

 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.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估.....尹晓梅,李梓铭,熊亚军,乔林,邱雨露,孙兆彬,寇星霞(1011)

利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对APEC期间北京空气质量的影响.....李颖若,汪君霞,韩婷婷,王焱,何迪,权维俊,马志强(1024)

京津冀郊区站点秋冬季大气PM_{2.5}来源解析.....王彤,华阳,许庆成,王书肖(1035)

四川省典型工业行业PM_{2.5}成分谱分析.....冯小琼,陈军辉,熊文朋,梅林德,徐雪梅,尹寒梅,范武波,姜涛,钱骏,叶宏(1043)

典型物流城市2016年冬季2次污染过程PM_{2.5}污染特征及来源解析.....赵雪艳,杨文,王静,刘盈盈,白雯宇,徐艳萍,王歆华,白志鹏(1052)

沈阳市采暖期与非采暖期空气PM_{2.5}污染特征及来源分析.....张显,田莎莎,刘盈盈,赵雪艳,余浩,张辉,陈莉,王歆华(1062)

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.....闫广轩,雷豪杰,张靖雯,唐明双,张佳羽,曹治国,李云蓓,王跃思,樊静,李虎(1071)

烟台市环境受体PM_{2.5}四季污染特征与来源解析.....刘童,王晓军,陈倩,温杰,黄渤,朱红霞,田瑛泽,冯银厂(1082)

常州市冬季PM_{2.5}中类腐殖质昼夜特征分析.....顾远,李清,黄雯倩,赵竹子,马帅帅,叶招莲(1091)

西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险.....曹红梅,赵留元,穆熙,李尧捷,毛潇萱,黄韬,马建民,高宏(1101)

京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析.....邱昀,李令军,姜磊,王新辉,赵文慧,张立坤,鹿海峰(1111)

中国城市O₃浓度时空变化特征及驱动因素.....黄小刚,赵景波,曹军骥,宋永永(1120)

基于卫星和地面观测的2013年以来我国臭氧时空分布及变化特征.....张倩倩,张兴赢(1132)

舟山市臭氧污染分布特征及来源解析.....王俏丽,董敏丽,李素静,吴成志,王刚,陈必新,李伟,高翔,叶荣民(1143)

中国建筑涂料使用VOCs排放因子及排放清单的建立.....高美平,邵霞,聂磊,王海林,安小栓(1152)

异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化.....黄亚娟,曹罡,朱荣淑,欧阳峰(1163)

兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征.....栗世学,郭文凯,何昕,朱玉凡,陈强(1172)

成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析.....胡月,刘国东,孟玉川,张文江,夏成城(1179)

基于TBL模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面CO₂扩散通量估算.....张逸飞,杨平,赵光辉,李玲,谭立山,全川(1188)

渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化.....刘兆冰,梁文健,秦礼萍,唐建辉(1198)

思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学.....劳心宇,原杰,刘瑜, Khan M. G. Mostofa(1209)

厦门湾海滩微塑料污染特征.....刘启明,梁海涛,锡桂莉,胡欣,葛健(1217)

高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析.....王奇岗,肖琼,赵海娟,王健力,郭永丽,张清华(1222)

鲜水河断裂带拉花盆地地下水化学特征及控制因素.....何锦,张幼宽,赵雨晴,韩双宝,刘元晴,张涛(1236)

成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征.....吴迪,印红玲,李世平,王增武,邓旭,罗怡,罗林(1245)

丹江口库区表层浮游细菌群落组成与PICRUS1功能预测分析.....张菲,田伟,孙峰,陈彦,丁传雨,庞发虎,姚伦广,李玉英,陈兆进(1252)

蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响.....刘志迎,许海,詹旭,朱广伟,秦伯强,张运林(1261)

基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价.....苏瑛,许育新,安文浩,王云龙,何振超,楼颖雯,沈阿林(1270)

生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响.....黄磊,梁根坤,梁岩,罗星,陈玉成(1280)

城市不同材料屋面径流的污染负荷特性.....何湖滨,陈诚,林育青,严晗璐,董建玮,陈求稳(1287)

BiOCl-(NH₄)₃PW₁₂O₄₀复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制.....张文海,吉庆华,兰华春,李静(1295)

微米铁复合生物碳源对地下水中1,2-二氯乙烷的高效去除.....吴乃瑾,宋云,魏文侠,王海见,孙仲平(1302)

鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除.....邓曼君,王学江,成雪君,景焕平,赵建夫(1310)

Ca/Mg负载改性渣渣生物炭对水中磷的吸附特性.....易蔓,李婷婷,李海红,黄巧,杨金娥,陈玉成,杨志敏(1318)

两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素.....程扬,沈启斌,刘子丹,杨小莹,张太平,廖志钟(1328)

静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响.....俞阳,林建伟,詹艳慧,何思琪,吴小龙,王艳,赵钰颖,林莹,刘鹏茜(1337)

4种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去及机制.....王大鹏,张烟,颜昌宙(1347)

以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析.....徐婷,李勇,朱怡嘉,薛梦婷,汤同欢(1353)

进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响.....李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰(1360)

除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复.....李海玲,李冬,张杰,刘博(1367)

CAST工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能.....马娟,杨蕊春,俞小军,周猛,陈永志(1375)

不同曝气量和好氧时间下SPNDPR系统处理低C/N城市污水的脱氮除磷性能.....袁梦飞,于德爽,巩秀珍,王晓霞,陈光辉,杜世明,甄建园(1382)

ABR除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水.....李田,曹家炜,谢凤莲,沈耀良,吴鹏,宋吟玲(1390)

室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性.....谢璐琳,王建芳,钱飞跃,张泽宇,沈耀良,齐泽坤(1396)

不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征.....任君怡,陈林艺,李慧春,秦玉洁,姜雁,王桐屿,周少奇(1405)

降温过程中生物膜CANON反应器的运行特征.....付昆明,廖敏辉,周厚田,付巢,姜婍,仇付国,曹秀芳(1412)

IEM-UF同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析.....刘子奇,张岩,马翔山,张博康,曹孟京,陈昌明(1419)

温度对硝化杆菌(Nitrobacter)活性动力学影响.....于雪,孙洪伟,李维维,祁国平,马娟,陈永志,吕心涛(1426)

零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化.....牛雨彤,刘吉宝,马爽,李亚明,解立平,魏源送,孟晓山(1431)

牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响.....彭磊,王科,谷月,王爱杰(1439)

环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响.....张彦军,郭胜利(1446)

三峡库区典型微生物土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的反应.....李一凡,王玉杰,王彬,王云琦(1457)

三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响.....王甜,黄志霖,曾立雄,肖文发,宋文梅(1468)

长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征.....宁赵,程爱武,唐海明,葛体达,邓扬悟,苏以荣,陈香碧(1475)

不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征.....童瑶瑶,王季斐,祝贞科,邓扬悟,陈珊,葛体达,袁红朝,吴金水(1483)

桂林市仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征.....徐广平,李艳琼,沈育伊,张德楠,孙英杰,张中峰,周龙武,段春燕(1491)

缙云山4种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征.....王富华,吕盛,黄容,高明,王子芳,徐畅(1504)

大气污染对居民健康影响研究进展.....秦耀辰,谢志祥,李阳(1512)

《环境科学》征订启事(1042) 《环境科学》征稿简则(1162) 信息(1208, 1235, 1286)

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

闫广轩¹, 雷豪杰², 张靖雯¹, 唐明双¹, 张佳羽¹, 曹治国¹, 李云蓓¹, 王跃思^{3,4}, 樊静^{1*}, 李虎^{2*}
(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. 中国农业科学院-美国新罕布什尔大学可持续农业生态系统研究联合实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081; 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: 为了探究新乡地区年际间冬季 PM_{2.5} 组分的变化特征和污染来源, 于 2015 年冬季和 2016 年冬季分别在新乡市区进行连续 1 个月的膜采样, 测定 PM_{2.5} 质量浓度、金属元素含量及其水溶性离子成分含量, 并结合气象因素进行分析. 结果表明, 新乡地区 2015 年和 2016 年冬季采样期间 PM_{2.5} 的质量浓度日均值分别为 226 μg·m⁻³ 和 224 μg·m⁻³, 污染水平较高. 观测期间, 新乡冬季 PM_{2.5} 中 Cd 和 Pb 金属元素富集明显, 富集因子超过 1000. 且与 2015 年相比, 2016 年金属元素(除 Ag 和 Ni)浓度下降约 7.83% ~ 73.33%, 富集程度均趋于降低. 水溶性离子以 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 这 3 种为主, 2016 年在 PM_{2.5} 中占比上升 25.1%. 综合两种成分分析, 新乡地区的 PM_{2.5} 污染呈现出金属污染向二次水溶性离子污染转移的趋势. 综合 PCA 和 PMF 源解析结果显示, 新乡市冬季有 4 种主要排放源, 即尘土、二次源、工业源和化石燃料燃烧源, 2015 年冬季主要来源是土壤和建筑扬尘混合源, 贡献率 37.46%, 2016 年主要来源是交通及工业生产中的二次气溶胶污染源, 贡献率为 34.94%.

