

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勳之, 姜榕, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
基于多种新型受体模型的PM_{2.5}来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
华中地区夏季PM_{2.5}中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)

淄博2021年元宵节PM_{2.5}水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)

浙江省大气颗粒物PM_{2.5}中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)

2001~2019年气象条件对江苏省PM_{2.5}分布的影响 潘晨, 康志明 (649)

基于神经网络和数值模型的重点区域PM_{2.5}预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)

2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)

济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)

山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)

基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善PMF源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)

日照市夏季VOCs物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付莹, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)

泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)

典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)

2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)

西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)

生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)

不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)

雨源型城市河流水污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)

廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)

北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰若, 郭道宇 (803)

河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 陈召堂, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)

青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)

鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)

鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)

汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)

基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)

新冠疫情下武汉典型饮用水水源中DBPs污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)

铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)

氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)

环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)

冷冻PN/A颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张绮英, 文言, 钱飞跃 (920)

不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)

云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)

山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄蓉, 高雪松 (946)

地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)

西南地质高背景区蔬菜Pb的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)

典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)

矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)

不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)

温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)

两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐焯 (1015)

复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)

产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦Cd吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 鹿发虎, 韩辉 (1031)

土壤phoC和phoD微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余烁, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)

刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张祯敏, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)

中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)

稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)

模拟及实际根系分泌物对镉污染土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)

德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)

陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)

长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)

《环境科学》征订启事(618) 《环境科学》征稿简则(761) 信息(685, 935, 956)

华中地区夏季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析

苏业旺¹, 刘威杰¹, 毛瑶², 程铖¹, 石明明¹, 许安¹, 李星谕¹, 胡天鹏¹, 祁士华², 邢新丽^{1,2*}

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 为探究我国华中地区不同区域夏季大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源, 选取武汉、随州和平顶山分别作为城市、郊区和农村监测站点进行大气 PM_{2.5} 样品采集, 分析了大气中 PM_{2.5} 质量浓度以及 8 种水溶性无机离子含量。结果表明, 采样期间 3 个站点 ρ (水溶性离子) 呈明显的空间分布特征, 即: 平顶山 [$(36.29 \pm 9.82) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] > 武汉 [$(32.55 \pm 10.05) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] > 随州 [$(26.10 \pm 6.23) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$], 分别占 PM_{2.5} 的质量分数为 52.47%、51.32% 和 48.61%, 平顶山站点由于农村生物质燃烧活动, 水溶性离子占比最大, 其中, 二次离子(SNA)是主要的离子成分, 分别占总水溶性离子的 95.65%、96.12% 和 97.33%。武汉(0.64)和随州(0.63)站点硫氧化率均值高于平顶山站点(0.50), 而武汉(0.18)和平顶山(0.19)站点氮氧化率高于随州站点(0.15), 站点间硫氧化率和氮氧化率差异分别受二次转化机制和站点富氨环境及周边交通源影响。武汉和平顶山站点的 PM_{2.5} 整体呈碱性, 随州站点则呈中性或弱酸性, 主要由 NH₄⁺ 差异造成。NH₄⁺ 在武汉和平顶山站点主要以 (NH₄)₂SO₄ 和 NH₄NO₃ 形式存在, 随州站点则主要以 (NH₄)₂SO₄ 和 (NH₄)HSO₄ 的形式存在。主成分-多元线性回归(PCA-MLR)分析表明, 武汉(89.27%)和随州(67.38%)站点受二次转化源影响最大, 同时武汉站点还受到工业源(8.54%)和燃煤源(2.27%)影响, 随州站点的污染来源还包括生物质燃烧(24.42%)和扬尘源(8.25%), 平顶山站点受生物质燃烧影响最大(58.37%), 其次为扬尘及燃烧源(38.05%)和交通源(3.58%)。SNA 离子潜在污染源区(PSCF)分析表明, 武汉站点主要潜在源区为湖北、河南和安徽交界处及安徽西南区域, 随州和平顶山受到长距离传输影响, 主要潜在源区从东部沿海开始自东向西分布在上海、江苏和安徽等地。

关键词: PM_{2.5}; 水溶性离子; 污染特征; 主成分-多元线性回归(PCA-MLR); 潜在源区; 华中地区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0619-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202106213

Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM_{2.5} During Summer in Central China

SU Ye-wang¹, LIU Wei-jie¹, MAO Yao², CHENG Cheng¹, SHI Ming-ming¹, XU An¹, LI Xing-yu¹, HU Tian-peng¹, QI Shi-hua², XING Xin-li^{1,2*}

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to investigate the pollution characteristics and sources of water-soluble ions in atmospheric PM_{2.5} in different regions of central China during summer, Wuhan, Suizhou, and Pingdingshan were selected as urban, suburban, and rural monitoring stations, respectively, to collect PM_{2.5} samples, and the mass concentration of PM_{2.5} in the atmosphere and the contents of eight water-soluble ions were analyzed. The results showed that ρ (water-soluble ions) at the three sites showed obvious spatial distribution characteristics, with Pingdingshan [$(36.29 \pm 9.82) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] > Wuhan [$(32.55 \pm 10.05) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] > Suizhou [$(26.10 \pm 6.23) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$], accounting for 52.47%, 51.32%, and 48.61% of the PM_{2.5} mass concentration, respectively. In the Pingdingshan station, the proportion of water-soluble ions was the largest due to biomass combustion in the rural area. Additionally, SNA (SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺) were the main ionic components, accounting for 95.65%, 96.12%, and 97.33% of the total water-soluble ions, respectively. The mean values of SOR of the Wuhan (0.64) and Suizhou (0.63) stations were higher than that of the Pingdingshan station (0.50), whereas the NOR values of the Wuhan (0.18) and Pingdingshan (0.19) stations were higher than that of the Suizhou station (0.15). The difference in SOR and NOR among stations was affected by the secondary conversion mechanism, the ammonia-rich environment, and the surrounding traffic sources, respectively. The PM_{2.5} at the Wuhan and Pingdingshan stations was in general alkaline, whereas at the Suizhou station it was neutral or weakly acidic, which was mainly caused by differences in NH₄⁺. NH₄⁺ mainly existed in the form of (NH₄)₂SO₄ and NH₄NO₃ at the Wuhan and Pingdingshan stations, whereas at the Suizhou station it mainly existed in the form of (NH₄)₂SO₄ or (NH₄)HSO₄. PCA-MLR analysis revealed that the Wuhan (89.27%) and Suizhou (67.38%) stations were the most affected by secondary conversion sources, whereas the Wuhan station was also affected by industrial sources (8.54%) and coal sources (2.27%). The pollution sources of the Suizhou station also included biomass combustion (24.42%) and dust sources (8.25%). The Pingdingshan station was most affected by biomass combustion (58.37%), followed by dust and combustion sources (38.05%) and traffic sources (3.58%). The analysis of potential sources of SNA (PSCF) showed that the main potential source areas of Wuhan were the boundary of Hubei, Henan, and Anhui and the southwest area of Anhui. Suizhou and Pingdingshan were affected by long-distance transport, and the main potential source regions were distributed in Shanghai, Jiangsu, and Anhui provinces from the east coast to the west.

