

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.9
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析·····	肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐遨,陈魁,邓小文(3879)
基于高分辨率MARGA分析成都市PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征·····	尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)
宿迁市PM _{2.5} 中水溶性无机离子的季节特征和来源分析·····	马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)
鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布·····	李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)
鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析·····	林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)
西安市冬季PM _{2.5} 中WSOC的光谱特性和来源解析·····	杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)
长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测·····	杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)
连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析·····	崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛丞,曹云擎(3941)
成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析·····	王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)
德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案·····	严茹莎(3961)
超低改造下中国火电排放清单及分布特征·····	屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)
浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征·····	赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)
垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选·····	赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)
兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源·····	韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)
然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素·····	张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)
河套灌区地下水化学演变特征及形成机制·····	崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)
石期河流域地下水化学特征及物质来源分析·····	李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)
长江中下游湖泊水体氮磷时空变化特征及其影响因素·····	季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)
2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析·····	李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)
菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响·····	康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)
金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析·····	刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)
典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征·····	孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)
微塑料对河水抗生素抗性基因的影响·····	周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)
莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价·····	廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)
拟柱孢藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异·····	叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)
奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟·····	李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)
浅基质层干植草沟运行效果的现场实验·····	张佳炜,李田,张庭秀(4105)
海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输·····	李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)
天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制·····	石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)
过硫酸盐氧化处理含苯磺酸废水·····	章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)
温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响·····	刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)
ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能·····	缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)
低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能·····	刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)
雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨·····	郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)
基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例·····	吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)
基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价·····	张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)
云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力·····	张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)
水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期·····	胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾纭,刘俊,廖柏寒(4218)
田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率·····	郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)
桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果·····	段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)
秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响·····	杨彩迪,卢升高(4246)
土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应·····	王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)
粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响·····	理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)
松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响·····	张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)
黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应·····	李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)
土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响·····	程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)
黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系·····	尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)
贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性·····	王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)
玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附·····	刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊嘉,彭晶,铁柏清(4322)
无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法·····	梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)
《环境科学》征订启事(4061)	
《环境科学》征稿简则(4132)	
信息(4233, 4293, 4304)	

宿迁市 PM_{2.5} 中水溶性无机离子的季节特征和来源分析

马红璐¹, 赵欣^{2,3*}, 陆建刚^{1*}, 王辉⁴, 许纯领⁴, 欧阳琰², 朱新胜², 殷堂兵^{2,3}, 漆丹^{2,3}, 陆亚秋², 汪玖阳¹, 陆声兴¹

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏省大气环境监测与污染控制高技术重点实验室, 南京 210044; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 3. 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室, 南京 210042; 4. 江苏省宿迁环境监测中心, 宿迁 223800)

摘要: 为了研究宿迁市 PM_{2.5} 中水溶性无机离子的季节特征和来源, 于 2017 年 5 月至 2018 年 1 月在宿迁市水汽通道上的 3 个监测点位采集了 171 份 PM_{2.5} 样品, 分析了 PM_{2.5} 质量浓度以及 9 种水溶性无机离子含量。结果表明, 宿迁市 PM_{2.5} 中水溶性无机离子的年均浓度为 $(44.08 \pm 34.61) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 PM_{2.5} 质量的 41.8%, 9 种水溶性离子浓度大小排序为 $\rho(\text{NO}_3^-) > \rho(\text{SO}_4^{2-}) > \rho(\text{NH}_4^+) > \rho(\text{Cl}^-) > \rho(\text{Na}^+) > \rho(\text{Ca}^{2+}) > \rho(\text{K}^+) > \rho(\text{F}^-) > \rho(\text{Mg}^{2+})$, 其中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 是主要的离子组分, 占总水溶性无机离子浓度的 75.6%。 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 年均值为 1.53 ± 0.88 , 表明移动污染源对 PM_{2.5} 的贡献高于固定污染源。水溶性无机离子相关性分析表明, NH_4^+ 与 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 可能以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4HSO_4 和 NH_4NO_3 的形式存在。结合主成分分析, 水溶性无机离子主要来源于二次转化、工业源、生物质燃烧和扬尘。PM_{2.5} 浓度与相对湿度在冬季呈显著正相关, 水汽传输在冬季更容易对 PM_{2.5} 浓度增长有促进作用。

关键词: PM_{2.5}; 水溶性离子; 污染特征; 主成分分析(PCA); 来源; 水汽通道

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-3899-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911243

Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM_{2.5} in Suqian City

MA Hong-lu¹, ZHAO Xin^{2,3*}, LU Jian-gang^{1*}, WANG Hui⁴, XU Chun-ling⁴, OUYANG Yan², ZHU Xin-sheng², YIN Tang-bing^{2,3}, QI Dan^{2,3}, LU Ya-qiu², WANG Jiu-yang¹, LU Sheng-xing¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control, Nanjing 210042, China; 4. Suqian Center of Environmental Monitoring, Suqian 223800, China)

Abstract: To study the seasonal pollution characteristics and sources of water-soluble inorganic ions in atmospheric PM_{2.5} in Suqian City, 171 samples were collected at three monitoring points, which were in the water vapor channel, from May 2017 to January 2018. The mass concentrations of PM_{2.5} and nine water-soluble inorganic ions were analyzed. The results showed that the annual average concentration of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in Suqian City was $(44.08 \pm 34.61) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, accounting for 41.8% of PM_{2.5}. The concentrations of these species were in the order of $\rho(\text{NO}_3^-) > \rho(\text{SO}_4^{2-}) > \rho(\text{NH}_4^+) > \rho(\text{Cl}^-) > \rho(\text{Na}^+) > \rho(\text{Ca}^{2+}) > \rho(\text{K}^+) > \rho(\text{F}^-) > \rho(\text{Mg}^{2+})$; NO_3^- , SO_4^{2-} , and NH_4^+ accounted for 75.6% of the total water-soluble ions. The annual average ratio of $\rho(\text{NO}_3^-)$ to $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ was 1.53 ± 0.88 , indicating that mobile sources contributed more to PM_{2.5} pollution. Based on the correlation analysis of NH_4^+ and SO_4^{2-} , NO_3^- may exist in the form of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4HSO_4 , or NH_4NO_3 . According to the principal component analysis, secondary transformation, industrial pollution, biomass burning, and dust were the major sources of water-soluble inorganic ions. PM_{2.5} concentrations were positively related to relative humidity in winter. Water vapor transmission is more likely to promote PM_{2.5} accumulation in winter.

