃浓度之和的比值. 认为当

$\text{CPI} \approx 1$ 时,大气飘尘中的污染物主要来自于化石燃料燃烧等人为来源;当 $\text{CPI} > 5$ 时,可以判断气溶胶中正构烷烃主要来源于植物蜡的排放^[26]. 聊城市冬季白天 CPI 平均值为 1.2,夜间 CPI 平均值为 1.1,昼夜 CPI 变化范围均为 1.0 ~ 1.3,表明白天和夜间正构烷烃的主要来源均为化石燃料的燃烧.

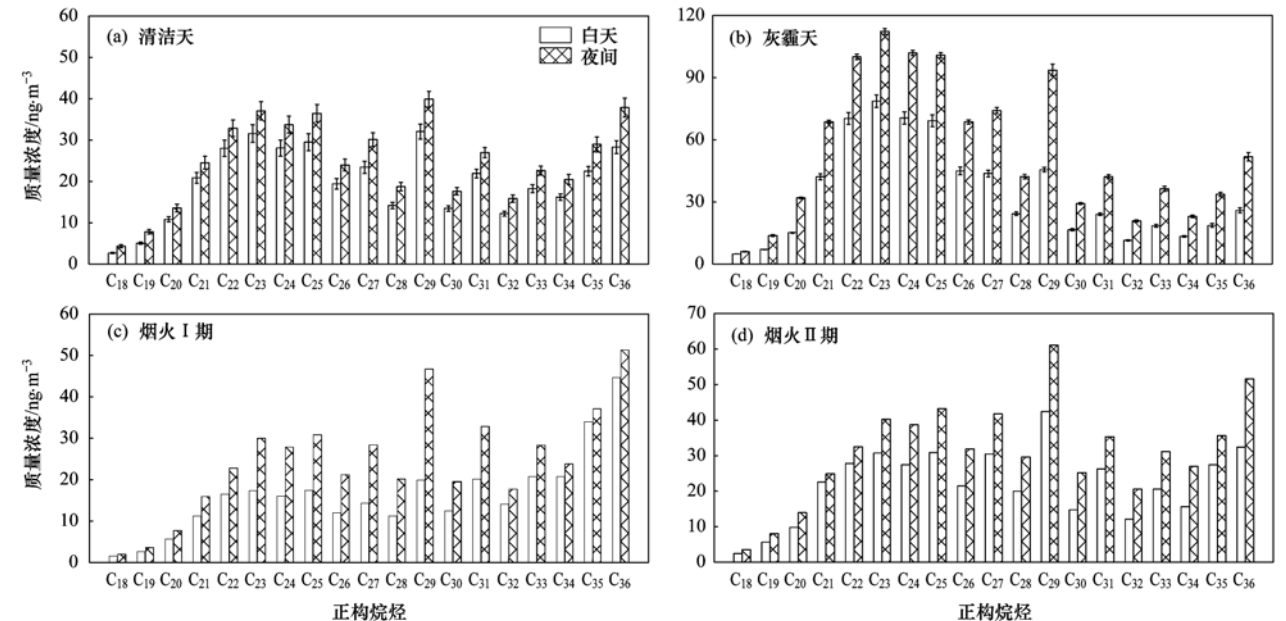


图 3 聊城市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中正构烷烃各碳数的昼夜质量浓度

Fig. 3 Diurnal concentrations of *n*-alkanes in $\text{PM}_{2.5}$ during the winter in Liaocheng City

