

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥化中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 李振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462)	
《环境科学》征订启事 (4672)	
信息 (4647, 4705, 4789)	

鄂东典型工业城市大气 PM₁₀ 中元素浓度特征和来源分析

占长林¹, 张家泉^{1*}, 郑敬茹¹, 姚瑞珍¹, 刘红霞¹, 肖文胜¹, 刘先利¹, 曹军骥^{2,3}

(1. 湖北理工学院环境科学与工程学院, 矿区环境污染控制与修复湖北省重点实验室, 黄石 435003; 2. 中国科学院地球环境研究所气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061; 3. 西安交通大学全球气候变化研究院, 西安 710049)

摘要: 为了解鄂东典型工业城市——黄石市可吸入颗粒物中元素的浓度水平、污染特征及来源, 于2012年4月至2013年2月在黄石市城区采集 PM₁₀ 样品, 利用能量色散 X 射线荧光光谱仪测定了 17 种元素的质量浓度。运用富集因子法讨论了 PM₁₀ 中 14 种元素的污染特征, 并通过主成分分析法和正定矩阵因子分析法 (PMF) 分析了这些元素的来源。结果表明, 观测期间黄石城区 PM₁₀ 中元素质量浓度变化范围较大, 在 0.01 ~ 9.83 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 其中 S 的浓度最高, Ni 和 V 的浓度最低。与国家二级标准相比, Pb 和 Cd 日均浓度超标较为严重, 全年超标天数分别达到 36.4% 和 89.1%。富集因子分析表明, PM₁₀ 中 Ti、V、Mn 和 Ni 为轻度富集, 受自然源和人为源的双重影响; Ca、Cr 和 Ba 为中度富集, Cu、Zn 和 Pb 为高度富集, Sn、Sb 和 Fe 为超富集, 说明这些元素受到人为源的影响较大。主成分分析和 PMF 源解析结果表明, PM₁₀ 中元素主要来源于地壳源/土壤扬尘、燃煤源、工业源和机动车源, 且两种方法的解析结果具有较好的一致性。

关键词: PM₁₀; 元素; 富集因子; 来源; 黄石

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4463-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201704023

Characteristics and Sources of Elements of a PM₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province

ZHAN Chang-lin¹, ZHANG Jia-quan^{1*}, ZHENG Jing-ru¹, YAO Rui-zhen¹, LIU Hong-xia¹, XIAO Wen-sheng¹, LIU Xian-li¹, CAO Jun-ji^{2,3}

(1. Hubei Key Laboratory of Mine Environmental Pollution Control and Remediation, School of Environmental Science and Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China; 2. Key Laboratory of Aerosol Chemistry & Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 3. Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics and sources of elements in atmospheric aerosols (PM₁₀) measurements, samples were collected between April 2012 and February 2013 in Huangshi, a typical industrial city in the east of Hubei province, China. These samples were analyzed for seventeen elements using wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry. In addition, the pollution characteristics of fourteen elements were analyzed by an enrichment factor (EF) method, and the sources of these elements were studied by a principal component analysis (PCA) and positive matrix factorization (PMF) method. The result from the EF indicated that the concentration of the seventeen elements in the PM₁₀ measurements varied from 0.01-9.83 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The elemental concentration of S was the highest and Ni and V was the lowest during the monitoring period in Huangshi. Daily levels of Pb and Cd exceeded the annual reference values set by the National Ambient Air Quality Standard (GB3095-2012) by 36.4% and 89.1%, respectively. An analysis of EF showed that Ti, V, Mn, and Ni elements were mildly enriched, indicating they were affected by both natural and anthropogenic sources. Ca, Cr, and Ba elements were moderately enriched and Cu, Zn, Pb, Sn, Sb, and Fe were highly enriched or hyper accumulated, suggesting they are mainly sourced from human activities. There were four sources significantly contributing to the elements in the PM₁₀ measurement, which were determined using PCA and PMF analysis. These were soil and fugitive dust, coal combustion, industry exhausts, and motor vehicle emissions. The results of the two models supported each other and had good consistency.