Key words: PM_{2.5}; water-soluble ions; pollution characteristics; principal component analysis(PCA); source analysis; water vapor channel

随着我国工业化与城镇化的快速发展, 长江经济带区域大气环境进入复合型污染阶段, 其中 PM_{2.5} 是主要的污染物之一。PM_{2.5} 粒径微小, 能长时间滞留并降低能见度^[1~3], 其巨大的比表面积能吸附有害物质^[4,5], 具有显著负面健康效应^[6~9]。PM_{2.5} 中的水溶性无机离子可作为大气颗粒物的来源标识物^[10], 分析其组分浓度、季节特征和来源, 有助于阐

明颗粒物的来源、形成和转化^[11]。

收稿日期: 2019-11-26; 修订日期: 2020-03-24

基金项目: 2018 年中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(GYZX180104); 2017 年中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(42024); 南京信息工程大学大学生创新创业训练计划立项项目(201910300219)

作者简介: 马红璐(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向大气污染控制, E-mail: 492972977@qq.com

* 通信作者, E-mail: jglu@nuist.edu.cn; zhaoxin_8125@163.com

江苏地处长江经济带,是我国经济最活跃的省份之一,按地理位置分为苏北、苏中和苏南地区.近年来,苏南地区城市群的 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征与源解析已有越来越多的研究报道,如刘寿东等^[12]的研究发现,南京冬季 SO_4^{2-} 质量浓度在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的占比随着相对湿度的增大而升高;腾加泉等^[13]的研究发现,常州工业区中 Cl^- 浓度高于商业区和居住区,由于受到周边城市污染输送的影响,背景点水溶性无机离子浓度与其他点位浓度无显著差异;蔡敏等^[14]的研究发现,苏州 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子除了来自工业排放、二次污染和生物质燃烧,还受到海盐污染的影响.有研究表明,区域城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 及其水溶性无机离子的污染特征和成因差异,与城市的工业结构^[15,16]、地理位置和环境气候差异密切相关^[17~21].

相比苏南城市群,苏北地区关于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况与成因解析的相关研究鲜有报道.宿迁市位于江苏省北部,地势平坦,北面有骆马湖,南面有洪泽湖,两大湖泊的水汽传输可能对宿迁市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染存在影响.因此本研究在连接骆马湖、宿迁城区、洪泽湖的水汽通道上设置监测点位,针对宿迁

市四季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子,分析其污染特征和来源,以期对宿迁大气污染治理提供科学的理论依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

在连接宿迁市南北两大水体的水汽通道上结合地形和风向等综合因素,设置3个采样点(图1):骆马湖($33^\circ 59' 59''\text{N}$, $118^\circ 14' 05''\text{E}$)位于宿迁市区北部,距离市区2.5 km;宿迁学院($33^\circ 55' 59''\text{N}$, $118^\circ 17' 32''\text{E}$)位于市区中心;陈圩村($33^\circ 51' 17''\text{N}$, $118^\circ 18' 03''\text{E}$)位于宿迁市区南部,距离洪泽湖约30 km.采样仪器为中崂1108A-1型 $\text{PM}_{2.5}$ 采样器,选用石英纤维滤膜进行采样,采样流量为 $100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.每天采样时间为当天早09:00~次日早07:00,累计22 h.样品采样时间为2017年5月6~19日(春季)、8月15~25日(夏季)、11月10~29日(秋季)和2018年1月10~23日(冬季),有效样品数共计171份.每个采样点设置平行样的采集.同时记录下现场的温度、相对湿度、气压和风向等气象参数.

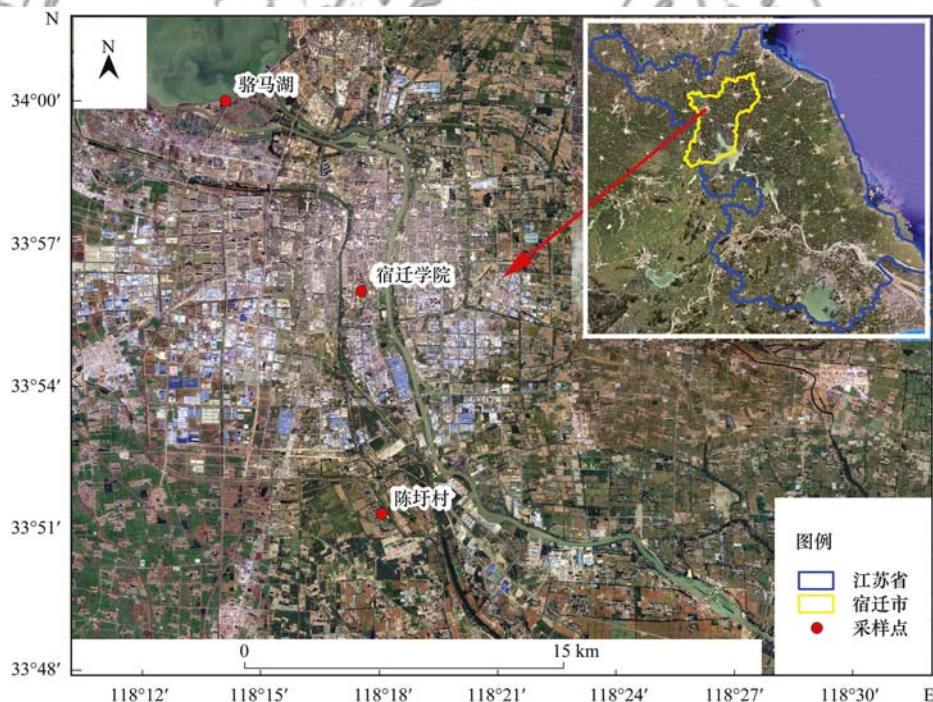


图1 宿迁市位置及采样点位示意

Fig. 1 Map of the Suqian City and sampling sites

1.2 分析方法

按照《环境空气颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 手工监测方法(重量法)技术规范》(HJ 656-2013)的要求,采样滤膜用电子天平(BSA224S-CW,德国,精度为 $1 \mu\text{g}$)称重.水溶性阴离子(F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-})采用

ICS-3000型(Dionex,美国)离子色谱仪分析,保护柱和色谱柱分别为 Ion Pac AG11-HC 和 Ion Pac AS11-HC,淋洗液为 $25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH,流速为 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,进样量为 $25 \mu\text{L}$,分析时间约为13 min.水溶性阳离子(NH_4^+ 、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+})采

用 ICS-3000 型 (Dionex, 美国) 离子色谱仪分析, 保护柱和色谱柱分别为 Ion Pac CG12A 和 Ion Pac CS12A, 淋洗液为 20 mmol·L⁻¹ 甲烷磺酸, 流速为 1.0 mL·min⁻¹, 进样量为 25 μL, 分析时间约为 18 min.