Key words: PM_{2.5}; water-soluble ions; pollution characteristics; PCA-MLR; potential source area; central China

收稿日期: 2021-06-25; 修订日期: 2021-07-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212603)

作者简介: 苏业旺(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: suyw0224@163.com

* 通信作者, E-mail: xlxing@cug.edu.cn

随着社会经济快速发展,空气污染在全国范围内普遍存在,成为日益严重的环境问题。 $PM_{2.5}$ 是空气污染物的主要成分,是指空气动力学当量直径 $\leq 2.5 \mu m$ 的细颗粒物^[1]。由于其比表面积大,可以成为有毒物质的载体,进入呼吸系统后可直接到达人体肺泡内,对人体健康产生严重影响^[2]。大气 $PM_{2.5}$ 的化学组成比较复杂,目前主要报道的有水溶性离子、重金属、含碳组分和有机物质等^[3]。其中水溶性离子是 $PM_{2.5}$ 的重要组成部分之一,占 $PM_{2.5}$ 总质量浓度的30%以上^[4],二次离子(SNA,即 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+)是大气颗粒物中最主要的水溶性离子。水溶性离子由于其吸湿性,会对大气能见度产生影响,且水溶性离子还控制着气溶胶的酸碱度,对降雨产生影响^[5,6]。此外,水溶性离子对人体健康的影响也不容忽视,水溶性离子在转化过程中的催化作用会增强污染物的毒性,增加细颗粒物的潜在健康影响^[7,8]。因此,对 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子特别是二次水溶性离子的研究具有重要意义。

区域大气 $PM_{2.5}$ 及其水溶性离子的污染特征和成因差异,与地区的工业结构、地理位置和环境气候差异密切相关^[9],姜蕴聪等^[10]的研究对11座城市分别进行城区、郊区和乡村站点 $PM_{2.5}$ 样品采集,发现京津冀和长三角地区城区 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高,而长江中游、四川盆地及关中地区郊区 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高。贾佳等^[11]的研究分析京津冀区域典型城市重污染时段SNA的污染来源和区域传输对SNA质量浓度的影响,发现SNA污染是本地源排放和外来源传输共同作用的结果,其中外来源中 NO_3^- 的贡献较高。李瑞等^[12]的研究对长三角北部城市秋冬季重污染过程进行潜在源分析,发现区域内城市间相互影响较大,跨区域大气污染联动对缓解长三角北部区域污染有重要作用。郭振东等^[13]的研究采集了长江三角洲地区徐州、东山、南京和寿县4个站点的 $PM_{2.5}$ 样品,发现二次转化源对4个站点 $PM_{2.5}$ 有着最大的贡献率,且生物质燃烧对分别位于郊区和农村的东山和寿县站点影响较大。

近年来,华中地区工农业和交通运输业发展迅速,经济快速发展和人口的持续增长导致能源消耗量也不断增加,华中地区大气环境质量有下降趋势。目前对华中地区 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染的研究多集中在武汉^[14,15]、郑州^[16,17]和新乡^[18]等大中型城市,各项研究表明华中地区 $PM_{2.5}$ 污染水平较高且其中水溶性离子主要受二次转化影响,例如闫广轩等^[18]的研究结合2a的观测数据发现水溶性离子在 $PM_{2.5}$ 中占比增加,颗粒污染物向二次水溶性离子污染物转移。已有研究多关注于单一站点,且集中在冬

季或冬夏组分对比分析,对城市、郊区和农村夏季大气水溶性离子的异同及其原因的关注有所欠缺。尽管我国冬季 $PM_{2.5}$ 污染较为严重,但夏季气溶胶的研究也不容忽视,且大气本身的流通性较强,站点之间具有联系,环境空气污染的防范需要从区域传输尺度系统考虑。本研究选取华中地区从北到南的传输通道为切入点,以武汉、随州和平顶山分别作为城市、郊区和农村站点,进行 $PM_{2.5}$ 样品采集,对水溶性离子的污染特征和主要来源进行分析,对比二次离子的区域传输贡献,结果有助于了解华中地区 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的区域性差异,以期为区域大气联合防控工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于2017年6月3~22日连续采集武汉、随州和平顶山这3个站点的 $PM_{2.5}$ 样品(图1)。采样位置均高于地面20 m以上,周边无建筑物遮挡,通风条件良好。武汉采样点(N30°31'54", E114°21'43")位于湖北省环境监测中心站楼顶,地处城市中心人类活动密集区域,周边交通流量大,是典型的城区站点。随州采样点(N32°21'02", E113°11'53")位于随县万和新城太白顶居委会楼顶,周边被丘陵环抱,人烟稀少,属于典型的郊区站点。平顶山采样点(N33°53'34", E113°01'56")位于平顶山市宝丰县肖旗乡居委会楼顶,附近存在高速公路及主乡道,交通便利,但周边多为农田,是典型的农村站点。

$PM_{2.5}$ 样品采集仪器为TH-150 F(武汉天虹,中国)智能中流量颗粒物采样器,采样滤膜为石英纤维滤膜。样品采集时,采样器流量设置为 $100 L \cdot min^{-1}$,每天09:00至第2 d 09:00连续采集24 h颗粒物样品。

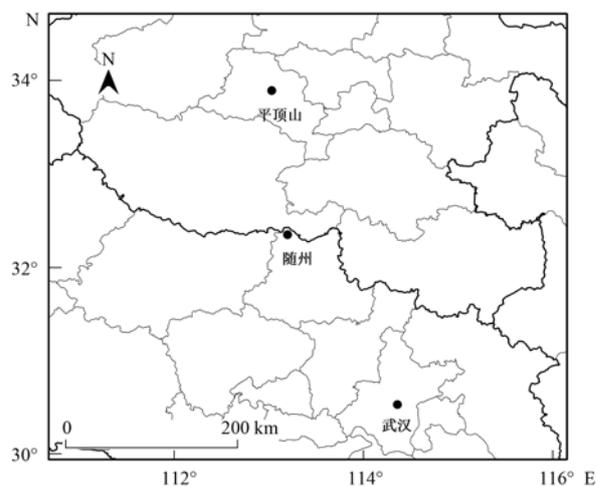


图1 采样站点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.2 样品分析

切取 3.14 cm² 石英滤膜作为样品,剪碎后置于 15 mL 洁净离心管中并编号,加入 15 mL 去离子水后超声 60 min,经 0.45 μm 水系滤头过滤后,取 10 mL 待测.采用 883 Basic IC plus 型离子色谱仪(瑞士万通)测定样品中的 F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 这 4 种阴离子和 Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺ 这 4 种阳离子.使用 Metrosep C6-150/4.0 型色谱柱,以 HNO₃ 6.0 mmol·L⁻¹ 为淋洗液检测阳离子,使用 Metrosep A Supp4-250/4.0 型色谱柱,以 1.8 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃ 和 1.7 mmol·L⁻¹ NaHCO₃ 为淋洗液,并以 0.3% H₂SO₄ 为抑制剂检测阴离子. F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、NH₄⁺、K⁺ 和 Ca²⁺ 的检出限分别为: 0.001、0.001、0.001、0.002、0.004、0.003、0.006 和 0.011 μg·m⁻³.

1.3 质量保证及控制

采样滤膜使用前在马弗炉中 550℃ 下烘烤 4 h 后在温度 (25 ± 2)℃ 和相对湿度 (55 ± 3)% 条件下恒温恒湿 24 h,再用十万分之一天平称重(AUW 120 D 日本岛津),称重两次以上,确保连续两次称量之间误差不超过 0.02 mg. 样品采集后在相同条件下恒温恒湿 24 h,再次称重. 采样过程中对采样滤头及时清理,避免发生交叉污染,确保数据准确. 样品测定过程中每 10 个样品加入一个标准样品,以检测仪器的稳定性. 同时设置 3 个采样空白和 3 个流程空白,所有样品的结果均扣除了空白膜的平均背景值.

