

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



## 2019

Vol.40 No.5  
第40卷 第5期

# 目次

|                                                    |                                                        |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律                     | 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)                               |
| 餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征                         | 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)                                      |
| 泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征                             | 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)                            |
| 郑州-新乡冬季PM <sub>2.5</sub> 中元素浓度特征及其源分析              | 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027) |
| 我国PM <sub>2.5</sub> 浓度分阶段改善目标情景分析                  | 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)                                |
| 安阳市典型工业源PM <sub>2.5</sub> 排放特征及减排潜力估算              | 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)                            |
| 郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单                               | 赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)                          |
| 2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性                        | 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)                                    |
| 兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势                    | 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)                                 |
| 12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征                            | 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)                                   |
| 我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布                             | 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)                           |
| 我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价                        | 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)                          |
| 我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价                             | 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)                         |
| 大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征                       | 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)                                    |
| 干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义                           | 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)                                  |
| 柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素                               | 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)                              |
| 崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素                             | 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)                          |
| 三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析                             | 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)                   |
| 三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力                       | 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)                           |
| 不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素                               | 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)                                  |
| 巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险                         | 李如忠,鲍琴,戴源(2178)                                        |
| 闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析                           | 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)                            |
| 生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应                          | 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)                  |
| 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估                                | 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)                                    |
| 三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征                               | 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)                           |
| 多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析                            | 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)                              |
| 不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征                                 | 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)                    |
| 微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响                                | 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)                            |
| 上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析                           | 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)                      |
| 异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系                          | 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)                            |
| 水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析                               | 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)                         |
| 绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应                              | 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)                       |
| 紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能                                | 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)                                      |
| UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制                                | 吕娟,许志伟,王言(2278)                                        |
| 铝代水铁矿协同吸附砷的机制                                      | 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)                         |
| 新型材料磁性氧化铁的除氯效能                                     | 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)                                   |
| 羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制                          | 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)                          |
| 基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化                        | 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)                       |
| 不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征                              | 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)                        |
| 15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能                             | 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)                         |
| 长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响              | 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)                        |
| 厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响                           | 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)                          |
| HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液                             | 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)                      |
| 温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响                 | 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)                            |
| 城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异                            | 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)                                |
| 三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响                              | 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)                              |
| 亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制                            | 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)                            |
| 生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响                             | 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)                               |
| 地膜覆盖和施肥对菜地CH <sub>4</sub> 排放的影响                    | 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)                           |
| 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响                                | 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)                                |
| 不同施肥模式对热区晚稻田CH <sub>4</sub> 和N <sub>2</sub> O排放的影响 | 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)                    |
| 周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响                                  | 曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)                            |
| 广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价                           | 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)                              |
| 超富集植物藿香蓿(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力        | 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)                            |
| 种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险                               | 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)                          |
| 土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应                               | 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)                              |
| 某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价                  | 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)                        |
| 《环境科学》征订启事(2018)                                   | 《环境科学》征稿简则(2042)                                       |
| 信息(2114, 2348, 2393)                               |                                                        |



## 郑州-新乡冬季 PM<sub>2.5</sub> 中元素浓度特征及其源分析

闫广轩<sup>1</sup>, 张朴真<sup>1</sup>, 黄海燕<sup>1</sup>, 高雅<sup>1</sup>, 张靖雯<sup>1</sup>, 宋鑫<sup>1</sup>, 张佳羽<sup>1</sup>, 李怀刚<sup>2</sup>, 曹治国<sup>1</sup>, 姜继韶<sup>1</sup>, 樊静<sup>1</sup>, 王跃思<sup>3,4</sup>, 金彩霞<sup>1</sup>

(1. 河南师范大学环境学院, 黄淮水环境污染与防治教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 新乡 453007; 2. 新乡市环境保护监测站, 新乡 453000; 3. 中国科学院大气物理研究所, 大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了探究郑州-新乡地区 PM<sub>2.5</sub> 中各化学组成的污染特征和可能来源, 用中流量大气采样器于 2016 年冬季分别在郑州、新乡市区进行连续 1 个月大气 PM<sub>2.5</sub> 膜采集, 利用重量法、电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 和离子色谱法分别进行了 PM<sub>2.5</sub> 浓度、17 种金属元素的含量和 7 种水溶性离子含量的测定, 并采用富集因子法和主成分分析法分析元素污染特征及其来源。结果表明, 新乡地区 2016 年冬季 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度日均值为 223.87  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 郑州 2016 年冬季 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日均值为 226.67  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 两地污染水平相对较高。两地 PM<sub>2.5</sub> 中主要常量元素均为 Al、Ca 和 Fe, 约占 17 种元素总量的 50%, 而主要重金属含量差异明显, 新乡 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的含量均高于郑州地区, 其中 Cd、Ag 和 Pb 富集因子超过 1 000, 新乡 Cd 元素富集突出。两地水溶性盐离子均以  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  这 3 种离子为主, 占水溶性离子总量超过 94%,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  是两地 PM<sub>2.5</sub> 中主要存在形式。源解析结果显示, 新乡 2016 年冬季的主要来源是生物质燃烧及二次气溶胶混合源, 贡献率为 34.94%。郑州 2016 年冬季 PM<sub>2.5</sub> 的主要来源是燃煤及交通混合源, 贡献率为 33.99%。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 金属元素; 富集因子; 水溶性离子; 因子分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2027-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201806010

## Concentration Characteristics and Source Analysis of PM<sub>2.5</sub> During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang

YAN Guang-xuan<sup>1</sup>, ZHANG Pu-zhen<sup>1</sup>, HUANG Hai-yan<sup>1</sup>, GAO Ya<sup>1</sup>, ZHANG Jing-wen<sup>1</sup>, SONG Xin<sup>1</sup>, ZHANG Jia-yu<sup>1</sup>, LI Huai-gang<sup>2</sup>, CAO Zhi-guo<sup>1</sup>, JIANG Ji-shao<sup>1</sup>, FAN Jing<sup>1</sup>, WANG Yue-si<sup>3,4</sup>, JIN Cai-xia<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. Xinxiang Environmental Protection Monitoring Station, Xinxiang 453000, China; 3. State Key Laboratory Atmospheric Boundary Layer Physics & Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To study the pollution characteristics, sources, and transportation process of PM<sub>2.5</sub> and its chemical compositions in the Zhengzhou-Xinxiang region, PM<sub>2.5</sub> samples were collected using a middle volume sampler, in Zhengzhou and Xinxiang urban areas for 30 consecutive days during the winter of 2016. The mass concentration of PM<sub>2.5</sub> was measured gravimetrically. 17 trace metals were determined by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), and 7 water-soluble ions were determined by ion chromatography. The enrichment factor (EF) method and principal component analysis were employed to determine the source apportionment. The results showed that the daily mean PM<sub>2.5</sub> mass concentration during the winter sampling period of 2016 in Xinxiang and Zhengzhou was 223.87  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and 226.67  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively, which indicated that pollution levels were relatively high in both cities. The concentration of three macro elements (Al, Ca, and Fe) accounted for 50% of the total metal elements in both cities, while the heavy metals concentration was higher in Xinxiang than in Zhengzhou. The EFs of Cd, Ag, and Pb in Xinxiang were far higher than 1000, while only Cd was higher than 1000 in Zhengzhou.  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , and  $\text{NH}_4^+$  were the main ions in the two cities. They exceeded 94% of total water-soluble ions and existed in the forms of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  and  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . The principle component analysis showed that the main contributors to PM<sub>2.5</sub> were a mixture of biomass combustion and secondary aerosol in Xinxiang, and a mixture of coal combustion and traffic emissions in Zhengzhou, accounting for 34.94% and 33.99% of total PM<sub>2.5</sub> emissions, respectively.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; trace metals; enrichment factor method; water-soluble ions; factor analysis

