

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 ..... 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 ( 1 )

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 ..... 林海涛,李琦路,张干,李军 ( 10 )

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 ..... 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 ( 16 )

南京地区大气PM<sub>2.5</sub>潜在污染源硫碳同位素组成特征 ..... 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 ( 22 )

青奥会前后南京PM<sub>2.5</sub>重金属污染水平与健康风险评估 ..... 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 ( 28 )

南昌市秋季大气PM<sub>2.5</sub>中金属元素富集特征及来源分析 ..... 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 ( 35 )

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 ..... 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 ( 41 )

边界层低空急流导致北京PM<sub>2.5</sub>迅速下降及其形成机制的个例分析 ..... 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 ( 51 )

电厂燃煤烟尘PM<sub>2.5</sub>中化学组分特征 ..... 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 ( 60 )

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 ( 66 )

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 ..... 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 ( 74 )

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 ..... 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 ( 82 )

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 ..... 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 ( 88 )

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 ..... 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 ( 94 )

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 ..... 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 ( 102 )

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 ..... 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 ( 112 )

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 ..... 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 ( 123 )

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 ..... 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 ( 132 )

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 ..... 杨帆,蒋秩锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝斌,陈琳 ( 141 )

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 ..... 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 ( 148 )

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 ..... 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 ( 156 )

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 ..... 黄廷林,刘飞,史建超 ( 166 )

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 ..... 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 ( 173 )

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 ..... 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 ( 180 )

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 ..... 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 ( 187 )

二氧化钛光催化氧化阿散酸 ..... 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 ( 193 )

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 ..... 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 ( 198 )

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 ..... 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 ( 208 )

纳米TiO<sub>2</sub>吸附HgCl<sub>2</sub>水溶液中Hg(II) ..... 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 ( 220 )

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 ..... 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 ( 228 )

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 ..... 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 ( 240 )

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 ..... 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 ( 247 )

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 ..... 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 ( 253 )

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 ..... 徐特,曾辉,倪宏刚 ( 262 )

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 ..... 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 ( 270 )

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 ..... 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 ( 280 )

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 ..... 周益奇,刘云霞,傅慧敏 ( 288 )

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 ..... 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 ( 293 )

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 ..... 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 ( 301 )

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 ..... 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 ( 309 )

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 ..... 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 ( 317 )

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 ..... 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 ( 325 )

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 ..... 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 ( 335 )

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 ..... 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 ( 342 )

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 ..... 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 ( 350 )

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 ..... 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 ( 359 )

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 ..... 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 ( 366 )

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 ..... 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 ( 377 )

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 ..... 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 ( 384 )

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 ..... 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 ( 391 )

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 ..... 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 ( 397 )

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

# 南昌市秋季大气 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素富集特征及来源分析

林晓辉<sup>1</sup>, 赵阳<sup>1,2</sup>, 樊孝俊<sup>3</sup>, 胡恭任<sup>1</sup>, 于瑞莲<sup>1\*</sup>

(1. 华侨大学环境科学与工程系, 厦门 361021; 2. 南昌市环境保护局, 南昌 330038; 3. 南昌市环境监测站, 南昌 330002)

**摘要:** 采集 2013 年秋季南昌市 6 个不同区域的大气 PM<sub>2.5</sub> 样品, 分析 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度及其中 18 种金属元素 (Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Ba、Co、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg) 的富集特征, 并用多元统计分析法探讨了 PM<sub>2.5</sub> 中上述元素主要来源. 结果表明, 南昌市秋季大气 PM<sub>2.5</sub> 日均质量浓度满足《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 二级标准限值 ( $\leq 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Mn、Ti、Al 和 V 的富集因子小于 1.0, 表明这些元素基本没有富集; Fe、Cr、Co、K、Mg、Ba、Ca、Cu 和 As 的富集因子范围为 1.7~7.8, 表明这些元素受到自然源和人为源的共同影响; Hg、Zn、Pb、Ni 和 Cd 的富集因子范围为 21.9~481.2, 表明这些元素受到明显的人为污染. 综合相关分析、主成分分析和聚类分析结果表明: PM<sub>2.5</sub> 中 Mg、K、Al、Ca、Ti 主要来源于土壤及建筑尘; As、Hg 主要来自燃煤; Ba、Ni、Mn 主要来自金属冶炼排放; V、Cu、Fe、Cd、Pb、Cr、Co 主要来自交通源; Zn 主要受金属冶炼和燃煤的影响.