1.3 质量控制

每次采样前对采样器进行流量校准和气密性检查. 采样前, 石英纤维膜需在 450℃ 马弗炉里灼烧 4~6 h, 以去除有机杂质. 采样前后均将滤膜放在恒温恒湿的称重室 (温度 25℃ ± 5℃, 相对湿度 50% ± 5%) 平衡 24 h. 每个样品称重 3 次, 取其平均值, 称重后将滤膜放在 -40℃ 的冰箱中保存待测. 水溶性无机离子测试中, 每 10 个样品测定一个平行双样, 平行双样测定结果的相对偏差 ≤ 20% 视为样品有效. 同批次每 10 个样品做一个加标回收率测定, 实际样品的加标回收率控制在 80%~120% 之间. 样品的实际测量值要高于仪器的检出下限, 制作标准曲

线时各离子的峰面积与浓度之间的相关系数在 0.999 以上.

2 结果与讨论

2.1 宿迁市大气 PM_{2.5} 浓度水平

本研究期间 PM_{2.5} 浓度变化范围为 10~236 μg·m⁻³ (图 2), 年均浓度 [(106.5 ± 54.8) μg·m⁻³] 未达到《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 年均二级标准 (35 μg·m⁻³), 超标倍数为 3 倍. 宿迁市大气 PM_{2.5} 浓度季节变化规律显著, 表现为冬季最高 [(147.7 ± 57.5) μg·m⁻³], 其次为秋季 [(114.8 ± 39.9) μg·m⁻³] 和春季 [(109.5 ± 51.4) μg·m⁻³], 夏季浓度最低 [(87.3 ± 57.9) μg·m⁻³].

与周边城市相比, 宿迁与徐州、苏州的 PM_{2.5} 浓度季节变化趋势一致 (表 1). 从季节上看, 宿迁及周边城市 PM_{2.5} 浓度普遍在冬季最高, 在夏季最低.



图 2 宿迁市大气 PM_{2.5} 日均浓度变化

Fig. 2 Variations in daily PM_{2.5} concentrations in Suqian City

表 1 本研究与周边城市 PM_{2.5} 浓度对比/μg·m⁻³

Table 1 Comparison of PM_{2.5} concentrations in this study with nearby cities/μg·m⁻³

城市	采样时间 (年-月)	平均	春季	夏季	秋季	冬季
连云港 ^[22]	2016-12~2017-05	—	42	—	—	58.9
南京北郊 ^[23]	2014-01 和 2014-07	—	—	57.7	—	146.7
苏州 ^[24]	2015-04, 2015-08, 2015-10 和 2015-12	74.3	78.5	57.0	68.0	99.4
徐州 ^[25]	2016-04, 2016-07, 2016-10 和 2017-01	59.1	56.1	34.6	42.2	103.6
本研究	2017-05, 2017-08, 2017-11 和 2018-01	106.5	109.5	87.3	114.8	147.7

2.2 水溶性无机离子浓度的季节特征

本研究期间, 宿迁市大气 PM_{2.5} 中总水溶性无机离子浓度变化范围为 13.30~162.81 μg·m⁻³, 年均浓度为 (44.08 ± 34.61) μg·m⁻³, 平均占 PM_{2.5} 质量浓度的 41.8%. 9 种水溶性无机离子浓度特征为 NO₃⁻ (16.58 μg·m⁻³) > SO₄²⁻ (10.92 μg·m⁻³) > NH₄⁺ (7.84 μg·m⁻³) > Cl⁻ (2.59 μg·m⁻³) > Na⁺ (2.29 μg·m⁻³) > Ca²⁺ (1.75 μg·m⁻³) > K⁺ (1.02

μg·m⁻³) > F⁻ (0.93 μg·m⁻³) > Mg²⁺ (0.17 μg·m⁻³). 二次离子 NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 是主要的水溶性无机离子, 占总水溶性无机离子浓度质量分数为 75.6% (表 2).

水溶性离子的季节特征较为明显 (图 3). NO₃⁻ 浓度及其在总水溶性无机离子中的占比变化趋势均表现为: 冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季 (图 4), 与 PM_{2.5} 浓度变化趋势相同. 由于 NO₃⁻ 主要是从机动车尾气

排放的 NO_x 气体经过液相或气相氧化而来^[26],而宿迁市机动车排放源的排放强度不具有明显的季节性差异,因此 NO_3^- 浓度变化主要受当地温度和湿度等气象条件的影响.秋冬季节的低温天气有利于大气气相中的硝酸盐向颗粒相中富集,而夏季当温度高于 30°C 时,颗粒相中的硝酸盐挥发至气相中^[27],所以宿迁市秋冬季节 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 NO_3^- 浓度升高,夏季降至最低浓度. SO_4^{2-} 浓度的季节变化表现为冬季最高,其次为夏季和春季,秋季最低.从离子占比上来看,夏季和春季 SO_4^{2-} 占比较高,分别为 34% 和 31%,冬季和秋季占比最低,分别为 22% 和 16% (图 4).这是由于在高温、高湿以及强烈的太阳光辐射等条件下,前体物 SO_2 的光化学反应和液相反应得到加强,所以在夏季更容易转化成硫酸盐^[28]. NH_4^+ 主要来源于人为活动,尤其是农业生产和交通对 NH_4^+ 的贡献较大. NH_4^+ 浓度在冬季最高,其他 3 个季节浓度变化不明显,说明人为污染在冬季对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献最大.由图 3 和图 4 可知,虽然 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度不高,在总离子中占比不大,但二者在春季的浓度高于其他 3 个季节. Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于土壤,说明宿迁市春季的扬尘污染较为严重.二次离子作为 $\text{PM}_{2.5}$ 中的主要组分,其浓度冬季最大,为 $73.07\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,

其他 3 个季节的浓度变化不明显,分别为 $24.65\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (秋季)、 $22.04\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (春季) 和 $21.34\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (夏季).综上所述,宿迁市的二次污染对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献较大,尤其在冬季,前体物更容易发生二次转化形成二次离子.