由图 3(a) 可知, 清洁天正构烷烃呈双峰型分布, 主峰碳为 C₂₃、C₂₉, 高于 C₂₆ 的正构烷烃有奇碳数优势, CPI 值为 1.2, 变化范围为 1.0 ~ 1.3. Simoneit 等^[26]通过对大气气溶胶中正构烷烃的研究发现, 生物源正构烷烃中 CPI 值一般 >5, 甚至高达 10 以上, 主峰碳数 >27; 石油及其产品的燃烧产生的正构烷烃, CPI 值接近于 1; 混合源烷烃中 CPI 值则随生物源和人为源的相对贡献大小, 在两者之间变化^[27]. 由此可知, 聊城市冬季清洁天正构烷烃具有植物蜡和化石燃料燃烧的双重来源. 灰霾期间正构烷烃呈前锋型, 以 C₂₃ 为主峰碳, 且没有明显的奇碳数优势, 碳优势指数为 1.2, 变化范围为 1.1 ~ 1.2, 表明其正构烷烃主要来自化石燃料的燃烧. 烟火 I 期与 II 期正构烷烃均呈后锋型, 以 C₂₉、C₃₆ 为主峰碳, 具有较为明显的奇碳数优势, 碳优势指数分别为 1.1 和 1.2, 表明烟火期正构烷烃的来源与灰霾期相似, 均主要来自化石燃料的燃烧. 总体来说, 聊城市冬季 CPI 值略高于保定, 与北京、杭州、台州基本接近, 说明聊城市正构烷烃来源与以上城市相似, 主要来源于石油、煤等化石燃料的燃烧.

植物蜡排放的正构烷烃主要以大分子量烷烃为主(>C₂₅), 且其奇数碳烷烃的含量远高于偶数碳烷烃; 反之, 化石燃料燃烧所释放的正构烷烃主要以小分子量(≤C₂₅)烷烃为主, 且其奇数碳烷烃的含量与偶数碳烷烃相当^[27]. 为明确植物蜡源与化石燃料源对正构烷烃的贡献, Simoneit 等^[26]提出大气中植物蜡排放的正构烷烃对总正构烷烃的贡献率(% Wax C_n)可由式(1)计算:

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

式中, C_n 代表碳数为 n 的正构烷烃的质量浓度, Wax C_n 代表植物来源的正构烷烃浓度, 该式计算了各烷烃的植物蜡质量浓度, 可用来估计生物源对正构烷烃的贡献率. 由此可知, 聊城市冬季正构烷烃中植物蜡烷烃的质量浓度为 (55.6 ± 28.6) ng·m⁻³, 贡献率为 3.1% ~ 36.0%, 远低于化石燃料烷烃, 这是由于冬季植被的新陈代谢及风化等作用较弱, 而工业生产、居民取暖等导致的化石燃料燃烧对正构烷烃的贡献较大. 灰霾期间, 植物蜡烷烃的贡献率为 6.1% ~ 19.4%, 化石燃料烷烃的质量浓度约为植物蜡烷烃的质量浓度的 7.7 倍, 二者分别为清洁天的 2 倍和 1.9 倍. 其中, 低分子量正构烷烃(C₂₁ ~ C₂₆)剧增, 因此, 灰霾天正构烷烃浓度升高主要是由于化石燃料的燃烧. 烟火 I 期植物

蜡烷烃的贡献率为 6.6% ~ 17.0%, 化石燃料烷烃的质量浓度约为植物蜡源贡献率的 7.5 倍, 二者分别为清洁天的 0.7 倍和 0.9 倍, 表明春节期间由于大部分工厂停工, 机动车出行减少, 导致化石燃料烷烃明显减少. 烟火 II 期植物蜡烷烃与化石燃料烷烃的质量浓度均较高, 分别为清洁天的 1.4 倍和 1.2 倍, 化石燃料源的贡献率约为植物蜡源贡献率的 6 倍, 另外, 植物蜡源贡献率增大可能是由于春节后气温升高, 致使部分高等植物生长且叶表风力磨损增强^[7].

2.3 糖类化合物的污染特征及来源

聊城市冬季 PM_{2.5} 中被检测出的糖类化合物如表 1 所示, 总质量浓度为 (415.5 ± 213.8) ng·m⁻³, 变化范围为 98.6 ~ 1 169.4 ng·m⁻³, 高于北京 (198 ng·m⁻³)^[28]、天津 (205 ng·m⁻³)^[12]、上海 (308 ng·m⁻³)^[29]、香港 (148 ng·m⁻³)^[12], 低于广州 (969 ng·m⁻³)^[12]、西安 (3 239 ng·m⁻³)^[24]、柳州 (868.2 ng·m⁻³)^[30], 表明聊城市生物质燃烧处于较高水平. 其中, 灰霾期间糖类化合物的总质量浓度为 (743.3 ± 267.5) ng·m⁻³, 约为清洁天 [(383.7 ± 191.5) ng·m⁻³] 的 1.9 倍, 这与不利的气象条件以及生物质燃烧的增多有关^[18]. 糖类化合物的总浓度在烟火 I 期与 II 期分别为清洁天的 0.9 倍和 1.4 倍, 变化趋势与正构烷烃基本一致.