**关键词:** 南昌市; PM<sub>2.5</sub>; 金属元素; 富集因子; 来源分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0035-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.006

## Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM<sub>2.5</sub> in Autumn in Nanchang City

LIN Xiao-hui<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>1,2</sup>, FAN Xiao-jun<sup>3</sup>, HU Gong-ren<sup>1</sup>, YU Rui-lian<sup>1\*</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Nanchang Municipal Environmental Protection Bureau, Nanchang 330038, China; 3. Nanchang Municipal Environmental Monitoring Station, Nanchang 330002, China)

**Abstract:** PM<sub>2.5</sub> samples were collected in six different functional zones in Nanchang City during autumn in 2013. PM<sub>2.5</sub> mass concentration and enrichment characteristics of eighteen metal elements (Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Ba, Co, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, As and Hg) were analyzed. The pollution sources of the above elements in PM<sub>2.5</sub> were discussed based on the results of multivariate statistical analysis. The results showed that the average daily mass concentration of PM<sub>2.5</sub> during autumn in Nanchang City met the secondary standard limit ( $\leq 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) of National Ambient Air Quality Standards (GB 3095-2012). The enrichment factors of Mn, Ti, Al and V were lower than 1.0, indicating that these elements were barely enriched. The enrichment factors of Fe, Cr, Co, K, Mg, Ba, Ca, Cu and As ranged from 1.7 to 7.8, suggesting the influence of both natural sources and anthropogenic sources. Hg, Zn, Pb, Ni and Cd were obviously affected by anthropogenic emissions since their enrichment factors ranged from 21.9 to 481.2. The combined results of correlation analysis, principal components analysis and cluster analysis revealed the pollution sources of these metals in PM<sub>2.5</sub>: Mg, K, Al, Ca and Ti mainly came from natural soil and building material dust; As and Hg were mainly from coal combustion; Ba, Ni and Mn were mainly from industrial emission of metal smelting; V, Cu, Fe, Cd, Pb, Cr and Co mainly came from traffic sources; Zn was influenced by metal smelting and coal burning.

**Key words:** Nanchang City; PM<sub>2.5</sub>; metal elements; enrichment factors; source analysis

大气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 不仅对空气质量有重要影响, 且粒径越小越容易随呼吸通过鼻纤毛进入血液或沉积在肺部, 严重危害人体健康<sup>[1]</sup>, 其来源分析已经成为国内外研究的重点<sup>[2]</sup>. 我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 将 Pb 列入常规监测指标, 而将 Cd、Hg、As 和 Cr(VI) 列入附录 A 的参考指标<sup>[3]</sup>, 但尚未对大气中的微量金属元素开展常规监测和相应的污染源普查, 导致对大气中微量金属元素污染状况不明<sup>[4]</sup>. 研究城市 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的污染特征及其可能的来源, 对于保护公众健康和

有关部门制定大气污染防治措施具有重要的理论和现实意义.

南昌市近年来经济发展迅速, 已跻身全球发展最快城市之列<sup>[5]</sup>. 但其环境管理模式的不完善及设备的未及时更新, 导致 SO<sub>2</sub>、烟尘等排放

收稿日期: 2015-05-04; 修订日期: 2015-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(21377042, 21477042); 福建省自然科学基金项目(2014J01159)

作者简介: 林晓辉(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境监测与评价, E-mail: 15305020435@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: ruiliany@hqu.edu.cn

量增加. 2013 年南昌市  $PM_{2.5}$  年平均质量浓度为  $69.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 约为环境空气质量标准 (GB 3095-2012) 二级年均质量浓度限值 ( $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 的两倍<sup>[6]</sup>. 南昌市大气颗粒物已有的研究多集中于重金属污染特征<sup>[7]</sup> 及  $PM_{2.5}$  中多环芳烃 (PAHs) 污染特征<sup>[8]</sup>, 而对  $PM_{2.5}$  中金属元素污染特征及来源分析鲜见报道. 本研究分析了南昌市 2013 年秋季不同区域元素富集特征, 探讨了元素污染来源, 以期对南昌市大气  $PM_{2.5}$  污染防治提供参

考依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 $PM_{2.5}$ 样品的采集

2013 年 9 月 13~25 日 (19、20 和 21 日雨天不采样), 在南昌市共布设了 6 个采样点, 各采样点具体详情见表 1, 分布见图 1. 同步采样, 单日采样时间满足样品分析检出限要求, 且避免滤膜负荷过载, 一般为 20 h, 共采集 10 d 的 60 组样品.

表 1 南昌市各采样点具体详情

Table 1 Details of  $PM_{2.5}$  sampling sites in Nanchang City

采样点	功能区	采样点描述
武术学校(湾里区)	郊区	湾里武术运动管理中心楼顶, 毗邻幸福水库
林科所(湾里区)	旅游区	昌北江西省林业科学院办公楼顶, 位于湾里区繁华中心地带, 距离梅岭国家森林公园较近
建工学校(青山湖区)	教育区	红谷滩市政协大楼顶, 东临保利国际高尔夫球会
省外办(东湖区)	商住混合区	江西省人民政府外事侨务办公室楼顶, 位于八一公园旁, 北邻佑民寺
京东镇政府(青山湖区)	住宅区	京东镇政府楼顶, 相对距泰豪高新工业园和泰豪高新科技园较近
石化(青云谱区)	交通区	迎宾大道与定山路交界处楼顶, 西临象湖, 距铁路较近