自 2000 年以来, 经济的快速增长与区域环境大幅度恶化的矛盾日益凸显, 大范围、持续性的重雾-霾天气频发, 使大气污染受到了社会各界的广泛关注<sup>[1]</sup>, 而大气颗粒物是重要的空气污染物之一, 尤其是细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 已经成为我国大多数城

收稿日期: 2018-06-02; 修订日期: 2018-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41807327, 41805123); 河南省高等学校重点科研项目 (15B530002); 河南师范大学青年科学基金项目 (5101219279005); 河南省科技攻关项目 (162102310095)

作者简介: 闫广轩 (1983 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为大气环境与气候变化, E-mail: xuanxuaneeec@163.com

市的首要污染物<sup>[2]</sup>。由于其粒径较小,比表面积相对  $PM_{10}$  较大,更容易富集空气中的有毒污染物质,且能够远距离传输<sup>[3]</sup>。因此,开展区域间  $PM_{2.5}$  化学组成的污染特征及其变化规律研究对雾-霾的控制具有重要意义<sup>[4,5]</sup>。

近年来,研究者对国内主要城市  $PM_{2.5}$  的化学组成及来源的研究已经较为深入<sup>[6~8]</sup>,如乔宝文等<sup>[9]</sup>的研究发现,  $PM_{2.5}$  中主要元素为 K、Ca、Fe、Al 和 Mg,占 16 种元素总量的 90.7%,  $PM_{2.5}$  中金属元素主要来源是燃煤、生物质燃烧以及交通和工业排放。赵小宁等<sup>[10]</sup>的研究表明,  $PM_{2.5}$  中主要金属元素均为 Al、Ca、Zn、Fe 和 Pb,占 20 种金属元素总量的 68%,新乡采暖期  $PM_{2.5}$  主要来源是燃煤源、农业源、机动车尾气源、土壤以及地面扬尘。陈纯等<sup>[11]</sup>的研究发现 Zn、Pb、Cu、Mn 等是  $PM_{2.5}$  中的主要污染元素,其富集系数分别为 110.0、94.9、10.9 和 5.0,郑州  $PM_{2.5}$  中流动源污染比重较大,建筑扬尘、土壤尘及道路扬尘是采暖期的主要来源。刀谓等<sup>[12]</sup>对京津冀水溶性离子组分区域性污染特征分析研究中表明,北京、天津、石家庄冬季  $PM_{2.5}$  中  $NH_4^+$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  这 3 种离子之和占总水溶性离子的 77.6%、83.5%、74.1%,整个京津冀地区  $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $NH_4^+$  在冬季  $PM_{2.5}$  中分别占 22.0%、14.7%、12.2%,说明二次离子是京津冀地区主要的水溶性污染离子。张棕巍等<sup>[13]</sup>的研究发现  $NH_4^+$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  这 3 种离子之和占全部水溶性离子质量浓度之和的比例达 79.64% 以上,表明厦门市大气  $PM_{2.5}$  二次污染较严重。吴丹等<sup>[14]</sup>的研究表明二次离子  $SNA(NH_4^+$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-)$  是水溶性离子的主要成分,共占到水溶性离子的 83.4%,  $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $NH_4^+$  各占总水溶性离子的 36.9%、27.9% 和 18.6%,由此可见,我国大部分城市气溶胶中水溶性离子的主要存在形式相一致,但不同城市相同离子在  $PM_{2.5}$  中所占比例略有不同,与水溶性离子研究不同,同一地区间不同城市的金属离子的总量及主要离子种类都存在明显时空差异,说明不同的城市规模、经济发展状况、能源结构、产业结构对应其  $PM_{2.5}$  的污染特征及其来源也存在不同程度的差异<sup>[15]</sup>。

郑州-新乡是豫北地区的中心城市,在中原经济区建设发展中发挥了重要的作用。2015 年冬季在该地区暴发类似于北京、天津、上海等地区的持续性重霾污染事件,造成巨大影响,受到了社会关注。杨书申等<sup>[16]</sup>对郑州灰霾天气过程  $PM_{2.5}$  水溶性无机离子污染的分析发现,水溶性离子在细颗粒物中所占比例逐渐增大,这表明  $PM_{2.5}$  的主要污染成

分来源于人为排放的二次污染物,同时郑州市大气细颗粒物污染受周边农村农业生产影响严重。Feng 等<sup>[17]</sup>在 2015 年春节期间对新乡市的  $PM_{2.5}$  情况进行分析,整个期间严重的区域烟雾污染持续存在,每日样本中有 95.8% 和 79.2% 的  $PM_{2.5}$  浓度高于国家标准 I 和 II,二次无机离子占了  $PM_{2.5}$  的主要成分,通过后向轨迹表明当空气从内蒙古、山西和郑州输送时,最严重的空气污染就发生了。基于此,本研究于 2016 年冬季对郑州、新乡同步开展为期 1 个月的连续膜采样,并对  $PM_{2.5}$  中的金属元素和水溶性盐浓度水平的时空差异及来源进行分析,通过了解两个城市不同环境功能区不同产业结构对雾-霾的影响,以期污染源头的控制和环保调控措施的制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

本研究中新乡  $PM_{2.5}$  采样点设于河南师范大学(35.33°N, 113.91°E),周围没有大型污染工厂的分布,可作为相对充分混合大气代表点,能够较为客观地反映本区域内的污染状况。郑州的采样地点位于华北水利水电大学(34.81°N, 113.67°E),周围没有高大建筑物和局部污染源,能够代表郑州  $PM_{2.5}$  的污染现状。 $PM_{2.5}$  采样使用武汉天虹智能中流量大气采样器(TH-150C 系列),利用天虹环仪专用流量标定仪进行标定,设定采样流量为 100 L·min<sup>-1</sup>,单个样品采样时长为 11.5 h [08:00 ~ 19:30 和 20:00 ~ 07:30(次日)],采样周期为一个月。使用有效直径为 80 mm 的石英纤维滤膜(7204-03, PALL)采集样品,采样后将样品膜置于冰箱冷冻层处避光保存至分析,除去强雨雪等特殊天气条件下无法采样,共采集昼夜有效样品 114 个。

### 1.2 样品前处理及测定

#### 1.2.1 $PM_{2.5}$ 质量分析

采样膜在使用前先放置于马弗炉中在 400℃ 条件下焙烧 4 h,除去表面吸附的有机蒸气和部分无机物质,避免对后续采样成分分析造成干扰<sup>[18~20]</sup>。称量前后都需把滤膜置于恒温恒湿箱(温度 20℃,相对湿度 50%)中平衡 24 h,使用精度为十万分之一的电子天平(梅特勒-托利多 MS105)进行称重且保证最近两次称量误差不能超过 0.10 mg,然后置于洁净干燥的膜盒中保存。未采样的膜称重后存于冰箱保鲜层(4℃)用于采样,采样后的膜放于冰箱的冷冻层(-20℃)保存至分析。测量采样前后石英膜质量的净增加即为颗粒物的质量,颗粒物质量除以采样标况体积即可得到大气中颗粒物的质量



浓度.

