

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)	

阳泉市秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分及来源分析

王成^{1,2}, 闫雨龙^{1*}, 谢凯¹, 李如梅^{1,2}, 徐扬^{1,2}, 彭林¹

(1. 华北电力大学环境科学与工程学院, 资源环境系统优化教育部重点实验室, 北京 102206; 2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: 采集了阳泉市城区 2017 年 10 月 15 日~2018 年 1 月 23 日 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, 分析了优良天和污染天 $\text{PM}_{2.5}$ 及其化学组分特征, 并利用富集因子分析法(EF)和正定矩阵因子分析法(PMF)对 $\text{PM}_{2.5}$ 进行来源分析. 结果表明, 采样期间污染天二次无机离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+) 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的比例为 23.83%, 是优良天的 2.43 倍, 污染天二次无机污染严重, 污染天人为源相关的元素 Cd、Sb、Sn、Cu、Pb、Zn 和 As 富集程度大于优良天; 主要的污染源对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献分别是燃煤 29.26%、扬尘 23.83%、机动车 19.34%、二次源 16.01% 和工业源 11.57%, 其中, 污染天机动车排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献 20.57%, 高于优良天时 17.82%, 而燃煤源的贡献 23.04% 明显低于优良天时 33.75%, 静稳天气时机动车排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献较优良天上升, 燃煤源对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献有下降. 因此, 阳泉市在秋冬季应加强对燃煤、扬尘源的控制, 同时进一步加强对机动车的控制, 以减少污染期间机动车的贡献.

关键词: 阳泉市; $\text{PM}_{2.5}$; 污染天; 源解析; 扬尘污染

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1036-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906024

Analysis of Chemical Components and Sources of $\text{PM}_{2.5}$ During Autumn and Winter in Yangquan City

WANG Cheng^{1,2}, YAN Yu-long^{1*}, XIE Kai¹, LI Ru-mei^{1,2}, XU Yang^{1,2}, PENG Lin¹

(1. Key Laboratory of Resources and Environmental Systems Optimization, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: $\text{PM}_{2.5}$ samples were collected from October 15, 2017 to January 23, 2018 in the Yangquan urban area. The characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and its main chemical components on clean and polluted days were analyzed, and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ was conducted using enrichment factor analysis (EF) and positive matrix factorization (PMF). The results showed that the ratios of secondary inorganic ions (SO_4^{2-} , NO_3^- , and NH_4^+) to $\text{PM}_{2.5}$ on polluted days was 23.83%, which is 2.43 times higher than that on clean days, indicating that secondary inorganic pollution was more significant on polluted days. The enrichment degree of anthropogenic elements Cd, Sb, Sn, Cu, Pb, Zn, and As on polluted days was higher than that on clean days. The results of the PMF source apportionment showed that the main sources of $\text{PM}_{2.5}$ in Yangquan are coal combustion, dust, motor vehicles, secondary aerosols, and industry, with contributions of 29.26%, 23.83%, 19.34%, 16.01%, and 11.57%, respectively. The contribution of motor vehicle emissions to $\text{PM}_{2.5}$ on polluted days is 20.57%, which is higher than that on clean days (17.82%), while the contribution of coal combustion sources to $\text{PM}_{2.5}$ on polluted days is 23.04%, which is significantly lower than that on clean days (33.75%). The stationary weather on polluted days caused the contribution of motor vehicle emissions to $\text{PM}_{2.5}$ to increase compared with on clean days, while the contribution of coal combustion sources to $\text{PM}_{2.5}$ was decreased. The results show that air pollution control should pay more attention to the control of coal combustion and dust during autumn and winter in Yangquan, and further strengthen the control of motor vehicles to reduce their contribution to pollution.

Key words: Yangquan City; $\text{PM}_{2.5}$; pollution days; source apportionment; dust pollution

大气细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$, 空气动力学当量直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的大气颗粒物) 是影响我国大多数城市大气环境质量的主要污染物, 对人体健康、大气能见度以及气候有重要的影响^[1~3]. $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征、化学组成、主要来源及健康、环境效益, 既是关乎民生的热点问题, 又是科研的焦点问题. 特别是近几年, 频繁出现的以细颗粒物为典型污染物的大范围空气污染事件, 引发了各界的强烈关注, 研究其来源是控制 $\text{PM}_{2.5}$ 的基础.

目前, 研究 $\text{PM}_{2.5}$ 来源的受体模型法, 有化学质量平衡 (CMB)、正定矩阵因子分析法 (PMF) 和主成

分分析 (PCA) 等模型. 相较于 CMB 需要使用源谱进行来源解析, PCA 不能直接定量解析的缺点, PMF 由于其不需要具体的排放源成分谱、仅需要输入受体点成分谱信息, 利用最小二乘法定量解出源贡献量, 并且具有处理遗失数据和不精确数据等特点, 在

收稿日期: 2019-06-03; 修订日期: 2019-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41673004); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0208500); 大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG-05-13)

作者简介: 王成 (1991~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为颗粒物来源解析及空气污染防治, E-mail: wangchenghuanjing@163.com

* 通信作者, E-mail: yanyulong@yeah.net

很多城市的源解析工作中得到了广泛应用^[4,5]. Liu 等^[6]对菏泽市大气细颗粒物来源解析进行了研究, 结果表明全年 PM_{2.5} 主要来源于二次源(27%)、燃煤源(17%)和机动车(17%). Yao 等^[7]对东营地区 PM_{2.5} 污染来源进行了研究, 发现二次硫酸盐和硝酸盐(54%)、生物质燃烧(15%)、工业(11%)是其 PM_{2.5} 的主要来源. 陈楚等^[8]对濮阳地区秋冬季大气细颗粒物来源解析进行了研究, 发现二次转化在重污染形成过程中起到重要作用, PM_{2.5} 主要来源于二次无机盐(37%)、工业源(16%)和二次有机气溶胶(14%).