Key words: PM₁₀; elements; enrichment factor; source; Huangshi

大气颗粒物不仅能影响大气辐射平衡, 改变自然界的能量收支平衡, 对全球气候变化产生直接的

收稿日期: 2017-04-04; 修订日期: 2017-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41603117); 湖北理工学院引进人才项目(16xjz02R); 科技部科技基础性工作专项(2013FY112700); 湖北理工学院矿区重金属污染防治与资源化协同创新中心开放基金项目(xt201303)

作者简介: 占长林(1983~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: chl_zhan@126.com

* 通信作者, E-mail: jiaquanzh@163.com

影响^[1-5],而且对人体健康和环境质量有重要影响^[6-10],因此成为全球关注的焦点.可吸入颗粒物(PM_{10})是指空气动力学当量直径小于等于 $10\ \mu m$ 的颗粒物.虽然 PM_{10} 在大气成分中所占比例很小,但它由于粒径粗,易富集和携带大量的有机污染物(如 PAHs、诱变剂)、重金属等有毒有害物质,对人体健康有较大的风险.流行病学的研究已经表明,大气 PM_{10} 和成人发病率和死亡率之间存在正相关关系^[11,12],且这种健康效应可能与颗粒物的化学组成和粒径分布有关^[13].

鄂东地区作为我国重要的原材料供应基地,冶金建材原料的矿产资源十分丰富,是湖北省重要的重工业区域^[14].黄石市位于湖北省东南部,作为武汉城市圈副中心城市,金属和非金属矿产资源储量丰富,矿产品种齐全.黄石的矿冶文化从商周开始一直持续到今天,是典型的中华民族矿冶文明百科全书,是中国近代工业的重要发源地.延续2 000多年的矿产资源开采及冶炼给黄石市带来了许多生态环境问题,特别是重金属污染问题十分严峻.许多研究发现该地区的土壤^[15-17]、沉积物^[18-21]、街道尘^[22]和水体^[23-25]中重金属严重超标,极大地威胁当地的生态环境安全和人群健康.然而,目前关于黄石市大气颗粒物重金属的研究还鲜有报道^[26,27].因此,开展矿冶城市 PM_{10} 中元素组成、变化特征以及来源解析等方面的研究具有重要的现实意义.基于此,本研究通过在黄石团城山经济开发区设置采样点采集 PM_{10} 样品,分析并探讨其元素组成及污染特征,同时利用主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分析模型(PMF)对 PM_{10} 中元素来源进行分析,以期对黄石市大气污染防治和保护人群健康等方面提供基础数据和科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样点位于湖北理工学院环境科学与工程学院楼顶,距离地面高度约 17 m.采样时间为 2012 年 4 月 3 日至 2013 年 2 月 27 日期间,采用 MiniVol (Airmetrics,美国)便携式颗粒物采样器每隔 6 d 采样一次,每次连续 24 h(早晨 09:00 至次日早晨 09:00)采集 PM_{10} 样品,流速为 $5\ L\cdot min^{-1}$.共采集有效滤膜样品 55 个,其中春季 10 个,夏季 16 个,秋季 14 个,冬季 15 个.所有采样滤膜为直径 47 mm 的 Teflon 滤膜(Whatman,英国).滤膜在采样前后均放置在恒温恒湿箱中(温度为 $20\ ^\circ C \pm 2\ ^\circ C$,相对湿度为

$40\% \pm 5\%$)平衡 24 h 以上,并采用精度为 $1\ \mu g$ 电子微量天平(Sartorius,德国)进行称量,直至前后两次称量结果在允许误差范围以内,之后放入冰箱低温保存.

1.2 PM_{10} 样品中元素的测定

使用能量色散仪型 X 荧光光谱仪(XRF, Panalytical E5, Netherlands)对 Teflon 采样膜上气溶胶所含的 17 种元素进行了测定,具体分析方法及步骤见文献[28].所有样品的分析均在中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室完成.

1.3 PMF 源解析

正定矩阵因子分解法(positive matrix factorization, PMF)是由 Paatero 等^[29]提出的一种颗粒物源解析方法,是美国国家环保署(EPA)和我国环保部推荐的大气颗粒物源解析工具.本研究选用 PMF5.0 版本,考虑到 V、Sn 和 Sb 这 3 种元素的 S/N(信/噪比)低于 0.1,因此分析时模型中只有 14 种元素.