1.4 研究方法

1.4.1 主成分-多元线性回归(PCA-MLR)法

PCA-MLR 法是一种利用受体模型来识别污染物来源和计算源贡献率的数理统计方法. PCA 的核心思想是降维,在保证原有信息尽可能完整的条件下,通过正交变化将可能存在线性关系的一组变量转换为几个互不相关的变量,即主成分,每个主成分可解释为一类污染源^[19]. MLR 是在 PCA 的基础上定量计算源的贡献率,其基本方程如下^[20]:

$$Y = \sum_{h=1}^p a_h X_h + b \quad (1)$$

式中, Y 为污染物的总浓度, p 为由主成分分析提取的因子数, a_h 为第 h 个因子的标准化回归系数, X_h 为由主成分分析提取的第 h 个因子的得分, b 为回归常数项.

1.4.2 潜在源因子分析法

利用 TrajStat 软件分析了 PM_{2.5} 水溶性离子在气象条件驱动情况下的潜在源区. 潜在源贡献因子模型(PSCF)是一种基于条件概率函数的结合气团轨迹和化学组分浓度值来描述潜在排放源区域的分析

方法. 该方法先将气流经过的区域划分为 $i \times j$ 个网格,然后通过计算气流轨迹在相应网格单元内的停留时间定量不同区域的污染排放贡献^[21],计算公式为:

$$PSCF_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \quad (2)$$

式中, PSCF_{ij} 为气流轨迹经过网格 (i, j) 后所传输的污染物的贡献; n_{ij} 为所有轨迹在网格 (i, j) 的停留时间; m_{ij} 为污染物质量浓度超过某一限定值(本研究限定值为各水溶性离子的平均质量浓度)的轨迹在网格 (i, j) 的停留时间. 本研究采用 0.5° × 0.5° 的网格对研究区域进行划分,计算每个网格内污染物在轨迹上出现的概率. 同时为减少总轨迹数较少的网格单元内 m_{ij} 和 n_{ij} 的不确定性,引入加权函数 W_{ij} , 计算所得的 PSCF 值乘以权重函数 W_{ij} ^[22], 即:

$$WPSCF_{ij} = PSCF_{ij} \times W_{ij} \quad (3)$$

W_{ij} 定义为:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & (n_{ij} > 80) \\ 0.72 & (20 < n_{ij} \leq 80) \\ 0.42 & (10 < n_{ij} \leq 20) \\ 0.05 & (n_{ij} \leq 10) \end{cases} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 及水溶性离子质量浓度特征

图 2 为观测期间 3 个站点 PM_{2.5}、水溶性离子组分和大气常规指标(NO₂、SO₂ 和 O₃) 的质量浓度以及气象参数的时间序列. 武汉、随州和平顶山站点的日均 ρ (PM_{2.5}) 分别为 (62.36 ± 13.96)、(53.39 ± 10.56) 和 (68.20 ± 12.18) μg·m⁻³. 观测期间,武汉站点有 2 d 超过《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 日均二级限值(75 μg·m⁻³),超标率为 14%,与孙焰等^[23]报道的 2014 年夏季武汉 PM_{2.5} 平均质量浓度相比下降了 35.96%、与张会涛等^[15]的同期观测结果相似,说明武汉近年来采取的优化能源结构和完善环境监测制度等措施取得一定成效. 平顶山站点有 5 d 超过二级限值,超标率为 33%,在 3 个站点中大气 PM_{2.5} 污染最为严重,同关中^[24]和华北^[25]农村地区相比,PM_{2.5} 质量浓度基本处于同一水平. 随州站点 PM_{2.5} 质量浓度相对较低,采样期间均低于二级限值,可能由于当地位于城郊边界,周围丘陵较多,人为活动影响较少.

水溶性离子质量浓度的日变化趋势和 PM_{2.5} 相似,武汉、随州和平顶山站点的日均值分别为 (32.55 ± 10.05)、(26.10 ± 6.23) 和 (36.29 ± 9.82) μg·m⁻³, 占 PM_{2.5} 质量分数为 51.32%、48.61% 和 52.47%,其中 SNA 是水溶性离子主要的

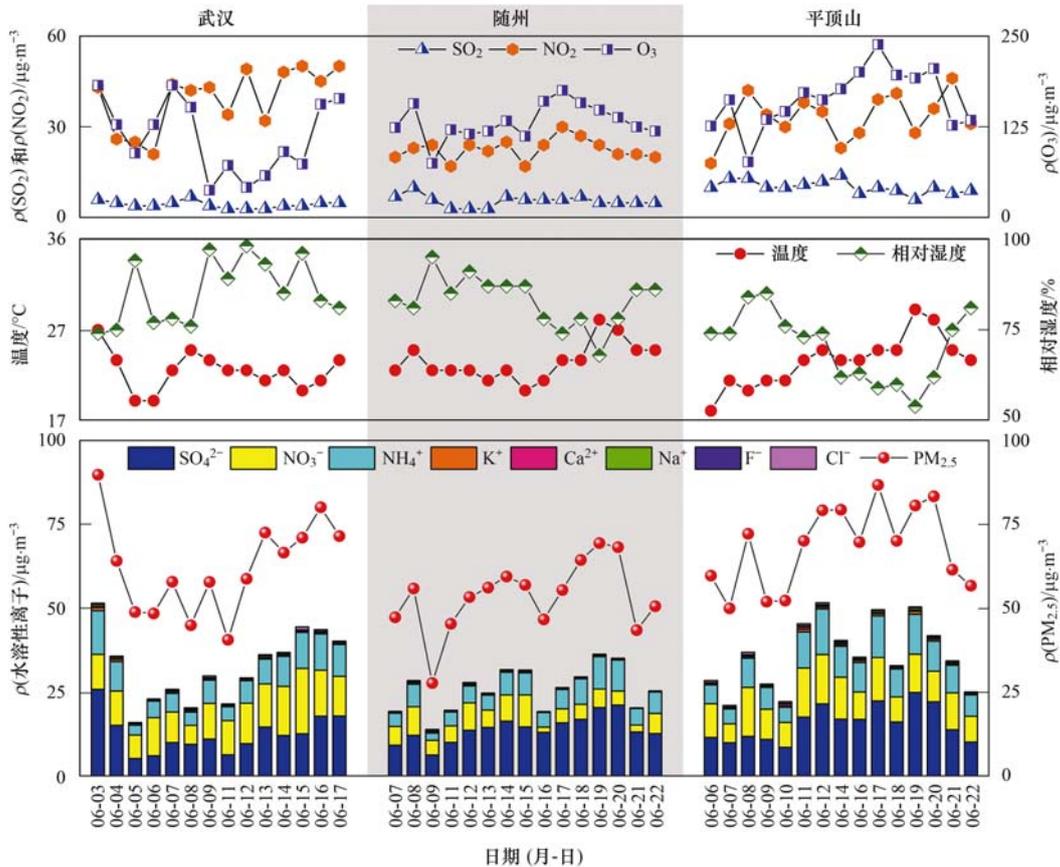


图2 采样点 $PM_{2.5}$ 、水溶性离子组分和污染气体质量浓度及气象要素时间序列

Fig. 2 Time series of meteorological factors and the mass concentrations of $PM_{2.5}$, water-soluble ions, and pollution gases in sampling sites