阳泉市位于山西省东部, 电力、煤炭、水泥、有色金属冶炼及加工、耐火材料等为其支柱产业, 经济结构偏重, 因此 PM_{2.5} 污染来源复杂. 阳泉市 2016~2017 年秋冬季 PM_{2.5} 浓度为 82 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 是国家 II 类标准限值(35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 2.34 倍^[9]. 目前, 针对阳泉市 PM_{2.5} 的研究非常有限, 已有的研究有利用中尺度气象模式 MM5 耦合大气污染模

式 CALPUFF 对阳泉市的大气环境中 SO₂、PM₁₀ 进行数值模拟、利用 PCA 对大气污染物特征进行分析等^[10,11], 但对秋冬季污染 PM_{2.5} 化学组分及污染来源研究尚未发现. 本研究通过对阳泉市 2017 年 10 月 15 日~2018 年 1 月 23 日 PM_{2.5} 中无机化学组分特征的分析, 采用 PMF 法对 PM_{2.5} 来源进行解析, 同时计算优良和污染天气各类源的贡献率, 这将有助于分析阳泉市大气颗粒物的来源, 以期为阳泉市大气污染防治, 尤其为应对重污染天气提供方向.

1 材料与方法

1.1 样品采集

阳泉市位于山西省中东部, 是典型的“两山夹一谷”的山区河谷型城市, 属暖温带半干旱大陆性季风气候. 本研究设置的采样点位于阳泉市环境保护局办公楼 4 层平台, 距地面 12 m 左右, 为典型的居民文教混合区, 附近无明显排放源(图 1).



图 1 阳泉市采样点位分布示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in Yangquan City

2017 年 10 月 15 日~2018 年 1 月 23 日期间每天 10:00 至次日 09:00 使用智能中流量采样器 (TH-150C, 武汉天虹仪表有限公司) 采集 PM_{2.5} 样品, 采样器流量为 100 L·min⁻¹, 并选择直径为 90 mm 的石英滤膜和特氟龙膜进行环境受体中 PM_{2.5} 的采集. 石英膜样品用于分析碳组分, 特氟龙膜样品用于分析无机元素和水溶性离子. 采样前后滤膜置于 25℃、相对湿度 50% 的恒温恒湿箱内平衡 24 h 后进行称重, 最后将滤膜用铝箔纸包好保存在 -20℃ 的冰箱中.

PM_{2.5}、气态污染物(NO₂ 和 SO₂) 及气象参数(温度、湿度和风速)等在线分析数据来自中国环境

监测总站的“全国城市空气质量实时发布平台”^[12]. 化学组分数据(无机元素、水溶性离子和碳组分等)均是手工离线采样分析的结果.

1.2 化学分析方法

使用美国 Agilent 7700 型电感耦合等离子体质谱仪(酸消解法)和美国 Thermo 公司 VISTA-MPX 等离子体发射光谱仪(碱熔法)分析无机元素(Li、Na、Mg、Al、Si、P、K、Ca、Sc、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Sr、Cd、Sn、Sb、Ba 和 Pb)^[13]; 水溶性离子(Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺)分析采用美国 DIONEX 公司型号 ICS-1100 的离子色谱系统^[14]; 采用美国 Sunset 实验室 Model 5L OC/EC 分析仪对

EC 和 OC 进行分析测定^[8]。

1.3 质量保证及控制

采样期间,采样仪器对污染物存在少量截留,为减少对后续样品的采集及分析的影响,应该定期更换相关零配件和耗材,以及对仪器设备的流量校准和维护;取换滤膜时,佩戴乙烯基手套等实验室专用手套,使用无锯齿状镊子。

样品分析前均对分析仪器进行校准。为保证分析结果的准确性,在分析过程中做实验流程空白处理,所做的空白均无检出目标化合物,分析时做10%样品量的平行样。为了检验样品在分析过程中是否有丢失,通过向样品中加入回收率指示剂(准备物质)测定回收率,保证回收率控制在95%~105%之间。同时在水溶性离子含量分析过程中,每20件样品至少重新测定标准系列的一个中间点,测定结果与标准曲线该点浓度之间的相对误差 $\leq 10\%$,保证标准曲线相关系数 ≥ 0.995 。

1.4 数据分析方法

正定矩阵因子分析法(positive matrix factorization, PMF)是一种多变量因子分析方法^[15],不需要事先明确源成分谱,且其结果定量,解析得到的每一个因子都代表了不同的化学组成,同时计算得到的分担率均为正值。

该方法将样本数据矩阵 $X(n \times m)$ 分解为两个矩阵,分别为源成分谱矩阵 $F(k \times j)$ 和源贡献矩阵 $G(j \times i)$, $E(i \times j)$ 为样本的观测值与模拟值之间的残差矩阵,具体表示方法如下:

$$X = GF + E \quad (1)$$

PMF模型在分析过程中通过最小化 Q 的值,确定污染源成分谱矩阵 F 和污染源贡献矩阵 G ,达到目标解析结果。目标函数 Q 定义为:

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

式中, e_{ij} 为第 i 个样本数据中第 j 个组分观测值与模拟值的残差, σ_{ij} 为第 i 个样本数据中第 j 个组分不确定性^[16,17]。

富集因子法(enrichment factor, EF)可以用来研究大气气溶胶中元素的富集程度,从而识别元素是否受到人为源的影响。富集因子的计算公式如下:

$$EF_i = \frac{(X_i/X_r)_{\text{环境}}}{(X_i/X_r)_{\text{背景}}} \quad (3)$$

式中,EF为富集因子, X_i 和 X_r 分别为细颗粒物上元素 i 和参比元素 r 的浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,本研究选取Al作为参比元素^[18,19]; X'_i 和 X'_r 分别为元素 i 和参比元素Al的土壤背景值,参考中国A层土壤背景平均值^[20]。当 $EF_i < 10$,认为元素 i 相对于地壳未富

集,主要来自自然源,且 EF_i 越小受到自然源影响的程度就越大;若 EF_i 在 $10 \sim 1 \times 10^4$ 范围,则认为元素被富集,主要来自人为源。

2 结果与讨论

2.1 采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况

采样期间,阳泉市环境受体中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化范围为 $23 \sim 144 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均值为 $68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是GB 3095-2012 II类标准限值^[9]($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)1.95倍,是世界卫生组织^[21](WHO)规定的24 h浓度限值($25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)2.73倍。