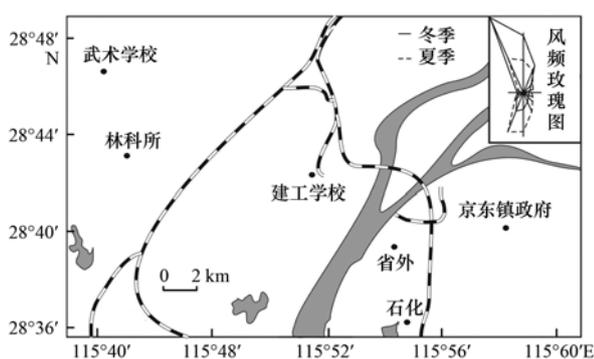


图 1 南昌市  $PM_{2.5}$  采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites of  $PM_{2.5}$  in Nanchang City

采样仪器为 TH-150AII 智能中流量颗粒物采样器 (武汉天虹智能仪表厂), 流速为  $(100 \pm 1) \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ . 采样膜为 90 mm 聚丙烯滤膜, 采样前将滤膜放在烘箱  $60^\circ\text{C}$  烘 2 h. 采样前后将采样膜置入温度  $(30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C})$ 、相对湿度  $(40\% \pm 5\%)$  的天平室中平衡 48 h 以上, 连续 2 次称量结果的误差不大于  $15 \mu\text{g}$ , 根据 HJ 618-2011《环境空气  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的测定 重量法》, 计算  $PM_{2.5}$  的质量浓度. 元素分析前将滤膜在  $<4^\circ\text{C}$  下密封保存备用.

### 1.2 $PM_{2.5}$ 样品中元素的分析

采用加热板消解法进行前处理: 将整张滤膜剪碎放入锥形瓶中, 加入 15 mL  $\text{HNO}_3$  和 5 mL  $\text{HClO}_4$ , 瓶口插入短颈玻璃漏斗, 置于  $100^\circ\text{C}$  左右的电热板 (EG35B, 北京莱伯泰科仪器有限公司) 上加热至微

沸, 保持约 1 h, 当溶液剩下约 3 mL 时, 取下锥形瓶冷却, 最后定容到 15 mL 容量瓶内待测. 取同批号等面积空白滤膜进行消解测定空白值.

用电感耦合等离子体质谱仪 (Agilent ICP-MS 7500, 安捷伦) 测定上述提取液中元素 Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Ba、Co 的质量浓度, 元素检出限范围  $0.004 \sim 1.108 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 用原子吸收光谱仪 (Solaar S4, 美国热电) 测定 Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 的质量浓度, 检出限范围  $0.002 \sim 0.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 用原子荧光光谱仪 (AFS-933, 北京吉天) 测定 As、Hg 的含量, 检出限分别为  $0.006 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.0005 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 空白滤膜中各元素本底值为 Mg ( $0.011 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Al ( $0.086 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、K ( $0.005 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Ca ( $0.008 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Ti ( $0.012 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、V ( $0.004 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Ba ( $0.023 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Co ( $0.002 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Cr ( $0.001 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Mn ( $0.002 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Fe ( $0.004 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Ni ( $0.003 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Cu ( $0.002 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Zn ( $0.002 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Cd ( $0.009 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、Pb ( $0.004 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )、As ( $0.002 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) 和 Hg ( $0.004 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ). 分析时扣除空白膜中各元素本底值作为最终结果.

## 2 结果与讨论

### 2.1 采样期间 $PM_{2.5}$ 质量浓度的空间分布特征

采样期间南昌市大气  $PM_{2.5}$  的质量浓度见表 2.

所有采样点的 PM<sub>2.5</sub> 均值都低于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 二级日均质量浓度限值 (75 μg·m<sup>-3</sup>)。京东镇政府采样点的 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度最高, 样品超标率达 30%, 该采样点距离泰豪高新工业园和泰豪高新科技园较近, 交通、工业污染源排

放的细颗粒物较多; 省外办采样点的 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度也较高, 样品超标率也达 30%, 可能是受八一公园旁的佑民寺烧香活动的影响; 石化和林科所两采样点的样品超标率 10%; 建工学校和武术学校两采样点均无超标样品。

表 2 采样期间南昌市 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度/μg·m<sup>-3</sup>

Table 2 Summary of PM<sub>2.5</sub> mass concentrations in Nanchang City during the sampling period/μg·m<sup>-3</sup>

采样点	武术学校	林科所	建工学校	省外办	京东镇政府	石化
平均浓度	32.35 ± 12.11	41.67 ± 20.60	44.61 ± 17.50	53.39 ± 19.48	55.06 ± 26.51	47.24 ± 21.36
浓度范围	11.92 ~ 55.16	10.00 ~ 82.86	14.39 ~ 70.18	22.85 ~ 88.05	11.90 ~ 100.3	15.11 ~ 77.78