聊城市冬季 PM_{2.5} 中糖类的昼夜质量浓度变化如图 4 所示, 其中, 左旋葡聚糖质量浓度最高, 其昼夜质量浓度分别为 (261.2 ± 116.5) ng·m⁻³ 和 (346.1 ± 158.8) ng·m⁻³, 约占总糖的 73.3%. 左旋葡聚糖是植物纤维素燃烧的热解产物, 在高于 300℃ 条件下, 经过复杂的纤维素燃烧热解过程, 包括转糖基作用、裂解等而形成的焦油状无水单糖^[31]. 该化合物的化学性质非常稳定, 暴露于空气中 8 h, 在大气光化学氧化剂下不会发生分解反应^[32], 因此, 左旋葡聚糖常作为生物质燃烧的重要示踪物^[33]. 聊城市冬季左旋葡聚糖平均质量浓度为 (304.7 ± 146.3) ng·m⁻³, 且夜间的质量浓度为白天的 1.3 倍, 主要是由于夜间大气稳定度较高、边界层降低^[18], 加之生物质燃烧取暖增多导致的.

糖类化合物中除质量浓度最高的左旋葡聚糖外, 其次为半乳聚糖和甘露聚糖, 分别占总糖的 11.9% 和 6.4%. 甘露聚糖与半乳聚糖主要是生物质中的纤维素或半纤维素经过高温降解形成的^[34,35], 由表 4 可知, 二者与其异构体左旋葡聚糖的相关性很好, 相关性系数为 0.91、0.87, 且甘露聚糖与半乳聚糖相关性也高达 0.97, 证实了三者具有共同来源, 均来自生物质燃烧. 与左旋葡聚糖相

似,半乳聚糖与甘露聚糖夜间的质量浓度均高于白天(图4).此外,聊城市冬季大气PM_{2.5}中半乳聚糖的昼夜质量浓度明显高于甘露聚糖(1.9倍),说明聊城地区的生物质燃烧物更多地来自农业垃圾,如农作物秸秆、生物质腐蚀物等,与Oros等^[36]的研究结果相似.

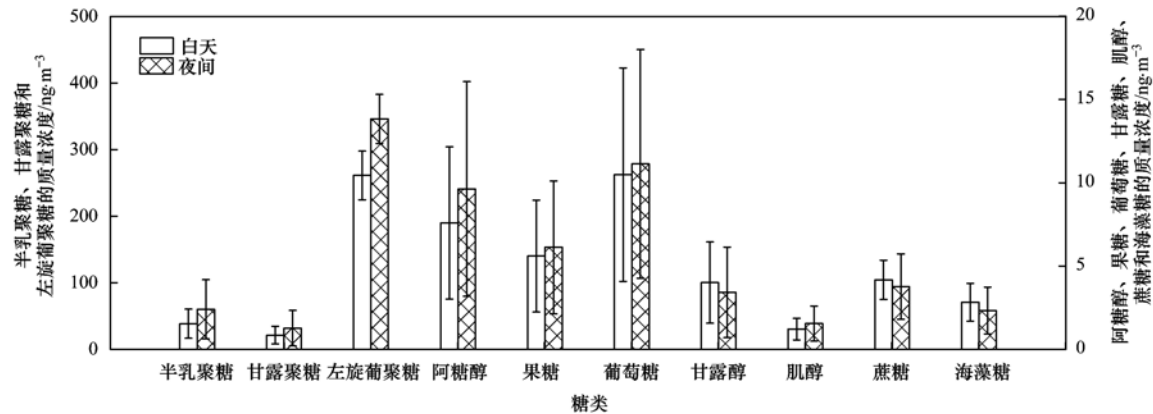


图4 聊城市冬季PM_{2.5}中糖类的昼夜质量浓度

Fig. 4 Diurnal concentrations of sugars in PM_{2.5} during the winter in Liaocheng City