为了研究不同污染条件下阳泉市的大气污染特征,根据空气质量指数(AQI)分类^[9],划分为污染天($\text{AQI} > 100$)和优良天($\text{AQI} \leq 100$),不同污染条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 、气态污染物及气象参数情况详见表1。分析表明,污染天条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,为优良天的2.13倍。通过对气象参数分析可知,优良天风速为 $2.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而污染天风速仅为 $0.95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,污染天大气基本处于静稳状态,导致大气污染物扩散条件变差,加重大气污染程度^[22]。

从表1可以看出,优良天和污染天相对湿度分别为54%和71%,相对湿度的增加有利于环境空气中 SO_2 和 NO_2 等气态前体物的二次转化,促进颗粒物的吸湿增长和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高^[23]。气态污染物中 SO_2 和 NO_2 污染天浓度分别为 $74 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是优良天的1.47和1.45倍。相关性分析表明, SO_2 和 NO_2 浓度变化趋势与 $\text{PM}_{2.5}$ 较为一致(R^2 为0.82和0.83, $P < 0.01$), SO_2 主要来源于燃煤和工业排放等, NO_2 主要来源于机动车排放和化石燃料燃烧等^[24,25],说明观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 可能受燃煤、机动车尾气及工业排放影响较大。

表1 不同污染条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 、气态污染物及气象参数

Table 1 $\text{PM}_{2.5}$, gaseous pollutants, and meteorological parameters under different pollution conditions

类型	优良天	污染天
$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	47	100
$\text{SO}_2/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	50	74
$\text{NO}_2/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	40	58
温度/ $^{\circ}\text{C}$	3	5
相对湿度/%	54	71
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.07	0.95

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子分析

采样期间各水溶性离子处于较高水平,其质量浓度排序为 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^-$;其中二次无机离子(包括 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+)在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比为15.62%,是阳泉市 $\text{PM}_{2.5}$ 中的主要组成部分。相较

于优良天,污染天二次无机离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+)在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的比例均有不同程度的增加,污染天二次无机离子在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的比例为 23.83%,是优良天(9.13%)的 2.43 倍(图 2),这和吴琳^[26]在杭

州市的研究相似. 污染发生时较高的相对湿度为 SO_2 和 NO_2 等一次污染物向 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 等二次颗粒物的转化提供适宜的条件^[27,28],导致二次无机离子的占比明显增加,是造成 $\text{PM}_{2.5}$ 升高的重要原因.

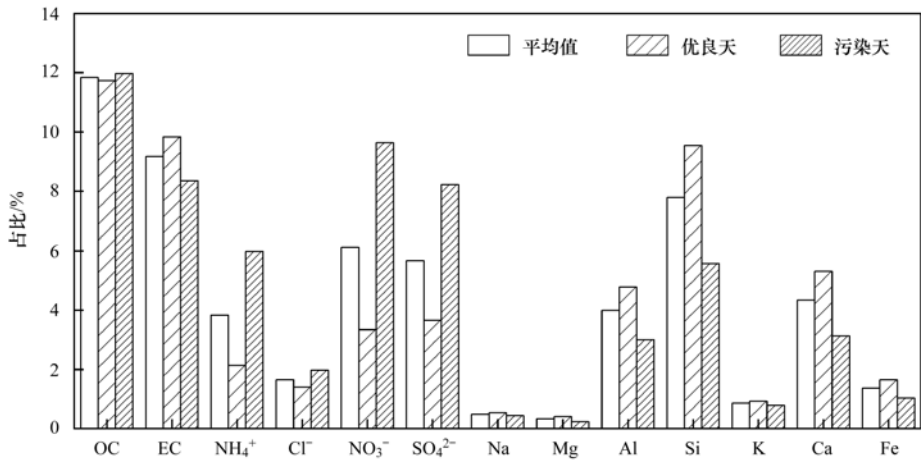


图 2 阳泉市 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要化学组分占比

Fig. 2 Percentage of main chemical components of $\text{PM}_{2.5}$ in Yangquan City

可通过硫氧化速率 (SOR) 和氮氧化速率 (NOR) 来分别反映 SO_2 和 NO_2 向 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 等二次颗粒物转化情况,其数值越高说明二次转化程度越高^[29]. 具体计算公式如下:

$$\text{SOR} = \frac{n(\text{SO}_4^{2-})}{n(\text{SO}_4^{2-}) + n(\text{SO}_2)} \quad (4)$$

$$\text{NOR} = \frac{n(\text{NO}_3^-)}{n(\text{NO}_3^-) + n(\text{NO}_2)} \quad (5)$$

式中, n 表示浓度,单位为 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$. 计算结果显示,污染天 SOR(0.11) 和 NOR(0.13) 明显高于优良天 SOR(0.06) 和 NOR(0.06),说明污染天时二次转化程度更高,可能是污染天 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 增幅较大的重要原因^[24]. 结合优良天、污染天条件下 SOR、NOR 与相对湿度相关性分析(图 3),发现相对湿度与污染天条件下 SOR 和 NOR 均为显著相关 ($P <$

0.01),且污染天条件下 SOR 和 NOR 与相对湿度的相关性 (R^2 分别为 0.68 和 0.56) 明显高于优良天 (R^2 分别为 0.40 和 0.33),说明污染天二次污染物的形成受非均相反应的影响比优良天更大^[29].

一般认为,机动车尾气和燃煤排放分别是 $\text{PM}_{2.5}$ 中硝酸盐和硫酸盐的重要贡献者. 通过比较 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ (质量比)可初步判断固定源与移动源的贡献比例,该比值越高说明移动源的贡献越大^[30]. 采样期间,阳泉市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 为 1.04,该比值与上海^[31] 2011 ~ 2012 年的值 0.996、邯郸^[32] 2012 ~ 2013 年的值 1.00 相当,介于京津冀^[33] 2013 年的值 0.56 ~ 1.85,明显高于南昌^[34] 2009 年的值 0.10,低于杭州^[26] 2011 年污染天的值 1.61 ~ 2.09,表明阳泉市固定源与移动源污染并存的复合大气污染特征. 阳泉市优良天和污染天 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 分