关键词: PM_{2.5}; 金属元素; 富集因子(EF); 水溶性离子; 因子分析(PCA); 正交矩阵因子分析法(PMF)

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1071-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804104

Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM_{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment

YAN Guang-xuan¹, LEI Hao-jie², ZHANG Jing-wen¹, TANG Ming-shuang¹, ZHANG Jia-yu¹, CAO Zhi-guo¹, LI Yun-bei¹, WANG Yue-si^{3,4}, FAN Jing^{1*}, LI Hu^{2*}

(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. China Joint Research Laboratory for Sustainable Agroecosystem Research between Chinese Academy of Agricultural Sciences and University of New Hampshire (CAAS-UNH), Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agricultural Non-point Source Pollution Control, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. State Key Laboratory Atmosphere Boundary Layer Physics and 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 interannual variations of chemical composition and source apportionment, a field campaign was carried out to collect the PM_{2.5} temperance sample during the winter of 2015 and the winter of 2016 in Xinxiang urban areas. PM_{2.5} mass concentration, metal elements, and the water-soluble ions were determined and meteorological factors were recorded simultaneously. The results showed that the daily mean concentrations of PM_{2.5} indicated serious pollution with values of 226 μg·m⁻³ and 224 μg·m⁻³ in 2015 and 2016, respectively. The Cd and Pb elements in PM_{2.5} were significantly enriched, with EF more than 1000. However, compared with 2015, the enrichment effect of most metal elements showed a trend of decrease in 2016. The water-soluble ions were mainly composed of SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺. The results showed a trade-off effect between metal elements and water-soluble ions in the two study periods. The results of PCA and PMF analyses show that there were four main emission sources in Xinxiang city in winter, namely dust, secondary source, industrial source, and fossil fuel combustion source. Moreover, the main sources of PM_{2.5} was the mixed source of soil and building dust and secondary aerosol pollution, with contributions of 37.46% and 34.94% in the winters of 2015 and 2016, respectively.

Key words: PM_{2.5}; metal elements; enrichment factors (EF); water-soluble ions; principal component analysis (PCA); positive matrix factorization (PMF)

收稿日期: 2018-04-13; 修订日期: 2018-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807327, 51508167, 41671303); 河南师范大学博士科研启动课题项目(5101219170103); 河南省高等学校重点科研计划项目(15B530002); 河南师范大学青年科学基金项目(5101219279005, 5101219279007)

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: xuanxuaneeeee@163.com

* 通信作者, E-mail: fanjing@htu.cn; lihu0728@sina.com

大气颗粒物是重要的空气污染物之一,尤其是细颗粒物(空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物, $\text{PM}_{2.5}$)的污染已经成为我国大多数城市的关注焦点^[1]. 其成分复杂,可在大气中发生多种物理化学反应,因此对大气能见度、人体健康、生态系统和气候产生显著影响^[2]. $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征及其追因溯源一直是空气污染研究领域的热点^[3]. 然而, $\text{PM}_{2.5}$ 污染成因复杂、类型多变,尤其是年际间的变化又受到气象因素、管控措施及其化学组分等影响. 因此,开展 $\text{PM}_{2.5}$ 年际变化研究对更好控制空气污染、把握其污染特征及趋势具有重要意义.

金属元素和水溶性离子是 $\text{PM}_{2.5}$ 中重要组分. 金属元素对人体健康影响较大,尤其是重金属元素,长期暴露于高浓度环境中会对人体呼吸系统、心血管系统和免疫系统产生损害^[4]. 而水溶性离子在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比较大,其中,硫酸根、硝酸根和铵根这3种主要离子又占有水溶性无机盐总和的70%~80%^[5]. 近十多年来,研究者对国内主要城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的成分组成和污染特征等方面的研究较为深入^[6~8],已在 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素和水溶性离子研究方面取得较大进展^[9,10]. 周雪明等^[11]和乔宝文等^[12]对2011~2014年北京大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属来源的研究表明,主要来源由扬尘和煤燃烧转向燃煤和生物质燃烧以及交通和工业排放. 通过顾芳婷等^[13]、Sun等^[14]和丁萌萌等^[15]对 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 这3种水溶性离子的研究,年际间3种离子在平均质量浓度水平、浓度排序及 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比方面存在差异. $\text{PM}_{2.5}$ 中各组分污染特征及其来源在不同年际间的差异可以反映出城市政策方针、能源结构和产业布局的改变对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响^[16]. 因此对年际间 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素和水溶性离子污染的研究能够及时发现治理灰霾政策存在的不足,及时作出调整,更加有效地进行污染防控.

新乡是豫北地区的中心城市(图1),地处环境保护部重点治理“2+26”城市群的最南部城市之一,在中原经济区建设中发挥重要作用. 2015年冬季该地暴发类似于北京、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. 然而针对该地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的研究相对较少,主要关注春节期间和单采暖季的10种重金属污染及其源解析^[17,18],使得灰霾治理工作缺少理论支持. 冬季是灰霾污染的多发季节,对新乡冬季灰霾污染年际变化的研究具有一定的代表性,是灰霾污染控制的重点环节. 基于此,本研究于2015年和2016年冬季对新乡开展为期1个月的连续膜采样,并对 $\text{PM}_{2.5}$ 中的金属元素和水溶性离子的年际变化

及来源进行分析,以期为污染源头的控制和环保调控措施的制定提供科学依据.

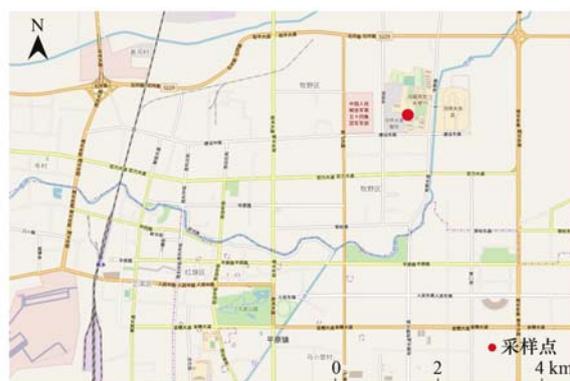


图1 新乡观测站位示意

Fig. 1 Map of Xinxiang and sampling sites

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究 $\text{PM}_{2.5}$ 采样地点设于新乡河南师范大学(35.33°N, 113.91°E),周围没有大型污染工厂的分布,通风效果良好,可以较为客观地反映本区域内的平均污染状况(图1). $\text{PM}_{2.5}$ 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 $100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,单个样品采样时长为11.5 h [08:00~19:30和20:00~07:30(次日)],整个采样周期为一个月. 采样膜使用石英纤维滤膜(PALL公司,7204-03),滤膜直径是90 mm. 除去强雨雪等特殊天气条件下无法采样,共采集有效样品118个. 同步的气象和大气污染物数据由当地气象局提供.

1.2 样品前处理及测定

1.2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 质量分析

采样膜使用前先放置于马弗炉中在 400°C 条件下焙烧4.0 h,除去表面吸附的有机蒸气和有机物^[19~21]. 称量前后为避免误差都要把滤膜置于恒温恒湿箱(温度 20°C ,相对湿度50%)中平衡24.0 h,使用精度为0.01 mg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,之后置于洁净干燥的膜盒中保存. 未使用的膜称重后存于冰箱保鲜层(4°C)用于采样,使用过的膜放于冰箱的冷冻层(-20°C)保存至分析. 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颗粒物的大气质量浓度.