### 1.2.2 重金属的消解及其测定

对金属元素的消解, 选取氧化性强, 基体干扰少且回收率较高 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-HF 混合酸体系<sup>[21,22]</sup>, 比例为 6:2:0.6, 3 步升温法进行样品的消解<sup>[9]</sup>. 将采过样品的滤膜用专用切膜器裁取 1/4 置于消解罐中, 尽量避免裁剪过程碎屑的脱落, 影响实验结果. 用 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-HF 混合体系在微波消解仪(上海新仪公司)中进行加热消解, 经过 120℃→160℃→195℃ 三步升温后将样品消解完全, 消解结束后待消解罐温度冷至室温, 将消解液转移至 PET 塑料瓶中, 然后加入超纯水至 50 mL, 用称量天平称取空 PET 瓶的初重及加入消解液和超纯水后的末重, 避光保存, 每组消解样品中设有 1 个实验空白. 将预处理过的样品采用电感耦合等离子体质谱(DRC-e, PerkinElmer)测定其中的 Be、K、Mg、Ca、Fe、Al、Mn、Cu、Pb、Zn、Cd、As、Co、Ni、Cr、V、Ag 等 17 种金属元素的含量. 仪器质量控制范围为 2~270 u, 分辨率为 0.30~3.00 u, 在线可调线性范围为 9 个数量级.

### 1.2.3 水溶性盐的浸提及其测定

将采样膜用直径为 16 mm 的打孔器在其表面均匀部位截取圆形小膜片后转移到洁净的 PET 瓶中, 用定量加水装置向瓶中加入 50 毫升的高纯水, 使用微波超声仪于 100 Hz 的条件下超声 30 min. 并在超声仪中加入冰块, 防止超声过程因温度升高而造成易挥发性物质的质量损失. 对空白滤膜做相同处理, 测定离子本底含量, 消除实验误差. 将超声之后的浸提液用 0.22 μm 的滤膜过滤, 然后用离子色谱仪(Dionex ICS-1100, 美国)测定样品溶液中水溶性的阴离子(F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)和阳离子(Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>)的含量. 阳离子检测: 采用 CS12A 分离柱, CSRS 抑制器, 淋洗液为 22 mmol·L<sup>-1</sup> 的甲基磺酸溶液, 流速为 1 mL·min<sup>-1</sup>; 阴离子检测: 采用 AS14A 分离柱, ASRS 抑制器, 淋洗液为 3.5 mmol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 1 mmol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 混合溶液, 流速为 1 mL·min<sup>-1</sup>. 各离子(Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)检出限为: 0.002、0.007、0.005、0.004、0.009、0.005、0.01、0.03、0.024 μg·m<sup>-3</sup>, 样品检测过程中, 质量保证与质量控制严格按照实验室监测相关技术规范执行. 为保证实验数据的准确性, 每次开机测定前需重新配制标准溶液并做标准曲线, 每次样品分析时, 对其 10% 的样品做加标回收率的测定, 保证加标回收率应在 80%~120% 之间. 由于低于检出限和实验误差等原因, 本研究仅讨论阳离

子(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>)和阴离子(Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)共计 5 种离子.

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 富集因子(EFs)法

富集因子(EF)公式为:

$$EF = \frac{\frac{c_{i(\text{气溶胶})}}{c_{n(\text{气溶胶})}}}{\frac{c_{i(\text{地壳})}}{c_{n(\text{地壳})}}} \quad (1)$$

式中,  $c_{i(\text{气溶胶})}$  为颗粒物中某元素质量浓度(ng·m<sup>-3</sup>);  $c_{n(\text{气溶胶})}$  为参比元素在颗粒物中的质量浓度(ng·m<sup>-3</sup>);  $c_{i(\text{地壳})}$  为地壳中该元素的质量浓度(ng·m<sup>-3</sup>);  $c_{n(\text{地壳})}$  为参比元素在地壳中的质量浓度(ng·m<sup>-3</sup>). 本研究选用地壳含量较多人为源干扰较少的 Al 元素作为参考元素. 富集因子小于 10, 说明这些元素主要来自自然源; 富集因子介于 10~100, 说明这些元素有不同程度的富集; 富集因子大于 100, 说明这些元素来自人为源.

#### 1.3.2 硫酸化率(SOR)和氮氧化率(NOR)

用 SOR 和 NOR 表征 PM<sub>2.5</sub> 中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的转化率, NOR 与 SOR 越高, 表明二次转化效率越高, 公式如下:

$$SOR = [SO_4^{2-}] / ([SO_4^{2-}] + [SO_2]) \quad (2)$$

$$NOR = [NO_3^-] / ([NO_3^-] + [NO_2]) \quad (3)$$

式中, [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]、[NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] 分别表示大气中水溶性硫酸根离子和硝酸根离子的质量浓度(μg·m<sup>-3</sup>); [SO<sub>2</sub>]、[NO<sub>2</sub>] 分别表示大气中二氧化硫和二氧化氮的质量浓度(μg·m<sup>-3</sup>).

#### 1.3.3 因子分析

用 SPSS 22 软件对两个采样时段样品成分数据进行因子成分分析. 选取 PM<sub>2.5</sub> 中 17 种金属元素和 5 种水溶性离子作为变量, 采用主成分分析法和最大方差法进行计算.

## 2 结果与讨论

### 2.1 郑州和新乡地区 PM<sub>2.5</sub> 的浓度变化规律

本研究结果如图 1 所示, 新乡 2016 年冬季采样期间 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度日均值为 (223.87 ± 100.94) μg·m<sup>-3</sup>, 其中冬季最高日均值达到 510.88 μg·m<sup>-3</sup>. 以国家环境空气质量(GB 3095-2012)日均值二级标准(PM<sub>2.5</sub>: 75 μg·m<sup>-3</sup>)对颗粒物浓度进行评估, 2016 年新乡的 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度超标率为 198.49%. 可见研究期间新乡的冬季霾污染形势严重, 郑州 2016 年冬季 PM<sub>2.5</sub> 的日均质量浓度为 (226.67 ± 98.79)

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 观测期间最大污染质量浓度达  $521.92\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 是国家二级标准的 3 倍, 超标率达到 202.23%. 2016 年两地的  $\text{PM}_{2.5}$  污染水平相当, 且郑州和新乡的污染趋势趋于一致, 相关系数为 0.87, 说明两地可能具有相同的污染源, 局部地区防霾措施与区域性的联防相结合实施可能会有更好御霾效果.

