

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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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, 曾燊, 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, 蒋铁峰, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝菱, 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	王维斐, 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, 邓吟, 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)
氢氧化钡-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 ₂ 吸附 HgCl ₂ 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, 任佳慧, 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)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	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, 霍旻, 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)

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析

王燕¹, 彭林^{2*}, 李丽娟¹, 王毓秀¹, 张腾¹, 刘海利¹, 牟玲¹

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024; 2. 华北电力大学环境与化学工程系, 北京 102206)

摘要: 采集晋城市城市扬尘及其他污染源样品, 分析其中元素、离子、碳含量, 选取富集因子分析法、潜在生态风险评价法、化学质量平衡模型分析城市扬尘化学组成及来源, 为制定有效的城市扬尘污染防治工作方案提供科学依据。结果表明, 晋城市城市扬尘中主量成分包括 Si、TC、Ca、OC、Al、Mg、Na、Fe、K 和 SO_4^{2-} , 质量分数总和为 61.14%。地壳元素在城市扬尘中含量最丰富, 离子更易在细颗粒上富集。OC 在 $\text{PM}_{2.5}$ 上的质量分数较高, EC 在 PM_{10} 上的质量分数较高, 说明二次有机污染物主要集中在细颗粒上。城市扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 潜在生态风险指数均为极强, 且 $\text{PM}_{2.5}$ 比 PM_{10} 具有更强的生态危害性。城市扬尘中 Pb 的富集因子最大, 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中达 196.97, 其次为 As、Cr、Ni、V、Zn、Cu, 且这些重金属元素的富集因子均在 10 以上, 表明这几种元素显著富集, 受人类活动影响较大。土壤风沙尘、建筑水泥尘、机动车尾气尘、煤烟尘是城市扬尘的主要来源。

关键词: 城市扬尘; 富集因子; 潜在生态风险; 化学质量平衡

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0082-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.012

Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng

WANG Yan¹, PENG Lin^{2*}, LI Li-juan¹, WANG Yu-xiu¹, ZHANG Teng¹, LIU Hai-li¹, MU Ling¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Environment and Chemical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to make effective plan to provide the scientific basis for prevention and control of re-suspended dust (RD), samples of particulate sources including RD and other pollution sources of Jincheng were collected. Elements, ions and carbon in particulate sources were analyzed. Enrichment factor, potential ecological risk assessment, and chemical mass balance model were used to analyze the chemical composition and the source of RD. The result indicated that the main components in RD of Jincheng were Si, TC, Ca, OC, Al, Mg, Na, Fe, K and SO_4^{2-} , contributing 61.14% of total mass of RD. The most abundant content of RD was crustal elements, and the ions were enriched in the fine particles. The mass fraction of OC in $\text{PM}_{2.5}$ was higher, whereas the mass fraction of EC in PM_{10} was higher, indicating that secondary organic pollutants were mainly dominated in the fine particles. The dust $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} potential ecological risk indexes were extremely strong, and $\text{PM}_{2.5}$ had higher ecological harm than PM_{10} . Pb had the highest enrichment factor of 196.97 in $\text{PM}_{2.5}$, which was followed by As, Cr, Ni, V, Zn and Cu, the enrichment factors of which were all greater than 10, indicating that they were apparently enriched and affected by human activities. Soil dust, construction dust, vehicle exhaust, and coal dust were the main sources of RD.

Key words: re-suspended dust; enrichment factor; potential ecological risk; chemical mass balance

大气颗粒物是影响环境空气质量的首要污染物^[1-4], 进行大气颗粒物来源解析是制定污染防治战略的重要措施^[5]。城市扬尘是各单一源类排放的初始态颗粒物随机沉降形成的一种混合源, 具有源强不确定性和排放不连续性等特点^[6,7], 是大气颗粒物 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要来源^[8,9]。扬尘会直接影响人体健康, 且扬尘中的 $\text{PM}_{2.5}$ 对人体健康的危害远比 PM_{10} 大^[10]。目前, 国内外对于城市扬尘的研究主要是 PM_{10} , 以化学组成和来源解析为主^[11,12], 而有关城市扬尘中 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分、重金属的富集以及健康风险评价较少。