2 结果与讨论

2.1 元素季节变化特征

表 1 中统计了不同季节各元素的浓度水平.总体来看,S 元素浓度最高.除 Ti 以外,地壳元素(Al、Si、Ca、Fe)的浓度明显高于其它各元素丰度.重金属元素中 Sn 年均浓度最高,年均值达到 $(2.27 \pm 0.17)\ \mu g\cdot m^{-3}$,其次是 Zn $(0.81 \pm 0.53)\ \mu g\cdot m^{-3}$ 和 Pb $(0.46 \pm 0.34)\ \mu g\cdot m^{-3}$,浓度最低的是 Ni 和 V.从季节变化来看,5 种地壳元素浓度均呈现夏季最低,春季最高的变化特征,秋冬季介于春、夏之间.这可能与黄石地区季节性降水分布有关,由于夏季降水比较集中,雨水的冲刷作用使得大气颗粒物中地壳元素浓度和地表扬尘显著减少;春季由于天气干燥,刮风时不仅会扬起城市街道、建筑工地和工厂的灰尘,还可能将北方的沙尘输送到黄石地区,因此地壳元素含量明显较高.而其他各重金属元素浓度的季节变化与地壳元素存在一定的差异,个别元素的季节变化特征不明显(如 V、Ni、Sn 和 Sb),其它元素均呈现冬季最高夏季最低的变化趋势,这可能与黄石地区冬季化石燃料燃烧增多有关.

与我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中 Pb 和 Cd 的年均浓度限值(分别为 0.5 和 $0.005\ \mu g\cdot m^{-3}$)相比,黄石地区 PM_{10} 中 Pb 年均浓度未超标,但全年超标天数为 20 d,超标率达到 36.4%.

Cd 年均浓度明显超过国家二级标准限值,全年超标天数 49 d,超标率高达 89.1%;且 4 个季节平均超标 4~6 倍,浓度最高日甚至超标 32 倍,应引起相关部门的高度重视.

表 1 PM₁₀ 中各元素含量统计/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Summary of measured element concentrations of PM ₁₀ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$					
元素	春季	夏季	秋季	冬季	年均值
Al	2.24 ± 1.58	1.09 ± 0.52	1.90 ± 0.94	2.15 ± 1.73	1.80 ± 1.31
Si	4.97 ± 3.54	2.33 ± 1.21	4.17 ± 1.97	3.82 ± 2.53	3.69 ± 2.45
Ca	4.57 ± 2.07	3.34 ± 1.74	4.71 ± 2.56	4.21 ± 2.72	4.15 ± 2.32
Fe	3.63 ± 1.71	1.97 ± 1.28	3.30 ± 1.32	3.64 ± 1.21	3.07 ± 1.50
Ti	0.17 ± 0.11	0.09 ± 0.05	0.17 ± 0.08	0.16 ± 0.08	0.14 ± 0.08
S	9.08 ± 2.14	8.15 ± 4.12	9.93 ± 4.19	12.01 ± 5.35	9.83 ± 4.40
V	0.01 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.00
Cr	0.09 ± 0.04	0.05 ± 0.03	0.07 ± 0.04	0.07 ± 0.07	0.07 ± 0.05
Mn	0.14 ± 0.05	0.09 ± 0.05	0.15 ± 0.07	0.18 ± 0.08	0.14 ± 0.07
Ni	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00
Cu	0.08 ± 0.05	0.08 ± 0.06	0.09 ± 0.05	0.14 ± 0.08	0.10 ± 0.06
Zn	0.82 ± 0.32	0.66 ± 0.55	0.92 ± 0.68	0.85 ± 0.46	0.81 ± 0.53
Cd	0.02 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.05 ± 0.04	0.03 ± 0.03
Sn	2.31 ± 0.07	2.37 ± 0.05	2.29 ± 0.06	2.11 ± 0.25	2.27 ± 0.17
Sb	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.03	0.05 ± 0.02	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.02
Ba	0.16 ± 0.04	0.17 ± 0.06	0.17 ± 0.05	0.30 ± 0.46	0.20 ± 0.24
Pb	0.45 ± 0.38	0.39 ± 0.38	0.42 ± 0.32	0.58 ± 0.28	0.46 ± 0.34