## 2.2 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素含量水平

南昌市 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素平均质量浓度顺序: Ca > Al > K > Fe > Mg > Ba > Zn > Ni > Pb > Mn > Ti > Cr > Cu > As > V > Cd > Co > Hg。表 3 列出了南昌市及国内外某些城市 PM<sub>2.5</sub> 及有关金属元素的平均质量浓度。结果表明: 南昌市的 PM<sub>2.5</sub> 含量普遍低于国内其他城市, 与太原和香港九龙塘相近, 但高于韩国首尔和意大利莱切市。与国内城市 (除太原和香港外) 相比, 南昌市多数金属元素质量浓度普遍较

低, 但 Ni 分别是北京和成都的 42.5 和 68 倍, Zn 是南京的约 15 倍, Co 是成都的约 9 倍。与香港和国外城市相比, 南昌市金属元素质量浓度水平均较高。根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中规定的金属元素参考浓度限值, 南昌 PM<sub>2.5</sub> 中 Pb 和 Hg 质量浓度在所有采样点均未超标, 而 As 质量浓度在所有采样点的样品超标率均高于 50%, Cd 质量浓度在省外办采样点的样品超标率达 100%, 在其余采样点未超标或仅稍有超标。

表 3 南昌市 PM<sub>2.5</sub> 及金属元素质量浓度与其他城市比较/μg·m<sup>-3</sup>

Table 3 Mass concentration of PM<sub>2.5</sub> and metal elements in Nanchang City and other cities/μg·m<sup>-3</sup>

项目	南昌市区	太原市区 <sup>[9]</sup>	南京 <sup>[2]</sup>		天津 <sup>[10]</sup>		北京市区 <sup>[11]</sup>	成都市区 <sup>[12]</sup>	香港九龙塘 <sup>[13]</sup>	韩国首尔 <sup>[14]</sup>	意大利莱切 <sup>[15]</sup>	国家二级标准 <sup>[3]</sup>
			市区	郊区	市区	郊区						
PM <sub>2.5</sub>	45.72	—	92.75	104.7	166.9	180.0	—	123.1	45.5	37.2	22	75
Mg	0.537	0.127	—	—	—	—	—	—	0.062	—	—	—
Al	0.740	3.431	—	—	—	—	—	—	0.215	—	0.1	—
K	0.734	0.788	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ca	1.207	0.859	—	—	—	—	—	—	0.244	—	—	—
Fe	0.571	1.530	—	—	—	—	—	—	0.401	—	0.1	—
Ni	0.150	0.007	—	—	—	—	0.004	0.003	0.005	—	—	—
Zn	0.279	0.260	0.015	0.025	1.144	1.182	—	—	0.350	0.092	—	—
Ba	0.325	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.004	—
Pb	0.106	0.035	0.193	0.386	0.101	0.237	0.143	0.172	0.131	0.103	0.005	0.500
Ti	0.033	0.112	—	—	0.284	0.241	—	—	—	—	—	—
V	0.009	0.001	—	—	—	—	—	—	0.008	—	0.004	—
Cr	0.020	0.015	—	—	0.023	0.074	0.011	0.009	0.005	0.011	—	—
Mn	0.043	0.063	—	—	0.130	0.134	—	0.066	0.032	0.011	0.002	—
Co	0.004	0.002	—	—	0.005	0.008	0.001	0.001	—	—	—	—
Cu	0.019	0.058	—	—	0.068	0.053	—	—	0.054	—	—	—
As	0.010	0.002	0.156	0.335	0.003	0.007	0.012	0.020	—	0.002	—	0.006
Cd	0.005	0.0005	0.004	0.025	0.001	0.001	0.003	0.004	0.003	0.008	—	0.005
Hg	0.0002	0.00001	0.006	0.002	0.001	0.001	—	—	—	—	—	0.050

## 2.3 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的富集程度

富集因子 (enrichment factor, EF) 是反映人类活动对自然环境扰动程度的重要指标, 通过样品中某元素的实测值与该元素背景值对比, 来计算元素的富集程度, 以判断人为源对样品中元素含量的贡献水平<sup>[16]</sup>, 其计算式为:

$$EF = (C_i/C_r)/(B_i/B_r) \quad (1)$$

式中, EF 为富集因子;  $C_i$  和  $C_r$  分别为 PM<sub>2.5</sub> 中待测元素  $i$  和参比元素  $r$  的浓度;  $B_i$  和  $B_r$  分别为元素  $i$  和参比元素  $r$  的土壤背景浓度, 本研究选取江西 A 层土壤元素背景值的几何平均值作为背景浓度<sup>[17]</sup>。目前研究多采用 Al、Fe、Ti 和 Mn 作为参比元素, 本

文选取 Al 作为参比元素. 若元素  $EF < 10$ , 可以认为该元素主要由土壤或岩石风化形成的尘埃进入大气造成的, 相对于地壳而言没有富集; 若  $EF$  值增大到  $10 \sim 10^4$ , 则表明元素主要受到人类活动影响<sup>[18]</sup>. 图 2 为南昌市  $PM_{2.5}$  中各金属元素的富集因子, Mn、Ti、Al 和 V 的富集因子在 0.6 ~ 1.0 范围内, 表明这些元素在  $PM_{2.5}$  中基本没有富集. Fe、Cr、Co、Mg、K、Ba、Ca、Cu 和 As 的富集因子范围为 1.7 ~ 7.8, 表明这些元素受到自然来源和人为来源的共同影响; Hg、Zn、Pb、Ni 和 Cd 的富集因子范围为 21.9 ~ 481.2, 表明这些元素受到明显的人为污染, 结果与太原市采暖期  $PM_{2.5}$  中元素的富集程度较为一致<sup>[9]</sup>.