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的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2\text{-HF}$ 混合酸体系^[22,23],比例为6:2:0.6,4步升温法进行样品的

消解^[12]. 裁取 1/4 采样膜置于消解罐中, 用 HNO₃-H₂O₂-HF 混合体系在微波消解仪(上海新仪公司)中进行加热消解, 消解结束后待消解罐温度降至室温, 将消解液转移至 PET 塑料瓶中用超纯水定容至 50 mL. 每组消解样品中设有 1 个实验空白. 采用电感耦合等离子体质谱(DRC-e, PerkinElmer)测定消解液中 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 0.3 ~ 3.0 u, 在线可调线性范围为 9 个数量级.

1.2.3 水溶性离子的浸提及其测定

使用直径为 16 mm 的打孔器于采样膜表面均匀部位截取圆形小膜片, 转移到洁净的 50 mL PET 瓶中, 用定量加水装置向瓶中加入 50 mL 的纯净水, 使用超声仪于 100 Hz 的条件下超声 30 min. 另外, 超声时加入冰块于超声仪, 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. 超声浸提后, 浸提液通过直径 0.22 μm 的滤膜过滤. 由于部分水溶性离子浓度大部分低于检出限, 有效数据太少, 经离子色谱仪(Dionex ICS-1100, 美国)测得有效水溶性阴离子(Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻)和阳离子(K⁺、NH₄⁺)共 5 种. 阳离子检测: 采用 CS12A 分离柱, CSRS 抑制器, 淋洗液为 22

mmol·L⁻¹的甲基磺酸溶液, 流速为 1 mL·min⁻¹; 阴离子检测: 采用 AS14A 分离柱, ASRS 抑制器, 淋洗液为 3.5 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃ 和 1 mmol·L⁻¹ NaHCO₃ 混合溶液, 流速为 1 mL·min⁻¹. 各离子(NH₄⁺、K⁺、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻)检出限为: 0.007、0.005、0.01、0.03、0.024 μg·m⁻³. 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.

1.3 数据分析

1.3.1 富集因子(EFs)法

富集因子(EF)公式为:

$$EF = \frac{(c_i/c_n)_{\text{气溶胶}}}{(c_i/c_n)_{\text{地壳}}} \quad (1)$$

式中, $c_{i(\text{气溶胶})}$ 为颗粒物中某元素质量浓度 (ng·m⁻³); $c_{n(\text{气溶胶})}$ 为参比元素在颗粒物中的质量浓度 (ng·m⁻³); $c_{i(\text{地壳})}$ 为地壳中该元素的质量浓度 (ng·m⁻³); $c_{n(\text{地壳})}$ 为参比元素在地壳中的质量浓度 (ng·m⁻³). 本研究选用地壳中含量较多且人为干扰较少的 Al 元素 (63.4 g·kg⁻¹) 做为参考元素, 地壳元素浓度选择河南省 A 层土壤元素背景值的算术平均值^[24]. 一般而言, 富集因子 EF 的大小不仅可以反映出 PM_{2.5} 中元素的富集程度, 还可以初步定性判断和评价 PM_{2.5} 中元素的来源及其对污染的贡献^[25]. 有研究把 PM_{2.5} 中元素的富集程度分为 5 个级别^[26], 见表 1.

表 1 富集程度与污染源对应关系

Table 1 Relationships of enrichment degree and pollution sources

富集因子(EF)	EF ≤ 1	1 < EF ≤ 10	10 < EF ≤ 100	100 < EF ≤ 1000	EF > 1000
富集程度	微量富集	轻度富集	中度富集	高度富集	超富集
来源	地壳或土壤源	自然源和人为源共同作用	人为污染源	人为污染源	人为污染源

1.3.2 PMF 受体模型

正交矩阵因子分析法(PMF)是目前广泛使用的受体模型之一, 其基本原理是采用最小二乘法判定污染物的主要来源, 并可计算出每个非负因子对污染物的贡献率以及其时间变化序列^[27]. 其基本公式为 $X = GF + E$, 式中, G 和 F 分别为 $n \times p$ 和 $p \times m$ 的矩阵, p 为主要污染源的数目, E 为残差矩阵, X 为 $n \times m$ 的矩阵, $n \times m$ 代表 n 个样品的 m 种化学成分, X 可分解为:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (2)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{x_{ij} \sum_{k=1}^p f_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \quad (3)$$

式中, x_{ij} 为样品 i 中 j 元素的质量浓度 (μg·m⁻³); g_{ik} 为第 k 个排放源对样品 i 的贡献; f_{kj} 为来源 k 中 j 元素的含量; e_{ij} 为 j 元素的残差; u_{ij} 为第 i 个样品第 j 种物质的不确定度. 模型运行的优化目标是经过多次拟合, 使 Q 值趋于最小.

模型不确定度可用下列公式进行估算:

$$u_{ij} = \begin{cases} \sqrt{(10\% \cdot c)^2 + (0.5 + MDL)^2} & (c \geq MDL) \\ \frac{5}{6} \cdot MDL & (c < MDL) \end{cases} \quad (4)$$

式中, c 和 MDL 分别为元素质量浓度和方法检测限.

1.3.3 硫氧化率(SOR)和氮氧化率(NOR)

用 SOR 和 NOR 表征 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻ 与 NO₃⁻ 的

转化率, NOR 与 SOR 值越高, 表明其对应二次转化效率越高^[28], 公式如下:

$$\text{SOR} = [\text{SO}_4^{2-}] / ([\text{SO}_4^{2-}] + [\text{SO}_2]) \quad (5)$$

$$\text{NOR} = [\text{NO}_3^-] / ([\text{NO}_3^-] + [\text{NO}_2]) \quad (6)$$

式中, $[\text{SO}_4^{2-}]$ 和 $[\text{NO}_3^-]$ 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 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). $[\text{SO}_2]$ 和 $[\text{NO}_2]$ 分别表示大气中二氧化硫和二氧化氮的质量浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

1.3.4 分析及图表绘制

用 SPSS 22.0.0 软件对采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 与气象数据进行相关性分析. 选取 $\text{PM}_{2.5}$ 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 PMF 模型进行源解析计算. 利用 Origin Pro 9.1 绘制 $\text{PM}_{2.5}$ 及 SO_2 、 NO_2 的质量浓度变化趋势图和风玫瑰图, 其他图片分析均利用 Excel 作图工具完成.

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度特征

2.1.1 年际间 $\text{PM}_{2.5}$ 污染水平

新乡市 2015 年和 2016 年冬季采样期间 $\text{PM}_{2.5}$

的质量浓度日均值分别为 $226 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $224 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 2), 其中 2015 年冬季最高日均值达到 $596 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2016 年达到 $511 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 污染峰值下降. 两年夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 日均质量浓度分别为 $205 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $209 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 白天日均质量浓度分别为 $237 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $236 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 白天污染水平高于晚上. 参照我国现行 $\text{PM}_{2.5}$ 二级标准 ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 2015 年和 2016 年新乡 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度超标率分别为 201.7% 和 198.5%. 可见研究期间新乡的冬季灰霾污染局势依然严重. 采样期间, 二次离子气体前体物 SO_2 、 NO_2 的年际平均浓度呈下降趋势, SO_2 、 NO_2 分别下降 52.5%、16.1%. 2015 年和 2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和 NO_2 的浓度变化特征一致, 相关性分别为 0.845 ($P < 0.01$)、0.837 ($P < 0.01$), 说明 NO_2 与新乡灰霾污染的形成关系密切.