表 2 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子年均浓度水平¹⁾
Table 2 Annual concentrations of water-soluble ions in $\text{PM}_{2.5}$

项目	最小值	最大值	平均值	标准偏差
F^-	0.00	4.64	0.93	0.58
Cl^-	0.34	8.94	2.59	2.16
SO_4^{2-}	2.52	44.06	10.92	8.81
NO_3^-	2.25	76.28	16.58	18.02
Na^+	0.61	11.22	2.29	1.31
NH_4^+	0.11	34.56	7.84	6.69
K^+	0.00	4.03	1.02	0.70
Mg^{2+}	0.00	0.60	0.17	0.09
Ca^{2+}	0.00	5.82	1.75	1.11
SNA	8.10	146.58	35.34	32.41
WSHs	13.30	162.81	44.08	34.61
SNA/WSHs	44.1	91.7	75.6	9.5
$\text{SO}_4^{2-}/\text{PM}_{2.5}$	2.3	25.7	10.9	5.9
$\text{NO}_3^-/\text{PM}_{2.5}$	2.7	37.2	13.8	8.0
$\text{NH}_4^+/\text{PM}_{2.5}$	0.1	17.5	7.4	3.4
SNA/ $\text{PM}_{2.5}$	6.2	66.1	32.1	14.5
WSHs/ $\text{PM}_{2.5}$	10.8	90.0	41.8	16.4

1) SNA 为 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度之和; WSHs 为 9 种水溶性无机离子浓度之和

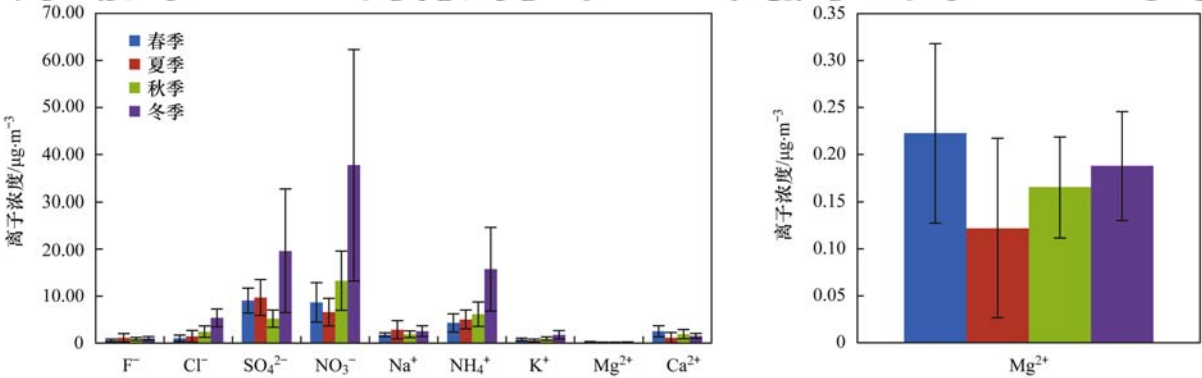


图 3 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子浓度季节变化

Fig. 3 Seasonal variations in water-soluble ions concentrations in $\text{PM}_{2.5}$

2.3 水溶性无机离子中 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$

大气中的 SO_2 主要来源于燃煤,而 NO_x 主要来源于机动车尾气,少量来源于燃煤,所以, $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 常用来表征固定排放源(燃煤)和移动排放源(机动车)相对贡献^[29, 30]. 宿迁市 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 年均值为 1.53 ± 0.88 , 比值大于 1.0, 表明移动排放源对宿迁市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的贡献占主导地位. 研究期间冬季和秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 比值较高, 平均比值均大于 1.0; 而夏季和春季 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 比值较低(图 5). 主要原因可能是夏季高温容易使颗粒相中的硝酸盐分

解挥发至气相中,从而使颗粒相中的 NO_3^- 浓度急剧降低. 另一方面,夏季高温、高湿和强辐射条件有利于 SO_4^{2-} 的生成,从而导致夏季 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 比值最低. 因此,宿迁当地在秋冬季节应加强对机动车等移动源的交通管制,以作为大气治理强化措施.

2.4 水溶性无机离子的相关性分析及来源分析

为了研究宿迁市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子的存在形式以及来源转化,采用 SPSS 25.0 软件对水溶性离子进行相关性分析. F^- 与 Na^+ 的相关系数分别为 0.959, 在 0.01 水平上显著相关(表 3). 由此可得, $\text{PM}_{2.5}$ 中 F^- 和 Na^+ 同源性较好. Mg^{2+} 与 Ca^{2+}

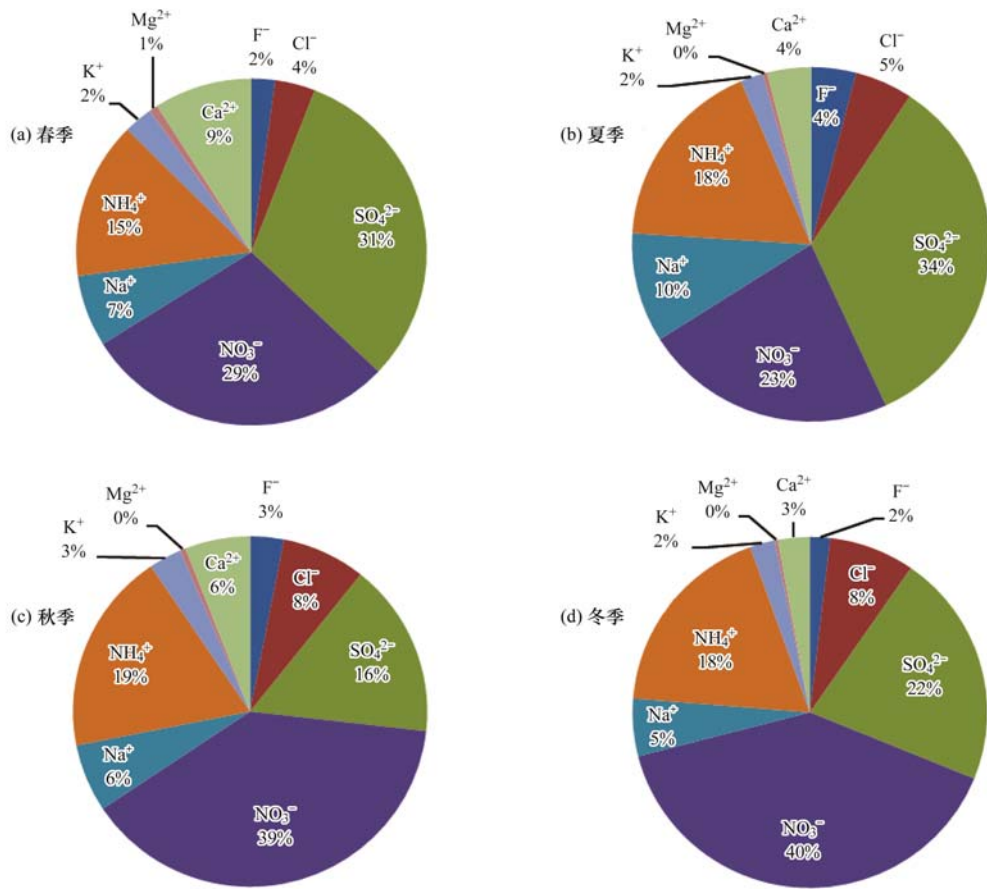


图 4 PM_{2.5} 中水溶性无机离子占比季节变化
Fig. 4 Seasonal proportion of water-soluble ions in PM_{2.5}