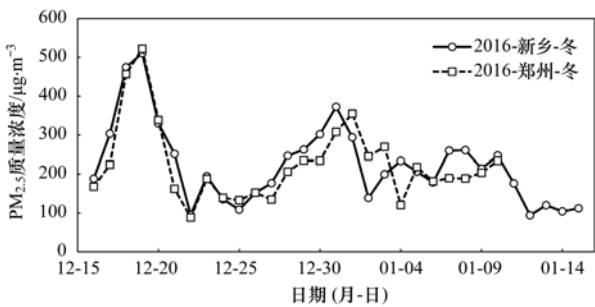


图 1  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度变化趋势  
Fig. 1 Dynamic mass concentration change of  $\text{PM}_{2.5}$

2.2 重金属元素的污染特征

由表 1 可知, 新乡冬季  $\text{PM}_{2.5}$  中金属元素浓度从高到低依次为:  $\text{Al} > \text{Pb} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Ag} > \text{V} > \text{Co} > \text{Be}$ , 其中  $\text{Al}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Ca}$ 、 $\text{Fe}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{K}$  等元素的浓度较高, 占总浓度的 84.21%, 郑州冬季  $\text{PM}_{2.5}$  中金属元素浓度从高到低依次为:  $\text{Al} > \text{Fe} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Cd} > \text{V} > \text{Co} > \text{Be} > \text{Ag}$ , 其中  $\text{Al}$ 、 $\text{Fe}$ 、 $\text{Ca}$ 、 $\text{K}$ 、 $\text{Mg}$  是其中主要元素, 占总浓度的

84.75%. EF 的计算结果显示, 两地区 EF 值显著较高的元素为  $\text{Cd}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Ag}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Cr}$  和  $\text{Be}$ , EF 值均大于人为污染判断值 10, 这些元素受人为污染较为严重. 两地区  $\text{PM}_{2.5}$  中  $\text{Cd}$ 、 $\text{Pd}$ 、 $\text{Ag}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Ni}$  等的富集程度较高, 是两地区  $\text{PM}_{2.5}$  中主要的富集元素. 其中  $\text{Cd}$  元素的富集系数在两地都大于 1 000, 这表明  $\text{Cd}$  元素的人为污染在两地均较为普遍, 而  $\text{Cd}$  通常来源于工业排放, 尤其是有色金属冶炼厂<sup>[23]</sup>, 作为工农业使用中的原料主要应用于电镀、镍-镉充电电池、杀虫剂等行业并最终排放到环境中造成污染, 说明两地工业污染均较为严重. 其中  $\text{Pb}$  和  $\text{Cd}$  是两地差异较大的元素, 新乡  $\text{PM}_{2.5}$  中  $\text{Cd}$  和  $\text{Pb}$  的浓度分别是郑州的 25 和 3.7 倍.  $\text{Pb}$  的污染主要来自与  $\text{Pb}$  相关的工业和汽车尾气等<sup>[24,25]</sup>, 另外电池工业和刹车磨损过程也会产生  $\text{Pb}$ , 新乡的  $\text{Pb}$  含量远高于郑州, 在很大程度上与新乡的产业结构有关, 新乡市电池产业园锂电池生产过程中可能会排放大量的  $\text{Pb}$ <sup>[10]</sup>. 新乡市是我国著名的轻工业城市, 电池企业约有 200 多家, 规模较大的就有 30 多家, 企业排放造成重金属污染的问题已经较为严重<sup>[26]</sup>. 王学峰等<sup>[27]</sup> 对新乡市环宇大道工业区周边土壤重金属的研究发现其  $\text{Cd}$  含量超标是国家土壤环境质量二级标准的 176.85 倍, 且潜在风险最大构成了很强的危害.

表 1 新乡与郑州 2016 年冬季  $\text{PM}_{2.5}$  中金属元素的质量浓度  
Table 1 Mass concentration of metal elements in  $\text{PM}_{2.5}$  during the winter of 2016 in Xinxiang and Zhengzhou

| 元素 | 2016 年新乡冬季                            |           | 2016 年郑州冬季                            |          |
|----|---------------------------------------|-----------|---------------------------------------|----------|
|    | 元素日均浓度/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ | EF 值      | 元素日均浓度/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ | EF 值     |
| Cd | 50.72                                 | 76 175.94 | 2.61                                  | 3 034.55 |
| Pb | 237.24                                | 1 345.23  | 63.42                                 | 278.90   |
| Cu | 46.12                                 | 260.18    | 30.46                                 | 133.28   |
| Zn | 135.12                                | 249.87    | 97.49                                 | 139.82   |
| As | 28.71                                 | 279.87    | 10.86                                 | 82.08    |
| Ag | 1.78                                  | 1 433.17  | 0.27                                  | 169.12   |
| Ni | 7.65                                  | 31.83     | 5.65                                  | 18.23    |
| Cr | 8.67                                  | 15.10     | 7.99                                  | 10.80    |
| Be | 0.12                                  | 10.18     | 0.29                                  | 18.97    |
| Co | 0.58                                  | 6.43      | 0.36                                  | 3.08     |
| Mn | 46.00                                 | 8.83      | 41.33                                 | 6.15     |
| V  | 1.67                                  | 1.98      | 1.92                                  | 1.76     |
| Ca | 224.04                                | 1.02      | 186.78                                | 0.66     |
| K  | 117.25                                | 0.75      | 120.88                                | 0.60     |
| Al | 570.46                                | 1.00      | 735.49                                | 1.00     |
| Mg | 89.38                                 | 0.87      | 114.57                                | 0.87     |
| Fe | 217.11                                | 0.86      | 301.87                                | 0.93     |

2.3 水溶性离子的变化规律对比

新乡  $\text{PM}_{2.5}$  中总水溶性离子的平均质量浓度为  $127.12\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 占  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的 56.8%, 郑州

$\text{PM}_{2.5}$  中总水溶性离子的平均质量浓度为  $104.30\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 占  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的 46.01%, 表明水溶性离子是  $\text{PM}_{2.5}$  中重要的化学组分. 新乡水溶性离子



中各离子的浓度水平高低顺序为  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+$ , 郑州各水溶性离子高低顺序为  $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+$ , 占总水溶性离子的比例见图 2, 从中可以看到  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  是水溶性离子中的重要成分, 三者在新乡 PM<sub>2.5</sub> 中的占比分别为 15.60%、19.15%、19.00%, 在水溶性离子中的占比分别为 27.48%、33.72%、33.46%, 三者总和占水溶性离子总量的 94.65%, 在郑州 PM<sub>2.5</sub> 中的占比分别为 13.33%、13.84%、16.34%, 在水溶性离子中的占比分别为 28.98%、30.07%、35.51%, 三者总和占水溶性离子总量的 94.56%, 可见豫北地区  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  等水溶性离子污染较重, 与刀谓和范雪波等对京津冀、杭州地区的水溶性离子研究结果一致<sup>[12,28]</sup>, 有研究表明,  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  分别是由  $\text{NH}_3$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  等一次污染物经二次转化而来<sup>[29]</sup>, 可见新乡、郑州冬季大气细颗粒物中存在着严重的二次污染且新乡二次污染更严重。

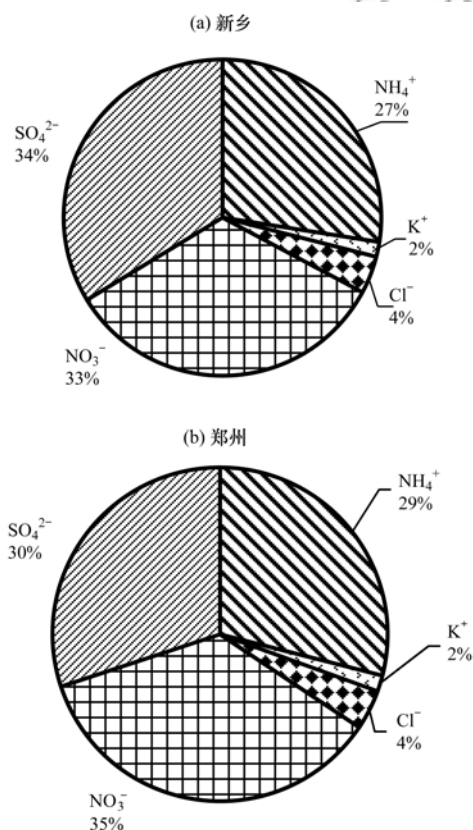


图 2 新乡和郑州 PM<sub>2.5</sub> 中主要水溶性离子的百分比

Fig. 2 Percentages of major water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> in Xinxiang and Zhengzhou