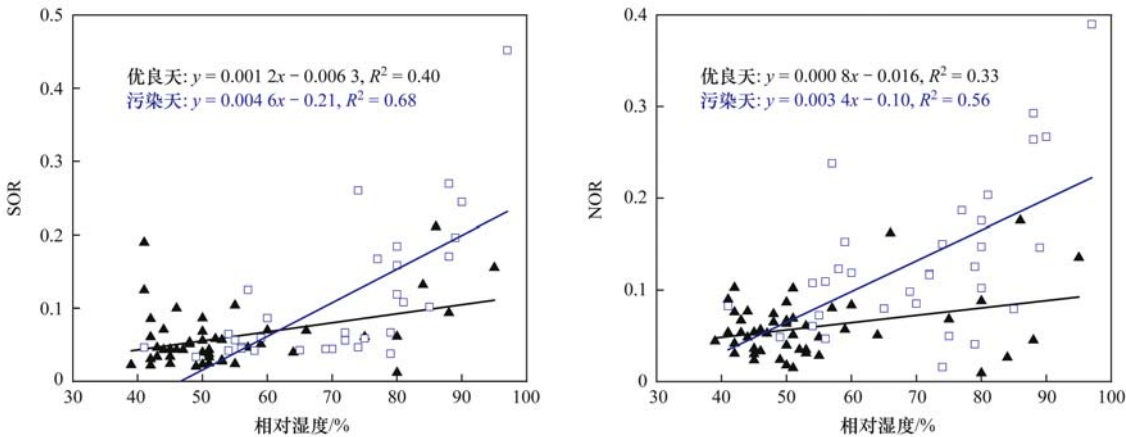


图 3 采样期间不同污染条件下 SOR 和 NOR 与相对湿度相关性

Fig. 3 Correlation between SOR and NOR and relative humidity under different pollution conditions during the sampling period

别为 0.91 和 1.17,说明在污染发生时移动源的相对贡献明显上升,这与重污染发生期间的静稳天气下,位于城市中心采样点受周边机动车影响更大有关。

2.3 $PM_{2.5}$ 中地壳元素分析

$PM_{2.5}$ 中的地壳元素 Na、Mg、Al、Si、K、Ca 和 Fe 总占比为 19.16%,其中 Si 和 Ca 的占比最高,分别达到 7.79% 和 4.34%,显著高于济南^[35] 和武汉^[36],Si、Ca 通常被认为是扬尘的标识元素^[37,38],说明阳泉市扬尘污染较为严重。从图 2 可看出,污染天和优良天各地壳元素在 $PM_{2.5}$ 中的占比排序一致,为 $Si > Ca > Al > Fe > K > Na > Mg$,但相较于污染天,优良天各地壳元素在 $PM_{2.5}$ 中的占比均有不同程度地上升,其中 Si 和 Ca 的增幅最大,分别达到 3.97% 和 2.18%,与污染天多发于静稳天气,风速下降导致地壳物质的贡献下降有关。

2.4 $PM_{2.5}$ 中碳组分分析

如图 2 所示,OC 和 EC 分别占 $PM_{2.5}$ 的 11.86% 和 9.22%。EC 在 $PM_{2.5}$ 中的占比明显高于郑州 (4.00%~5.00%)、石家庄 (5.00%) 和乌鲁木齐 (7.83%)^[30,39,40]。由于 EC 主要来自化石燃料等污染源的不完全燃烧^[26],说明阳泉市燃烧一次排放污染的排放较为严重。有研究表明,根据 EC 和 OC 的相关性大小可以判断二者是否具有同源性^[41]。与很多研究不同,优良天和污染天 OC 和 EC 的相关性 R^2 (分别为 0.62 和 0.68) 低于北京^[42] (0.90) 和菏泽^[34] (0.77~0.87),说明阳泉市 OC 和 EC 的来源较其他城市复杂。基于 Turpin 等^[43] 提出的经验公式对 SOC 进行估算,计算公式如下:

$$SOC = OC - EC \times (OC/EC)_{pri} \quad (6)$$

式中,SOC 为二次有机碳, $(OC/EC)_{pri}$ 为研究期间观测到的 OC/EC 最小比值。为减小计算误差,对

OC/EC 比值大小进行排序后,选取比值中最小 3 个值的平均值作为 $(OC/EC)_{pri}$ 的值^[44]。结果显示,污染天 SOC 质量浓度 ($7.07 \mu g \cdot m^{-3}$) 是优良天 ($4.45 \mu g \cdot m^{-3}$) 的 1.6 倍,污染天 SOC 在 OC 中的占比 (48%) 同样是优良天的 (35%) 的 1.4 倍,表明污染天 SOC 的生成量及其对 OC 的贡献均高于优良天。污染天时,高湿环境加速了 SOC 生成的非均相反应速率,较差的大气扩散情况又增加了气粒反应的接触时间,最终导致 SOC 浓度水平的上升^[45]。

3 $PM_{2.5}$ 源解析

3.1 富集因子分析

本研究的 $PM_{2.5}$ 样品中发生富集的元素 Cd、Sb、Sn、Cu、Pb、Zn 和 As 的 EF 值分别为:117.82、81.74、67.93、50.84、50.49、27.75 和 11.87 (图 4)。有研究表明,As 和 Pb 主要来源于有色金属冶炼及燃煤排放^[46],Pb、Cu、Sb 和 Sn 等元素也可来自冶金化工尘,大气中 Zn、Cd、Pb 和 Cu 浓度较高则与机动车排放相关^[47,48]。结果显示阳泉市 $PM_{2.5}$ 受工业生产、燃料燃烧和机动车尾气排放等影响。

如图 4,通过计算不同污染条件下各元素的 EF_i ,发现各元素的富集因子排序一致,而对应的 EF 值发生较大的波动。相对于清洁天,污染天 $PM_{2.5}$ 样品中 Cd、Sb、Sn、Cu、Pb、Zn 和 As 的 EF 值显著增加,增加比例分别达到 174.22%、123.61%、117.31%、71.64%、168.10%、98.18% 和 114.56%;地壳元素 (Si、Mg、Ca、Fe、Na 和 K) 的 EF 值变化较小,其中 Si 和 Ca 元素的 EF 值在污染天发生了下降,分别下降 9.83% 和 4.83%。说明污染发生时, $PM_{2.5}$ 受到人为源 (工业生产、燃料燃烧和机动车尾气排放等) 的影响增加,自然源 (扬尘等) 的影响减弱。