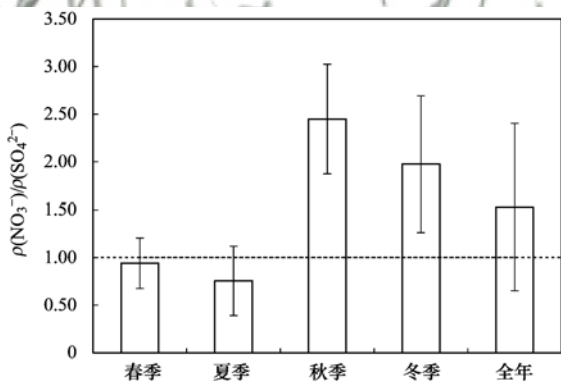


图 5 宿迁市 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 的季节变化特征
Fig. 5 Seasonal variation characteristics of $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ in Suqian City

在 PM_{2.5} 中存在显著的相关性 ($r = 0.855$), 说明 Mg²⁺ 与 Ca²⁺ 的来源可能相同^[31]. NH₄⁺ 与 SO₄²⁻、NO₃⁻ 呈现显著的相关性 ($r_1 = 0.876, r_2 = 0.948$), 3 种离子可能以 (NH₄)₂SO₄、NH₄HSO₄ 和 NH₄NO₃ 的形式存在^[32]. 由表 3 可知, 宿迁 PM_{2.5} 中 Cl⁻ 与 Na⁺ 的相关性系数为 0.572, 而苏州由于受到海盐气溶胶输送的影响, Cl⁻ 与 Na⁺ 相关性系数高达 (0.97)^[33], 明显高于宿迁, 表明宿迁市受到海盐气溶胶输送的影响程度较低.

主成分分析是采用降维的方法识别 PM_{2.5} 中水溶性离子的来源^[34~36]. 本研究利用 SPSS 25.0 软件对 PM_{2.5} 中的水溶性离子进行主成分分析.

表 3 PM_{2.5} 中水溶性离子间的相关系数矩阵¹⁾

	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
F ⁻	1								
Cl ⁻	0.614 **	1							
SO ₄ ²⁻	0.290 **	0.622 **	1						
NO ₃ ⁻	0.127 *	0.687 **	0.851 **	1					
Na ⁺	0.959 **	0.572 **	0.249 **	0.130	1				
NH ₄ ⁺	0.135	0.675 **	0.876 **	0.948 **	0.104	1			
K ⁺	0.589 **	0.811 **	0.731 **	0.831 **	0.433 **	0.817 **	1		
Mg ²⁺	0.862 **	0.626 **	0.352 **	0.254 **	0.842 **	0.196 *	0.538 **	1	
Ca ²⁺	0.717 **	0.475 **	0.135	0.065	0.688 **	-0.012	0.378 **	0.855 **	1

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; 黑体表示相关系数大于 0.8

KMO 和 Bartlett 球形检验可以用来评估数据是否适合因子分析. 本研究中的 Bartlett 球形检验的 P 值为 0.000, 显著性检验限值为 0.05, 可以认为相关系数矩阵与单位矩阵有显著性差异; KMO 值越接近 1, 则变量越适合做因子分析, 主成分分析 (principal component analysis, PCA) 的结果才能保证有效性. 本研究的 KMO 值为 0.821, 球形检验也符合要求, 数据可以作因子分析.

如表 4 所示, 主成分分析提取了 2 个因子, 可以解释水溶性无机离子来源的 92.66%. 主成分 1 中 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 F^- 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 的载荷值较高 (均大于 0.7), 能够解释离子来源的 65.86%. Mg^{2+} 主要来自土壤; Ca^{2+} 可能来自道路扬尘、土壤或建筑施工, 也可能来自水泥厂或石灰窑; Na^+ 和 Cl^- 除了来自海盐外, 还可能来自燃煤、工业排放等; F^- 主要来自工业排放、土壤、燃煤燃烧等, 所以可以认为主成分 1 是扬尘和工业源.

表 4 宿迁市水溶性离子的正交旋转因子负载矩阵

Table 4 Varimax rotated factor loading matrix for water-soluble ions in Suqian City

项目	因子 1	因子 2
F^-	0.953	0.182
Cl^-	0.712	0.631
SO_4^{2-}	0.235	0.895
NO_3^-	0.071	0.977
Na^+	0.953	0.147
NH_4^+	0.026	0.988
K^+	0.489	0.822
Mg^{2+}	0.957	0.208
Ca^{2+}	0.945	0.074
特征值	5.927	2.413
方差贡献率/%	65.857	26.806
累计贡献率/%	65.857	92.663

主成分 2 中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 和 K^+ 的载荷值较高 (均大于 0.7), 解释了水溶性离子来源的 26.81%. NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 属于二次污染物, 是由 NO_x 、 SO_2 和 NH_3 等前体物经过化学反应而生成. NO_3^- 可能来源是汽车尾气、燃料燃烧等; SO_4^{2-} 主要来自工农业生产、交通运输、建筑、燃煤燃烧等过程, NH_4^+ 可能来自大量生物质燃料的燃烧, 而 K^+ 是生物质燃烧的示踪污染物, 所以主成分 2 可以认为是二次污染源和生物质燃烧.

2.5 水汽传输对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响

随着相对湿度增加, $\text{PM}_{2.5}$ 吸湿性能增强且易累积^[37, 38]. 为了研究宿迁市南北两大湖泊的水汽传输对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响, 对不同采样点在不同季节的相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行相关性分析. 宿迁冬季盛行东北风, 冬季季风携带骆马湖水汽南下, 增加了宿迁环境空气中的相对湿度. 如图 6~8 所示, 冬季各采样点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与相对湿度的正相关性显著, 临湖区域大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与相对湿度的相关系数最大 (0.7), 正相关性系数随着离骆马湖距离的增加逐渐减小. 夏季环境空气的相对湿度最高, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度却是最低的, 这是因为夏季大气对流强烈, 降水频繁, 降水对大气颗粒物有“冲洗”作用^[39]. 宿迁冬季风速小、大气混合层低, 骆马湖的水汽传输使环境空气相对湿度增大, 这些条件都不利于 $\text{PM}_{2.5}$ 扩散, 导致 $\text{PM}_{2.5}$ 累积, 更易发生污染物二次转化, 这与上文中冬季二次离子浓度最高的结果相一致. 综上所述, 水汽传输造成的相对湿度增大在一定程度上会使宿迁市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增加, 具体的影响范围和强度, 尚需进一步研究.