除以上脱水糖外,其他糖类化合物(包括单糖:果糖和葡萄糖;二糖:蔗糖和海藻糖以及糖醇,如阿糖醇和甘露醇)主要来源于植物和动物的新陈代谢排放、以及土壤微生物等^[37].其中质量分数较大的为葡萄糖,占总糖的2.4%,其次为阿糖醇和果糖.葡萄糖和果糖主要来自原生生物源,如陆生植物花粉、水果和岩石碎屑^[38],且二者的相关性高达0.9.然而,葡萄糖的来源除生物源外,还包括生物质燃烧^[39].葡萄糖与左旋葡聚糖的相关性较好($P<0.01$, $R^2=0.57$),由此可知,聊城市PM_{2.5}中葡萄糖与生物质燃烧有密切关系.海藻糖作为一种真菌代谢物,广泛存在于真菌、细菌以及一些高等植物和无脊椎动物中,常作为土壤颗粒再悬浮和沙尘传输的重要分子的示踪物^[40].除了耐受干旱的物种,其他大多数植物中不会积累可检测的海藻糖^[41],因此,海藻糖一般存在于戈壁沙漠的粉尘中.从后向轨迹(图1)可以看出,聊城市冬季受到来自西北方向气流的影响,因此,海藻糖可能来源于沙漠和戈壁沙尘的长距离传输.

表4 聊城市冬季PM_{2.5}中各糖类组分相关系数矩阵¹⁾

Table 4 Correlation analysis of sugars in PM_{2.5} during the winter in Liaocheng City

	半乳聚糖	甘露聚糖	左旋葡聚糖	阿糖醇	果糖	葡萄糖	甘露醇	肌醇	蔗糖	海藻糖	总糖
半乳聚糖	1.00										
甘露聚糖	0.97 **	1.00									
左旋葡聚糖	0.91 **	0.87 **	1.00								
阿糖醇	0.90 **	0.86 **	0.80 **	1.00							
果糖	0.66 **	0.67 **	0.63 **	0.86 **	1.00						
葡萄糖	0.57 **	0.56 **	0.56 **	0.78 **	0.90 **	1.00					
甘露醇	0.43 **	0.41 **	0.37 **	0.77 **	0.84 **	0.79 **	1.00				
肌醇	0.89 **	0.90 **	0.79 **	0.89 **	0.82 **	0.71 **	0.60 **	1.00			
蔗糖	0.09	0.08	0.07	0.46 **	0.73 **	0.74 **	0.84 **	0.31 *	1.00		
海藻糖	0.26 *	0.22	0.20	0.61 **	0.70 **	0.68 **	0.90 **	0.38 **	0.88 **	1.00	
总糖	0.95 **	0.92 **	0.99 **	0.88 **	0.71 **	0.64 **	0.46 **	0.86 **	0.16	0.29 *	1.00

1) **表示在0.01水平(双侧)上显著相关; *表示在0.05水平(双侧)上显著相关

2.4 来源解析

为解析聊城市冬季PM_{2.5}中正构烷烃和糖类的来源,本研究利用主成分分析(PCA)对C₁₈~C₃₆和各糖类有机物等数据进行分析,主成分正交旋转因子荷载矩阵结果如表5所示,聊城市冬季正构烷烃和糖类共提取4个主因子,这4个主成分因子共解释了正构烷烃、糖类来源的94%.由表5可知,C₁₈~C₂₅、半乳聚糖、甘露聚糖、左旋葡聚糖、葡萄糖、肌醇在主成分1中均具有较高的载荷值,由2.3节可知,C₁₈~C₂₅主要来自化石燃料燃烧,半乳聚糖、甘露聚糖、左旋葡聚糖和部分葡萄糖来自生物质燃烧,因此主成分1代表化石燃料燃烧和生物质燃烧源,贡献率为69%;主成分2中因子载荷较大的化合物是高分子量烷烃C₂₆~C₃₆,因此植物蜡是PM_{2.5}

的另一重要来源，其贡献率为 13%；在主成分 3 中，阿糖醇、甘露醇、海藻糖具有较大的因子载荷，甘露醇主要由真菌、孢子和细菌等土壤中的生物群产生，常作为地表土再悬浮的示踪物^[42]，海藻糖是沙尘远距离传输的重要分子示踪物^[40]，因此，主成分 3 代表土壤粉尘源，包括来自沙漠地区的远距