2.1.2 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与地面气象要素的相关性

冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与各气象因素、SOR、NOR 的相关性见表 2. 2015 年冬季平均风速为 $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0.7 \sim 5.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 平均温度 1.5°C ($-2.9 \sim 7.1^\circ\text{C}$), 平均相对湿度 58.6% ($21.0\% \sim$

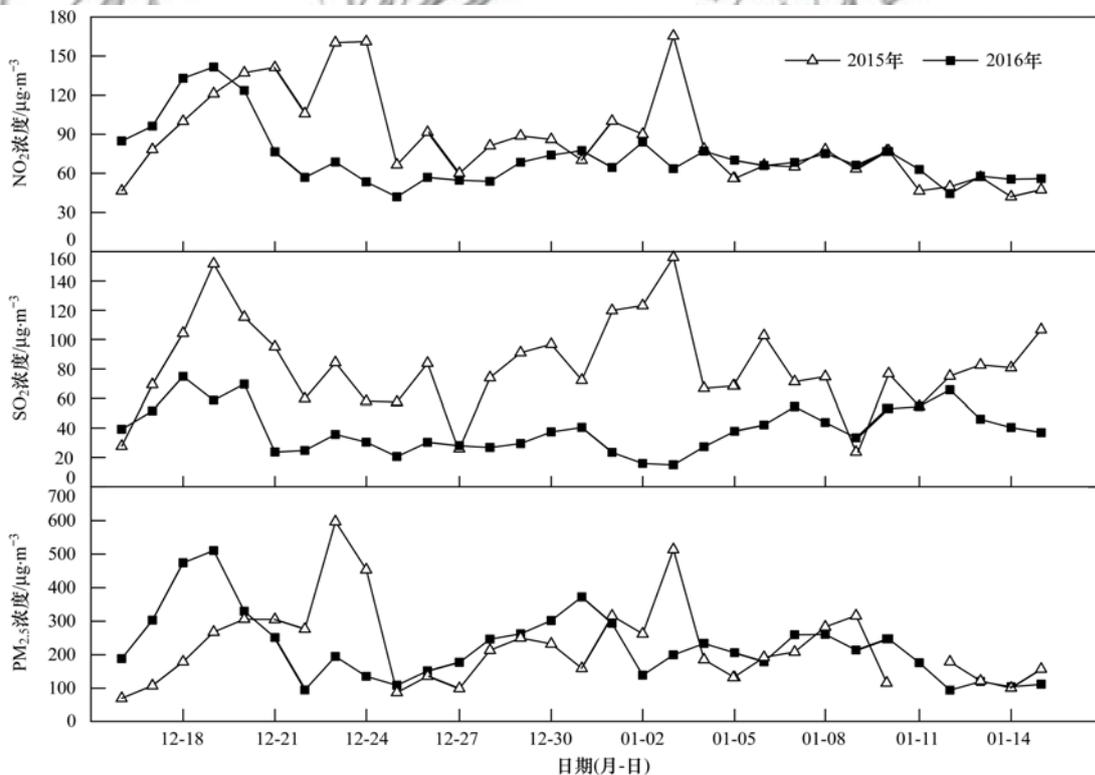


图 2 $\text{PM}_{2.5}$ 及 SO_2 、 NO_2 的质量浓度

Fig. 2 Mass concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 , and NO_2

87.0%). 2016 年冬季平均风速为 $1.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0.6 \sim 3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 平均温度 2.6°C ($-0.4 \sim 6.4^\circ\text{C}$), 平均相对湿度 78.0% ($44.8\% \sim 97.6\%$). 两年 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与 SOR、NOR 均呈显著相关, 灰霾

污染受气态前体物的二次转化影响较重. 其次, 2015 年冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与相对湿度呈显著正相关 ($R = 0.689$), 与平均风速呈显著负相关 ($R = -0.437$). 2016 年冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与平均风

速呈显著负相关($R = -0.420$)。风是决定大气中 PM_{2.5} 稀释和扩散最重要的气象因子^[29,30]。2015 冬季采样期(2015 年 12 月 16 日~2016 年 1 月 15 日)新乡市主要盛行西南风,但其风速低,而东北风却风频低,风速高[图 3 (a)]。受太行山系影响,豫北地区地形呈西高东低,西部为南北向山脉,中东部为平原地带,所以东北方向吹来的大风短暂地加速了污染物的消散,向西南方向传输,大风之后,风向多又转为西南方向,携带污染物重新返回豫北地区,形成污染,使 PM_{2.5} 浓度升高。相似地,徐敬等^[31]在对北京地区 PM_{2.5} 质量浓度和地面气象要素相关性的研究得到了类似的结果。

2016 年冬季采样期(2016 年 12 月 16 日~2017

年 1 月 15 日)新乡偏南风风频高,风速小,期间平均风速较 2015 年降低 11.1%,不利于污染物的扩散。2015 年冬季 PM_{2.5} 质量浓度与平均相对湿度呈现显著正相关,平均相对湿度与 PM_{2.5} 污染的形成关系紧密,而 2016 年冬季并没有观测到这种相关关系。虽然 2016 年大气平均相对湿度处于较高水平,由 2015 年 58.6% 增加到 78.0%,增加 33.1%,但相对湿度变化平缓,未能与多变的 PM_{2.5} 质量浓度良好相关。而这样高湿度和弱风天气环境使污染物更易发生聚集和二次转化,最终形成污染。可见,两年间灰霾的污染形成存在差异,以地理环境为基础,各气象因素在灰霾污染形成过程中发挥作用的尺度不同,地理和气象因素是新乡地区 PM_{2.5} 污染形成的重要条件^[32]。

表 2 新乡冬季 PM_{2.5} 质量浓度与各气象因素、SOR、NOR 的相关性(R)¹⁾

Table 2 Correlation between PM_{2.5} and meteorological factors during wintertime in Xinxiang

年份	平均气压 (0.1 hPa)	平均气温 (0.1℃)	平均风速 (0.1 m·s ⁻¹)	平均相对湿度	24 h 累积降水 (0.1 mm)	SOR	NOR
2015	-0.221	0.077	-0.437 *	0.689 **	0.074	0.688 **	0.541 **
2016	-0.198	0.017	-0.420 *	0.308	-0.077	0.587 **	0.760 **

1) * 表示在置信度为 0.05 时,相关性是显著的; ** 表示在置信度为 0.01 时,相关性是显著的

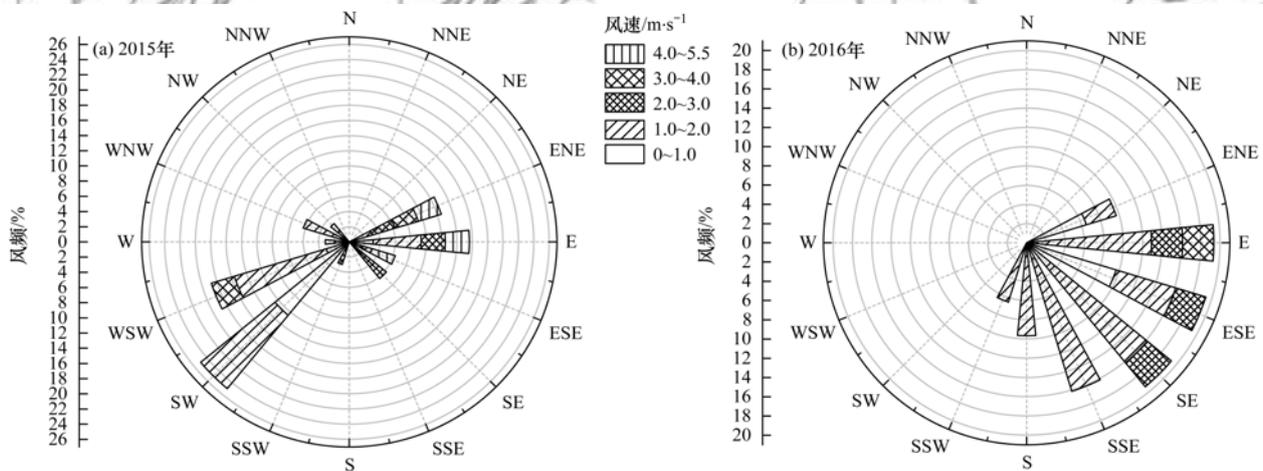


图 3 2015 年和 2016 年冬季采样期风玫瑰图

Fig. 3 Wind rose diagram during sampling period in 2015 and 2016

2.2 金属元素污染特征

新乡 2015 年和 2016 年冬季 PM_{2.5} 中各元素的日平均质量浓度和富集因子(EF)的计算结果见表 3。

2015 年冬季 PM_{2.5} 中金属元素的质量浓度范围是 0.38 ~ 654.86 ng·m⁻³, 2016 年冬季 PM_{2.5} 中金属元素的质量浓度范围是 0.12 ~ 570.46 ng·m⁻³, 除 Al、Ca、Fe 等常见土壤元素含量较高外, 年际间突出污染的重金属元素是 Pb、Zn、Cd 和 Cu。各金属元素质量浓度大小排序未出现明显差异, 但日均质量浓度水平整体呈下降趋势, 降低 7.83% ~