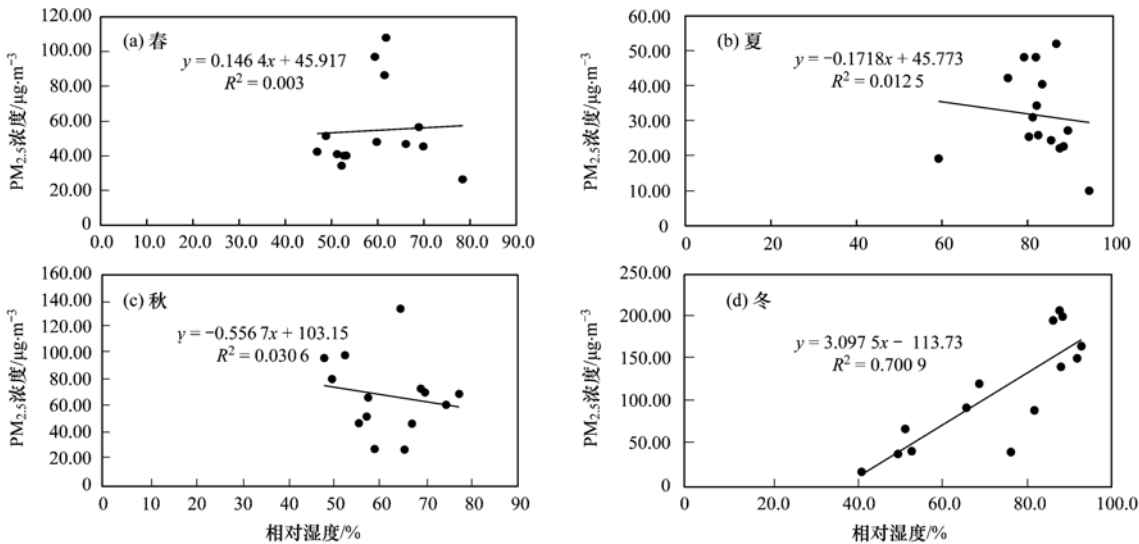
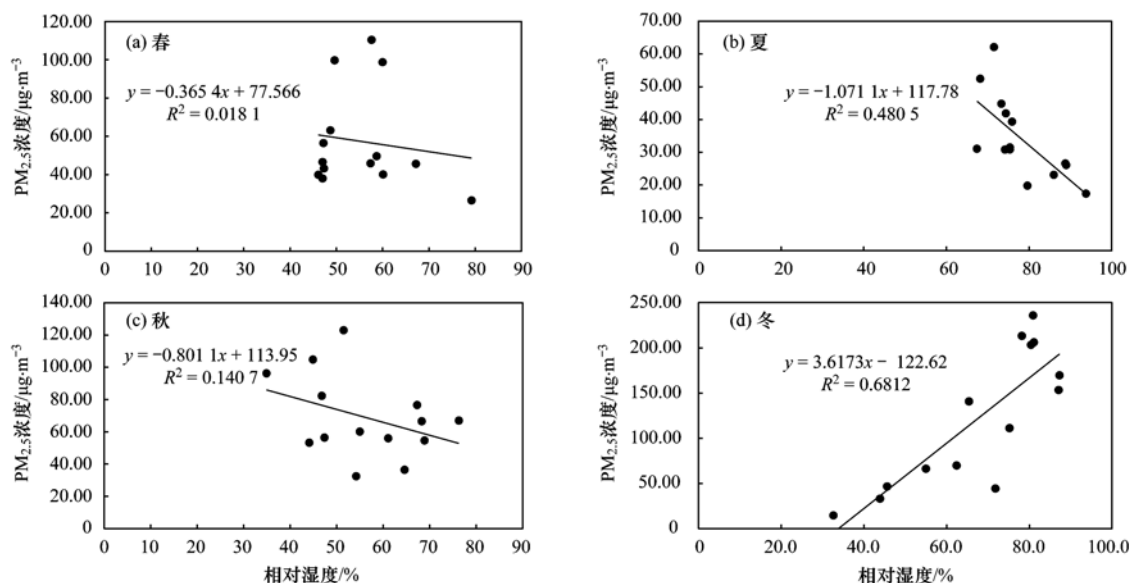
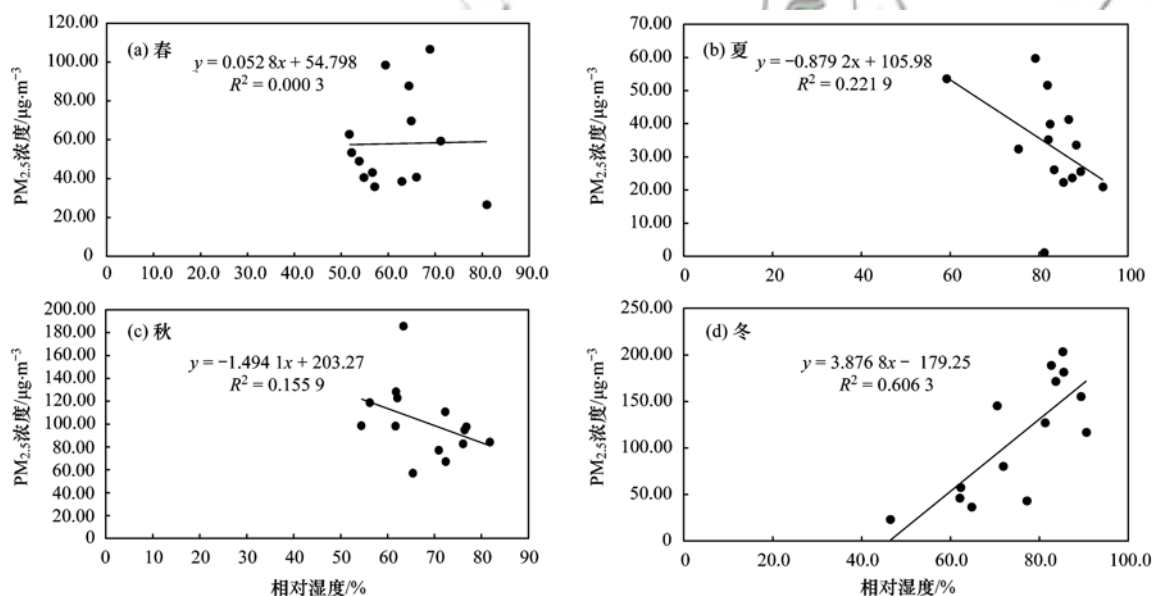