晋城市位于山西省东南部, 是全省煤电能源重化工开发的重点地区之一, 是重要的无烟煤生产基

地。本研究选择晋城市的城市扬尘为对象, 系统地 进行来源解析, 分析其元素、离子、碳以及重金属 的潜在危害性, 以期制定有效的城市扬尘污染防治 工作方案提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究共采集了城市扬尘、土壤风沙尘、煤烟 尘、建筑水泥尘和机动车尾气尘这 5 种源类样品。

收稿日期: 2015-06-15; 修订日期: 2015-08-20

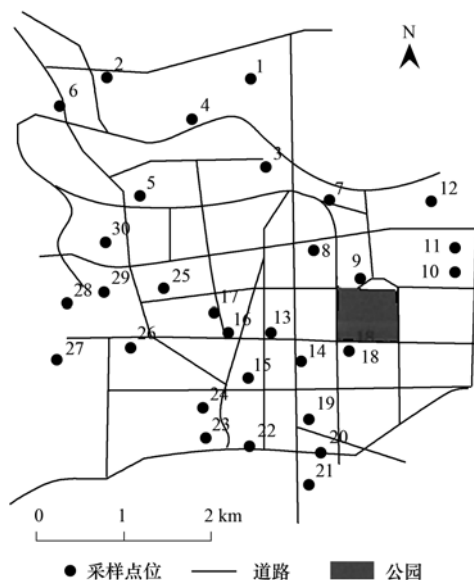
基金项目: 国家自然科学基金项目(41373008); 山西省基础研究项目(2015021170)

作者简介: 王燕(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环 境污染, E-mail: 499454583@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: penglin6611@163.com

城市扬尘:采样点位基本覆盖晋城市全市域面积,设置 30 个点位(见图 1),选取 2 层以上楼房、仓库、商店等建筑物的窗台、橱窗、台架等处长期积累的灰,用毛刷刷入袋内,每袋 0.5 kg 左右,共采集 30 个样品。样品采集晾干后按照不同方位混样,共得到 5 个混合样(北:混样 1;东:混样 2;中:混样 3;南:混样 4;西:混样 5)。

土壤风沙尘:在晋城市中心区周边 20 km 范围上的不同距离上和主导风向的不同距离上,为了保证采集的土壤风沙尘具有代表性,按梅花型布设采样点。在每个采样点上用干净的扫帚或大的毛刷扫地表土并用木铲将其收集到纸袋中,每袋 0.5 kg 左右。



采样点 1~6 混合得到混样 1; 7~12 混合得到混样 2;
13~18 混合得到混样 3; 19~24 混合得到混样 4;
25~30 混合得到混样 5

图 1 城市扬尘采样点位示意

Fig. 1 Location of the sampling sites of re-suspended dust

煤烟尘:选取典型的正常使用的以煤为燃料的工业锅炉(电厂锅炉),采集工业锅炉除尘器下的灰。

建筑水泥尘:选择晋城市主要水泥厂有组织排放尘和无组织排放尘以及施工作业面上建筑水泥尘。

机动车尾气尘:通过在机动车排气筒上加装有滤膜的采样器,固定在各类机动车的排气管上,在道路上运行 3 h 左右,分别用石英膜和聚丙烯膜采集的尘来代表晋城市机动车各种运行工况下机动车尾气尘。机动车尾气尘样品共采集 18 个。

1.2 样品处理及测试

采样点采集的粉末样品,分析前需进行前处理,

步骤为:①粉末样品运回实验室后自然晾干;②粉末样品过 150 目(泰勒标准筛 150 目 = 0.104 mm)的不锈钢筛。过筛后按照要求将各类样品分别进行混样,样品于低温条件(4℃)下保存;③混样后对每个样品进行再悬浮,同时采用聚丙烯和石英滤膜平行采集 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 样品,再悬浮采集完成后待测。