## 2.4 $PM_{2.5}$ 中金属元素来源分析

### 2.4.1 相关性分析

相关分析是通过相关系数来衡量变量之间的紧密程度, 对元素之间的相关性分析可有效地指示元素的相同物质来源或迁移途径, 有助于了解其来源<sup>[19]</sup>. 本研究采用 Pearson 双侧相关性分析法, 各

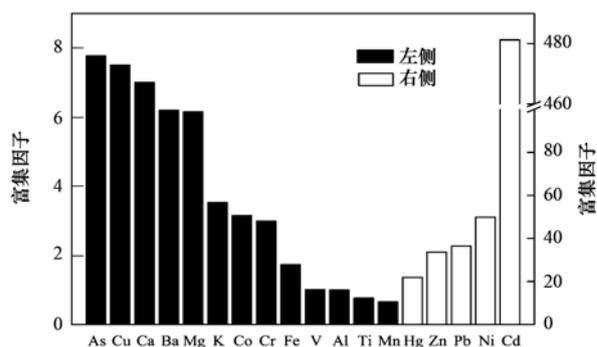


图 2 南昌市  $PM_{2.5}$  中金属元素的富集因子

Fig. 2 Enrichment factors of metal elements in  $PM_{2.5}$  of Nanchang City

元素相关系数矩阵见表 4. 从中可见, 南昌市  $PM_{2.5}$  中 Mg、Al、K、Ca、Ti、Fe 之间两两相关显著, 它们是主要的地壳元素, 说明主要来自土壤源, 但这些元素又与 Cu、As、Cd、Hg 有较强的相关性, 说明一定程度上受燃煤排放的影响. Pb、Cu、Cd 之间有显著相关性, 说明它们之间具有同源性, 如交通源. Zn、Mn 与其他金属元素相关性较弱, 表明其污染源有所差异.

表 4 南昌市  $PM_{2.5}$  中金属元素皮尔逊相关系数 ( $n=60$ )<sup>1)</sup>

Table 4 Pearson's correlation coefficients of metal elements in  $PM_{2.5}$  of Nanchang City ( $n=60$ )

	Mg	Al	K	Ca	Fe	Ni	Zn	Ba	Pb
Mg	1								
Al	0.823 **	1							
K	0.835 **	0.764 **	1						
Ca	0.700 **	0.797 **	0.775 **	1					
Fe	0.536 **	0.617 **	0.404 **	0.653 **	1				
Ni	0.219	0.397 **	0.394 **	0.564 **	0.322 *	1			
Zn	0.291 *	0.369 **	0.266 *	0.367 **	-0.095	0.247	1		
Ba	-0.087	0.208	0.128	0.404 **	0.133	0.629 **	0.205	1	
Pb	0.276 *	0.488 **	0.412 **	0.674 **	0.641 **	0.541 **	0.004	0.503 **	1
Ti	0.597 **	0.698 **	0.732 **	0.828 **	0.375 **	0.608 **	0.375 **	0.547 **	0.526 **
V	0.211	0.326 *	0.215	0.488 **	0.692 **	0.167	-0.139	0.285 *	0.510 **
Cr	0.252	0.362 **	0.317 *	0.453 **	0.417 **	0.332 **	0.124	0.331 **	0.496 **
Mn	-0.040	0.071	-0.050	0.108	0.138	0.093	0.027	0.236	0.186
Co	0.100	0.135	0.024	0.104	0.363 **	0.383 **	-0.220	-0.038	0.326 *
Cu	0.411 **	0.625 **	0.463 **	0.758 **	0.750 **	0.479 **	0.259 *	0.471 **	0.731 **
As	0.524 **	0.562 **	0.574 **	0.493 **	0.396 **	0.316 *	0.344 **	0.288 *	0.301 *
Cd	0.470 **	0.622 **	0.427 **	0.696 **	0.855 **	0.464 **	0.072	0.304 *	0.794 **
Hg	0.458 **	0.511 **	0.472 **	0.521 **	0.505 **	0.218	0.252	0.154	0.497 **
	Ti	V	Cr	Mn	Co	Cu	As	Cd	Hg
Ti	1								
V	0.313 *	1							
Cr	0.330 *	0.309 *	1						
Mn	0.134	0.266 *	0.004	1					
Co	-0.071	0.046	0.375 **	-0.058	1				
Cu	0.585 **	0.734 **	0.472 **	0.194	0.144	1			
As	0.410 **	0.336 **	0.259 *	0.058	-0.050	0.571 **	1		
Cd	0.409 **	0.582 **	0.525 **	0.128	0.415 **	0.827 **	0.391 **	1	
Hg	0.370 **	0.303 *	0.320 *	0.085	0.161	0.567 **	0.655 **	0.506 **	1