### 2.3.1 硫氮转化速率特征与 PM<sub>2.5</sub> 酸碱性分析

$\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  是 PM<sub>2.5</sub> 中的重要成分, 高浓度的  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  表明大气二次转化效率比较高<sup>[30]</sup>. 通常用 SOR (硫转化率) 和 NOR (氮转化率) 表征

$\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  的生成量<sup>[31]</sup>, 一般来说 SOR 和 NOR 越高, 表明一次污染物的转化效率越高. 有研究表明<sup>[32]</sup>,  $\text{SOR} \leq 0.1$  时大气中以一次污染物  $\text{SO}_2$  为主,  $\text{SOR} > 0.1$  说明大气中发生  $\text{SO}_2$  向  $\text{SO}_4^{2-}$  的转化反应, SOR 越大,  $\text{SO}_2$  越容易发生光化学反应生成  $\text{SO}_4^{2-}$ .

一般认为,  $\text{NO}_2$  主要通过气相氧化转化形成硝酸盐,  $\text{SO}_2$  主要有气相氧化和液相氧化 2 种转化过程形成硫酸盐, 液相氧化主要发生在低温或是高湿的情况下, 而气相氧化多发生于晴朗干燥的天气, 主要受温度的影响<sup>[33]</sup>. 研究期间, 新乡与郑州的 SOR 平均值分别为 0.49 和 0.43, NOR 分别为 0.35 和 0.29, 且 NOR 小于 SOR. 说明新乡与郑州的二次转化率高, 且新乡二次污染较郑州更加严重,  $\text{SO}_2$  向  $\text{SO}_4^{2-}$  的转化率高于  $\text{NO}_2$ .

有研究表明,  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{K}^+$  等阳离子可增加颗粒物的碱性, 相反,  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$  等阴离子可增加颗粒物的酸性. 一般强酸性的颗粒物吸湿性性能高, 对大气能见度的影响比较大<sup>[34,35]</sup>. 可用阴离子当量 (AE) 与阳离子当量 (CE) 的比值来表明颗粒物的酸碱中和程度, 比值小于 1, 阳离子占主导, 颗粒物呈碱性, 反之颗粒物为酸性. 公式如下<sup>[36]</sup>:

$$\text{AE} = c(\text{Cl}^-)/35.5 + c(\text{NO}_3^-)/62 + c(\text{SO}_4^{2-})/48 + c(\text{F}^-)/19 \quad (4)$$

$$\text{CE} = c(\text{NH}_4^+)/18 + c(\text{Mg}^{2+})/12 + c(\text{K}^+)/39 + c(\text{Ca}^{2+})/20 + c(\text{Na}^+)/23 \quad (5)$$

式中,  $c$  表示各离子质量浓度 ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

采样期间新乡冬季 AE/CE 平均值为 0.75, 郑州冬季 AE/CE 平均值为 0.68, 表明新乡与郑州冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 组分整体偏碱性, 表明水溶性离子中存在一定的阴离子亏损, 且硫酸根与硝酸根可被氨完全中和, 这可能是由于 PM<sub>2.5</sub> 中没有检测的  $\text{CO}_3^{2-}$  造成的<sup>[37]</sup>.

### 2.3.2 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 浓度关系及来源分析

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  没有挥发性, 所以颗粒物中  $\text{NH}_4^+$  会优先与  $\text{SO}_4^{2-}$  结合, 形成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ ; 多余的  $\text{NH}_4^+$  则和  $\text{NO}_3^-$  等阴离子结合. 根据 Seinfeld 理论, 若  $c(\text{NH}_4^+)/c(\text{SO}_4^{2-}) < 2$ , 则  $\text{SO}_4^{2-}$  没有完全被中和, 可能以酸式盐的形态存在. 为确定硫酸盐的存在形态, 前人研究指出当  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  以  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的形式 (酸式盐形态) 存在时, 可以通过式 (6) 估算  $\text{NH}_4^+$  的质量浓度, 若以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的形式 (中性形态) 存在, 可以通过式 (7) 估算<sup>[38]</sup>.

$$c(\text{NH}_4^+) = 0.29c(\text{NO}_3^-) + 0.19c(\text{SO}_4^{2-}) \quad (6)$$

$$c(\text{NH}_4^+) = 0.29c(\text{NO}_3^-) + 0.38c(\text{SO}_4^{2-}) \quad (7)$$

由图3可见,以式(6)计算新乡测量值和计算值之间线性回归方程为  $y = 0.70x - 3.95$ ,  $r^2 = 0.49$ ,以式(7)计算,测量值和计算值之间线性回归方程为  $y = 1.00x - 6.18$ ,  $r^2 = 0.50$ ,当假设以  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的形式存在时,线性拟合的斜率0.70;当假设以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的形式存在时,线性拟合的斜率为1.00,故新乡  $\text{PM}_{2.5}$  中二次组分以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的形式存在;以式(6)计算,郑州测量值和计算值之间线性回归方程为  $y = 0.64x - 2.36$ ,  $r^2 = 0.56$ ;以式(7)计算,测量值和计算值之间线性回归方程为  $y = 0.87x - 3.34$ ,  $r^2 = 0.55$ ,当假设以  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的形式存在时,线性拟合的斜率0.64;当假设以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的形式存在时,线性拟合的斜率为0.87,故郑州  $\text{PM}_{2.5}$  中二次组分以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的形式存在。

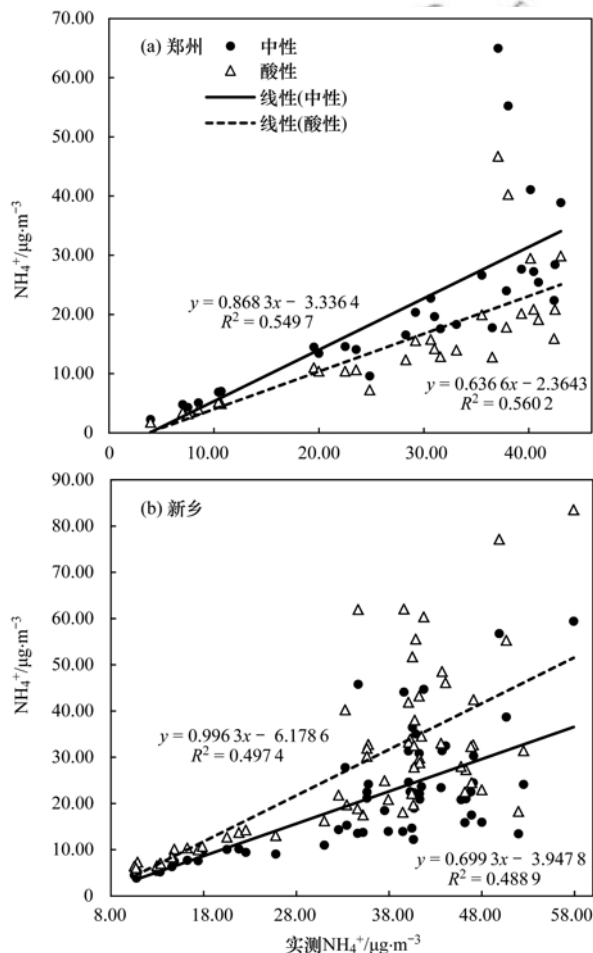


图3  $\text{NH}_4^+$  估算值与实测值的线性关系

Fig. 3 Linear relationship between  $\text{NH}_4^+$  estimated and measured values

## 2.4 因子分析

应用 SPSS 22 统计分析软件分别对新乡和郑州

2016 年  $\text{PM}_{2.5}$  中 5 种水溶性无机离子和 17 种金属元素测定数据进行主成分分析,表征细颗粒物的来源与贡献. 以其质量浓度作为因子分析变量代入模型进行计算,载荷值大于 0.80,认为相关性较强. 分别得出 4 种因子. 由表 2 可知,新乡跟郑州各因子累计贡献率分别为 84.81% 和 84.98%.