组成部分, 3 个站点 SNA 分别占总水溶性离子质量分数为 96.12%、97.33% 和 95.65%。平顶山作为农村站点, $PM_{2.5}$ 中水溶性离子质量分数最大, 采样期间为夏收时节, 可能与生物质薪材和农村秸秆燃烧有关。 K^+ 和 Cl^- 作为生物质燃烧标志物^[26], 在平顶山站点的质量浓度同样高于其余站点。 3 个站点含量最高的水溶性离子均为 SO_4^{2-} , 大气细颗粒物中硫酸盐的形成主要有两个途径^[27], 一是 SO_2 与 $\cdot OH$ 的气相氧化过程, 主要受温度、光辐射和 $\cdot OH$ 的影响; 二是发生在液相表面的非均相过程, 主要受相对湿度和氧化剂影响。 夏季高温高湿的环境和较强的光辐射, 有利于 SO_4^{2-} 的大量生成。 平顶山属于煤炭型工业城市, 较高的燃煤强度会释放大量 SO_2 , 采样点虽处于农村, 仍可能受到市区大气传输的影响, 故平顶山站点 SO_4^{2-} 及气态前体物 SO_2 质量浓度在 3 个站点中均为最高。 NO_3^- 与机动车排放密切相关, 主要由气态前体物质 NO_x 经过光化学反应或非均相氧化而来^[6], $\rho(NO_3^-)$ 武汉站点 ($11.33 \mu g \cdot m^{-3}$) 和平顶山站点 ($10.38 \mu g \cdot m^{-3}$) 明显高于随州站点 ($5.46 \mu g \cdot m^{-3}$), 武汉作为城市站点, 周边交通流量大, 平顶山站点位于主乡道及高速公路旁, 较高质量浓度 NO_3^- 可能和站点周边交通源排放有关。 武汉、

随州和平顶山站点的日均 $\rho(NH_4^+)$ 分别为 7.41、5.82 和 $8.51 \mu g \cdot m^{-3}$, NH_4^+ 主要来源于农业生产和交通, 采样期间正值夏收时节, 平顶山和武汉站点 NH_4^+ 质量浓度高于随州站点, 可能与两地的交通排放及平顶山农村地区氮肥使用有关。

NO_3^-/SO_4^{2-} 比值常用来分析移动源和固定源对大气污染的相对贡献^[28]。 本研究中武汉、随州和平顶山站点夏季的 NO_3^-/SO_4^{2-} 比值分别为 1.03、0.41 和 0.69, 说明武汉站点相对随州和平顶山站点而言, 移动源对大气 $PM_{2.5}$ 污染的贡献更大, 随州站点由于附近无主要道路, 机动车影响较小, 故在 3 个站点中比值最小。

2.2 二次转化特征

本研究中 3 个站点 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 在总水溶性离子中的质量分数均高于 95%, 是主要的水溶性离子, 目前有研究发现 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 有很少一部分来源于一次排放^[29], 大气中二次转化是这些离子的主要来源。 利用硫酸化率 (SOR) 和氮氧化率 (NOR) 来表示 SO_2 和 NO_2 组分向 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的转化程度, 当 SOR 和 NOR 值大于 0.1 时, 大气二次转化过程较明显, 取值越大, 大气中前体物质的二次转化程度越高, SOR 和 NOR 的计算公式如下:

$$\text{SOR} = \frac{c(\text{SO}_4^{2-})}{c(\text{SO}_4^{2-}) + c(\text{SO}_2)} \quad (5)$$

$$\text{NOR} = \frac{c(\text{NO}_3^-)}{c(\text{NO}_3^-) + c(\text{NO}_2)} \quad (6)$$

式中, $c(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $c(\text{NO}_3^-)$ 、 $c(\text{SO}_2)$ 和 $c(\text{NO}_2)$ 分别表示 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 SO_2 和 NO_2 的量浓度。

武汉、随州和平顶山站点的 SOR 日均值分别为 0.64、0.63 和 0.50, NOR 日均值分别为 0.18、0.15 和 0.19, 表明 3 个站点二次转化现象明显. 3 个站点 NO_2 质量浓度是 SO_2 的 3~9 倍, 但 SO_4^{2-} 质量浓度接近或高于 NO_3^- , SOR 总体远高于 NOR, 说明在同样的大气背景下, SO_2 转化为二次污染物的效率更高, 在随州站点尤为明显, 这是由于夏季的气象条件有利于 SO_2 向 SO_4^{2-} 的二次转化, 同时夏季高温使得硝酸盐容易分解形成 HNO_3 和 NH_3 ^[30], 使 NO_3^- 质量浓度下降。

武汉和随州站点 SOR 高于平顶山站点, 这可能与不同站点 SO_4^{2-} 的生成机制有关. 武汉和随州站点相对湿度明显高于平顶山, 较高的相对湿度为 SO_2 在云雾滴中的非均相反应提供了更多的反应介质^[11], 说明武汉和随州站点 SO_4^{2-} 生成过程同时存在均相和非均相反应, 平顶山站点 SOR 与温度 ($r = 0.83$) 和 O_3 ($r = 0.66$) 显著正相关, 与相对湿度显著负相关 ($r = -0.76$), 表明主要是均相反应过程. 武汉和随州站点更多的反应途径使得其 SO_2 转化效率高于平顶山站点. 3 个站点 NOR 与相对湿度相关性均不明显 (武汉、随州和平顶山站点相关性系数分别为 0.08、0.32 和 -0.14), 说明 NO_2 主要通过白天的光化学反应转化为 NO_3^- , 且研究表明富氨环境会促使 NO_2 生成 NO_3^- ^[31], 武汉和平顶山站点由于交通及农业排放, 大气中 NO_2 和 NH_4^+ 质量浓度均处于较高水平, 有利于 NO_2 的二次转化, 使得两地 NOR 明显高于随州站点

2.3 离子平衡及主要存在形式

气溶胶酸碱性可以直接影响气溶胶的气-粒分布及其化学组分分布^[32], 通过阴阳离子的电荷平衡可以判断气溶胶的酸碱性, 研究表明, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 和 F^- 等阴离子会增加颗粒物的酸性, 相反, Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 等阳离子会增加颗粒物的碱性. 计算阴阳离子电荷平衡的方程式为:

$$\text{AE} = \frac{\text{SO}_4^{2-}}{48} + \frac{\text{NO}_3^-}{62} + \frac{\text{Cl}^-}{35.5} + \frac{\text{F}^-}{19} \quad (7)$$

$$\text{CE} = \frac{\text{Na}^+}{23} + \frac{\text{NH}_4^+}{18} + \frac{\text{K}^+}{39} + \frac{\text{Ca}^{2+}}{20} \quad (8)$$

式中, AE 为阴离子摩尔电荷, CE 为阳离子摩尔

电荷.