73.33%, 17 种金属在 PM_{2.5} 组成中占比也从 1.12% 降低至 0.80%。元素 Cd、Cu、Zn 和 K 的质量浓度与富集因子均下降, 且均主要来自于垃圾焚烧、机动车刹车磨损和生物质燃烧^[25]。可见, 2016 年新乡在减排、控污、控尘和控煤方面采取的综合整治措施在一定程度上削减了 PM_{2.5} 的金属污染。

EF 的计算结果显示, 该地 EF 值显著较高的元素为 Cd、Pb、Cu、Zn、As、Ag、Ni、Cr 和 Be, EF 值均大于人为污染判断值 10, 其中, Cd、Pb、Ag 多为超富集, Cu、Zn 和 As 多为高度富集, Cr、Ni 和 Be 多为中度富集, 这些元素受人为污染影响严重^[33],

其中 As、Pb、Se 等元素的主要来源是燃煤燃油^[34]。Mn、Co、V、Ca、K、Al、Fe、Mg 等元素的 EF 值均小于 10，主要由于地面扬尘而富集于 PM_{2.5} 中。2015 年冬季新乡 PM_{2.5} 中 Cd、Pb 为超富集，而 2016 年多出 Ag 元素，且该元素质量浓度升高了 3.7 倍。

PM_{2.5} 中 Ag 元素是燃煤过程排放的一种特征元素^[35]，这可能与冬季供暖需求的增加有关。可见，与燃煤有关的污染在冬季 PM_{2.5} 中发挥了重要作用，控煤、控油形势依然严峻，值得加强重视并进一步采取措施。

表 3 金属元素的质量浓度及富集因子 (EFs)

Table 3 Mean mass concentrations of metal elements and the enrichment factors (EFs)

元素	2015 年冬季			2016 年冬季		
	平均浓度 /ng·m ⁻³	EF	富集程度	平均浓度 /ng·m ⁻³	EF	富集程度
Cd	77.40	101 269.69	超富集	50.72	76 175.94	超富集
Pb	257.38	1 271.36	超富集	237.24	1 345.23	超富集
Cu	99.09	486.96	高度富集	46.12	260.18	高度富集
Zn	253.73	408.74	高度富集	135.12	249.87	高度富集
As	38.00	322.73	高度富集	28.71	279.87	高度富集
Ag	0.38	269.60	高度富集	1.78	1 433.17	超富集
Ni	3.19	11.57	中度富集	7.65	31.83	中度富集
Cr	23.05	34.98	中度富集	8.67	15.10	中度富集
Be	0.45	33.24	中度富集	0.12	10.18	中度富集
Co	1.00	9.71	轻度富集	0.58	6.43	轻度富集
Mn	54.80	9.16	轻度富集	46.00	8.83	轻度富集
V	2.79	2.87	轻度富集	1.67	1.98	轻度富集
Ca	440.20	1.75	轻度富集	224.04	1.02	轻度富集
K	227.91	1.28	轻度富集	117.25	0.75	微量富集
Al	654.86	1.00	轻度富集	570.46	1.00	轻度富集
Mg	114.90	0.98	微量富集	89.38	0.87	微量富集
Fe	280.88	0.97	微量富集	217.11	0.86	微量富集

2.3 水溶性离子污染特征

2.3.1 水溶性无机组分及其在 PM_{2.5} 中的占比

NH₄⁺、K⁺、Cl⁻、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 这 5 种水溶性离子是大气颗粒物中一类较为重要的物质，分别在 2015 年和 2016 年新乡冬季 PM_{2.5} 中占比(质量分数)为 29.9%、56.8% (图 4)，2016 年 5 种离子在 PM_{2.5} 中占比之和升高，增加 26.9%，水溶性离子污染影响加深。其中，浓度较高的水溶性离子主要是 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ (SNA)。一般认为，SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 主要是由其气态前体物(SO₂、NO_x 和 NH₃) 经大气化学反应而形成的二次离子，属于二次污染物^[36]。2015 年冬季新乡 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的占比分别是 11.1%、9.0%、8.6%，2016 年

冬季新乡 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的占比分别是 19.2%、19.0%、15.6%。2016 年冬季新乡 PM_{2.5} 中 3 种离子的占比增加了约 1 倍。新乡 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 等水溶性离子污染趋于加重，这与刀谔等^[37] 和范雪波等^[38] 对京津冀、杭州地区的水溶性离子研究结果一致。据此，较 2015 年同期二次污染程度相比，新乡冬季灰霾污染中二次污染有所加重。二次源在水溶性离子中占比较大，也是颗粒物浓度升高的主要因素^[39,40]，结合新乡 2016 年实施的冬季机动车限行措施和冬季农业二次气体排放较弱，可推测新乡 PM_{2.5} 中水溶性离子的污染可能来自于工业生产排放的气态前体物的转化。

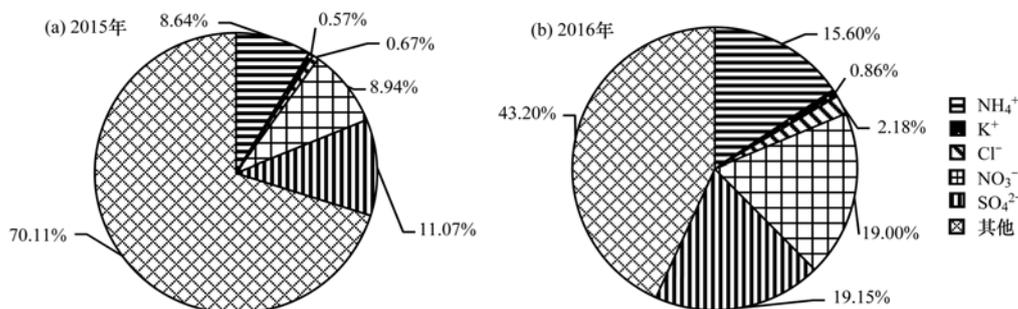


图 4 采样期 PM_{2.5} 中主要水溶性离子组分组成

Fig. 4 Proportion of main water-soluble ions in PM_{2.5} during the sampling period

综合分析新乡 2015~2016 年冬季 PM_{2.5} 中金属元素和水溶性离子的质量浓度特征, 得到在 PM_{2.5} 质量浓度中, 金属元素和水溶性离子之间潜在相互消长关系. 新乡 2015 年 PM_{2.5} 中, 两者共占比 31.0%, 2016 年两者占比之和为 57.6%, 其中, 金属元素占比降低 28.6%, 水溶性离子占比升高了 90.0%. 说明金属元素污染在消减, 水溶性二次离子污染成为 PM_{2.5} 中重要污染物.

2.3.2 [NO₃⁻]浓度、[SO₄²⁻]浓度及其气态前体物的关系

采样期间, 新乡冬季两年 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻、NO₃⁻ 的日均质量浓度分别为 23.75 μg·m⁻³ (2015 年)、19.34 μg·m⁻³ (2015 年) 和 42.90 μg·m⁻³ (2016 年)、42.71 μg·m⁻³ (2016 年). 不同于 2015 年冬季, 2016 年冬季 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 的质量浓度分别上升 80.6% 和 120.8%, SOR 和 NOR 分别上升 184.4% 和 154.0%, 且两年 PM_{2.5} 的质量浓度均与 SOR 和 NOR 显著相关. 而其对应气态前体物 SO₂

和 NO₂ 分别下降 52.5% 和 16.0%. 可见, 2016 年大气中 SO₂ 和 NO₂ 的氧化速率增加值远远大于其质量浓度的减少值, 2016 年冬季高湿度、低风速的气象条件可能是两种气体氧化速率提高的重要条件. 空气中大量的 SO₂ 和 NO₂ 发生二次转化, 生成 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 致使 SNA 浓度上升, 形成二次气溶胶, 加重灰霾污染, 导致了 2016 年冬季持续性重霾天气的出现.