### 2.4.1 主成分分析结果

由分析结果表明,2016 年新乡冬季  $\text{PM}_{2.5}$  中,第 1 类因子载荷值较大的元素为  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ,是主要的二次污染物,它们的来源为氮氧化物和硫氧化物,而氮氧化物和硫氧化物的主要来源可能为燃煤电厂和机动车尾气,  $\text{K}^+$  主要来源于生物质燃烧,因此因子 1 可能代表生物质燃烧源及二次污染物,贡献率为 34.94%. 第 2 类因子中载荷较大的元素是 Al、Fe 和 Ni,其中 Al 和 Fe 是重要的土壤元素,因此因子 2 可能为土壤风沙源,其贡献率为 29.93%. 因子 3 中载荷值较大的元素分别为 Cd、Mg、Ca, Ca 和 Mg,也广泛用于建筑材料,同时也是道路扬尘的标志元素<sup>[9]</sup>,所以认为因子 3 代表道路扬尘源和建筑源尘源,因子 4 中载荷值较大的元素 Ag 为燃煤排放源中的特征元素<sup>[39]</sup>,因子 3 和 4 的贡献率分别为 13.13% 和 6.81%.

2016 年郑州冬季  $\text{PM}_{2.5}$  中,因子 1 中载荷值较大的元素是 Be、Cr、Fe、As、Ag、Be、As、Ag,主要与燃煤尘排放有关, Cr 来自于汽车尾气排放<sup>[40]</sup>,因此因子 1 可能代表燃煤污染源和交通污染源的混合源,其贡献率为 33.99%. 第 2 类因子中载荷较大的元素是  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{K}^+$ ,因此因子 2 可能代表二次气溶胶污染源和生物质燃烧源,其贡献率为 23.66%. 因子 3 中载荷值较大的是 V 元素, V 是石油燃烧的一个指示物,化石燃料的燃烧是 V 的主要排放源<sup>[41]</sup>,说明因子 3 可代表燃油燃料污染源,其贡献率为 14.94%. 因子 4 中载荷值较大的元素是 Ca, Ca 主要应用于建筑材料,而且是建筑扬尘的标志元素<sup>[42]</sup>,因此,因子 4 可表示为土壤扬尘和建筑扬尘的混合污染源,其贡献率为 12.38%.

### 2.4.2 源解析结果讨论

对比新乡与郑州  $\text{PM}_{2.5}$  源解析结果,新乡地区  $\text{PM}_{2.5}$  中水溶性二次离子污染源突出,工业污染严重,使得气溶胶中二次污染离子的来源以及形成原因较为复杂,增加了研究的难度. 另外,土壤建筑污染和机动车移动源污染贡献减弱,金属元素富集浓度降低,这与新乡积极推进工厂减排、冬季机动车限行和建筑行业停止施工等政策密切相关. 但是燃煤、燃油源污染依然严重. 可见,  $\text{PM}_{2.5}$  污染治理的重点应关



注到燃煤和燃油的固定污染源以及相关涉及废气排放的工厂和企业的问题上. 而郑州面临的主要是燃煤污染问题, 这可能与城市的发展模式有关, 其次是由工业和交通综合作用引起的二次离子污染问题,

说明 2016 年豫北地区的二次离子污染具有一致性, 加强区域内部的协控很有必要. 此外, 建筑土壤扬尘也是郑州 2016 冬季的主要贡献源之一, 因此规范房地产开发商建筑行为也十分重要.

表 2 最大方差旋转因子分析结果

Table 2 Results of factor analysis with varimax rotation

| 项目                            | 2016 年新乡冬季 |       |       |       | 2016 年郑州冬季 |       |       |       |
|-------------------------------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|
|                               | 因子 1       | 因子 2  | 因子 3  | 因子 4  | 因子 1       | 因子 2  | 因子 3  | 因子 4  |
| Ni                            | 0.13       | 0.81  | 0.22  | 0.11  | 0.20       | 0.13  | 0.65  | 0.32  |
| Cu                            | 0.68       | 0.49  | 0.14  | 0.11  | 0.72       | 0.11  | 0.50  | 0.15  |
| Zn                            | 0.76       | 0.56  | 0.23  | 0.14  | 0.77       | 0.38  | 0.39  | 0.28  |
| K                             | 0.74       | 0.55  | 0.31  | 0.15  | 0.67       | 0.29  | 0.57  | 0.28  |
| Ca                            | 0.13       | 0.59  | 0.74  | 0.06  | 0.09       | 0.14  | 0.16  | 0.93  |
| Mn                            | 0.67       | 0.69  | 0.22  | 0.07  | 0.78       | 0.29  | 0.40  | 0.30  |
| Co                            | 0.50       | 0.73  | 0.23  | 0.11  | 0.48       | 0.27  | 0.50  | 0.64  |
| Be                            | 0.27       | 0.66  | 0.00  | 0.42  | 0.82       | -0.08 | 0.19  | 0.30  |
| Mg                            | 0.25       | 0.56  | 0.76  | 0.05  | 0.46       | -0.07 | 0.47  | 0.71  |
| Al                            | -0.03      | 0.90  | 0.15  | -0.20 | 0.53       | 0.03  | 0.58  | 0.40  |
| V                             | 0.56       | 0.27  | 0.34  | 0.32  | 0.26       | 0.10  | 0.82  | 0.11  |
| Cr                            | 0.47       | 0.68  | 0.38  | 0.06  | 0.81       | 0.07  | 0.26  | 0.39  |
| Fe                            | 0.25       | 0.83  | 0.01  | -0.07 | 0.84       | 0.16  | 0.30  | 0.31  |
| As                            | 0.56       | 0.73  | 0.22  | 0.20  | 0.77       | 0.45  | 0.11  | -0.11 |
| Ag                            | -0.05      | 0.03  | 0.18  | 0.89  | 0.80       | 0.23  | 0.08  | -0.03 |
| Cd                            | -0.05      | 0.01  | 0.88  | 0.13  | 0.70       | 0.56  | 0.15  | 0.05  |
| Pb                            | 0.68       | 0.50  | 0.38  | 0.21  | 0.72       | 0.63  | 0.12  | 0.08  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0.78       | -0.03 | -0.23 | 0.29  | 0.06       | 0.73  | 0.40  | -0.10 |
| Cl <sup>-</sup>               | 0.86       | 0.23  | 0.23  | -0.23 | 0.36       | 0.82  | 0.06  | 0.12  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 0.97       | 0.11  | -0.01 | 0.01  | 0.06       | 0.97  | -0.03 | 0.09  |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 0.91       | 0.25  | -0.19 | -0.03 | 0.14       | 0.96  | -0.05 | 0.09  |
| K <sup>+</sup>                | 0.86       | 0.18  | 0.19  | -0.22 | 0.25       | 0.83  | 0.25  | 0.12  |
| 特征值                           | 7.69       | 6.58  | 2.89  | 1.50  | 7.48       | 5.21  | 3.29  | 2.72  |
| 贡献率/%                         | 34.94      | 29.93 | 13.13 | 6.81  | 33.99      | 23.66 | 14.94 | 12.38 |
| 累积贡献率/%                       | 34.94      | 64.87 | 78.00 | 84.81 | 33.99      | 57.65 | 72.59 | 84.98 |

3 结论

(1)河南新乡地区 2016 年冬季采样期间 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度日均值为 (223.87 ± 100.94) μg·m<sup>-3</sup>, 郑州 2016 年冬季日均值为 (226.67 ± 98.79) μg·m<sup>-3</sup>, 是我国现行的环境空气质量二级标准 (GB 3095-2012) 的 2 ~ 3 倍.