2.2 富集因子分析

富集因子法(EF)用于表征微量元素相对于地壳元素的富集程度,是判断颗粒物主要来自天然源和人为源的有效方法^[30,31].富集因子计算公式如下:

$$EF = \frac{(X_i/X_n)_{\text{大气}}}{(X_i/X_n)_{\text{地壳}}}$$

式中, $(X_i/X_n)_{\text{大气}}$ 为气溶胶中待测元素与参比元素浓度之比; $(X_i/X_n)_{\text{地壳}}$ 为地壳中待测元素与参比元素浓度之比.一般常用 Al、Fe、Ti、Si 等作为参考元素,本研究中选取 Al 元素作为地壳源的参比元素,依据湖北省 A 层土壤元素背景含量(中国土壤元素背景值)计算 PM₁₀ 中各元素的 EF 值,结果如图 1 所示.

一般认为,EF ≤ 1 时,主要受地壳源的影响; 1 < EF ≤ 10 时,说明该元素受到人为污染源和自然源的共同影响; EF > 10 时,说明该元素主要由人为源贡献^[32].从图 1 可以看出,Ti、V、Mn 和 Ni 元素的 EF 值介于 1~10 之间,处于轻度富集水平,说明它们在一定程度上已经受到人为源的影响;Ca、Cr 和 Ba 元素 EF 值介于 10~100 之间,处于中度富集水平,说明这 3 种元素受到较为明显的人为源影响.特别是 Ca 可能与黄石地区石灰岩开采、水泥制造或建筑扬尘的影响有关.而金属元素 Cu、Zn 和 Pb 的 EF 值普遍高于 100,其中 Cd、Sn 和 Sb 的 EF 值

超过 1 000,Fe 的 EF 值甚至达到 32 213,说明 PM₁₀ 中这些元素的污染已经非常严重,主要来源于人为污染,可能受露天采矿、金属冶炼、工业排放、燃煤和机动车尾气排放等的影响.

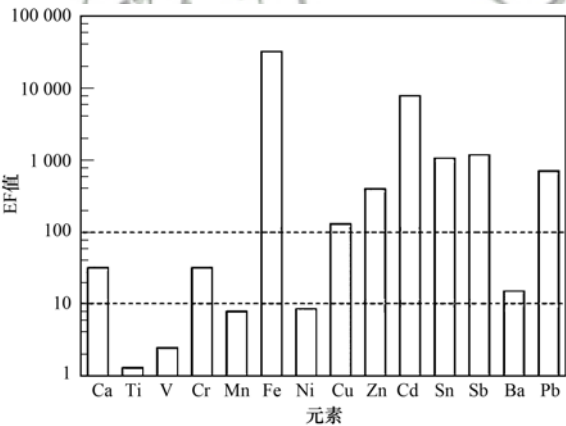


图 1 PM₁₀ 中 14 种元素的富集因子

Fig. 1 Enrichment factors for the fourteen elements in the PM₁₀ measurement in Huangshi

2.3 来源解析

2.3.1 主成分分析

对 PM₁₀ 中 14 种元素进行主成分分析,结果见表 2.从中可以看出,前 4 个因子提取了总方差的 81.41%,表明这 4 个主成分可解释元素的绝大多数信息.

因子 1 对总方差的贡献率为 29.93% (表 2),

Al、Si、Ca、Ti 和 Fe 元素载荷较高. 这些元素是地壳源或土壤尘的重要标志物^[5,33,34]. 黄石城区分布有石灰岩矿区 7 处,且大多矿区采用露天开采方式,再加上较多的水泥厂分布,这些排放源可能对因子 1 产生一定的贡献. 研究发现黄石大气降尘中 Fe 元素高度富集,因此道路交通扬尘也可能是一个重要的贡献源^[35]. 所以因子 1 与地壳源和土壤飘尘有关.