图 6 骆马湖四季的相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相关性

Fig. 6 Correlation between relative humidity and $\text{PM}_{2.5}$ in Luoma Lake

图7 宿迁学院四季的相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相关性Fig. 7 Correlation between relative humidity and $\text{PM}_{2.5}$ in Suqian College图8 陈圩村四季的相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相关性Fig. 8 Correlation between relative humidity and $\text{PM}_{2.5}$ in Chenwei Country

3 结论

(1) 宿迁市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较为严重, 冬季浓度最高, 秋季、春季次之, 夏季浓度最低。

(2) 研究期间宿迁市 $\text{PM}_{2.5}$ 中总水溶性无机离子平均浓度为 $(44.08 \pm 34.61) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 41.8%; $\text{PM}_{2.5}$ 中 9 种水溶性离子浓度大小为 $\rho(\text{NO}_3^-) > \rho(\text{SO}_4^{2-}) > \rho(\text{NH}_4^+) > \rho(\text{Cl}^-) > \rho(\text{Na}^+) > \rho(\text{Ca}^{2+}) > \rho(\text{K}^+) > \rho(\text{F}^-) > \rho(\text{Mg}^{2+})$, 其中二次水溶性离子占比最大, 冬季水溶性无机离子浓度最高。

(3) 二次离子 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 可能以

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4HSO_4 、 NH_4NO_3 的形式存在; $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的年均特征值大于 1, 宿迁市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的贡献主要来自移动源。

(4) 通过主成分分析, 宿迁市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子来源主要有工业源、二次转化、生物质燃烧和扬尘。

(5) 在冬季, 骆马湖水汽传输引起的相对湿度增大使宿迁市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高, 水汽传输对临湖区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增长影响最大。

致谢: 感谢宿迁环境监测中心陈树军和何青在方案制定与现场监测中给予的协助。

参考文献:

[1] Liu F, Tan Q W, Jiang X, et al. Effects of relative humidity and

- PM_{2.5} chemical compositions on visibility impairment in Chengdu, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **86**: 15-23.
- [2] Feng J L, Yu H, Mi K, *et al.* One year study of PM_{2.5} in Xinxiang City, north China: seasonal characteristics, climate impact and source[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **154**: 75-83.
- [3] 韩艳妮, 王格慧. 华北农村大气 PM_{2.5} 中水溶性物质化学组成、吸湿性能及光学特征[J]. *地球环境学报*, 2016, **7**(1): 44-54.
- Han Y N, Wang G H. Composition, hygroscopicity and light absorption of water-soluble fraction of PM_{2.5} at a rural site near Beijing[J]. *Journal of Earth Environment*, 2016, **7**(1): 44-54.
- [4] Samek L, Stegowski Z, Furman L, *et al.* Chemical content and estimated sources of fine fraction of particulate matter collected in Krakow[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, **10**(1): 47-52.
- [5] Liu K K, Ren J. Characteristics, sources and health risks of PM_{2.5}-bound potentially toxic elements in the northern rural China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(5): 1621-1626.
- [6] Gao Y, Guo X Y, Li C, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} in Miyun, the northeastern suburb of Beijing: chemical composition and evaluation of health risk[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(21): 16688-16699.
- [7] 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 等. 2017 年秋季长春市 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染源及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 564-573.
- Zhang Y X, Cao F, Zheng H, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in Changchun City, autumn of 2017[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 564-573.
- [8] 陈泉, 李灿, 魏小清, 等. 株洲市冬季室内 PM_{2.5} 污染成分特征及健康风险研究[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(9): 1088-1093.
- Chen Q, Li C, Wei X Q, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} pollution composition and its health risk assessment of indoor PM_{2.5} in winter in Zhuzhou[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2019, **41**(9): 1088-1093.
- [9] Chai G R, He H, Sha Y Z, *et al.* Effect of PM_{2.5} on daily outpatient visits for respiratory diseases in Lanzhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 1563-1572.
- [10] 陶月乐, 李亲凯, 张俊, 等. 成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4034-4043.
- Tao Y L, Li Q K, Zhang J, *et al.* Seasonal variations in particle size distribution and water-soluble ion composition of atmospheric particles in Chengdu[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4034-4043.
- [11] 别淑君, 杨凌霄, 高颖, 等. 济南市背景区域大气 PM_{2.5} 污染特征及其对能见度的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 3868-3874.
- Bie S J, Yang L X, Gao Y, *et al.* Characteristics of atmospheric PM_{2.5} pollution and its influence on visibility in background areas of Jinan[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3868-3874.
- [12] 刘寿东, 张莉, 张园园, 等. 温湿度对南京北郊 PM_{2.5} 中二次无机离子生成演化的影响[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(4): 714-721.
- Liu S D, Zhang L, Zhang Y Y, *et al.* Influences of temperature and humidity on formation and evolution of secondary aerosol inorganic ions of PM_{2.5} at northern suburban Nanjing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(4): 714-721.
- [13] 滕加泉, 程钟, 梁丹妮, 等. 常州市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子组成及来源[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, **25**(9): 1368-1374.
- Teng J Q, Cheng Z, Liang D N, *et al.* Characteristics and sources analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} in Changzhou[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(9): 1368-1374.
- [14] 蔡敏, 严明良, 包云轩. 苏州市大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子的源解析及其气象因子分析[J]. *气象科学*, 2018, **38**(5): 648-658.
- Cai M, Yan M L, Bao Y X. Source resolution of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in atmosphere of Suzhou City and impact of meteorological factors on their concentration change[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2018, **38**(5): 648-658.
- [15] Zhang Z Y, Shao C F, Guan Y, *et al.* Socioeconomic factors and regional differences of PM_{2.5} health risks in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **251**: 109564.
- [16] 王振波, 梁龙武, 王旭静. 中国城市群地区 PM_{2.5} 时空演变格局及其影响因素[J]. *地理学报*, 2019, **74**(12): 2614-2630.
- Wang Z B, Liang L W, Wang X J. Spatio-temporal evolution patterns and influencing factors of PM_{2.5} in Chinese urban agglomerations[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(12): 2614-2630.
- [17] Huy D H, Thanh L T, Hien T T, *et al.* Comparative study on water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} from two distinct climate regions and air quality[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **88**: 349-360.
- [18] 柏玲, 姜磊, 陈忠升. 长江中游城市群 PM_{2.5} 时空特征及影响因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, **27**(5): 960-968.
- Bai L, Jiang L, Chen Z S. Spatio-temporal characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(5): 960-968.
- [19] Zhang W J, Wang H, Zhang X Y, *et al.* Evaluating the contributions of changed meteorological conditions and emission to substantial reductions of PM_{2.5} concentration from winter 2016 to 2017 in Central and Eastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **716**: 136892.
- [20] Liu T T, Hu B Y, Yang Y X, *et al.* Characteristics and source apportionment of PM_{2.5} on an island in Southeast China: Impact of sea-salt and monsoon[J]. *Atmospheric Research*, 2020, **235**: 104786.
- [21] 张晓雨, 赵欣, 应蓉蓉, 等. 广州大气 PM_{2.5} 中含碳组分的污染特征及来源解析[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, **34**(7): 659-666.
- Zhang X Y, Zhao X, Ying R R, *et al.* Characteristics and source apportionments of carbonaceous components in atmospheric fine particles in Guangzhou[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, **34**(7): 659-666.
- [22] 姚瑶, 陈程, 张丽. 连云港市区 PM_{2.5} 中水溶性离子组分特征[J]. *污染防治技术*, 2018, **31**(5): 27-31.
- Yao Y, Chen C, Zhang L. Pollution character of PM_{2.5} water-soluble ions in Lianyungang City[J]. *Pollution Control Technology*, 2018, **31**(5): 27-31.
- [23] 张海潇, 郭照冰, 陈善莉, 等. 南京北郊秋冬季大气 PM_{2.5} 中碳质组分浓度及同位素组成研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(9): 3424-3429.