将采集的膜样品剪碎,放入锥形瓶中,加去离子水润湿,加入分析纯的 HNO_3 ($1.42 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$) 15 mL 和 $HClO_4$ (75%) 5 mL,在电炉上加热,控制在 100℃ 以下。当酸剩余约 3 mL 时,冷却锥形瓶,加入少许去离子水,过滤残渣,定容至 15 mL,待测。采用美国热电公司 ICP-9000(N+M) 型等离子体发射光谱仪对处理好的样品进行元素分析测试,被测元素包括 Si、Ti、Al、Mn、Mg、Ca、Na、K、Cu、Zn、As、Pb、Cr、Ni、Co、Cd、Hg、Fe、V,共 19 种元素。

采用瑞士万通 861 型离子色谱仪对样品中水溶性离子 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 进行定量分析,阴离子色谱柱为: Metrosep A Supp5,淋洗液用 $1.78 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KOH} + 2.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{CO}_3$ 的混合溶液;阳离子色谱柱为: Metrosep C4 150,淋洗液用 $1.7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HNO}_3 + 0.7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 吡啶二甲酸的混合溶液。碳分析由德国元素分析系统公司的 Analysensysteme GmbH vario EL cube 型元素分析仪直接测定颗粒物中的总碳和有机碳的质量浓度。

1.3 质量保证与质量控制(QA/QC)

为了保证样品前处理和分析方法的准确性和可靠性,元素测定选择 GSD6 沉积物标准样进行相同的消解和分析,各检测物质加标回收率在 80% ~ 120%,平行样相对标准偏差(RSD)均小于 7%,且空白膜中化学组分含量均低于检出限,达到质量控制规范。同时每批样品随机抽取 10% 做平行样分析,实行质量控制措施。

2 结果与讨论

2.1 城市扬尘化学组成特征分析

2.1.1 城市扬尘化学组成特征与其他城市比较分析

将大气颗粒物中质量分数大于 1% 的化学组分作为主量成分,质量分数小于 1% 的化学组分作为次量成分^[10]。从表 1 可知,晋城市城市扬尘中主量成分包括 Si、TC、Ca、OC、Al、Mg、Na、Fe、K 和 SO_4^{2-} ,质量分数总和为 61.14%;次量成分包括 Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、 Cl^- 、

NO_3^- 和 K^+ , 质量分数总和为 2.09%. 质量分数依次为: $\text{TC} > \text{Si} > \text{Ca} > \text{Al} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{Fe} > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}$, 分别为 14.693 3% $\pm$ 4.436 4%、11.163 8% $\pm$ 0.878 9%、9.713 7% $\pm$ 3.561%、6.485 1% $\pm$ 2.216 1%、3.009 1% $\pm$ 2.071 5%、2.183 9% $\pm$ 2.028 7%、1.848 1% $\pm$ 1.026 7%、1.623 5% $\pm$ 0.471 9%、1.283 3% $\pm$ 0.070 3%, 同时总碳 TC 为机动车尾气尘的标识化学组分, Si 是土壤风沙尘的标识元素, Ca 为建筑水泥尘的标识元素, Al 为煤烟尘的标识元素^[13], 表明土壤风沙尘、建筑水泥尘、机动车尾气尘、煤烟尘是影响城市扬尘的主要因素.

表 1 为晋城市城市扬尘 PM_{10} 与其他 5 个城市(东营^[14]、太原^[9]、安阳^[9]、天津^[9]、济南^[9])城市扬尘的成分谱. 结果显示, 不同城市

的城市扬尘成分谱存在差异, 但主要化学组分基本相同, 只是浓度相差较大: ①晋城市 TC 含量最高, 济南市为 Ca 含量最高, 其他城市均为 Si 含量最高. ②晋城市城市扬尘中 TC 含量高于其他 5 个城市, 考虑主要原因是晋城市为山西省无烟煤的主要产地, OC/TC 约 0.62, 表明 TC 中大部分为 OC. ③晋城市 Na、Mg、V、Cr、Ni、Pb、 Cl^- 含量高于其他 5 个城市; SO_4^{2-} 含量高于安阳, 低于其他 4 个城市; Fe 含量低于其他 5 个城市. 燃煤和机动车尾气的共同作用导致 V、Pb 的含量相对较高^[15,16], Ni、Cr 的主要来源为焦化煤燃烧和冶炼废气排放^[17], As 的主要来源为有色金属冶炼^[18]. 这与晋城市地处内陆, 是山西省重要的煤生产基地, 加之特殊的地形和气候条件是大气污染物不易扩散有关.