离传输和局地粉尘排放，贡献率为 8%；主成分 4 中果糖、葡萄糖、蔗糖具有较大的因子载荷，葡萄糖和果糖都是植物体内最常见的糖类化合物，广泛地存在于植物的果实、种子、叶、花、根中^[43]。果糖是多种花粉中含量最高的化合物^[44]，说明该因子主要来自于花粉和植物碎屑的排放源。

表 5 聊城市冬季 PM_{2.5} 中正构烷烃、糖类的主成分分析结果¹⁾

Table 5 Principal component analysis (PCA) for *n*-alkanes and sugars in PM_{2.5} during the winter in Liaocheng City

项目	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
正十八烷	0.65	0.17	-0.03	0.49
正十九烷	0.69	0.38	0.10	0.49
正二十烷	0.61	0.19	0.24	0.48
正二十一烷	0.78	0.25	0.27	0.48
正二十二烷	0.81	0.22	0.25	0.44
正二十三烷	0.82	0.21	0.24	0.41
正二十四烷	0.83	0.22	0.24	0.40
正二十五烷	0.80	0.29	0.25	0.40
正二十六烷	0.55	0.83	0.26	0.37
正二十七烷	0.50	0.77	0.27	0.33
正二十八烷	0.46	0.78	0.24	0.27
正二十九烷	0.48	0.79	0.29	0.17
正三十烷	0.27	0.75	0.23	0.18
正三十一烷	0.46	0.81	0.24	0.13
正三十二烷	0.25	0.93	0.13	0.15
正三十三烷	0.45	0.85	0.20	0.09
正三十四烷	0.18	0.96	0.10	0.11
正三十五烷	0.17	0.95	0.10	0.15
正三十六烷	0.28	0.93	0.05	0.12
半乳聚糖	0.92	0.30	0.06	0.08
甘露聚糖	0.89	0.33	0.04	0.05
左旋葡聚糖	0.87	0.34	0.03	-0.05
阿糖醇	0.46	0.26	0.81	0.07
果糖	0.49	0.15	-0.03	0.71
葡萄糖	0.72	0.15	-0.02	0.59
甘露醇	0.35	0.16	0.88	0.10
肌醇	0.88	0.20	0.29	0.02
蔗糖	0.02	0.07	0.49	0.97
海藻糖	0.12	0.14	0.92	0.13
贡献率/%	69	13	8	4
来源	化石燃料燃烧 + 生物质燃烧	植物蜡	土壤粉尘	植物花粉

1) 粗体字表示绝对值大于 0.5 的数据

3 结论

(1) 聊城市冬季 PM_{2.5} 的质量浓度呈夜间略高于白天的变化特征，有 28 d 超过国家二级标准，超标率为 93%。其中烟火 I 期与 II 期由于烟花爆竹的燃放，导致大气中 PM_{2.5} 质量浓度分别为清洁天的 1.3 倍和 1.4 倍。

(2) 正构烷烃的碳数组成范围为 C₁₈ ~ C₃₆，各碳数夜间的质量浓度均高于相应白天的质量浓度。CPI 变化范围为 1.1 ~ 1.2，% Wax C_n 的变化范围为 3.1% ~ 36.0%，表明化石燃料燃烧对正构烷烃的贡献较大。

(3) 聊城市冬季大气气溶胶中检测出 10 种不同糖类化合物，左旋葡聚糖所占百分比最高，甘露聚糖和半乳聚糖次之，脱水糖占总糖的 91.6%，表明生物质燃烧源对聊城市大气气溶胶具有重要贡献。

(4) 主成分分析 (PCA) 结果表明，聊城市冬季 PM_{2.5} 中糖类和正构烷烃主要来自化石燃料燃烧和生物质燃烧源、植物源和粉尘源。后向轨迹结果表明，聊城市冬季主要受南北两个方向气流的影响，其中灰霾主要来自本地源。