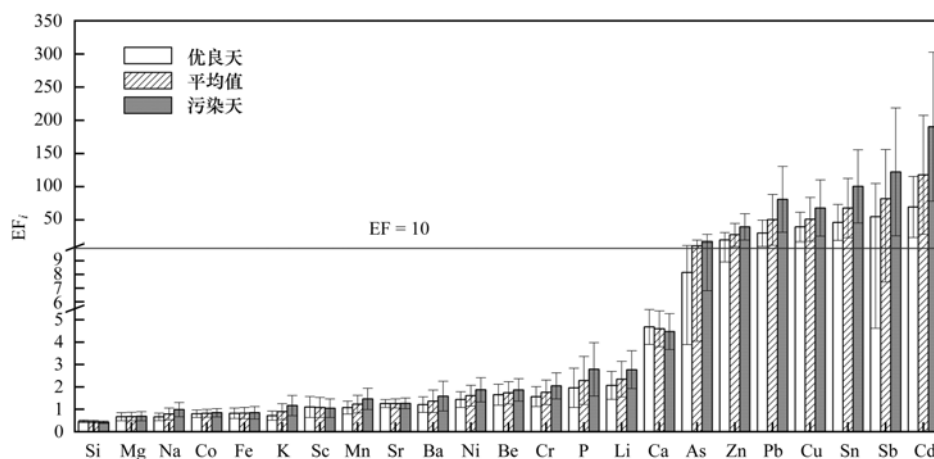


图 4 采样期间不同污染条件下 $PM_{2.5}$ 中各元素的富集因子

Fig. 4 Enrichment factors (EFs) of elements in $PM_{2.5}$ under different pollution conditions during the sampling period

3.2 PMF 模型

PMF 解析 PM_{2.5} 源成分谱如图 5 所示, 依据不同特征组分对 5 种因子进行来源识别. 因子 1 中以 Zn、As、Cd、Sn、Sb 和 Pb 等金属元素的贡献率较高, 其中 Zn、As 和 Pb 等金属元素为焦化生产过程产生的主要组分, As、Cd 和 Pb 等在冶金化工粉尘中往往也有较高的含量^[36,19], 因此可认为因子 1 是工业源. 因子 2 中以 NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 贡献率较高, 表现为明显的二次源特征^[49,50]. 因子 3 中贡献率较高的是 OC、EC、Al、

Si、Fe、Sr、Ba、Ca 和 As. 由于 As 为燃煤标识元素^[51,52], OC 和 EC 为燃煤排放的标志性物种^[53,54], 因子 3 可被认定为燃煤源. 因子 4 中, 贡献率较高的物种为 EC、Cu、Zn、Pb 和 Cl⁻, Zn 和 Cu 为机动车润滑油的主要添加剂, Zn、Ba 和 Mn 广泛地用于刹车片和轮胎中^[38], EC 也被认为是机动车排放的一种标志性物种, 因子 4 是机动车排放源. 因子 5 中贡献率较高的物种 Sr、Ca、Mg、Al 和 Si 一般认为是地壳物质的主要组成元素^[55,56], 因子 5 可被看作是扬尘源.