表 2 PM_{10} 中各元素的因子载荷矩阵

Table 2 Results matrix for the principal component analysis loadings for elements in the PM_{10}

元素	方差极大正交旋转因子载荷矩阵			
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
Al	0.806	-0.045	0.089	0.552
Si	0.970	-0.054	0.153	-0.016
S	-0.015	0.670	0.241	0.085
Ca	0.897	0.116	0.174	-0.124
Ti	0.957	0.056	0.179	0.153
Cr	0.084	-0.122	0.891	0.002
Mn	0.345	0.269	0.829	0.007
Fe	0.736	0.363	0.470	0.048
Ni	0.191	0.383	0.671	0.057
Cu	0.180	0.694	0.112	0.523
Zn	0.330	0.525	0.541	-0.035
Cd	-0.086	0.791	-0.122	-0.155
Ba	0.016	0.093	-0.025	0.973
Pb	0.159	0.818	0.234	0.170
特征值	4.19	2.90	2.68	1.63
方差贡献率/%	29.93	20.69	19.14	11.65
累积方差贡献率/%	29.93	50.62	69.76	81.41

因子 2 对总方差的贡献率为 20.69%,载荷较高的元素是 S、Cu、Zn、Cd 和 Pb. S 和 Pb 是燃煤的主要标志物^[36];而 Cu、Zn、Cd 和 Pb 与金属冶炼等来源密切相关^[5,33]. 前述富集因子分析结果表明 Cu、Zn、Cd 和 Pb 在黄石市 PM_{10} 中高度富集,主要受人为源的影响. 黄石是我国重要的铁矿和有色矿生产基地,金属制造和加工、金属冶炼企业较多,这些工业活动可能对 PM_{10} 中重金属元素有重要贡献. 韩力慧等^[36]对北京大气气溶胶中金属元素的研究表明 Cu、Zn、Cd 和 Pb 等都受到燃煤的重要影响. 因此,因子 2 与金属冶炼和燃煤活动有密切关系.

因子 3 对总方差的贡献率为 19.14%,载荷较高的元素是 Cr、Mn、Ni 和 Zn. Cr 和 Mn 是金属铸造、矿山开采和冶金行业排放的主要元素,Ni 和 Zn 主要来源于冶金尘^[32]. 说明因子 3 与冶金工业排放密切相关.

因子 4 中载荷较高的元素是 Ba、Al 和 Cu,对总

方差的贡献率为 11.65%. Ba 经常用作机动车源的指示元素^[33,37]. 而 Cu 除了来自机动车尾气以外,还可能来源于机动车刹车片和轮胎磨损^[37-39]. 所以,因子 4 与机动车排放有关.

2.3.2 PMF 分析

采用 PMF 方法对 PM_{10} 中的 14 个元素组分进行来源解析,经过多次运行分析比较,最终确定了 4 个因子,源解析的结果见图 2.

因子 1 中 Al、Si、Ca、Ti 的载荷最大,分别贡献了总量的 52.40%、51.94%、41.92% 和 45.28%,Fe 也有较大的载荷,贡献了总量的 34.76%. 富集因子分析结果显示这 4 种元素在 PM_{10} 中都存在一定程度的富集,说明受到人为源和自然源的双重影响. 可以确定因子 1 代表地壳源,还可能与地表扬尘有关.

因子 2 中 S 有最大载荷,贡献了总量的 63.78%,Cd、Ni 和 Ba 也有较大的载荷,贡献了总量的 40% 左右. S 是燃煤的重要标志物,Cd 被认为是机动车燃油排放的代表性元素,也来源于燃煤排放和工业烟尘^[40]. Ni 可以来源于机动车排放^[5],同时也可能受燃煤排放的影响^[41]. 因此,因子 2 可确定为燃煤排放源.

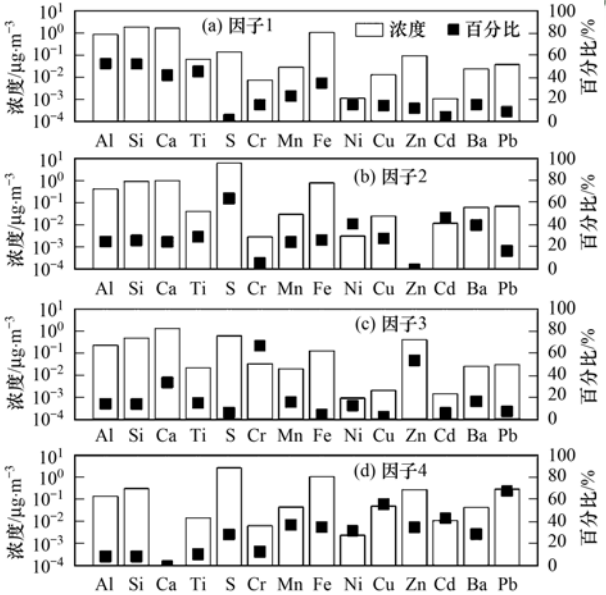


图 2 PM_{10} 中元素的 PMF 源解析

Fig. 2 Source profiles for elements in the PM_{10} resolved by PMF

因子 3 中 Cr 和 Zn 的载荷最大,分别贡献了总量的 66.85% 和 53.5%. Cr 是冶金化工行业排放烟尘的标志性元素^[42];Zn 除了来源于机动车尾气和轮胎磨损外^[37,43],金属冶炼也是其重要来源之一^[36]. 因此,因子 3 代表冶金工业排放源.