参考文献：

[1] Cheng C L, Li M, Chan C K, et al. Mixing state of oxalic acid

- containing particles in the rural area of Pearl River Delta, China: implications for the formation mechanism of oxalic acid [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17** (15): 9519-9533.
- [2] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [3] 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.
- [4] 李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 等. 保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 441-447.
- Li X R, Du X Q, Wang Y F, *et al.* Pollution characteristics and source identification of atmospheric particulate matters *n*-alkanes in Baoding city [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 441-447.
- [5] Simoneit B R T. The organic chemistry of marine sediments [J]. *Chemical Oceanography*, 1978, **7**: 233-311.
- [6] Simoneit B R T. Organic matter of the troposphere—III. Characterization and sources of petroleum and pyrogenic residues in aerosols over the western united states [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1984, **18**(1): 51-67.
- [7] Simoneit B R T. Application of molecular marker analysis to reconcile sources of carbonaceous particulates in tropospheric aerosols [J]. *Science of the Total Environment*, 1984, **36**: 61-72.
- [8] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 2. Noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(4): 636-651.
- [9] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 3. Road dust, tire debris, and organometallic brake lining dust: roads as sources and sinks [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(9): 1892-1904.
- [10] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 4. Particulate abrasion products from leaf surfaces of urban plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(13): 2700-2711.
- [11] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 1. Charbroilers and meat cooking operations [J]. *Environmental Science & Technology*, 1991, **25**(6): 1112-1125.
- [12] Wang G H, Kawamura K, Lee S, *et al.* Molecular, seasonal, and spatial distributions of organic aerosols from fourteen Chinese cities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(15): 4619-4625.
- [13] Zhang J M, Yang L X, Chen J M, *et al.* Influence of fireworks displays on the chemical characteristics of PM_{2.5} in rural and suburban areas in Central and East China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **578**: 476-484.
- [14] 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 等. 聊城冬季一重污染过程 PM_{2.5} 污染特征及成因分析 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4026-4033.
- Zhang J Q, Wu Y J, Zhang M, *et al.* PM_{2.5} Pollution characterization and cause analysis of a winter heavy pollution event, Liaocheng City [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4026-4033.
- [15] 张敬巧, 王淑兰, 罗达通, 等. 聊城市冬季 PM_{2.5} 及水溶性离子污染特征及来源分析 [J]. *环境科学研究*, 2018, doi: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.04.22.
- Zhang J Q, Wang S L, Luo D T, *et al.* Characterization and source analysis of PM_{2.5} and water-soluble ions during winter in Liaocheng [J]. *Research of Environmental Science*, 2018, doi: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.04.22.
- [16] Yang L X, Gao X M, Wang X F, *et al.* Impacts of firecracker burning on aerosol chemical characteristics and human health risk levels during the Chinese New Year Celebration in Jinan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **476-477**: 57-64.
- [17] Tian Y Z, Wang J, Peng X, *et al.* Estimation of the direct and indirect impacts of fireworks on the physicochemical characteristics of atmospheric PM₁₀ and PM_{2.5} [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(18): 9469-9479.
- [18] 姚利, 李杏茹, 郭雪清, 等. 2007 年春节期间北京大气细粒子中正构烷烃的污染特征 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 589-593.
- Yao L, Li X R, Guo X Q, *et al.* Pollution characteristics of *n*-alkanes in atmospheric fine particles during Spring Festival of 2007 in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(2): 589-593.
- [19] Wang G H, Kawamura K, Xie M J, *et al.* Selected water-soluble organic compounds found in size-resolved aerosols collected from urban, mountain and marine atmospheres over East Asia [J]. *Tellus*, 2011, **63**(3): 371-381.
- [20] Kong S F, Li L, Li X X, *et al.* The impacts of firework burning at the Chinese Spring Festival on air quality: insights of tracers, source evolution and aging processes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(4): 2167-2184.
- [21] Li Y S, Cao J J, Li J J, *et al.* Molecular distribution and seasonal variation of hydrocarbons in PM_{2.5} from Beijing during 2006 [J]. *Particuology*, 2013, **11**(1): 78-85.
- [22] 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.
- [23] Gu Z P, Feng J L, Han W L, *et al.* Characteristics of organic matter in PM_{2.5} from an e-waste dismantling area in Taizhou, China [J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(7): 800-806.
- [24] Li J J, Wang G H, Aggarwal S G, *et al.* Comparison of abundances, compositions and sources of elements, inorganic ions and organic compounds in atmospheric aerosols from Xi'an and New Delhi, two megacities in China and India [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **476-477**: 485-495.
- [25] Simoneit B R T, Cox R E, Standley L J. Organic matter of the troposphere-IV. Lipids in harmattan aerosols of Nigeria [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1988, **22**(5): 983-1004.
- [26] Simoneit B R T, Sheng G Y, Chen X J, *et al.* Molecular marker study of extractable organic matter in aerosols from urban areas of China [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1991, **25**(10): 2111-2129.
- [27] Simoneit B R T, Kobayashi M, Mochida M, *et al.* Aerosol particles collected on aircraft flights over the northwestern Pacific region during the ACE-Asia campaign: Composition and major sources of the organic compounds [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(D19): D19S09.
- [28] Li X R, Guo X Q, Liu X R, *et al.* Distribution and sources of solvent extractable organic compounds in PM_{2.5} during 2007 Chinese Spring Festival in Beijing [J]. *Journal of Environmental Science*, 2009, **21**(2): 142-149.