2.4 来源分析

2.4.1 主成分分析

应用 SPSS 22.0.0 统计分析软件分别对新乡 2015 年、2016 年 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 0.75, 认为相关性较强. 分别得出 4 种因子. 由表 4 可知, 2015 年和 2016 年各因子累计贡献率分别为 77.76% 和 84.81%.

表 4 最大方差旋转因子分析结果

Table 4 Results of factor analysis with varimax rotation

时段因子	2015 年冬季				2016 年冬季			
	1	2	3	4	1	2	3	4
特征值	8.24	5.28	1.88	1.68	7.69	6.58	2.89	1.50
贡献率/%	37.46	24.01	8.56	7.64	34.94	29.93	13.13	6.81
累计贡献率/%	37.46	61.47	70.03	77.66	34.94	64.87	78.00	84.81

依据最大方差旋转因子分析结果(图 5), 2015 年新乡冬季 PM_{2.5} 中, 第 1 类因子中载荷值较大的元素主要为 Fe、Ca、Mg 和 Mn, 富集因子均小于 10, Ca、Mg 和 Mn 多来源于建筑尘和土壤扬尘, 因此因子 1 可能代表土壤和建筑扬尘的混合源, 贡献率为 37.46%; 第 2 类因子中载荷较大的元素是 NH₄⁺ 和 SO₄²⁻. NH₄⁺ 主要与人和动物的活动和农业化肥的使用有关, 但考虑到冬季气温较低, 农业氨源的贡献应处于较低水平. SO₄²⁻ 来自 SO₂ 的二次转化, 由此可以判断, 因子 2 可能代表二次源, 贡献率为 24.01%; 第 3 类因子载荷较大的元素分别为 Cr 和 Ni, Cr 多来源于冶金尘等工业污染源^[41], 因子 3 可能为工业冶金源, 贡献率为 8.56%; 第 4 类因子中载荷较大的元素为 Al 和 Cl⁻. 其中, Cl⁻ 离子是生物质燃烧或者垃圾焚烧的标识物^[42], 因此因子 4 可能代表燃烧源, 其贡献率为 7.64%.

2016 年新乡冬季 PM_{2.5} 中, 第 1 类因子中载荷值较大的元素为 NO₃⁻、SO₄²⁻, 是主要的二次污染物, 主要来源为燃煤电厂和机动车尾气, 因此因子 1 可能代表交通及工业生产中产生气态二次气溶胶污染源, 贡献率为 34.94%; 第 2 类因子中载荷较

大的元素是 Al、Fe 和 Ni, 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%; 第 3 类因子中载荷较大的元素是 Cd、Mg 和 Ca, 有研究表明, Cd 广泛应用于汽车轮胎的生产, 会随着轮胎的磨损和老化暴露在环境中^[43,44], 因此可以认为因子 3 为交通道路扬尘源, 其贡献率为 13.13%; 第 4 类因子中载荷较大的元素是 Ag, 其为化石燃料燃烧过程排放尘的特征元素^[33], 并且为超富集, 所以因子 4 可能为冬季取暖的化石燃料燃烧污染源, 其贡献率为 6.81%

2.4.2 PMF 源解析结果

将两个冬季观测获得的 PM_{2.5} 化学成分的分析数据输入 PMF 模型中, 输入不同的因子数目(3~12 个)运行得到了不同的结果, 通过比较不同因子数目得到的模型输出 Q 值以及每个源成分谱的差异, 发现因子数为 4 时得到的源成分谱比较合理. 经过多次运行后发现, 当因子轻微旋转时(FPEAK = -0.1), Q 的变化比较稳定, 因此确定 PMF 模型运行的最终方案为 Factor = 4, FPEAK = -0.1, 运行结果的因子平均贡献与年度差异结果见图 6 和表 5. 因子 1 主要负载是 Ni (68%)、Al (53%)、

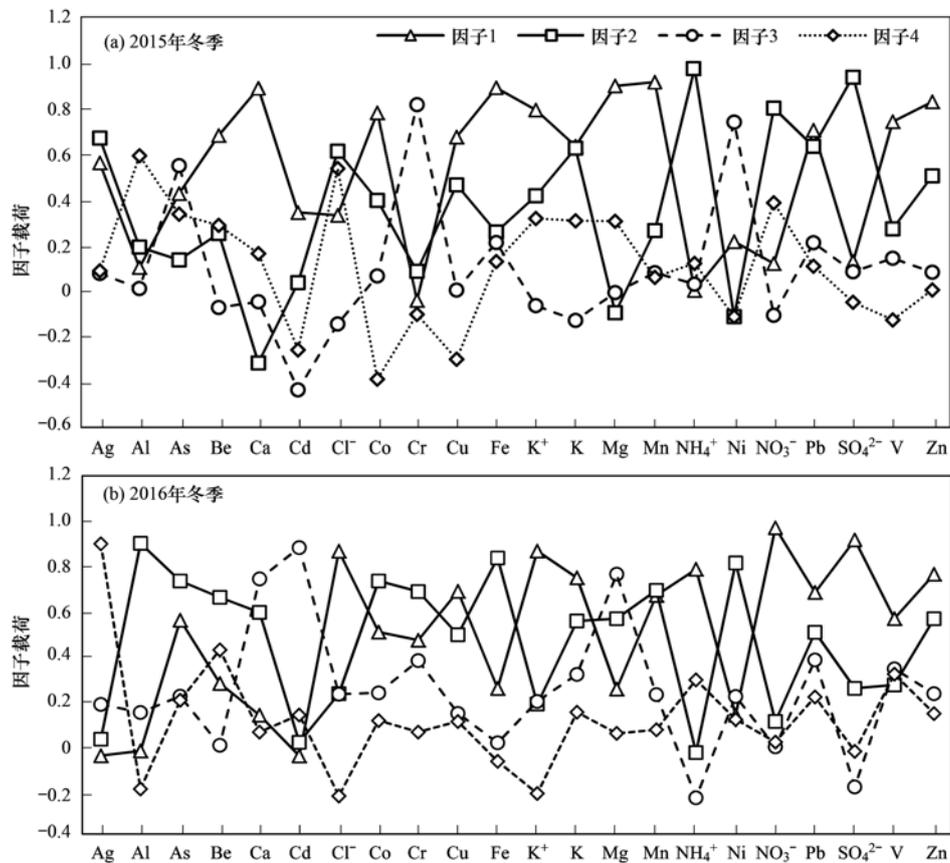


图5 最大方差旋转因子分析结果

Fig. 5 Diagram of maximum variance rotation factor analysis

Mg(42%)、Ca(39%)这4种元素,这些元素都是地壳标识元素^[45].因此,将因子1确定为土壤尘与建筑尘土,2015年和2016年冬季分别贡献6.69%和13.70%;因子2中主要贡献因子是NO₃⁻(79%)、NH₄⁺(74%)和SO₄²⁻(71%),这些离子都是经过化学反应生成的二次无机离子,因此将因子2确定为二次源,两年的贡献差别不大,从2015年70.05%增加到2016年的74.37%;因子3中主要负载元素几乎包括了所有的金属元素,且贡献值相差不大,介于40%~60%之间.

这些金属元素,尤其是重金属元素主要多来自与工业工程排放^[41],因此该因子确定为工业混合源,其贡献量从2015年的9.79%迅速降到了2016年的0.63%;因子4中贡献较大的是As(60%)、Cd(49%)、Ag(49%)、Cu(47%)、Zn(33%),这些元素中前3种是化石燃料燃烧的标识物^[45],后两者主要是来自汽车尾气和轮胎的磨损^[46],因此将因子4确定为机动车与化石燃料燃烧源,其贡献值在两年之间差异不明显,介于11.29%~13.47%之间.