因子 4 中 Pb、Cu 和 Cd 的载荷较大,分别贡献了总量的 67.50%、55.63% 和 43.09%, Mn、Fe、Ni、Zn 和 Ba 约贡献了总量的 30% 左右. Pb 虽然是燃煤排放的特征元素^[36],但同时也来自机动车燃油的排放^[28]. Cu 主要来源于机动车尾气、轮胎和刹车片磨损排放^[33]. Fe、Zn 和 Mn 与道路交通扬尘有关^[44]. 因此,因子 4 可确定为机动车排放源.

3 结论

(1)黄石城区 PM₁₀ 中 S 元素质量浓度最高,年均值达到 $9.83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, V 和 Ni 年均浓度最低,均为 $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 地壳元素 Al、Si、Ca、Ti 和 Fe 的质量浓度均呈现春高夏低的变化特征,秋冬季介于春、夏之间. 与国家二级标准限值相比,监测期间 Pb 元素日超标率达到 36.4%,而 Cd 元素平均超标 4~6 倍,日超标率高达 89.1%.

(2)富集因子分析结果表明, Ti、V、Mn 和 Ni 元素的 EF 值小于 10,存在轻度富集; Ca、Cr 和 Ba 元素 EF 值介于 10~100 之间,处于中度富集水平; Fe、Cu、Zn、Cd、Sn、Sb 和 Pb 的 EF 值普遍高于 100,说明这些元素的污染已经非常严重,主要与人为源污染排放有关,受土壤扬尘源的影响很小.

(3)主成分分析和 PMF 源解析结果表明黄石城区 PM₁₀ 中元素主要来自于 4 类源:第 I 类为地壳源/土壤扬尘(Al、Si、Ca、Ti、Fe),第 II 类为燃煤源(S、Cd 和 Ni),第 III 类为工业源(Cr、Zn、Mn),第 IV 类为机动车源(Cu、Pb 和 Ba),且两种方法的解析结果较为一致.

参考文献:

- [1] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, *et al.* Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. *Science*, 1992, **255** (5043): 423-430.
- [2] Pöschel U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2005, **44**(46): 7520-7540.
- [3] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J K, *et al.* Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 2001, **294** (5549): 2119-2124.
- [4] Booth B B B, Dunstone N J, Halloran P R, *et al.* Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability [J]. *Nature*, 2012, **484**(7393): 228-232.
- [5] Alleman L Y, Lamaison L, Perdrix E, *et al.* PM₁₀ metal concentrations and source identification using positive matrix factorization and wind sectoring in a French industrial zone [J]. *Atmospheric Research*, 2010, **96**(4): 612-625.
- [6] Brook R D, Rajagopalan S, Pope C A, *et al.* Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association [J]. *Circulation*, 2010, **121**(21): 2331-2378.
- [7] Davidson C I, Phalen R F, Solomon P A. Airborne particulate matter and human health: a review [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2005, **39**(8): 737-749.
- [8] Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. *JAMA*, 2002, **287**(9): 1132-1141.
- [9] Samet J M, Dominici F, Currier F C, *et al.* Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994 [J]. *The New England Journal of Medicine*, 2000, **343**(24): 1742-1749.
- [10] Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z L. PM_{2.5} in China: measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation [J]. *Particology*, 2014, **13**: 1-26.
- [11] Pope III C A, Dockery D W, Spengler J D, *et al.* Respiratory health and PM₁₀ pollution: a daily time series analysis [J]. *American Review of Respiratory Disease*, 1991, **144**(3 Pt 1): 668-674.
- [12] Medina S, Plasencia A, Ballester F, *et al.* Apheis: public health impact of PM₁₀ in 19 European cities [J]. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 2004, **58**(10): 831-836.
- [13] 杜鹏瑞, 杜睿, 任伟珊. 城市大气颗粒物毒性效应及机制的研究进展 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(9): 2815-2827.
Du P R, Du R, Ren W S. Research progress on toxicological characteristics and mechanisms of urban atmospheric particulate matters [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(9): 2815-2827.
- [14] 任晓华, 易朝路. 京九铁路对鄂东地区经济发展的影响及产业发展思路 [J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 1999, **33**(2): 301-305.
Ren X H, Yi C L. Influence of the railway from Beijing to Jiulong on the economy of eastern Hubei province and suggestions for the development of its major industries [J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 1999, **33**(2): 301-305.
- [15] 陈华勇, 欧阳建平, 马振东. 大冶有色冶炼厂附近农田镉污染的现状与治理对策 [J]. *土壤*, 2003, **35**(1): 76-79, 82.
Chen H Y, OuYang J P, Ma Z D. Status quo of and countermeasures for Cd contamination of farmland and in the vicinity of Daye Smelter [J]. *Soils*, 2003, **35**(1): 76-79, 82.
- [16] 孙清斌, 尹春芹, 邓金锋, 等. 大冶矿区周边农田土壤和油菜重金属污染特征研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(1): 85-91.
Sun Q B, Yin C Q, Deng J F, *et al.* Investigation on the heavy metal contamination of farmland soil and *Brassica Campestris* nearby mining areas in Daye City, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(1): 85-91.
- [17] Yan S, Ling Q C, Bao Z Y. Metals contamination in soils and vegetables in metal smelter contaminated sites in Huangshi, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, **79**(4): 361-366.
- [18] 贺跃, 胡艳华, 王秋潇, 等. 大冶大港河水系沉积物中重金属来源分析 [J]. *地球化学*, 2011, **40**(3): 258-265.
He Y, Hu Y H, Wang Q X, *et al.* Analysis on the source of heavy metals in the Dagang River, Daye County, Hubei Province [J]. *Geochimica*, 2011, **40**(3): 258-265.
- [19] Zhang J, Li Z H, Chen J, *et al.* Assessment of heavy metal contamination status in sediments and identification of pollution source in Daye Lake, Central China [J]. *Environmental Earth*