表 1 晋城市与其他 5 个城市的城市扬尘 PM_{10} 成分谱比较/%

Table 1 Comparison of chemical compositions of re-suspended dust among Jincheng and other five cities/%						
化学组分	晋城	东营	太原	安阳	天津	济南
Na	2.183 9 $\pm$ 2.028 7	0.790 9 $\pm$ 0.233 6	0.726 2 $\pm$ 0.044 9	0.365 4 $\pm$ 0.203 0	1.260 0 $\pm$ 0.440 0	1.247 7 $\pm$ 0.427 9
Mg	3.009 1 $\pm$ 2.071 5	1.362 5 $\pm$ 0.253 4	1.551 8 $\pm$ 0.121 4	1.564 5 $\pm$ 0.087 8	1.450 0 $\pm$ 0.330 0	2.312 4 $\pm$ 0.403 1
Al	6.485 1 $\pm$ 2.216 1	5.330 8 $\pm$ 0.988 8	7.080 7 $\pm$ 0.795 0	6.910 1 $\pm$ 0.596 2	7.910 0 $\pm$ 1.570 0	6.969 3 $\pm$ 2.494 3
Si	11.163 8 $\pm$ 0.878 9	13.083 2 $\pm$ 2.471 3	22.333 1 $\pm$ 1.695 2	21.243 8 $\pm$ 1.369 4	17.600 0 $\pm$ 3.930 0	15.710 9 $\pm$ 3.352 7
K	1.283 3 $\pm$ 0.070 3	1.204 5 $\pm$ 0.304 1	1.086 6 $\pm$ 0.257 2	1.732 2 $\pm$ 0.086 7	2.620 0 $\pm$ 0.720 0	1.453 5 $\pm$ 0.424 0
Ca	9.713 7 $\pm$ 3.561 3	11.059 9 $\pm$ 1.732 6	13.700 1 $\pm$ 2.289 7	9.333 9 $\pm$ 1.808 0	6.840 0 $\pm$ 1.470 0	15.895 0 $\pm$ 1.718 0
Ti	0.102 2 $\pm$ 0.034 2	0.295 5 $\pm$ 0.072 5	0.345 2 $\pm$ 0.034 2	0.455 4 $\pm$ 0.047 4	0.650 0 $\pm$ 0.220 0	0.551 5 $\pm$ 0.075 6
V	0.247 4 $\pm$ 0.098 1	0.006 2 $\pm$ 0.001 7	0.007 2 $\pm$ 0.000 8	0.010 0 $\pm$ 0.001 1	0 $\pm$ 0	0.012 1 $\pm$ 0.002 8
Cr	0.165 3 $\pm$ 0.089 8	0.006 0 $\pm$ 0.001 8	0.016 $\pm$ 0.006 5	0.008 5 $\pm$ 0.000 4	0.010 0 $\pm$ 0.010 0	0.10 18 $\pm$ 0.056 5
Mn	0.042 5 $\pm$ 0.028 9	0.050 2 $\pm$ 0.014 3	0.053 7 $\pm$ 0.007 4	0.073 0 $\pm$ 0.015 2	0.040 0 $\pm$ 0.010 0	0.088 9 $\pm$ 0.013 2
Fe	1.848 1 $\pm$ 1.026 7	3.491 7 $\pm$ 0.937 6	3.462 1 $\pm$ 0.335 7	6.161 8 $\pm$ 2.747 3	2.390 0 $\pm$ 0.340 0	4.190 2 $\pm$ 1.558 7