1) \*\* 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关, \* 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

### 2.4.2 主成分分析

主成分分析 (principal components analysis, PCA) 是以元素含量作为原始变量, 通过计算变量方差和协方差矩阵的特征量, 将多个原始变量通过降维转化为少数几个综合变量, 即将大气颗粒物中污染物的信息进行集中和提取, 能够从众多污染物中识别出起主导作用的成分<sup>[20]</sup>, 目前已广泛应用于污染物来源的识别. 其中方差贡献率反映的是某主成分提取原始污染信息的权重, 其方差贡献率越大, 表明该主成分的污染贡献率越大<sup>[21]</sup>. 主因子的入选以相关阵的特征值为标准, 因子载荷矩阵的变换采用方差极大 (Varimax) 旋转法. 由表 5 可知, 主因子分析模型提取出 4 个主因子, 对原有变量的累积成因率达到 74.4%, 基本可解释 PM<sub>2.5</sub> 中各金属元素的主要来源. 因子 1 的成因率为 45.0%, 该因子中 Mg、K、Al、Ca、Ti、As、Hg 和 Zn 载荷值较高, 其中 Ca 和 Mg 是水泥、石灰的特征元素<sup>[22]</sup>, Ca-Al 被用于建筑源的识别<sup>[23]</sup>, As 是燃煤烟尘的标志性元素<sup>[24]</sup>, 因此因子 1 代表土壤源、建筑源及燃煤源的混合. 因子 2 中 V、Cu、Fe、Pb、Mn 和 Cd 载荷值较高, 其中 Cd 是燃煤或燃油飞灰中的典型元素<sup>[25]</sup>, Pb 主要来自汽车尾气, 且车辆轮胎、润滑剂中均含 Pb<sup>[26]</sup>, 所以因子 2 主要代表交通源; 因子 3 中 Ba 和 Ni 的载荷值最高, 冶炼含镍矿石会导致 Ni 的排放<sup>[4]</sup>, 且本因子中 Ti、Zn 和 Pb 的载荷值也较大, 所

表 5 南昌市 PM<sub>2.5</sub> 中各金属元素主成分分析结果<sup>1)</sup>

Table 5 Principal component analysis results of metal elements in PM<sub>2.5</sub> of Nanchang City

元素	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
Mg	<b>0.922</b>	0.017	-0.101	0.147
K	<b>0.883</b>	0.000	0.157	0.113
Al	<b>0.853</b>	0.186	0.170	0.188
Ca	<b>0.750</b>	0.321	0.399	0.218
As	<b>0.672</b>	0.283	0.151	-0.090
Ti	<b>0.656</b>	0.142	0.596	0.003
Hg	<b>0.597</b>	0.348	0.034	0.148
Zn	<b>0.478</b>	-0.217	0.424	-0.328
V	0.187	<b>0.859</b>	0.030	0.128
Cu	0.491	<b>0.675</b>	0.340	0.237
Fe	0.460	<b>0.648</b>	-0.066	0.500
Cd	0.431	<b>0.568</b>	0.174	0.567
Mn	-0.117	<b>0.548</b>	0.216	-0.269
Pb	0.284	<b>0.531</b>	0.421	0.486
Ba	-0.012	0.297	<b>0.878</b>	-0.003
Ni	0.238	0.030	<b>0.767</b>	0.395
Co	-0.054	-0.047	0.007	<b>0.889</b>
Cr	0.243	0.184	0.313	<b>0.537</b>
成因率/%	45.0	12.2	9.6	7.6

1) 同栏黑色数字表示所对应的金属元素属于相同主成分

以因子 3 代表金属冶炼、化工生产等工业源; 因子 4 中载荷值最高的是 Co 和 Cr, 此外 Fe、Cd 和 Pb 也有较大荷载值, 因此因子 4 代表交通源和金属冶炼等工业源的混合.

### 2.4.3 聚类分析

聚类分析 (cluster analysis) 是对类似的对象进行分类组合的分析过程, 可用于元素来源判别. 采用 Ward 法对南昌市 PM<sub>2.5</sub> 中 18 种金属元素进行 R 型变量聚类分析, 结果如图 3 所示.