如图 3 所示, 武汉、随州和平顶山三地阴阳离子均存在较好的相关性. 其中武汉站点 AE/CE 值为 0.82 ($R^2 = 0.97$), 随州站点 AE/CE 值为 1.05 ($R^2 = 0.84$), 平顶山站点 AE/CE 值为 0.81 ($R^2 = 0.92$). 3 个站点 AE 与 CE 均呈现较好的相关性, 表明这 8 种水溶性离子是 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要的离子, 观测数据可靠性高. AE/CE 结果表明随州站点则呈中性或弱酸性, 武汉和平顶山站点气溶胶颗粒物整体呈碱性, 即阳离子不能完全被阴离子中和. NH_4^+ 是 $\text{PM}_{2.5}$ 中含量最高的阳离子, 武汉、随州和平顶山站点 NH_4^+ 摩尔电荷浓度分别占阴离子摩尔电荷浓度的 90.49%、60.47% 和 92.72%, 说明 3 个站点气溶胶酸碱度差异与 NH_4^+ 质量浓度有关.

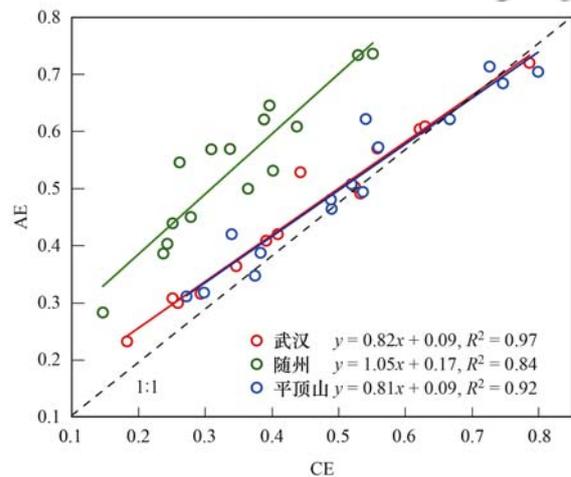


图 3 采样站点阴、阳离子电荷平衡关系

Fig. 3 Balance of anion and cations in water-soluble ions in sampling sites

有研究表明^[33], 大气中 NH_3 通常优先与 H_2SO_4 反应, 生成不易挥发的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 或 $(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$, 过量的 NH_3 会进一步与 HNO_3 或 HCl 反应生成易挥发的 $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$ 和 NH_4Cl . 本研究利用 $n(\text{SO}_4^{2-})$ 和 $n(\text{NH}_4^+)$ 来分析二次离子的主要存在形式. 当 $n(\text{NH}_4^+)$ 和 $n(\text{SO}_4^{2-})$ 的比值介于 0.5~1 时, 主要以 NH_4HSO_4 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 结合存在, 当大于 1 时, 则主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 存在^[34]. 如图 4 所示, 武汉和平顶山站点两种离子均落在富氨区, 说明 SO_4^{2-} 能被 NH_4^+ 完全中和以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 形式存在, 多余的 NH_4^+ 再与 NO_3^- 结合形成 NH_4NO_3 ; 而随州站点存在部分离子落在两条控制线之间, 说明 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4HSO_4 都存在于大气中. 同时相关性分析表明 NH_4^+ 和 NO_3^- 在武汉 ($r = 0.63$) 和平顶山 ($r = 0.76$) 站点呈显著相关, 在随州站点无明显相关性 ($r = 0.26$), 说明武汉和平顶山站点 NH_4^+ 主要存在形式

为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 , 而在随州站点 NH_4^+ 主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 或 $(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$ 的形式存在。

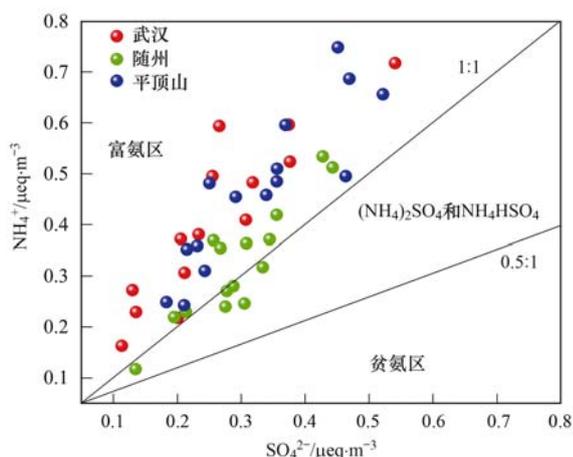


图4 $n(\text{NH}_4^+)$ 与 $n(\text{SO}_4^{2-})$ 比值

Fig. 4 Equivalent concentration ratio of NH_4^+ and SO_4^{2-}

2.4 水溶性离子源解析

运用主成分-多元线性回归 (PCA-MLR) 对 3 个研究站点的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子进行来源解析。本研究利用 SPSS 23.0 软件分析了武汉、随州和平顶山这 3 个站点 $\text{PM}_{2.5}$ 水溶性离子来源。基于特征值大于 1, 对 3 个站点进行因子提取, 认为因子累计方差贡献率大于 80% 则可以反映主要污染源类型。

表 1 是 3 个采样点的主成分旋转因子载荷矩阵。武汉站点提取的 3 个主成分累计方差贡献率达 88.5%, 主成分 1 中载荷最高的是 Cl^- , 解释了总方差的 41.71%, Cl^- 来源较为复杂包括生物质燃烧、化石燃料燃烧以及海盐传输^[35], 武汉市能源结构以燃煤为主, 2017 年武汉全市煤炭总消费量占能源消费总量的 49.7%^[36], 故主成分 1 可识别为燃煤源; 主成分 2 中 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 最为显著, 解释了总方差的 27.7%, 是典型的气态前体物二次转化源; 主

成分 3 的方差贡献率为 19.81%, 主要离子为 Na^+ 和 F^- , Na^+ 的来源广泛, 燃烧过程、地壳、扬尘和海洋均是其重要来源^[37], 有研究指出工业来源是内陆城市地区 Na^+ 的来源之一^[38], 相关性分析表明 Na^+ 和 F^- 呈显著相关 ($r=0.82$), 故可能来自同一来源, 因此推断主成分 3 为工业源。

平顶山站点提取的 3 个主成分共解释了总方差的 89.87%。主成分 1 中载荷较大水溶性离子包括 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 K^+ 和 Na^+ , 方差贡献率为 52.94%。有研究表明^[39], 生物质燃烧过程产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要水溶性离子包括 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 Na^+ , 与主成分 1 中高载荷离子组成相似, 且平顶山站点为农村地区, 正值夏收时节, 因此推断主成分 1 主要受到生物质燃烧影响; 主成分 2 的方差贡献率为 23.2%, 其中载荷较高的离子为 Cl^- 和 NO_3^- 。该站点附近有一条高速公路, NO_3^- 的排放物源大多为机动车辆的尾气, 且 Cl^- 与 NO_3^- 具有较为显著的相关性, 因此主成分 2 代表了交通源。主成分 3 中载荷较高的离子为 Ca^{2+} 和 F^- , 解释了总方差的 13.73%, Ca^{2+} 通常来源于土壤扬尘和建筑扬尘, F^- 的可能来源有垃圾焚烧和煤燃烧^[40], 平顶山地区能源结构中煤炭居首位, 因此主成分 3 可以反映扬尘源和燃煤源对该站点的影响。

随州站点提取出 3 个主成分, 主成分 1 中的 Ca^{2+} 和 F^- 较为显著, 方差贡献率为 47.08%, Ca^{2+} 主要来源于土壤扬尘和建筑扬尘, Ca^{2+} 和 F^- 间相关系数为 0.86, 可能为同一来源, 因此主成分 1 代表了扬尘源。主成分 2 中 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 具有较高载荷, 解释了总方差的 33.13%, 与武汉站点相同, 主要为二次转化源。主成分 3 的方差贡献率为 13.21%, 其中主要为 K^+ , 因此代表了生物质燃烧源。