(2)新乡、郑州两地 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素 Cd、Pd、Ag、Zn、Cu 等的富集程度较高, 是两地区 PM<sub>2.5</sub> 中主要的富集元素, 其中 Cd 元素的富集系数在两地都大于 1 000, 说明两地可能受同一个 Cd 污染源影响.

(3)新乡、郑州 SNA 占水溶性离子总量的比例分别为 94.65%、94.56%, 可见豫北地区 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 等水溶性离子污染较重, 新乡与郑州的 SOR 平均值分别为 0.49 和 0.43, NOR 分别为 0.35 和 0.29, 可知新乡与郑州一次污染物的二次转化程度比较高, 容易形成二次污染. 新乡、郑州

PM<sub>2.5</sub> 中二次组分均以 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 的形式存在. 阴阳离子平衡显示新乡与郑州大气 PM<sub>2.5</sub> 整体呈碱性.

(4)因子分析结果显示, 新乡 2016 年冬季 PM<sub>2.5</sub> 的主要来源是生物质燃烧及二次气溶胶混合源、土壤风沙源、道路及建筑扬尘源和燃煤源, 贡献率分别为 34.94%、29.93%、13.13% 和 6.81%. 郑州 2016 年冬季 PM<sub>2.5</sub> 的主要来源是燃煤和交通混合源、二次气溶胶源和生物质燃烧混合源、燃油污染源和建筑扬尘污染源, 贡献率分别为 33.99%、23.66%、14.94% 和 12.38%.

参考文献:

[1] 于扬, 岑况, Norra S, 等. 北京市 PM<sub>2.5</sub> 中主要重金属元素污染特征及季节变化分析[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 975-982.  
Yu Y, Cen K, Norra S, et al. Concentration characteristics and seasonal trend of main heavy metal elements of PM<sub>2.5</sub> in Beijing [J]. Geoscience, 2012, 26(5): 975-982.  
[2] 郭新彪, 魏红英. 大气 PM<sub>2.5</sub> 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

- PM<sub>2.5</sub> pollution[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(13): 1171-1177.
- [3] 覃辉艳. 大气污染颗粒物 PM<sub>2.5</sub>诱导支气管上皮细胞凋亡及其机制探讨[D]. 南宁: 广西医科大学, 2012.
- [4] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 257-269.
- Wu D. Hazy weather research in China in last decade: a review [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(2): 257-269.
- [5] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 中国 PM<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> source apportionment methods in China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, **50**(6): 1141-1154.
- [6] Yao L, Lu N. Spatiotemporal distribution and short-term trends of particulate matter concentration over China, 2006-2010 [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(16): 9665-9675.
- [7] Li Z, Jiang J K, Ma Z Z, *et al.* Effect of selective catalytic reduction (SCR) on fine particle emission from two coal-fired power plants in China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **120**: 227-233.
- [8] Martini F M S, Hasenkopf C A, Roberts D C. Statistical analysis of PM<sub>2.5</sub> observations from diplomatic facilities in China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **110**: 174-185.
- [9] 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 等. 北京冬季 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素浓度特征和来源分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 876-883.
- Qiao B W, Liu Z R, Hu B, *et al.* Concentration characteristics and sources of trace metals in PM<sub>2.5</sub> during wintertime in Beijing [J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 876-883.
- [10] 赵小宁, 席冬冬, 席奔野, 等. 新乡市冬、春季 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子及重金属的污染特征与源解析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(8): 3210-3219.
- Zhao X N, Xi D D, Xi B Y, *et al.* The pollutant character and source apportionment of water-soluble ions and heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in winter-spring time of Xinxiang [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(8): 3210-3219.
- [11] 陈纯, 朱泽军, 刘丹, 等. 郑州市大气 PM<sub>2.5</sub> 的污染特征及源解析[J]. 中国环境监测, 2013, **29**(5): 47-52.
- Chen C, Zhu Z J, Liu D, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> of ambient air in Zhengzhou [J]. Environmental Monitoring in China, 2013, **29**(5): 47-52.
- [12] 刀谓, 张霖琳, 王超, 等. 京津冀冬季与夏季 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 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.
- [13] 张棕巍, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 厦门市大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 1947-1954.
- Zhang Z W, Hu G R, Yu R L, *et al.* Characteristics and sources apportionment of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> of Xiamen City, China [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(7): 1947-1954.
- [14] 吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 等. 杭州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- Wu D, Lin S L, Yang H Q, *et al.* Pollution characteristics and light extinction contribution of water-soluble ions of PM<sub>2.5</sub> in Hangzhou [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- [15] 陈翱, 强天伟, 王耀辉. 浅谈 PM<sub>2.5</sub> 及其研究方法 [J]. 洁净与空调技术, 2014, (1): 34-36.
- Chen A, Qiang T W, Wang Y H. The research on PM<sub>2.5</sub> [J]. Contamination Control & Air-conditioning Technology, 2014, (1): 34-36.
- [16] 杨书申, 宋晓焱, 郑明凯, 等. 郑州市灰霾天气过程 PM<sub>2.5</sub> 水溶性无机离子污染分析 [J]. 安全与环境学报, 2016, **16**(6): 348-353.
- Yang S S, Song X Y, Zheng M K, *et al.* Analysis of PM<sub>2.5</sub> watersoluble inorganic ion pollution during haze weather in Zhengzhou [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, **16**(6): 348-353.
- [17] Feng J L, Yu H, Sun X F, *et al.* Chemical composition and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> during Chinese spring festival at Xinxiang, a heavily polluted city in north China: fireworks and health risks [J]. Atmospheric Research, 2016, **182**: 176-188.
- [18] 陈涛. 成都市中心城区细粒子来源解析研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- Chen T. Analyse on resource apportionment of PM<sub>2.5</sub> in the center of Chengdu [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [19] 杨凌霄. 济南市大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征、来源解析及其对能见度的影响[D]. 济南: 山东大学, 2008. 1-157.
- Yang L X. Characteristics, source apportionment and influence on visual range of in PM<sub>2.5</sub> Jinan [D]. Jinan: Shandong University, 2008. 1-157.
- [20] 胡珊. 珠三角地区大气颗粒有机物致癌风险及来源解析 [D]. 北京: 北京大学, 2009.
- [21] Wang C F, Yang J Y, Ke C H. Multi-element analysis of airborne particulate matter by various spectrometric methods after microwave digestion [J]. Analytica Chimica Acta, 1996, **320**(2-3): 207-216.
- [22] Karthikeyan S, Joshi U M, Balasubramanian R. Microwave assisted sample preparation for determining water-soluble fraction of trace elements in urban airborne particulate matter: evaluation of bioavailability [J]. Analytica Chimica Acta, 2006, **576**(1): 23-30.
- [23] Samara C, Voutsas D, Koumizis T, *et al.* Characterization of airborne particulate matter in Thessaloniki, Greece, Part 1: source related heavy-metals concentrations within TSP [J]. Toxicological and Environmental Chemistry, 1990, **29**(1-2): 107-119.
- [24] Berg T, Røyset O, Steinnes E. Trace elements in atmospheric precipitation at Norwegian background stations (1989-1990) measured by ICP-MS [J]. Atmospheric Environment, 1994, **28**(21): 3519-3536.
- [25] 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.
- [26] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展 [J]. 土壤通报, 2004, **35**(3): 366-370.
- Cui D J, Zhang Y L. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, **35**(3): 366-370.
- [27] 王学锋, 何聪聪. 新乡市环宇大道工业区周边土壤重金属的污染特征和评价 [J]. 土壤通报, 2012, **43**(4): 962-966.