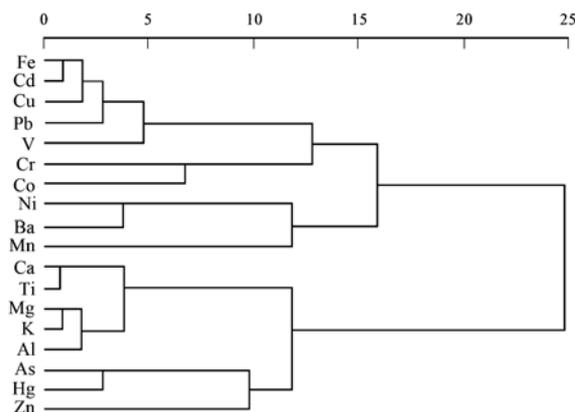


图 3 南昌市 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的聚类分析树状图

Fig. 3 Tree diagram of cluster analysis of metal elements in PM<sub>2.5</sub> of Nanchang City

由图 3 可见, 南昌市 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素来源可分为三大类. 第一类为 Fe、Cd、Cu、Pb、V、Cr、Co, 与主成分 2 基本一致, 代表的是交通污染源<sup>[25,26]</sup>. 第二类为 Ni、Ba、Mn, 相关性较好, 与主成分 3 较为一致, 代表金属冶炼的工业污染源<sup>[4]</sup>. 第三类可分为 2 小类, 可将主成分 1 中金属元素来源明确区分: 第一小类为 Ca、Ti、Mg、K、Al, 代表土壤自然源、建筑尘污染源<sup>[22,23]</sup>; 第二小类为 As、Hg、Zn, 代表燃煤污染源<sup>[24]</sup>, 这与南京市大气细颗粒中重金属的分析结果较为一致<sup>[2]</sup>.

## 3 结论

(1) 南昌市 6 个采样点的秋季大气 PM<sub>2.5</sub> 日均质量浓度均低于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 二级标准限值 ( $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 与国内外城市相比, 南昌市 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度普遍低于大陆其他城市, 与香港九龙塘相近, 稍高于首尔和意大利莱切市.

(2) 南昌市秋季大气 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的平均质量浓度顺序为  $\text{Ca} > \text{Al} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Ba} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Ti} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{As} > \text{V} > \text{Cd} > \text{Co} > \text{Hg}$ .

其中 As 在所有采样点的样品超标率均高于 50%, Cd 在省外办采样点样品超标率达 100%, 在其余采样点未超标或仅稍有超标. 与国内大陆城市相比, 南昌市大气 PM<sub>2.5</sub> 中上述元素质量浓度大多较低 (Ni、Zn 和 Cu 除外); 与香港和国外城市相比, 上述元素质量浓度大多偏高.

(3) 富集因子结果表明, 南昌市秋季大气 PM<sub>2.5</sub> 中 Mn、Ti、Al 和 V 基本没有富集; Fe、Cr、Co、Mg、K、Ba、Ca、Cu 和 As 受到自然源和人为源的共同影响; Hg、Zn、Pb、Ni 和 Cd 受到明显的人为污染.