表5 PMF运行因子贡献值的年际变化/%

Table 5 Inter-annual variation of contributions from four sources simulated by the PMF model/%

项目	因子1	因子2	因子3	因子4
2015年冬季	6.69	70.05	9.79	13.47
2016年冬季	13.70	74.37	0.63	11.29
变化量	7.01	4.32	-9.16	-2.18

2.4.3 源解析结果讨论

综合PCA和PMF两种方法得到的源解析结果,发现新乡市冬季有4种主要排放源,即尘土、二次源、工业源和化石燃料燃烧源,然而两种方法得到的解析结果还存在较大的差异,尤其是不同源的贡献比例(表4和5).这可能与两种分析方法的

解析原理不同以及本次实验样本量较少有一定关系.对比新乡2015年和2016年冬季PM_{2.5}源解析结果,2016新乡地区PM_{2.5}中水溶性二次离子含量显著增加,新乡冬季PM_{2.5}灰霾污染趋于二次气溶胶污染.而2016年冬季二次离子气态前体物SO₂、NO₂的浓度下降(图2),则推测二次离子转化速率

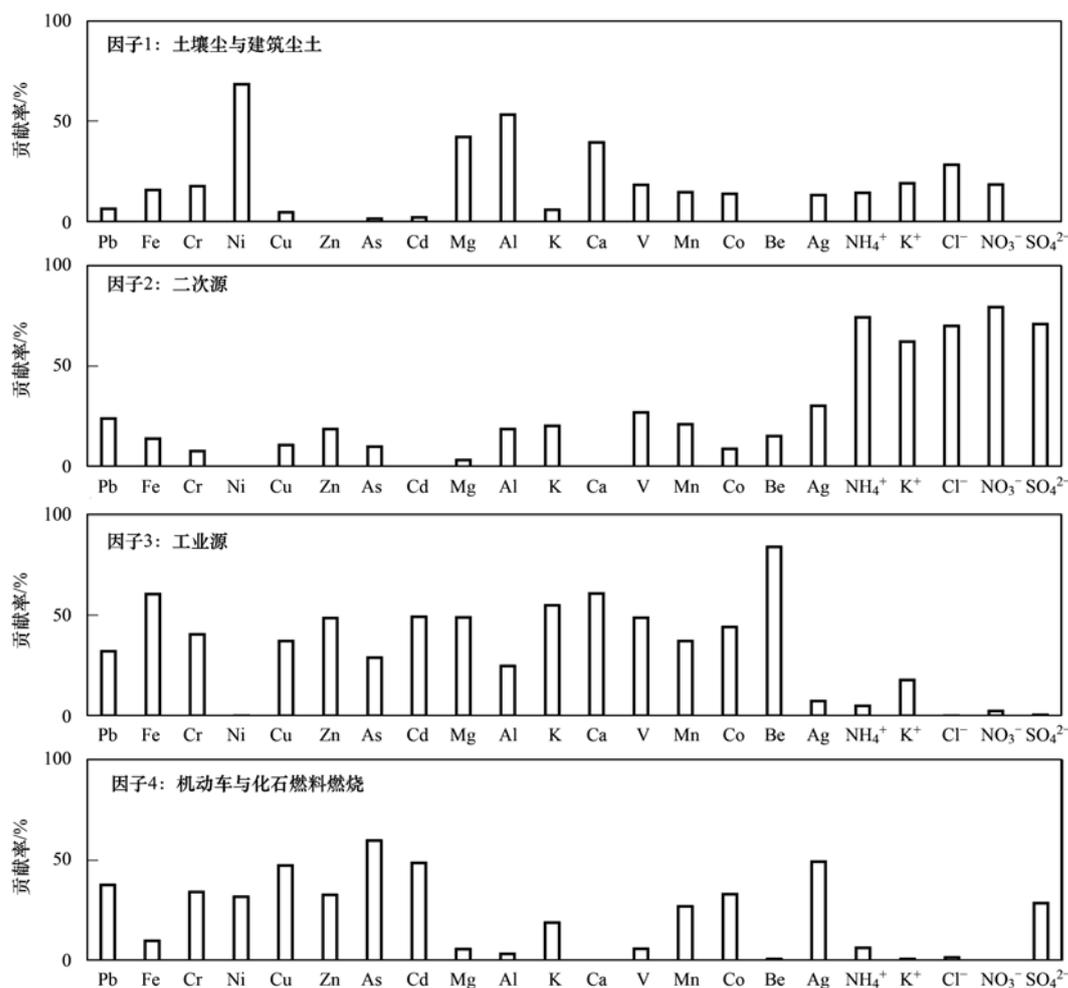


图6 PMF 解析的新乡市冬季 4 类来源

Fig. 6 Four PM_{2.5} sources in Xinxiang derived from the PMF model

的提高应是污染形成的重要因素之一。实际上,观测期间 2015 年新乡的 SOR 的平均值为 0.17, NOR 平均值为 0.14, 2016 年 SOR 和 NOR 的平均值分别为 0.50、0.35, 表征新乡冬季大气年际变化中存在明显的由 SO₂ 向 SO₄²⁻、NO₂ 向 NO₃⁻ 转化的二次过程。SO₂ 和 NO₂ 的浓度下降、土壤建筑污染和机动车移动源污染贡献减弱以及金属元素富集浓度的降低, 这与新乡市积极推进工厂减排、冬季机动车限行和建筑行业停止施工等政策密切相关。气溶胶中二次污染离子的来源以及形成原因较为复杂, 有待进一步研究新乡本地促进其前体物转化的因素, 可能与气象条件关系密切。但是, 该地区冬季燃煤、燃油源对污染形成影响较大, 新乡冬季 PM_{2.5} 污染治理应更多地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, 重视绿色新能源的开发、利用和推广。

3 结论

(1) 河南新乡地区 2015 年和 2016 年冬季采样期间 PM_{2.5} 的质量浓度日均值分别为 226 μg·m⁻³ 和

224 μg·m⁻³, 是我国现行的环境空气质量二级标准 (GB 3095-2012) 的 2~3 倍。可见, 近两年来, 新乡 PM_{2.5} 污染水平较高, 新乡的冬季灰霾污染情况依然严重。

(2) 与 2015 年相比, 新乡 2016 年冬季 PM_{2.5} 中各金属元素的浓度大小排序未出现显著差异, 但日均质量浓度水平整体呈下降趋势, 降低了 7.83%~73.33%, 17 种金属在 PM_{2.5} 组成中的占比也从 1.12% 降低至 0.80%。水溶性离子在 PM_{2.5} 中的占比增加了 26.9%, 与金属元素污染呈相互消长关系。

(3) 新乡冬季 PM_{2.5} 中金属元素 Cd、Pb 多为超富集, Cu、Zn、As 和 Ni 为高度富集, 这些元素主要受人为污染影响。Mn、Co、V、Ca、K、Al、Fe、Mg 等元素的 EF 值均小于 10, 主要由于地面扬尘而富集于 PM_{2.5} 中; PM_{2.5} 中典型二次污染离子 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的占比增加, 颗粒物污染向二次水溶性离子污染转移。

(4) 因子分析结果显示, 新乡 2015 年冬季

PM_{2.5}的主要来源是土壤和建筑扬尘的混合源、二次离子污染、工业冶金源和各类焚烧源,贡献率分别为 37.46%、24.01%、8.56%、7.64%。新乡 2016 年冬季 PM_{2.5}的主要来源是交通及工业生产中的二次气溶胶污染源、土壤风沙源、交通道路扬尘源和化石燃料燃烧源,贡献率分别为 34.94%、29.93%、13.13%、6.81%。

参考文献:

- [1] 郭新彪,魏红英. 大气 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 PM_{2.5} pollution[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(13): 1171-1177.
- [2] 王跃思,姚利,刘子锐,等. 京津冀大气霾污染及控制策略思考[J]. 中国科学院院刊, 2013, **28**(3): 353-363.
Wang Y S, Yao L, Liu Z R, et al. Formation of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and their control strategies [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, **28**(3): 353-356.
- [3] 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 the last decade: a review[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(2): 257-269.
- [4] 李丽娟,温彦平,彭林,等. 太原市采暖季PM_{2.5}中元素特征及重金属健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4431-4438.
Li L J, Wen Y P, Peng L, et al. Characteristic of elements in PM_{2.5} and health risk assessment of heavy metals during heating season in Taiyuan[J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4431-4438.
- [5] 张凯,王跃思,温天雪,等. 夏秋季北京大气可吸入气溶胶(PM₁₀)浓度及其中化学组分分析[J]. 过程工程学报, 2006, **6**(S2): 55-59.
Zhang K, Wang Y S, Wen T X, et al. Analysis on concentration and chemical composition of PM₁₀ in summer and autumn in Beijing[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, **6**(S2): 55-59.
- [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_{2.5} observations from diplomatic facilities in China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **110**: 174-185.
- [9] 马艳华,宁平,黄小凤,等. PM_{2.5}重金属元素组成特征研究进展[J]. 矿物学报, 2013, **33**(3): 375-381.
Ma Y H, Ning P, Huang X F, et al. Research progress of atmospheric heavy metal elements composition characteristics in fine particles (PM_{2.5}) [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, **33**(3): 375-381.
- [10] 姚琳,廖欣峰,张海洋,等. 中国大气重金属污染研究进展与趋势[J]. 环境科学与管理, 2012, **37**(9): 41-44.
Yao L, Liao X F, Zhang H Y, et al. Progress and trend of atmospheric heavy metal pollution in China [J]. Environmental Science and Management, 2012, **37**(9): 41-44.
- [11] 周雪明,郑乃嘉,李英红,等. 2011~2012北京大气PM_{2.5}中重金属的污染特征与来源分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4054-4060.
Zhou X M, Zheng N J, Li Y H, et al. Chemical characteristics and sources of heavy metals in fine particles in Beijing in 2011-2012 [J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4054-4060.
- [12] 乔宝文,刘子锐,胡波,等. 北京冬季PM_{2.5}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_{2.5} during wintertime in Beijing [J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 876-883.
- [13] 顾芳婷,胡敏,王渝,等. 北京2009~2010年冬、春季PM_{2.5}污染特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2578-2584.
Gu F T, Hu M, Wang Y, et al. Characteristics of PM_{2.5} pollution in winter and spring of Beijing during 2009~2010 [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2578-2584.
- [14] Sun Y L, Wang Z F, Fu P Q, et al. Aerosol composition, sources and processes during wintertime in Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(9): 4577-4592.
- [15] 丁萌萌,周健楠,刘保献,等. 2015年北京城区大气PM_{2.5}中NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻及前体气体的污染特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1307-1316.
Ding M M, Zhou J N, Liu B X, et al. Pollution characteristics of NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ in PM_{2.5} and their precursor gases during 2015 in an urban area of Beijing [J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1307-1316.
- [16] 陈翱,强天伟,王耀辉. 浅谈PM_{2.5}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_{2.5} [J]. Contamination Control & Air-conditioning Technology, 2014, (1): 34-36.
- [17] Feng J L, Yu H, Su X F, et al. Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} during Chinese spring festival at Xinxiang, a heavily polluted city in north China: fireworks and health risks [J]. Atmospheric Research, 2016, **182**: 176-188.
- [18] 张丰泉,董恩恒,吴卫东. 新乡大学采暖期空气质量及大气PM_{2.5}中10种元素含量[J]. 环境与健康杂志, 2016, **33**(10): 883-885.
Zhang F Q, Dong E H, Wu W D. Air quality and contents of 10 elements in PM_{2.5} during heating season in Xinxiang college town [J]. Journal of Environment and Health, 2016, **33**(10): 883-885.
- [19] 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_{2.5} in the center of Chengdu [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [20] 杨凌霄. 济南市大气PM_{2.5}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_{2.5} in Jinan [D]. Ji'nan: Shandong University, 2008. 1-157.
- [21] 胡珊. 珠三角地区大气颗粒物有机物致癌风险及来源解析[D]. 北京: 北京大学, 2009.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [25] Duce R A, Hoffman G L, Zoller W H. Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: pollution or natural? [J]. *Science*, 1975, **187**(4171): 59-61.
- [26] 杨怀金, 杨德容, 叶芝祥, 等. 成都西南郊区春季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4490-4503.
Yang H J, Yang D R, Ye Z X, *et al.* Characteristics of elements and potential ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} at the southwest suburb of Chengdu in spring[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4490-4503.
- [27] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [28] Shon Z H, Ghosh S, Kim K H, *et al.* Analysis of water-soluble ions and their precursor gases over diurnal cycle [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **132-133**: 309-321.
- [29] 黄亚林, 刘超, 曾克峰, 等. 2013—2014 年武汉市 PM_{2.5} 的时空分布特征及其与气象条件的关系[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(8): 1330-1335.
Huang Y L, Liu C, Zeng K F, *et al.* Spatio-temporal distribution of PM_{2.5} in Wuhan and its relationship with meteorological conditions in 2013—2014 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(8): 1330-1335.
- [30] 崔宜少. 威海 PM_{2.5} 浓度与气象要素的相关分析[J]. *山东气象*, 2015, **35**(3): 17-22.
- [31] 徐敬, 丁国安, 颜鹏, 等. 北京地区 PM_{2.5} 的成分特征及来源分析[J]. *应用气象学报*, 2007, **18**(5): 645-654.
Xu J, Ding G A, Yan P, *et al.* Componential characteristics and sources identification of PM_{2.5} in Beijing[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, **18**(5): 645-654.
- [32] 李凯, 张承中, 周变红. 西安市采暖期 PM_{2.5} 污染状况及其与气象因子的相关分析[J]. *安徽农业科学*, 2009, **37**(20): 9603-9605.
Li K, Zhang C Z, Zhou B H. Pollution status of the particulate matter (PM_{2.5}) and the correlation of PM_{2.5} and meteorological factors during heating period in Xi'an City[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, **37**(20): 9603-9605.
- [33] 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.
- [34] 刘咸德, 李军, 赵越, 等. 北京地区大气颗粒物污染的风向因素研究[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(1): 1-6.
Liu X D, Li J, Zhao Y, *et al.* Impact of wind direction on atmospheric particulate matter concentrations in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(1): 1-6.
- [35] 王明星. 大气化学[M]. (第二版). 北京: 气象出版社, 1999. 194-210.
- [36] 段凤魁, 刘咸德, 鲁毅强, 等. 北京市大气颗粒物的浓度水平和离子物种的化学形态[J]. *中国环境监测*, 2003, **19**(1): 13-17.
Duan F K, Liu X D, Lu Y Q, *et al.* Concentration level of TSP and chemical speciation of ion species in Beijing [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2003, **19**(1): 13-17.
- [37] 刀谓, 张霖琳, 王超, 等. 京津冀冬季与夏季 PM_{2.5}/PM₁₀ 及其水溶性离子组分区域性污染特征分析[J]. *环境化学*, 2015, **34**(1): 60-69.
Dao X, Zhang L L, Wang C, *et al.* Characteristics of mass and ionic compounds of atmospheric particles in winter and summer of Beijing-Tianjin-Hebei area, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(1): 60-69.
- [38] 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.
- [39] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 等. 北京大气气溶胶中水溶性离子的粒径分布和垂直分布[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 14-19.
Xu H H, Wang Y S, Wen T X, *et al.* Size distributions and vertical distributions of water soluble ions of atmospheric aerosol in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(1): 14-19.
- [40] 赵鹏, 朱彤, 梁宝生, 等. 北京郊区农田夏季大气颗粒物质量和离子成分谱分布特征[J]. *环境科学*, 2006, **27**(2): 193-199.
Zhao P, Zhu T, Liang B S, *et al.* Characteristics of mass distributions of aerosol particle and its inorganic water soluble ions in summer over a suburb farmland in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(2): 193-199.
- [41] Song Y, Zhang Y H, Xie S D, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing by positive matrix factorization[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(8): 1526-1537.
- [42] Khare P, Baruah B P. Elemental characterization and source identification of PM_{2.5} using multivariate analysis at the suburban site of north-east India[J]. *Atmospheric Research*, 2010, **98**(1): 148-162.
- [43] Councill T B, Duckenfield K U, Landa E R, *et al.* Tire-wear particles as a source of zinc to the environment [J]. *Environmental science & technology*, 2004, **38**(15): 4206-4214.
- [44] Yeung Z L L, Kwok R C W, Yu K N. Determination of multi-element profiles of street dust using energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2003, **58**(3): 339-346.
- [45] Hsu C Y, Chiang H C, Lin S L, *et al.* Elemental characterization and source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in the western coastal area of central Taiwan [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 1139-1150.
- [46] 玉散·吐拉甫, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 等. 极干旱地区沙尘与非沙尘天气 PM_{2.5} 及所含金属元素的浓度特征分析[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(9): 1529-1538.
Turap Y, Talifu D, Wang X M, *et al.* Elemental characterization in PM_{2.5} during the dust and non-dust periods in the extremely-arid areas[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(9): 1529-1538.

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ling, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)