表 1 水溶性离子的正交旋转因子载荷矩阵¹⁾

Table 1 Varimax rotated factor loading matrix for water-soluble ions

离子组分	平顶山			武汉			随州		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
K^+	0.889	0.090	0.289	-0.550	0.145	0.690	-0.108	0.329	0.906
Na^+	0.937	-0.212	0.117	-0.195	0.098	0.807	0.672	-0.219	0.651
Ca^{2+}	0.303	0.010	0.863	-0.877	0.148	0.357	0.954	0.128	0.220
NH_4^+	0.930	0.322	-0.144	0.287	0.947	-0.092	0.174	0.969	0.149
NO_3^-	0.659	0.728	0.085	0.673	0.651	-0.190	0.407	0.478	0.651
Cl^-	-0.066	0.945	0.190	0.889	0.337	0.193	0.652	-0.421	0.564
SO_4^{2-}	0.976	0.016	-0.125	-0.141	0.919	0.092	-0.384	0.885	0.140
F^-	-0.278	0.313	0.707	0.197	-0.298	0.907	0.970	-0.076	-0.086
方差贡献率/%	52.94	23.20	13.73	41.71	27.70	19.81	47.08	33.13	13.21

1) 黑粗体字表示所占载荷较高的离子, 即某成分的主要组成离子

对 3 个站点进行多元线性回归分析, 分别得到每个站点的回归方程。

平顶山站点:

$$Y = 0.757 \text{ F1} + 0.046 \text{ F2} + 0.489 \text{ F3}$$

(R² = 0.932, P = 0.002, n = 23)

武汉站点:

Y = 0.024 F1 + 0.982 F2 + 0.094 F3

(R² = 0.984, P = 0.000, n = 126)

随州站点:

Y = 0.103 F1 + 0.847 F2 + 0.307 F3

(R² = 0.976, P = 0.000, n = 81)

式中, P 为显著性水平, n 为检验统计量; 检测值均符合 0 < P < 0.05, 故建立的回归方程具有统计学意义, 即自变量和因变量之间存在线性关系.

分析结果表明, 武汉站点水溶性离子的主要污染来源是二次转化源, 其贡献率为 89.27%, 其次是工业源(8.54%)和燃煤源(2.27%); 平顶山站点的污染源包括: 生物质燃烧源(58.37%)、交通源(3.58%)、扬尘和燃烧源(38.05%); 随州站点同样受二次转化源影响最大, 贡献率为 67.38%, 生物质燃烧是第二大污染源, 贡献率为 24.42%, 最后是扬尘源, 贡献率为 8.25%. 综上所述, 水溶性离子来源与不同城市的功能区和地理位置有关. 平顶山和随州站点分别位于农村和郊区, 生物质燃烧源占比

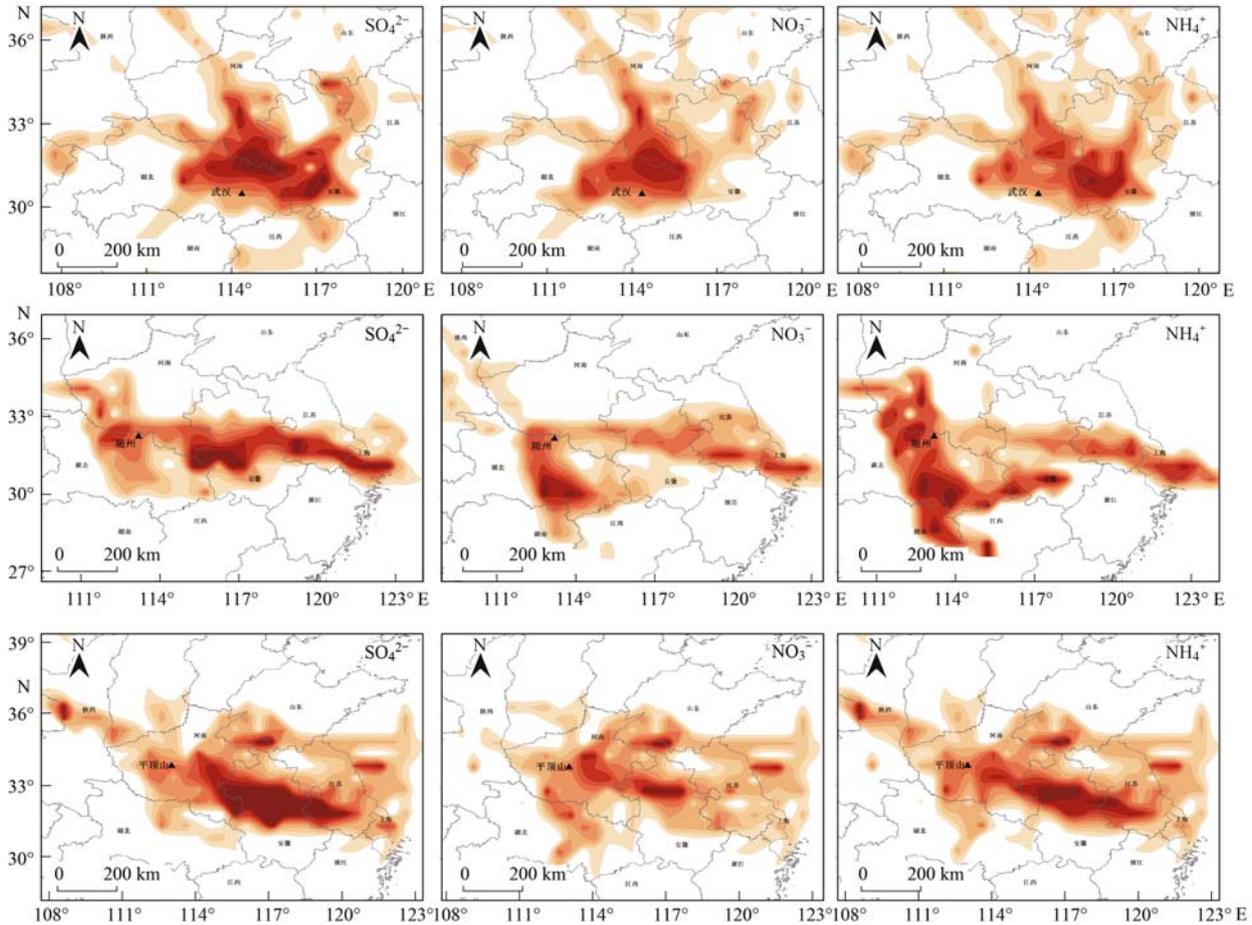
较高, 同时, 平顶山站点靠近高速公路, 随州站点附近存在工业园区, 存在交通源和工业源影响.

2.5 潜在污染源区

为了进一步研究华中地区 3 个站点潜在源的空间分布和相对贡献, 本研究利用 TrajStat 软件对 PM_{2.5} 中主要二次离子 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺ 进行潜在污染源贡献因子(WPSCF)分析, 以各离子质量浓度的平均值作为阈值, 如图 5 所示.