Co	0.001 7 $\pm$ 0.001 1	0.001 1 $\pm$ 0.000 2	0.001 6 $\pm$ 0.000 1	0.002 3 $\pm$ 0.001 1	0.010 0 $\pm$ 0	0.015 7 $\pm$ 0.004 2
Ni	0.077 7 $\pm$ 0.075 5	0.004 3 $\pm$ 0.000 7	0.006 8 $\pm$ 0.002 1	0.004 9 $\pm$ 0.000 9	0.010 0 $\pm$ 0.010 0	—
Cu	0.027 $\pm$ 0.013 4	0.008 7 $\pm$ 0.003 8	0.011 9 $\pm$ 0.002 8	0.010 7 $\pm$ 0.000 9	0.010 0 $\pm$ 0.010 0	0.022 3 $\pm$ 0.017 4
Zn	0.090 4 $\pm$ 0.114 7	0.071 4 $\pm$ 0.052 4	0.047 5 $\pm$ 0.014 6	0.120 2 $\pm$ 0.089 1	0.080 0 $\pm$ 0.040 0	0.142 1 $\pm$ 0.164 1
As	0.038 4 $\pm$ 0.018 3	0.001 8 $\pm$ 0.001 6	—	—	—	—
Pb	0.446 6 $\pm$ 0.170 3	0.016 8 $\pm$ 0.005 6	0.020 3 $\pm$ 0.008 3	0.068 9 $\pm$ 0.008 0	0.010 0 $\pm$ 0	0.009 0 $\pm$ 0.002 0
TC	14.693 3 $\pm$ 4.436 4	4.090 2 $\pm$ 0.774 1	12.883 1 $\pm$ 3.140 1	11.427 1 $\pm$ 1.034 9	11.170 0 $\pm$ 1.630 0	9.502 0 $\pm$ 1.423 9
OC	9.138 6 $\pm$ 3.005 4	3.901 6 $\pm$ 0.682 7	10.924 9 $\pm$ 3.166 9	9.089 2 $\pm$ 1.059 8	6.860 0 $\pm$ 1.110 0	6.364 0 $\pm$ 1.222 3
Cl^-	0.479 4 $\pm$ 0.221 2	0.448 2 $\pm$ 0.326 5	0.245 4 $\pm$ 0.024 1	0.013 4 $\pm$ 0	0.020 0 $\pm$ 0.010 0	0.302 9 $\pm$ 0.136 2
NO_3^-	0.098 3 $\pm$ 0.038 8	0.015 9 $\pm$ 0.051 6	0 $\pm$ 0.000 1	0.055 6 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0.192 0 $\pm$ 0.077 0
SO_4^{2-}	1.623 5 $\pm$ 0.471 9	2.716 9 $\pm$ 1.701 7	7.029 0 $\pm$ 0.677 7	0.252 7 $\pm$ 0.040 2	4.630 0 $\pm$ 1.500 0	3.398 2 $\pm$ 1.082 6
K^+	0.233 7 $\pm$ 0.126 3	—	—	—	—	—
NH_4^+	0.034 9 $\pm$ 0.030 4	—	0.037 8 $\pm$ 0.006 7	0.015 0 $\pm$ 0.010 0	0.020 0 $\pm$ 0.010 0	—