(4) 综合相关性分析、主成分分析和聚类分析结果表明, 南昌市 PM<sub>2.5</sub> 中的 Mg、K、Al、Ca、Ti 主要来源于土壤源, 并一定程度上受到建筑尘的影响; As、Hg 主要来自燃煤源; Ba、Ni、Mn 主要来自于金属冶炼的工业污染源; V、Cu、Fe、Cd、Pb、Cr、Co 主要来自交通源; Zn 来源广泛, 既受金属冶炼也有燃煤的影响.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Chow J C, Watson J G, Mauderly J L, *et al.* Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, **56** (10): 1368-1380.
- [ 2 ] 刘凤玲, 卢霞, 吴梦龙, 等. 南京大气细粒子中重金属污染特征及来源解析[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(2): 652-658.
- [ 3 ] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [ 4 ] 谭吉华, 段菁春. 中国大气颗粒物重金属污染, 来源及控制建议[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2013, **30** (2): 145-155.
- [ 5 ] 倪鹏飞, 彼得·卡尔·克拉索. 全球城市竞争力报告(2007~2008)城市: 未来一切皆有可能[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2008.
- [ 6 ] 秦文, 刘小真, 梁越, 等. 南昌市 2013 年 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 污染态势研究[J]. *科技广场*, 2014, (9): 31-34.
- [ 7 ] 梁越, 刘小真, 彭希珑, 等. 南昌市大气颗粒物中重金属的污染特征研究[J]. *科技广场*, 2010, (8): 150-154.
- [ 8 ] 郭琳, 何宗健, 尹丽. 南昌市夏季 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃来源解析[J]. *环境污染与防治*, 2010, **32**(11): 58-62.
- [ 9 ] 李丽娟, 温彦平, 彭林, 等. 太原市采暖季 PM<sub>2.5</sub> 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.
- [ 10 ] 姚青, 韩素芹, 蔡子颖. 天津采暖期大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素污染及其生态风险评价[J]. *中国环境科学*, 2013, **33** (9): 1596-1600.
- [ 11 ] 陶俊, 张仁健, 段菁春, 等. 北京城区 PM<sub>2.5</sub> 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析[J]. *环境科学*, 2014, **35** (2): 411-417.
- [ 12 ] 张智胜, 陶俊, 龙颖贤, 等. 成都城区 PM<sub>2.5</sub> 中有害微量元素的污染特征[J]. *中国科学院大学学报*, 2014, **31** (3): 426-430, 438.
- [ 13 ] Jiang S Y N, Yang F H, Chan K L, *et al.* Water solubility of metals in coarse PM and PM<sub>2.5</sub> in typical urban environment in Hong Kong[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2014, **5**(2): 236-244.
- [ 14 ] Park E J, Kim D S, Park K. Monitoring of ambient particles and heavy metals in a residential area of Seoul, Korea [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **137** (1-3): 441-449.
- [ 15 ] Perrone M R, Dinioi A, Becagli S, *et al.* Chemical composition of PM<sub>1</sub> and PM<sub>2.5</sub> at a suburban site in southern Italy [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2014, **94**(2): 127-150.
- [ 16 ] 姬亚芹, 朱坦, 冯银厂, 等. 用富集因子法评价我国城市土壤风沙尘元素的污染[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2006, **29**(2): 94-99.
- [ 17 ] 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. 329-490.
- [ 18 ] 戴树桂. 环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 140.
- [ 19 ] 赵锦慧, 王丹, 舒进兵, 等. 武汉市科教区冬春季气溶胶的元素组成特征及来源分析[J]. *气候变化研究进展*, 2008, **4** (2): 117-121.
- [ 20 ] 焦荔, 沈建东, 姚琳, 等. 杭州市大气降尘重金属污染特征及来源研究[J]. *环境污染与防治*, 2013, **35**(1): 73-76.
- [ 21 ] 李湘凌, 周涛发, 殷汉琴, 等. 基于层次聚类法和主成分分析法的铜陵市大气降尘污染元素来源解析研究[J]. *地质论评*, 2010, **56**(2): 283-288.
- [ 22 ] 李伟芳, 白志鹏, 史建武, 等. 天津市环境空气中细粒子的污染特征与来源[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(4): 394-400.
- [ 23 ] 杨婧, 郭晓爽, 滕曼, 等. 我国大气细颗粒物中金属污染特征及来源解析研究进展[J]. *环境化学*, 2014, **33**(9): 1514-1521.
- [ 24 ] Hien P D, Binh N T, Troung Y, *et al.* Comparative receptor modeling study of TSP, PM<sub>2</sub> and PM<sub>2.5-10</sub> in Ho Chi Minh City [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(15): 2669-2678.
- [ 25 ] Tian H Z, Wang Y, Xue Z G, *et al.* Trend and characteristics of atmospheric emissions of Hg, As and Se from coal combustion in China, 1980-2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(23): 11905-11919.
- [ 26 ] Duan J C, Tan J H. Atmospheric heavy metals and arsenic in China: situation, sources and control policies[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**: 93-101.

## CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe .....	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> ( 1 )
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure .....	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> ( 10 )
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou .....	..... HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> ( 16 )
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Region .....	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> ( 22 )
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games .....	..... ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> ( 28 )
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> in Autumn in Nanchang City .....	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> ( 35 )
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring .....	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> ( 41 )
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism .....	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> ( 51 )
Characteristics of Chemical Components in PM <sub>2.5</sub> from the Coal Dust of Power Plants .....	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> ( 60 )
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014 .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> ( 66 )
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing .....	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> ( 74 )
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng .....	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> ( 82 )
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing .....	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> ( 88 )
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region .....	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> ( 94 )
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China .....	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 102 )
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn .....	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 112 )
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China .....	..... SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> ( 123 )
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River .....	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> ( 132 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff .....	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> ( 141 )
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban .....	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> ( 148 )
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River .....	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> ( 156 )
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir .....	..... HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao ( 166 )
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir .....	..... YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> ( 173 )
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing .....	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> ( 180 )
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism .....	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> ( 187 )
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO <sub>2</sub> .....	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> ( 193 )
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV .....	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> ( 198 )
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution .....	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 208 )
Experimental Research of Hg( II ) Removal from Aqueous Solutions of HgCl <sub>2</sub> with Nano-TiO <sub>2</sub> .....	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> ( 220 )
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters .....	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> ( 228 )
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System .....	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> ( 240 )
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate .....	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> ( 247 )
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta .....	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> ( 253 )
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization .....	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang ( 262 )
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City .....	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> ( 270 )
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration .....	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> ( 280 )
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil .....	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min ( 288 )
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil .....	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> ( 293 )
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings .....	..... PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> ( 301 )
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils .....	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> ( 309 )
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China .....	..... LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> ( 317 )
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors .....	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> ( 325 )
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland .....	..... JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> ( 335 )
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill .....	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> ( 342 )
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction .....	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> ( 350 )
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy .....	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> ( 359 )
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying .....	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> ( 366 )
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter .....	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> ( 377 )
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens .....	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 384 )
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants .....	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> ( 391 )
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact .....	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> ( 397 )

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行