- Sciences, 2014, **72**(4): 1279-1288.
- [20] 张家泉, 胡天鹏, 张勇, 等. 磁湖表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 地球与环境, 2014, **42**(5): 639-645.
Zhang J Q, Hu T P, Zhang Y, *et al.* Pollution Characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from the Cihu Lake in Huangshi City[J]. Earth and Environment, 2014, **42**(5): 639-645.
- [21] 张家泉, 田倩, 许大毛, 等. 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2355-2363.
Zhang J Q, Tian Q, Xu D M, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in water and sediment from Daye Lake[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2355-2363.
- [22] 韩晓涛, 郭宇, 鲍征宇, 等. 大冶市街尘重金属污染评价及化学形态特征[J]. 地球化学, 2012, **41**(6): 585-592.
Han X T, Guo Y, Bao Z Y, *et al.* The level and speciation of metals in street dusts of Daye, Hubei Province[J]. Geochimica, 2012, **41**(6): 585-592.
- [23] 谢先军, 韩吟文. 黄石巷子口地区水环境重金属污染评价与防治对策[J]. 安全与环境工程, 2003, **10**(4): 34-36, 60.
Xie X J, Han Y W. Evaluation and measures on heavy metal pollution in Xingzikou area of Huangshi [J]. Safety and Environmental Engineering, 2003, **10**(4): 34-36, 60.
- [24] 毛欣, 陈旭, 李长安, 等. 大冶市城市湖泊表层水体中重金属的分布特征及其来源[J]. 安全与环境工程, 2013, **20**(5): 33-37, 84.
Mao X, Chen X, Li C A, *et al.* Distribution of heavy metal elements in surface water from three lakes in Daye City[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, **20**(5): 33-37, 84.
- [25] 刘煦爽, 熊小琴, 高欣, 等. 大冶铜绿山附近水体重金属污染及鱼体富集状况调查[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016, **38**(3): 246-251.
Liu X S, Xiong X Q, Gao X, *et al.* A survey on heavy metal pollution of waters and fish in nearby areas of the Tonglushan Copper Mine, Daye City [J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2016, **38**(3): 246-251.
- [26] 张禾. 黄石市冬/春季大气 PM₁₀ 中重金属形态特征研究[J]. 环境污染与防治, 2015, **37**(4): 71-77, 83.
Zhang H. Research on chemical species of atmospheric particulate heavy metals in Huangshi City in winter and spring [J]. Environmental Pollution & Control, 2015, **37**(4): 71-77, 83.
- [27] 李秀, 张勇, 张家泉, 等. 黄石城区夏季大气 PM₁₀/PM_{2.5} 中元素特征分析[J]. 环境化学, 2014, **33**(2): 357-358.
- [28] Xu H M, Cao J J, Ho K F, *et al.* Lead concentrations in fine particulate matter after the phasing out of leaded gasoline in Xi'an, China[J]. Atmospheric Environment, 2012, **46**: 217-224.
- [29] Paatero P, Tapper U. Analysis of different modes of factor analysis as least squares fit problems[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1993, **18**(2): 183-194.
- [30] Bilos C, Colombo J C, Skorupka C N, *et al.* Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina[J]. Environmental Pollution, 2001, **111**(1): 149-158.
- [31] Waked A, Favez O, Alleman L Y, *et al.* Source apportionment of PM₁₀ in a north-western Europe regional urban background site (Lens, France) using positive matrix factorization and including primary biogenic emissions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(7): 3325-3346.
- [32] 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.
- [33] Lim J M, Lee J H, Moon J H, *et al.* Source apportionment of PM₁₀ at a small industrial area using Positive Matrix Factorization [J]. Atmospheric Research, 2010, **95**(1): 88-100.
- [34] Santoso M, Hopke P K, Hidayat A, *et al.* Sources identification of the atmospheric aerosol at urban and suburban sites in Indonesia by positive matrix factorization [J]. Science of the Total Environment, 2008, **397**(1-3): 229-237.
- [35] Zhang J Q, Zhan C L, Liu H X, *et al.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), iron and black carbon within street dust from a steel industrial city, central China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, **16**(10): 2452-2461.
- [36] 韩力慧, 张鹏, 张海亮, 等. 北京市大气细颗粒物污染与来源解析研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(11): 3203-3210.
Han L H, Zhang P, Zhang H L, *et al.* Pollution and source apportionment of atmospheric fine particles in Beijing[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(11): 3203-3210.
- [37] Johansson C, Norman M, Burman L. Road traffic emission factors for heavy metals[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(31): 4681-4688.
- [38] Ho K F, Lee S C, Chow J C, *et al.* Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} source profiles for fugitive dust in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(8): 1023-1032.
- [39] 石爱军, 马俊文, 耿春梅, 等. 北京市机动车尾气排放 PM₁₀ 组分特征研究[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(4): 44-49.
Shi A J, Ma J W, Geng C M, *et al.* Characteristics of chemical composition of particulate matter (PM₁₀) from Beijing vehicle [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, **30**(4): 44-49.
- [40] Ambade B. Seasonal variation and sources of heavy metals in hilltop of Dongargarh, Central India[J]. Urban Climate, 2014, **9**: 155-165.
- [41] 侯聪, 邵龙义, 王静, 等. 燃煤排放可吸入颗粒物中微量元素的分布特征[J]. 煤炭学报, 2016, **41**(3): 760-768.
Hou C, Shao L Y, Wang J, *et al.* Distribution of trace elements in inhalable particulate matter emitted from coal burning [J]. Journal of China Coal Society, 2016, **41**(3): 760-768.
- [42] 刘菁, 张建强, 吴香尧, 等. 成都市十里店地区大气气溶胶元素组成及来源解析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, **33**(1): 99-102.
Liu J, Zhang J Q, Wu X Y, *et al.* Element components and sources analysis of atmospheric aerosols in the Shilidian area of Chengdu, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2006, **33**(1): 99-102.
- [43] Amato F, Viana M, Richard A, *et al.* Size and time-resolved roadside enrichment of atmospheric particulate pollutants [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(6): 2917-2931.
- [44] Jena S, Singh G. Human health risk assessment of airborne trace elements in Dhanbad, India [J]. Atmospheric Pollution Research, 2017, **8**(3): 490-502.

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physiochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)