2.1.2 晋城市的城市扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 成分谱比较

为便于比较, 将成分谱中化学组分分为地壳元素, 包括 Si、Ti、Al、Mn、Mg、Ca、Fe、K 和 Na, 痕量元素(去掉地壳元素), 离子(Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-}), 有机碳(OC)和元素碳(EC).

从图 2 中可以看出, 城市扬尘中地壳元素为含

量最丰富的物种^[19,20], 分别占到无机成分谱化学组分总量的 35.83%、39.11%. 城市扬尘中离子在 $\text{PM}_{2.5}$ 上的质量分数比 PM_{10} 高, 分别为 9.61%、10.72%, 表明该种组分更易于以细颗粒形式存在. OC 在 $\text{PM}_{2.5}$ 上的质量分数较高, 且 OC 中也包含大气中发生光化学氧化生成的二次有机碳(SOC), 说明二次有机污染物也主要集中在细颗粒上. EC 在

PM₁₀上的质量分数较高,因为 EC 主要来自于化石燃料或生物质的不完全燃烧,是由污染源直接排放.

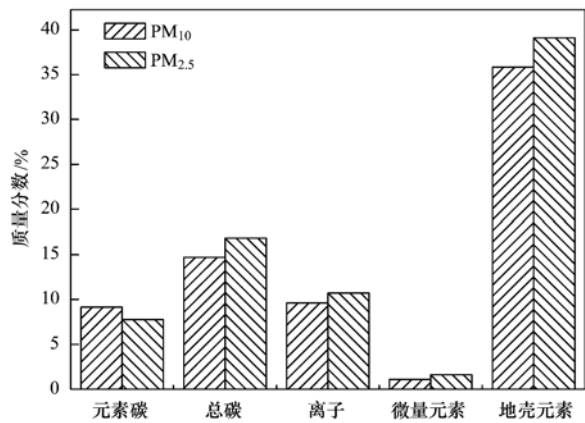


图2 晋城市城市扬尘 PM₁₀、PM_{2.5}无机化学组成

Fig. 2 Inorganic chemical composition percentage in PM₁₀ and PM_{2.5} of re-suspended dustin Jincheng

2.1.3 城市扬尘中重金属的潜在生态风险特征分析

潜在生态风险分析是以元素丰度响应为基本条件,即沉积物中金属潜在生态危害指数(RI)与金属污染程度正相关,且多种金属污染的生态危害具有加和性^[21].评价指标如下:

C_fⁱ = C_fⁱ / C_nⁱ (1)

E_rⁱ = T_rⁱ · C_fⁱ (2)

RI = ∑_i^m E_rⁱ = ∑_i^m T_rⁱ · C_fⁱ = ∑_i^m T_rⁱ · C_fⁱ / C_nⁱ (3)

式中,C_fⁱ为第*i*种重金属的污染系数;Cⁱ为样品中第*i*种重金属含量的实测值,mg·kg⁻¹;C_nⁱ为第*i*种重金属的背景值,mg·kg⁻¹;E_rⁱ为第*i*种重金属的潜在生态风险系数;T_rⁱ为第*i*种重金属的毒性系数,

反映其毒性水平和生物对其污染的敏感性;RI为多种重金属的潜在生态风险指数^[22];潜在生态风险评价指标的分级见表2.

表2 潜在生态风险评价指标的分级

Table 2 Classification criteria of the potential ecological risk index			
E _r ⁱ	单因子生态危害程度	RI	总的潜在生态风险程度
< 40	轻微	< 150	轻微
40 ~ 80	中	150 ~ 300	中等
80 ~ 160	较强	300 ~ 600	强
160 ~ 320	强	> 600	极强
> 320	极强		

本研究对8种重金属Mn、Zn、Cr、Cu、Pb、Ni、Co、As进行潜在生态风险特征评价,其毒性系数分别为1、1、2、5、5、5、5、10,元素背景值取中国土壤背景值,分别为583、74.2、61、22.6、26、26.9、12.7、11.2 mg·kg⁻¹^[23].

晋城市城市扬尘重金属潜在生态危害系数及生态风险指数见表3.对比表2可知,在城市扬尘的PM_{2.5}中,Pb和As的生态危害程度为极强,Ni的生态危害程度为强,Cr的生态危害程度为较强,Cu的生态危害程度为中,Zn、Co、Mn这3种重金属的危害程度为轻微.在城市扬尘的PM₁₀中,Pb、As的生态危害程度为极强,Ni的生态危害程度为较强,Cr、Cu的生态危害程度为中,Mn、Zn、Co这3种重金属的危害程度为轻微.即:Pb、As、Ni和Cr在PM₁₀中的潜在生态危害程度较在PM_{2.5}中的降低了一个等级,而Cu、Zn、Co、Mn这4种重金属在二者中的潜在生态危害程度一致.总体来看,城市扬尘的PM_{2.5}和PM₁₀潜在生态风险指数均为极强,且PM_{2.5}比PM₁₀具有更强的生态危害性.