- Wang X F, He C C. Pollution characteristics and risk evaluation of heavy metals pollution in soils around Huanyu avenue industrial area, Xinxiang City [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, **43**(4): 962-966.
- [28] 范雪波, 刘卫, 王广华, 等. 杭州市大气颗粒物浓度及组分的粒径分布[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(1): 13-18.  
Fan X B, Liu W, Wang G H, *et al.* Size distributions of concentrations and chemical components in Hangzhou atmospheric particles[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(1): 13-18.
- [29] 张敬巧, 王淑兰, 罗达通, 等. 聊城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 及水溶性离子污染特征及来源分析[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(10): 1712-1718.  
Zhang J Q, Wang S L, Luo D T, *et al.* Characterization and source analysis of PM<sub>2.5</sub> and water-soluble ions during winter in Liaocheng City[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(10): 1712-1718.
- [30] Kaneyasu N, Yoshikado H, Mizuno T, *et al.* Chemical forms and sources of extremely high nitrate and chloride in winter aerosol pollution in the Kanto Plain of Japan [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(11): 1745-1756.
- [31] Truex T J, Pierson W R, McKee D E. Sulfate in diesel exhaust [J]. Environmental Science & Technology, 1980, **14**(9): 1118-1121.
- [32] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of PM<sub>2.5</sub> in Shanghai and Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(26): 4223-4234.
- [33] 郑永杰, 张舒, 田景芝. 齐齐哈尔市春季 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子特征分析[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(1): 68-73.  
Zheng Y J, Zhang S, Tian J Z. Characteristics of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> in the spring of Qiqihar [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, **31**(1): 68-73.
- [34] 李英红. 兰州市大气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 化学成分污染特征及来源分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. 1799-1807.  
Li Y H. Chemical characteristics and source apportionment of atmospheric fine particles in Lanzhou city [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. 1799-1807.
- [35] 韩艳妮. 农村大气气溶胶化学组成、粒径分布与吸湿性能研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(地球环境研究所), 2016.
- Han Y N. Composition, size distribution and hygroscopicity of atmospheric aerosol in rural areas [D]. Xi'an: Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [36] 闫广轩, 杨争, 席冬冬, 等. 新乡市秋季大气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子特征及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(2): 640-648.  
Yan G X, Yang Z, Xi D D, *et al.* Characterization and source analysis of the water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> of Xinxiang during autumn [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(2): 640-648.
- [37] 周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 等. 南京北郊冬季霾天 PM<sub>2.5</sub> 水溶性离子的污染特征与消光作用研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 1926-1934.  
Zhou Y Y, Ma Y, Zheng J, *et al.* Pollution characteristics and light extinction effects of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> during winter Hazy Days at North Suburban Nanjing[J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 1926-1934.
- [38] 古金霞, 吴丽萍, 霍光耀, 等. 天津市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子污染特征及来源分析[J]. 中国环境监测, 2013, **29**(3): 30-34.  
Gu J X, Wu L P, Huo G Y, *et al.* Pollution character and source of water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> over Tianjin [J]. Environmental Monitoring in China, 2013, **29**(3): 30-34.
- [39] Duan J C, Tan J H, Wang S L, *et al.* Size distributions and sources of elements in particulate matter at curbside, urban and rural sites in Beijing [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(1): 87-94.
- [40] Shingun D Y, Ogunbajana V O, Barminas J T, *et al.* Analysis of street dust for heavy metal pollutants in Mubi, Adamawa State, Nigeria[J]. International Journal of Physical Sciences, 2007, **2**(11): 290-293.
- [41] Tan J H, Duan J C, Ma Y L, *et al.* Source of atmospheric heavy metals in winter in Foshan, China [J]. Science of the Total Environment, 2014, **493**: 262-270.
- [42] Kuang C, Neumann T, Norra S, *et al.* Land use-related chemical composition of street sediments in Beijing [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2004, **11**(2): 73-83.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                   |                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016                                      | ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)       |
| Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering                                             | WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)                   |
| Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1 534 m) in Central East China                                                 | SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)         |
| Concentration Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang                                                    | YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027) |
| Scenario Analysis of PM <sub>2.5</sub> Concentration Targets and Milestones in China                                                                              | HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)             |
| PM <sub>2.5</sub> Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang                               | DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)              |
| Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City                                           | ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)    |
| Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs)in the Urban Area of Nanjing, China                                             | QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)       |
| Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City                                                    | LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)            |
| Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees                                                         | LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)      |
| Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China                                | HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)          |
| Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments                                          | LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)               |
| Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China                                                     | FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)             |
| Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China         | CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)            |
| Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin                                       | YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)      |
| Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment                                                                            | HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)       |
| Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo                                                                   | ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143) |
| Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir           | QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)    |
| Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m                      | LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)       |
| Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods                                                | LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)           |
| Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin | LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)                              |
| Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River                                    | XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)           |
| Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed                                           | JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)    |
| Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin                                                            | ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)                |
| Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area                          | MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)        |
| Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland                                                                      | LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)       |
| Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands                                                                                   | FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)             |
| Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments                                                                                    | HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)         |
| Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai                                                  | WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)                |
| Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China            | WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)           |
| Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification                                                    | LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)         |
| Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>                | BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)        |
| Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite                                                                                                     | FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)                     |
| Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV                                                                                 | LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)                               |
| Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites                                                                 | HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)         |
| Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite                                                                        | FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)          |
| Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems                                                  | QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)      |
| Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control                                             | WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)          |
| Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations                                                             | MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)     |
| Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR                                                                                           | SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)                  |
| Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System                                                      | WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)            |
| Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics                                                   | YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)        |
| Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria                                                                   | LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)          |
| Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater                                 | HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357) |
| Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants                                                       | QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)      |
| Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain                                                                        | WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)                   |
| Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes                                                                  | LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)         |
| Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System                                                                 | LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)           |
| Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH <sub>4</sub> Emissions from a Vegetable Field                                          | NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)      |
| Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods                                                                           | WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)        |
| Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas                                                  | TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)       |
| Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil                                                                      | ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)           |
| Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi                                                   | SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)             |
| Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland                                                                           | ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)             |
| Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.                          | JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)    |
| Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil                                                                                    | SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)                     |
| Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant                         | LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)     |