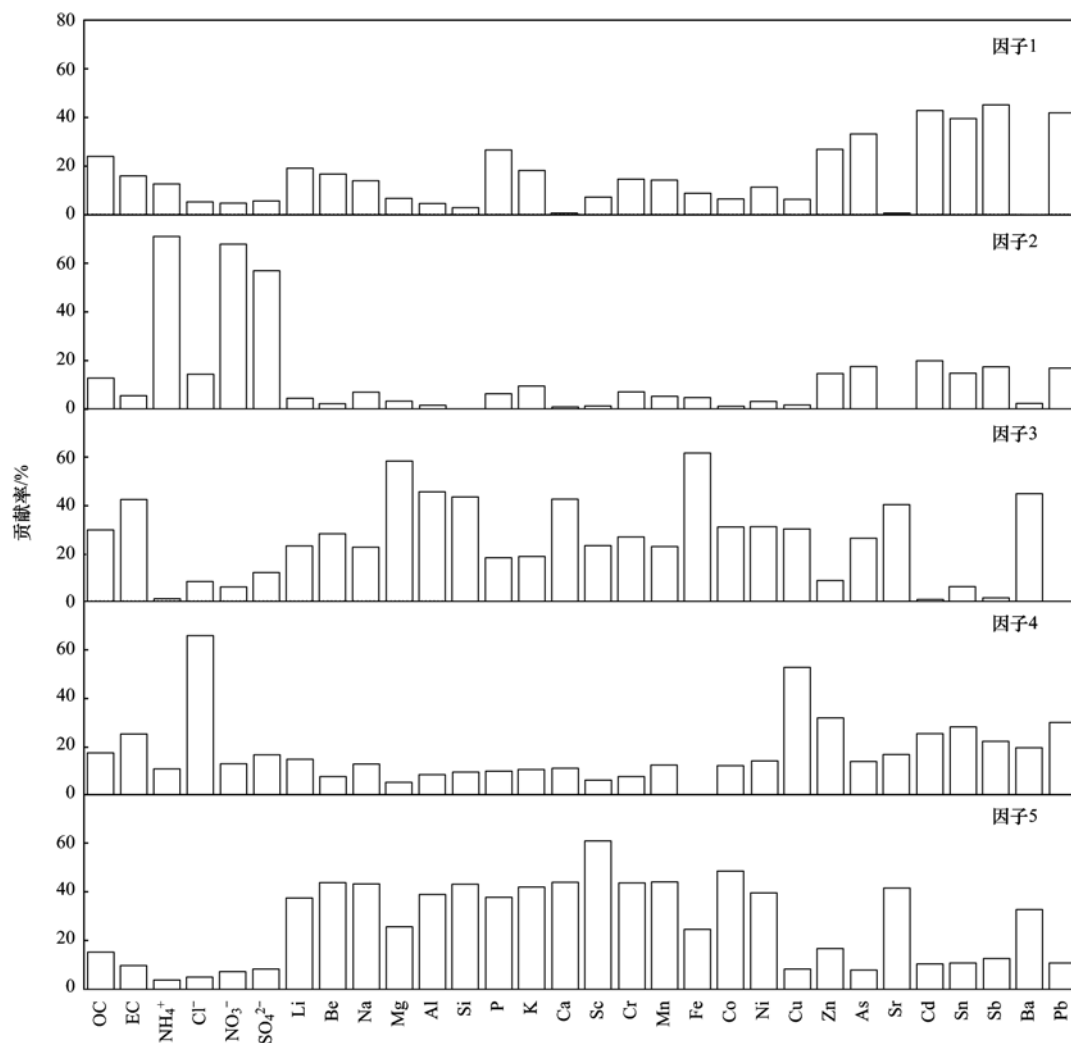


图 5 采样期间阳泉市 PM_{2.5} 源成分谱

Fig. 5 Source profiles of PM_{2.5} during the sampling period in Yangquan City

通过 PMF 计算, 阳泉市 PM_{2.5} 主要污染源为: 燃煤源、扬尘源、机动车排放源、二次源和工业源, 贡献率分别为: 29.26%、23.83%、19.34%、16.01% 和 11.57% (图 6). 燃煤源的较高贡献, 反映出阳泉市城市能源结构依然以煤炭为主, 而电力行业作为煤炭消耗的重点行业应作为颗粒物污染防治的关键; 扬尘对 PM_{2.5} 的贡献显著高于北京^[42] (16.00%)、兰州^[17] (12.45%) 和深圳^[57] (6.00%) 等城市, 表明

阳泉的扬尘污染较为严重.

阳泉市不同污染天各类污染源 PM_{2.5} 的贡献情况如图 7 所示, 优良天 PM_{2.5} 主要污染源为燃煤源 (33.75%)、扬尘源 (28.73%) 和机动车源 (17.82%), 而污染天主要污染源为二次源 (27.91%)、燃煤源 (23.04%) 和机动车源 (20.57%). 污染天二次源对 PM_{2.5} 贡献显著增加, 与不利的气象条件及较强的非均相反应作用造成一

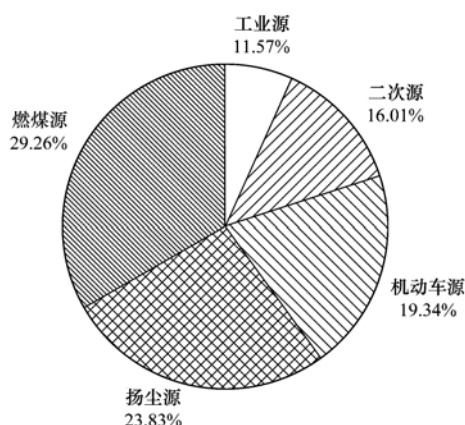
图6 采样期间阳泉市各类污染源对PM_{2.5}贡献率

Fig. 6 Sources contribution of PM_{2.5} during the sampling period in Yangquan City

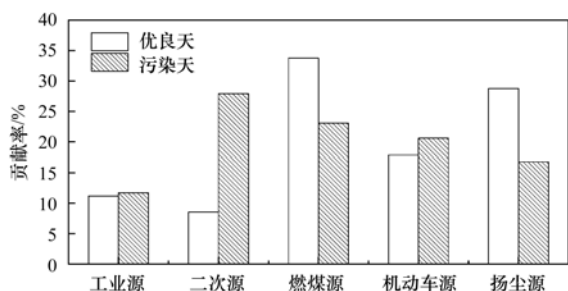
图7 不同污染条件下各类污染源对PM_{2.5}贡献

Fig. 7 Sources contributions of PM_{2.5} under different pollution conditions

次排放的SO₂和NO₂转化为二次颗粒物的速度加快有关^[27,28]。污染发生时的静稳天气导致采样点周边的机动车排放对PM_{2.5}贡献较优良天时上升,城市周边的燃煤源对PM_{2.5}贡献有所下降。污染天扬尘源对PM_{2.5}贡献低于优良天对PM_{2.5}贡献,与上文中化学组分的分析一致,相似的结果在郑州市重污染过程也被发现^[58]。

4 结论

(1) 采样期间,污染天二次无机离子(SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺) 在PM_{2.5}中的比例为23.83%,是优良天(9.13%)的2.43倍,污染天二次无机污染严重;污染天,人为源相关元素Cd、Sb、Sn、Cu、Pb、Zn和As的富集程度显著增加,EF值平均增加比例达到123.95%,污染天PM_{2.5}受到人为源(工业生产、燃料燃烧和机动车尾气排放等)的影响增加。

(2) 采样期间,阳泉市各主要污染源对PM_{2.5}的贡献分别是燃煤29.26%、扬尘23.83%、机动车19.34%、二次源16.01%和工业源11.57%,其中污染天,机动车、二次源和工业源对PM_{2.5}的贡献为20.57%、27.91%和11.70%,高于优良天时

17.82%、8.52%和11.18%,燃煤源和扬尘源的贡献为23.04%和16.77%,明显低于优良天时33.75%和28.73%,污染天二次源对PM_{2.5}贡献显著增加,与不利的气象条件及较强的非均相反应作用造成一次排放的SO₂和NO₂转化为二次颗粒物的速度加快有关,污染天气机动车排放对PM_{2.5}贡献较优良天上升,燃煤源对PM_{2.5}贡献有所下降。

(3) 阳泉市在秋冬季应加强对燃煤和扬尘源的控制,同时进一步加强对机动车的控制,以减少污染期间机动车的贡献。

参考文献:

- [1] Qi M, Zhu X, Du W, *et al.* Exposure and health impact evaluation based on simultaneous measurement of indoor and ambient PM_{2.5} in Haidian, Beijing [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 704-712.
- [2] 杨文涛, 姚诗琪, 邓敏, 等. 北京市PM_{2.5}时空分布特征及其与PM₁₀关系的时空变异特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 684-690.
Yang W T, Tao S Q, Deng M, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of PM_{2.5} and spatio-temporal variation characteristics of the relationship between PM_{2.5} and PM₁₀ in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 684-690.
- [3] 周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 等. 南京春季北郊地区大气PM_{2.5}中主要化学组分及碳同位素特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4439-4445.
Zhou Y M, Han X, Wang J J, *et al.* Chemical constitution and carbon isotopic compositions of PM_{2.5} in the northern suburb of Nanjing in spring [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4439-4445.
- [4] 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 泉州市大气PM_{2.5}中水溶性离子季节变化特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4044-4053.
Zhang Y F, Yu R L, Hu G R, *et al.* Seasonal variation and source apportionment of water-soluble ions in PM_{2.5} in Quanzhou City [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4044-4053.
- [5] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 中国PM_{2.5}来源解析方法综述[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, **50**(6): 1141-1154.
Zheng M, Zhang Y J, Yan C Q, *et al.* Review of PM_{2.5} source apportionment methods in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, **50**(6): 1141-1154.
- [6] Liu B S, Wu J H, Zhang J Y, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} based on error estimation from EPA PMF 5.0 model at a medium city in China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **222**: 10-22.
- [7] Yao L, Yang L X, Yuan Q, *et al.* Sources apportionment of PM_{2.5} in a background site in the North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 590-598.
- [8] 陈楚, 王体健, 李源昊, 等. 濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3421-3430.
Chen C, Wang T J, Li Y H, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of fine particulate matter in autumn and winter in Puyang, China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3421-3430.
- [9] GB 3095-2012 环境空气质量标准[S].
GB 3095-2012 Ambient air quality standard [S].

- [10] 任永建, 赖安伟, 高庆先. 山西省阳泉市大气环境质量数值模拟[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(2): 174-180.
Ren Y J, Lan A W, Gao Q X. Numerical simulation of air environment of Yangquan, Shanxi Province[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **33**(2): 174-180.
- [11] 王有文, 杨云霞, 王爱武. 用主成分回归分析大气污染成分的数学模型——以山西省阳泉市市区为例[J]. 忻州师范学院学报, 2016, **32**(5): 9-12.
Wang Y W, Yang Y X, Wang A W, *et al.* Mathematics model on analyzing air pollution factors with principal component and regression analysis method——taking Yangquan City in Shanxi Province as an example[J]. Journal of Xinzhou Teachers University, 2016, **32**(5): 9-12.
- [12] 中国环境监测总站. 全国城市空气质量实时发布平台[EB/OL]. <http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>, 2018-11-20.
- [13] Feng J L, Yu H, Su X F, *et al.* Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} during Chinese Spring Festival at Xinxiang, a heavily polluted city in North China: fireworks and health risks[J]. Atmospheric Research, 2016, **182**: 176-188.
- [14] 闫广轩, 张朴真, 黄海燕, 等. 郑州-新乡冬季 PM_{2.5} 中元素浓度特征及其源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2027-2035.
Yan G X, Zhang P Z, Huang H Y, *et al.* Concentration characteristics and source analysis of PM_{2.5} during wintertime in Zhengzhou-Xinxiang[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2027-2035.
- [15] Paatero P, Hopke P K. Rotational tools for factor analytic models[J]. Journal of Chemometrics, 2009, **23**(2): 91-100.
- [16] Brown S G, Eberly S, Paatero P, *et al.* Methods for estimating uncertainty in PMF solutions: Examples with ambient air and water quality data and guidance on reporting PMF results[J]. Science of the Total Environment, 2015, **518-519**: 626-635.
- [17] Qiu X H, Duan L, Gao J, *et al.* Chemical composition and source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in different functional areas of Lanzhou, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, **40**: 75-83.
- [18] 仇帅, 张爱滨, 刘明. 青岛大气总悬浮颗粒物中微量元素的含量特征及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(6): 1667-1675.
Qiu S, Zhang A B, Liu M. Concentrations and origins of trace elements in the atmospheric total suspended particulates in Qingdao, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(6): 1667-1675.
- [19] 武媛媛, 李如梅, 彭林, 等. 运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1799-1806.
Wu Y Y, Li R M, Peng L, *et al.* Chemical compositions and source apportionment of road dust in Yuncheng[J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1799-1806.
- [20] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
China National Environmental Monitoring Centre. Atlas of soil environmental background values of the People's Republic of China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [21] World Health Organization. Air quality guidelines. Global update 2005[M]. Copenhagen, Denmark: World Health Organization, 2006.
- [22] 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, **44**(1): 15-26.
Wang Y S, Yao L, Wang L L, *et al.* Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J]. Science China Earth Sciences, 2014, **57**(1): 14-25.
- [23] 李艳红, 赵彩萍, 荆肖军, 等. 太原地区灰霾天气特征及影响因子分析[J]. 气候与环境研究, 2014, **19**(2): 200-208.
Li Y H, Zhao C P, Jing X J, *et al.* Characteristics of dust haze in Taiyuan and its causative factors[J]. Climatic and Environmental Research, 2014, **19**(2): 200-208.
- [24] 徐虹, 肖致美, 陈魁, 等. 天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2519-2525.
Xu H, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Secondary inorganic pollution characteristics during heavy pollution episodes of 2017 in Tianjin[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2519-2525.
- [25] Zhang Q, Shen Z X, Cao J J, *et al.* Variations in PM_{2.5}, TSP, BC, and trace gases (NO₂, SO₂, and O₃) between haze and non-haze episodes in winter over Xi'an, China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **112**: 64-71.
- [26] 吴琳, 沈建东, 冯银厂, 等. 杭州市灰霾与非灰霾日不同粒径大气颗粒物来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(4): 373-381.
Wu L, Shen J D, Feng Y C, *et al.* Source apportionment of particulate matters in different size bins during hazy and non-hazy episodes in Hangzhou City[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(4): 373-381.
- [27] Sinha P R, Manchanda R K, Kaskaoutis D G, *et al.* Spatial heterogeneities in aerosol size distribution over Bay of Bengal during Winter-ICARB Experiment[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(27): 4695-4706.
- [28] Lagudu U R K, Raja S, Hopke P K, *et al.* Heterogeneity of coarse particles in an urban area[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(8): 3288-3296.
- [29] Zhang R, Sun X S, Shi A J, *et al.* Secondary inorganic aerosols formation during haze episodes at an urban site in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2018, **177**: 275-282.
- [30] 王敬, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 乌鲁木齐市重污染期间 PM_{2.5} 污染特征与来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(2): 113-119.
Wang J, Bi X H, Feng Y C, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during heavy pollution process in Urumchi City[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(2): 113-119.
- [31] 马剑丽. 上海宝山区 PM_{2.5} 特征研究与源解析研究[J]. 环境科学与管理, 2014, **39**(4): 120-123, 169.
Ma J L. Characteristics and sources analysis of PM_{2.5} in Baoshan district of Shanghai[J]. Environmental Science and Management, 2014, **39**(4): 120-123, 169.
- [32] 孟琛琛, 王丽涛, 苏捷, 等. 邯郸市 PM_{2.5} 化学组成特征及来源解析[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(2): 57-64.
Meng C C, Wang L T, Shu J, *et al.* Chemical compositions and source apportionment of PM_{2.5} in Handan City, Hebei Province[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(2): 57-64.
- [33] 刀谱, 张霖琳, 王超, 等. 京津冀冬季与夏季 PM_{2.5}/PM₁₀ 及其水溶性离子组分区域性污染特征分析[J]. 环境化学, 2015, **34**(1): 60-69.
Dao X, Zhang L L, Wang C, *et al.* Characteristics of mass and ionic compounds of atmospheric particles in winter and summer of Beijing-Tianjin-Hebei area, China[J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(1): 60-69.
- [34] Huang H, Zou C W, Cao J J, *et al.* Water-soluble ions in PM_{2.5}