- Zhang H X, Guo Z B, Chen S L, *et al.* Concentration and isotopic composition of carbonaceous components in PM_{2.5} during winter and summer in the northern suburb of Nanjing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(9): 3424-3429.
- [24] 王念飞, 陈阳, 郝庆菊, 等. 苏州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4482-4489.
- Wang N F, Chen Y, Hao Q J, *et al.* Seasonal variation and source analysis of the water-soluble inorganic ions in fine particulate matter in Suzhou[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4482-4489.
- [25] 陈飞, 于洪霞, 柴发合. 徐州市大气 PM_{2.5} 污染特征和来源解析[J]. *环境与可持续发展*, 2017, **42**(5): 135-138.
- Chen F, Yu H X, Chai F H. Characteristic and source apportionment of PM_{2.5} in Xuzhou [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2017, **42**(5): 135-138.
- [26] 赵梦雪, 吴琳, 方小珍, 等. 天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4133-4141.
- Zhao M X, Wu L, Fang X Z, *et al.* Water-soluble inorganic ions in the road ambient atmospheric particles of Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4133-4141.
- [27] 郭文帝, 王开扬, 郭晓方, 等. 太原市气溶胶中硫、氮转化特征[J]. *环境化学*, 2016, **35**(1): 11-17.
- Guo W D, Wang K Y, Guo X F, *et al.* Characteristics of sulfur and nitrogen conversion in the aerosol, Taiyuan [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(1): 11-17.
- [28] 程渊, 刘保双, 吴建会, 等. 菏泽市夏季 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中水溶性离子组分污染特征[J]. *环境化学*, 2019, **38**(4): 729-737.
- Cheng Y, Liu B S, Wu J H, *et al.* Pollution characteristics of water-soluble ions in ambient PM₁₀ and PM_{2.5} during summer of 2015 in Heze City[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(4): 729-737.
- [29] 肖浩, 肖化云, 吴攀, 等. 贵阳秋季 PM_{2.5} 水溶性离子组成特征及来源解析[J]. *环境化学*, 2019, **38**(3): 548-555.
- Xiao H, Xiao H Y, Wu P, *et al.* Composition and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} during autumn in Guiyang [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(3): 548-555.
- [30] 郁佳, 胡世祥, 黄振, 等. 武汉市春季大气 PM_{2.5} 中水溶性离子特征[J]. *中国环境监测*, 2017, **33**(5): 35-41.
- Yu J, Hu S X, Huang Z, *et al.* Characteristic analysis of water-soluble ions in atmospheric fine particles in spring Wuhan[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(5): 35-41.
- [31] 胡晓峰, 张翔, 柳笑, 等. 西宁市 PM_{2.5} 水溶性无机离子特征及其来源解析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(7): 1179-1186.
- Hu X F, Zhang X, Liu X, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in Xining city[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(7): 1179-1186.
- [32] 曹聪, 王格慧, 吴灿, 等. 华山地区 PM_{2.5} 中无机离子垂直分布特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1473-1483.
- Cao C, Wang G H, Wu C, *et al.* Vertical distributional characteristics of inorganic ions of PM_{2.5} at Mt. Huashan, Inland China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1473-1483.
- [33] 汤莉莉, 汤蕾, 花艳, 等. 苏南三市秋冬季 PM_{2.5} 中水溶性离子和元素特征及源解析[J]. *大气科学学报*, 2015, **38**(5): 686-693.
- Tang L L, Tang L, Hua Y, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble ions and elements in PM_{2.5} in three cities of South Jiangsu in autumn and winter [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2015, **38**(5): 686-693.
- [34] 龙学著. 基于主成分分析法的大气悬浮颗粒物来源探析[J]. *环境影响评价*, 2018, **40**(3): 61-64.
- Long X Z. Airborne particles apportionment study based on principal components analysis [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2018, **40**(3): 61-64.
- [35] Liang L C, Liu N, Landis M S, *et al.* Chemical characterization and sources of PM_{2.5} at 12-h resolution in Guiyang, China[J]. *Acta Geochimica*, 2018, **37**(2): 334-345.
- [36] Yadav V, Nath S. Novel hybrid model for daily prediction of PM₁₀ using principal component analysis and artificial neural network[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, **16**(6): 2839-2848.
- [37] 宋秀瑜, 曹念文, 赵成, 等. 南京地区相对湿度对气溶胶含量的影响[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(9): 3240-3246.
- Song X Y, Cao N W, Zhao C, *et al.* Effect of relative humidity on aerosol content in Nanjing[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(9): 3240-3246.
- [38] Zhu C Y, Zeng Y Z. Effects of urban lake wetlands on the spatial and temporal distribution of air PM₁₀ and PM_{2.5} in the spring in Wuhan[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, **31**: 142-156.
- [39] 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 等. 南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3268-3279.
- Wu D, Cao S, Tang L L, *et al.* Variation of size distribution and the influencing factors of aerosol in northern suburbs of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3268-3279.

CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Chengdu Based on the MARGA	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Suqian City	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM _{2.5} in Winter of Xi'an	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Appointment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiongan New District	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)