武汉站点污染潜在源区比较集中, 受本地源和外地源共同作用影响, 其中 SO₄²⁻ 的 WPSCF 高值区域集中在湖北、河南、安徽三省交界处和安徽西南区域, NO₃⁻ 的主要源区与 SO₄²⁻ 相似, 同样集中在三省交界区域, 但该区域 SO₄²⁻ 的潜在贡献程度更高; NH₄⁺ 的主要潜在源区包括安徽西南部和河南南部区域. 可以看出, 武汉站点大气 PM_{2.5} 水溶性离子受到长距离气团携带的污染物的影响较小, 主要受省内和周边省份短距离传输影响.

随州站点 SO₄²⁻ 潜在源区存在明显的海洋气团的影响, 主要污染源区从上海沿海区域开始, 沿西向江苏、安徽延伸, 在随州西部存在本地源的影响,



颜色越深, 表明该区域污染贡献越大

图 5 武汉、随州和平顶山站点 SNA 离子潜在源区分析

Fig. 5 WPSCF analysis of SNA in Wuhan, Suizhou, and Pingdingshan sites

WPSCF 高值区域包括安徽西部、江苏西南和上海东北区域。 NO_3^- 和 NH_4^+ 的潜在污染源区存在相同区域, NO_3^- 受本地源和长距离传输共同影响, 上海东北部和江苏南部是潜在污染源区, 但是贡献因子沿西方向不断下降; NH_4^+ 的潜在源区范围最大, 同时布局较为分散, 主要区域为湖北南部和湖南东北部, 还包括随州西部的鄂豫交界区域、安徽西南部和河南、江苏、上海等地。

平顶山站点 SNA 离子潜在源区覆盖范围较大且有很大相似性, 主要位于平顶山东部城市和安徽、江苏等地。 SO_4^{2-} 可能的潜在源区范围最大, 高 WPSCF 区域包括河南东部、安徽中北部、江苏西南部, 其污染源区范围有明显的沿着东部延伸的特征, 可能与海洋气团的传输有关; NO_3^- 的主要潜在源区与 SO_4^{2-} 方向大致相似, 但范围和贡献程度相对减小, 重污染源区集中在安徽中北部; NH_4^+ 的主要污染源区较为分散, 包括平顶山东侧部分城市、安徽中北部、江苏西北部和江苏沿海局部海面。

3 个站点二次离子的潜在源区分析表明, 3 个站点均受到明显的区域传输影响, 武汉站点受本地源和外地源共同作用影响, 随州和平顶山受到东向或东南方向的亚热带季风和温带海洋气团影响显著, 来自海上的气团较为清洁, 经过上海、江苏和安徽, 受当地排放影响, 将污染物质携带至监测站点。

3 结论

(1) 观测期间, 武汉、随州和平顶山站点日均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 (62.36 ± 13.96) 、 (53.39 ± 10.56) 和 $(68.20 \pm 12.18) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 日均 ρ (水溶性离子) 分别为 (32.55 ± 10.05) 、 (26.10 ± 6.23) 和 $(36.29 \pm 9.82) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 水溶性离子占 $\text{PM}_{2.5}$ 总质量的 51.32%、48.61% 和 52.47%, 各站点二次污染严重, SNA 占总水溶性离子的 96.12%、97.33% 和 95.65%。由于夏季气象条件和当地排放影响, 3 个站点质量浓度最高的水溶性离子均为 SO_4^{2-} 。受周边交通源影响, 武汉和平顶山站点 NO_3^- 质量浓度高于随州, 农业活动较强的平顶山站点 NH_4^+ 质量浓度最高。3 个站点 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值分别为 1.03、0.41 和 0.69, 表明武汉站点大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染主要来自移动源, 随州和平顶山站点来自固定源。

(2) 观测期间, 武汉(0.64)和随州(0.63)站点 SOR 高于平顶山站点(0.50), 可能由于平顶山站点 SO_2 转化过程主要为均相反应, 而武汉和随州站点同时存在均相和非均相过程。武汉(0.18)和平顶山(0.19)站点 NOR 高于随州站点(0.15), 可能与两

站点周边交通排放和富氨环境有关。武汉和平顶山站点 $\text{PM}_{2.5}$ 呈碱性, 随州站点呈中性或弱酸性, 主要由 NH_4^+ 差异造成。武汉和平顶山站点 NH_4^+ 主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$ 形式存在, 随州站点则主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 $(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$ 形式存在。

(3) PCA-MLR 分析结果表明: 武汉站点 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子污染源包括: 二次转化源(89.27%), 工业源(8.54%)和燃煤源(2.27%); 随州站点的主要污染来源是二次转化源(67.38%), 其次是生物质燃烧(24.42%), 扬尘源(8.25%); 平顶山站点受生物质燃烧影响最大, 其贡献率为 58.37%, 扬尘和燃烧源贡献率为 38.05%, 交通源 3.58%。

(4) 潜在源区贡献分析表明, 武汉站点 SNA 离子的潜在污染源区集中在湖北、安徽、河南交界处及安徽西南地区, 主要受短距离传输影响; 随州和平顶山主要受海洋气团的长距离传输影响, 潜在污染源区范围较大, 跨度较长, 包括上海、江苏和安徽等地。

参考文献:

- [1] 郭新彪, 魏红英. 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 对健康影响的研究进展[J]. 科学通报, 2013, **58**(13): 1171-1177.
Guo X B, Wei H Y. Progress on the health effects of ambient $\text{PM}_{2.5}$ pollution[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(13): 1171-1177.
- [2] Li W J, Zhang D Z, Shao L Y, et al. Individual particle analysis of aerosols collected under haze and non-haze conditions at a high-elevation mountain site in the North China plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(22): 11733-11744.
- [3] Calvo A I, Alves C, Castro A, et al. Research on aerosol sources and chemical composition: past, current and emerging issues [J]. Atmospheric Research, 2013, **120-121**: 1-28.
- [4] 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 等. 成都夏冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3012-3020.
Feng Y P, Zhang J K, Huang X J, et al. Pollution characteristics of water-soluble inorganic ions in Chengdu in summer and winter[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3012-3020.
- [5] Čanić K S, Vidić S, Klaić Z B. Precipitation chemistry in Croatia during the period 1981-2006 [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2009, **11**(4): 839-851.
- [6] 黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 等. 基于高分辨率 MARGA 分析桂林市 $\text{PM}_{2.5}$ 水溶性离子特征[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(4): 1390-1404.
Huang J L, Chen Z M, Mo Z Y, et al. Analysis of characteristics of water-soluble ions in $\text{PM}_{2.5}$ in Guilin based on the MARGA [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(4): 1390-1404.
- [7] Perrone M G, Gualtieri M, Ferrero L, et al. Seasonal variations in chemical composition and *in vitro* biological effects of fine PM from Milan [J]. Chemosphere, 2010, **78**(11): 1368-1377.
- [8] Wang G H, Wang H, Yu Y J, et al. Chemical characterization of water-soluble components of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ atmospheric aerosols in five locations of Nanjing, China [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(21): 2893-2902.
- [9] 马红璐, 赵欣, 陆建刚, 等. 宿迁市 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子