- [29] 李曼, 仲勉, 荆亮, 等. 上海 PM_{2.5} 中糖类化合物的组成及来源分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2013, **19**(4): 387-392.
- Li M, Zhong M, Jing L, *et al.* Concentrations and sources of saccharides in PM_{2.5} in Shanghai [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2013, **19**(4): 387-392.
- [30] 黄绪, 郭云霞, 刘剑斌, 等. 柳州大气 PM_{2.5} 中糖类物质的分布特征与指示意义[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(3): 838-843.
- Huang X, Guo Y X, Liu J B, *et al.* The distribution characteristics and implications of carbohydrates in the PM_{2.5} of Liuzhou[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(3): 838-843.
- [31] Simoneit B R T, Elias V O. Organic tracers from biomass burning in atmospheric particulate matter over the ocean [J]. Marine Chemistry, 2000, **69**(3-4): 301-312.
- [32] Fraser M P, Lakshmanan K. Using levoglucosan as a molecular marker for the long-range transport of biomass combustion aerosols [J]. Environmental Science & Technology, 2000, **34**(21): 4560-4564.
- [33] Simoneit B R T. Biomass burning — a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion [J]. Applied Geochemistry, 2002, **17**(3): 129-162.
- [34] Simoneit B R T. A review of biomarker compounds as source indicators and tracers for air pollution [J]. Environmental Science and Pollution Research, 1999, **6**(3): 159-169.
- [35] 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.
- [36] Oros D R, Abas M R B, Omar N Y M J, *et al.* Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning: Part 3. Grasses [J]. Applied Geochemistry, 2006, **21**(6): 919-940.
- [37] Jaeger III C H, Lindow S E, Miller W, *et al.* Mapping of sugar and amino acid availability in soil around roots with bacterial sensors of sucrose and tryptophan [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(6): 2685-2690.
- [38] Speranza A, Calzoni G L, Pacini E. Occurrence of mono- or disaccharides and polysaccharide reserves in mature pollen grains [J]. Sexual Plant Reproduction, 1997, **10**(2): 110-115.
- [39] Wan E C H, Yu J Z. Analysis of sugars and sugar polyols in atmospheric aerosols by chloride attachment in liquid chromatography/negative ion electrospray mass spectrometry [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(7): 2459-2466.
- [40] Wang G H, Li J J, Cheng C L, *et al.* Observation of atmospheric aerosols at Mt. Hua and Mt. Tai in central and east China during spring 2009-part 2: Impact of dust storm on organic aerosol composition and size distribution [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**: 4065-4080.
- [41] Garg A K, Kim J K, Owens T G, *et al.* Trehalose accumulation in rice plants confers high tolerance levels to different abiotic stresses [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, **99**(25): 15898-15903.
- [42] Bauer H, Claeys M, Vermeylen R, *et al.* Arabitol and mannitol as tracers for the quantification of airborne fungal spores [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(3): 588-593.
- [43] 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.
- [44] Pacini E. From anther and pollen ripening to pollen presentation [J]. Plant Systematics and Evolution, 2000, **222**(1-4): 19-43.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading ...	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrification System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)