- on the Qianhu campus of Nanchang University, Nanchang City: indoor-outdoor distribution and source implications[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, **12**(3): 435-443.
- [35] Gu J X, Du S Y, Han D W, *et al.* Major chemical compositions, possible sources, and mass closure analysis of PM_{2.5} in Jinan, China[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2014, **7**(3): 251-262.
- [36] Hao H Z, Guo Q Q. Spatial and temporal characteristics of PM_{2.5} and source apportionment in Wuhan[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, **121**: 032019.
- [37] 姚青, 韩素芹, 毕晓辉. 天津2009年3月气溶胶化学组成及其消光特性研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(2): 214-220.
- Yao Q, Han S Q, Bi X H. Main components and extinction characteristic of aerosol during March 2009 at Tianjin[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(2): 214-220.
- [38] Yu L D, Wang G F, Zhang R J, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} in an urban environment in Beijing[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, **13**(2): 574-583.
- [39] Jiang N, Li Q, Su F C, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} between heavily polluted days and other days in Zhengzhou, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **66**: 188-198.
- [40] Zhao P S, Dong F, He D, *et al.* Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM_{2.5} in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(9): 4631-4644.
- [41] 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 等. 朔州市市区PM_{2.5}中元素碳、有机碳的分布特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 787-793.
- Liu F X, Peng L, Bai H L, *et al.* Characteristics of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in Shuozhou City[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 787-793.
- [42] Zhang R, Jing J, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: Seasonal perspective[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **13**(14): 7053-7074.
- [43] Turpin B J, Huntzicker J J. Secondary formation of organic aerosol in the Los Angeles basin: a descriptive analysis of organic and elemental carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1991, **25**(2): 207-215.
- [44] 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 等. 重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3502-3510.
- Peng X L, Hao Q J, Wen T X, *et al.* Analysis pollution characteristics of organic carbon and elemental carbon in atmospheric aerosols in Beibei District, Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3502-3510.
- [45] Zhang Y, Huang W, Cai T Q, *et al.* Concentrations and chemical compositions of fine particles (PM_{2.5}) during haze and non-haze days in Beijing[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **174-175**: 62-69.
- [46] Thomaidis N S, Bakeas E B, Siskos P A. Characterization of lead, cadmium, arsenic and nickel in PM_{2.5} particles in the Athens atmosphere, Greece[J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(6): 959-966.
- [47] 王伯光, 杨嘉慧, 周炎, 等. 广州市机动车尾气中金属元素的排放特征[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(5): 389-394.
- Wang B G, Yang J H, Zhou Y, *et al.* The emission characteristics of metal elements in urban motor vehicles exhaust of Guangzhou City[J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(5): 389-394.
- [48] Huang X D, Olmez I, Aras N K, *et al.* Emissions of trace elements from motor vehicles: Potential marker elements and source composition profile[J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(8): 1385-1391.
- [49] 贾小花, 解静芳, 马翔, 等. 太原市冬季PM_{2.5}水溶性组分污染特征分析[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(4): 599-604.
- Jia X H, Xie J F, Ma X, *et al.* Analysis of water-soluble constituents in winter of PM_{2.5} in Taiyuan City [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(4): 599-604.
- [50] Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, *et al.* The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of PM_{2.5} and TSP aerosol in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(16): 2935-2952.
- [51] Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* Concentration and chemical characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China: 2001-2002 [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 264-275.
- [52] Zhang M, Salmon L G, Schauer J J, *et al.* Seasonal trends in PM_{2.5} source contributions in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(22): 3967-3976.
- [53] 刘亚勇, 张文杰, 白志鹏, 等. 我国典型燃煤源和工业过程源排放PM_{2.5}成分谱特征[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(12): 1859-1868.
- Liu Y Y, Zhang W J, Bai Z P, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} chemical source profiles of coal combustion and industrial process in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(12): 1859-1868.
- [54] Hsu S C, Liu S C, Huang Y T, *et al.* Long-range southeastward transport of Asian biomass pollution: signature detected by aerosol potassium in Northern Taiwan[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D14): D14301.
- [55] Callén M S, De La Cruz M T, López J M, *et al.* Comparison of receptor models for source apportionment of the PM₁₀ in Zaragoza (Spain)[J]. *Chemosphere*, 2009, **76**(8): 1120-1129.
- [56] Mazzei F, D'Alessandro A, Lucarelli F, *et al.* Characterization of particulate matter sources in an urban environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **401**(1-3): 81-89.
- [57] 苏吾比努尔·热克甫, 玉散·吐拉甫, 迪丽努尔·塔力甫, 等. 和田市城区PM_{2.5}化学组成特征及来源分析[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(5): 823-833.
- Suwubinuer R, Yusan T, Dilnuer T, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in urban area of Hotan City, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(5): 823-833.
- [58] 王申博, 余雪, 赵庆炎, 等. 郑州市两次典型大气重污染过程成因分析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(7): 2425-2431.
- Wang S B, Yu X, Zhao Q Y, *et al.* Analysis of the formation of two typical atmospheric heavy pollution episodes in Zhengzhou, China[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(7): 2425-2431.

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)