- 的季节特征和来源分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 3899-3907.
- Ma H L, Zhao X, Lu J G, *et al.* Seasonal characteristics and source analysis of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in Suqian City [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 3899-3907.
- [10] 姜蕴聪, 杨元建, 王泓, 等. 2015~2018年中国代表性城市 PM_{2.5}浓度的城乡差异[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(11): 4552-4560.
- Jiang Y C, Yang Y J, Wang H, *et al.* Urban-rural differences in PM_{2.5} concentrations in the representative cities of China during 2015~2018[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(11): 4552-4560.
- [11] 贾佳, 韩力慧, 程水源, 等. 京津冀区域 PM_{2.5}及二次无机组分污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(3): 801-811.
- Jia J, Han L H, Cheng S Y, *et al.* Pollution characteristic of PM_{2.5} and secondary inorganic ions in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(3): 801-811.
- [12] 李瑞, 李清, 徐健, 等. 秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1520-1534.
- Li R, Li Q, Xu J, *et al.* Regional air pollution process in winter over the Yangtze River Delta and its influence on typical northern cities[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1520-1534.
- [13] 郭振东, 朱彬, 王红磊, 等. 长江三角洲霾天气 PM_{2.5}中水溶性离子特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(3): 928-938.
- Guo Z D, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} in the haze weather over in Yangtze River Delta [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(3): 928-938.
- [14] 程渊, 吴建会, 毕晓辉, 等. 武汉市大气 PM_{2.5}中水溶性离子污染特征及来源[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 189-196.
- Cheng Y, Wu J H, Bi X H, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble ions in ambient PM_{2.5} in Wuhan, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 189-196.
- [15] 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 等. 武汉市 PM_{2.5}化学组分时空分布及聚类分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4764-4773.
- Zhang H T, Tian Y Z, Liu B S, *et al.* Spatial temporal characteristics and cluster analysis of chemical components for ambient PM_{2.5} in Wuhan[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4764-4773.
- [16] 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 等. 郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1545-1552.
- Yan G X, Zhang J W, Lei H J, *et al.* Seasonal variation and source analysis of water-soluble inorganic ions in fine particulate matter in Zhengzhou[J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1545-1552.
- [17] 杨留明, 王申博, 郝祺, 等. 郑州市 PM_{2.5}中水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 2977-2984.
- Yang L M, Wang S B, Hao Q, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} in Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 2977-2984.
- [18] 闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 等. 新乡冬季 PM_{2.5}中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1071-1081.
- Yan G X, Lei H J, Zhang J W, *et al.* Interannual variation of metal elements and water-soluble ions in PM_{2.5} during wintertime in Xinxiang and their source apportionment[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1071-1081.
- [19] Liu X H, Liu Y, Lu S Y, *et al.* Occurrence of typical antibiotics and source analysis based on PCA-MLR model in the East Dongting Lake, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **163**: 145-152.
- [20] Yang B, Zhou L L, Xue N D, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Huanghuai Plain, China; comparison of three receptor models[J]. Science of the Total Environment, 2013, **443**: 31-39.
- [21] Hopke P K, Gao N, Cheng M D. Combining chemical and meteorological data to infer source areas of airborne pollutants [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1993, **19**(2): 187-199.
- [22] Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, *et al.* The aerosol at Barrow, Alaska; long-term trends and source locations [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(16): 2441-2458.
- [23] 孙焰, 祁士华, 张莉, 等. 武汉市洪山区夏季 PM_{2.5}浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3714-3722.
- Sun Y, Qi S H, Zhang L, *et al.* Concentration, water-soluble ionic and polycyclic aromatic hydrocarbons composition and sources of PM_{2.5} during summer in Hongshan District, Wuhan [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3714-3722.
- [24] 李瑾, 李建军, 昊灿, 等. 美中典型城市及农村夏季 PM_{2.5}的化学组成对比[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(12): 4415-4425.
- Li J, Li J J, Wu C, *et al.* Comparison on the chemical composition of PM_{2.5} in the urban and rural regions of Guanzhong plain, China [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(12): 4415-4425.
- [25] 周甜, 闫才青, 李小滢, 等. 华北平原城乡夏季 PM_{2.5}组成特征及来源研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(9): 3227-3236.
- Zhou T, Yan C Q, Li X Y, *et al.* Chemical characteristics and sources of PM_{2.5} in urban and rural sites in the North China Plain during summer [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(9): 3227-3236.
- [26] Sun J, Shen Z X, Zhang Y, *et al.* Characterization of PM_{2.5} source profiles from typical biomass burning of maize straw, wheat straw, wood branch, and their processed products (briquette and charcoal) in China[J]. Atmospheric Environment, 2019, **205**: 36-45.
- [27] Zhang R Y, Wang G H, Guo S, *et al.* Formation of urban fine particulate matter [J]. Chemical Reviews, 2015, **115**(10): 3803-3855.
- [28] Ming L L, Jin L, Li J, *et al.* PM_{2.5} in the Yangtze River Delta, China; chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. Environmental Pollution, 2017, **223**: 200-212.
- [29] Baek B H, Aneja V P, Tong Q S. Chemical coupling between ammonia, acid gases, and fine particles [J]. Environmental Pollution, 2004, **129**(1): 89-98.
- [30] Wu P, Huang X J, Zhang J K, *et al.* Characteristics and formation mechanisms of autumn haze pollution in Chengdu based on high time-resolved water-soluble ion analysis [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(3): 2649-2661.
- [31] 赵斌. 细颗粒物化学组成及其对前体物排放响应的数值模拟

- 研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Zhao B. Numerical simulation of the chemical components of fine particles and their response to precursor emissions[D]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [32] Pye H O T, Nenes A, Alexander B, *et al.* The acidity of atmospheric particles and clouds[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(8): 4809-4888.
- [33] Pathak R K, Wu W S, Wang T. Summertime PM_{2.5} ionic species in four major cities of China: nitrate formation in an ammonia-deficient atmosphere[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(5): 1711-1722.
- [34] Meng C C, Wang L T, Zhang F F, *et al.* Characteristics of concentrations and water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in Handan City, Hebei province, China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **171**: 133-146.
- [35] Xie Z S, Fan C L, Lu R, *et al.* Characteristics of ambient bioaerosols during haze episodes in China: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **243**: 1930-1942.
- [36] 武汉市统计局, 国家统计局武汉调查队. 武汉统计年鉴(2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [37] 操文祥, 陈楠, 田一平, 等. 武汉地区秋冬季清洁与重污染过程的水溶性离子特征研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(1): 82-88.
- Cao W X, Chen N, Tian Y P, *et al.* Characteristic analysis of water-soluble ions during clean and heavy pollution processes in autumn and winter in Wuhan[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(1): 82-88.
- [38] 吕哲. 石家庄市 PM_{2.5} 水溶性离子化学特征与来源解析[D]. 南昌: 东华理工大学, 2019.
- Lv Z. Chemical characteristics and source apportionment of water-soluble ions in PM_{2.5} in Shijiazhuang [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.
- [39] Chantara S, Thepnuan D, Wiriya W, *et al.* Emissions of pollutant gases, fine particulate matters and their significant tracers from biomass burning in an open-system combustion chamber[J]. *Chemosphere*, 2019, **224**: 407-416.
- [40] Cheng C, Shi M M, Liu W J, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} during a wintertime haze event in Huanggang, central China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(1): 111-123.



CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> (577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo (586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li (597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> (608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> (619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> (639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming (649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> (663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> (675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> (686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> (696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> (707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> (714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> (723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> (735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao (743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}C_{DIC}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun (752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> (762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> (782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> (826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> (847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> (859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong (867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> (878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> (887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> (907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> (920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> (928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> (936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song (946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei (957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing (965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> (975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> (985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> (995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> (1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> (1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> (1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> (1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> (1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> (1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> (1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> (1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> (1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> (1108)