表3 晋城市城市扬尘重金属潜在生态危害系数及生态风险指数

Table 3 Potential ecological hazard coefficient and ecological risk index of heavy metals in re-suspended dust of Jincheng									
颗粒物	潜在生态风险系数								潜在生态风险指数
	Mn	Zn	Cr	Cu	Pb	Ni	Co	As	
PM _{2.5}	0.58	20.69	114.95	69.47	972.12	251.12	11.81	674.11	2 114.84
PM ₁₀	0.43	12.18	54.20	59.73	858.85	144.42	6.69	342.86	1 479.36

2.2 城市扬尘来源解析

2.2.1 富集因子分析法

富集因子法(enrichmentfactor,EF)主要是用于研究元素在城市扬尘中的富集程度,从而识别和评价元素的自然来源和人为来源^[24].计算公式如下:

EF_i = (c_i/c_r)_{环境} / (c_i'/c_r')_{背景} (4)

式中,EF_i为化学组分富集因子,c_i、c_r分别为城市扬尘中测量元素*i*和参比元素的浓度;c_i'、c_r'分别为参比系统中元素*i*和参比元素的浓度.若EF_i<10,认为元素相对于地壳未富集,主要来源为自然源,由土壤岩石风化造成;若EF_i在10~1×10⁴范围,认为元素被富集,主要来源为人为.

在富集因子分析中,应尽量选受人类活动影响较小的元素作为参比元素,而Al化学性质较稳定且

为分析精度最高最广泛使用的参比元素,故选取 Al 作为参比元素[25];背景值选取中国土壤中各元素的背景值. 根据式(4)计算各元素的富集因子,计算结果列于图 3.

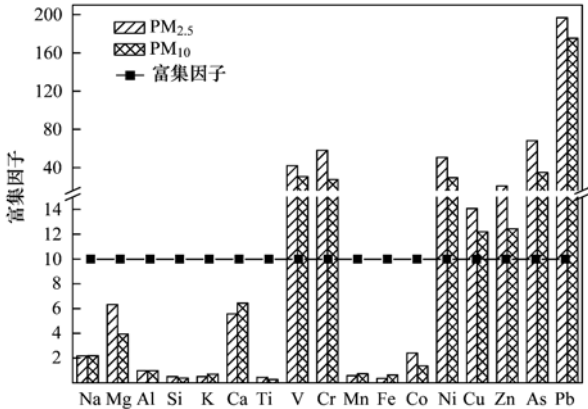


图3 晋城市城市扬尘的 PM₁₀、PM_{2.5} 中元素的富集因子

Fig. 3 Enrichment factors of elements in PM₁₀ and PM_{2.5} of re-suspended dust in Jincheng

由图 3 可知,各组分在 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中富集程度的变化趋势是一致的. 城市扬尘中 Pb 的富集因子最大,在 PM_{2.5} 中达 196.97,其次为 As、Cr、Ni、V、Zn、Cu,且这些重金属元素的富集因子均在 10 以上,表明这几种元素显著富集,受人类活动影响较大;PM₁₀、PM_{2.5} 的城市扬尘中元素的富集程度基本一致,但是受人为源污染较大的元素在细颗粒中富集程度较大,说明人为源对 PM_{2.5} 影响较大,而主要来源于自然源的元素在粗颗粒中较集中.

2.2.2 化学质量平衡模型

化学质量平衡模型是由一组线性方程构成,表示每种化学组分的受体浓度等于各种排放源类的成分谱中这种化学组分的含量和各种排放源类对受体的贡献浓度乘积的线性和[26],其计算公式如下:

$$c = \sum_{j=1}^J S_j \quad (5)$$

$$c_i = \sum_{j=1}^J (F_{ij} \times S_j) \quad (6)$$

$$\eta_j = S_j/c \times 100\% \quad (7)$$

式中, c 为受体城市扬尘中的总质量浓度测量值 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; j 为源类序号; J 为源类的总数; S_j 为 j 种源类贡献的质量浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; c_i 为受体城市扬尘中化学组分 i 的质量浓度测量值, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; F_{ij} 为 j 种源类的受体城市扬尘中化学组分 i 的含量 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.

当化学组分总数($I \geq J$)时,式(4)的解为正,才能求得 S_j ; 再根据式(7)求得 j 种源类的分担率

($\eta_j, \%$). 根据城市扬尘定义可知,城市扬尘具有二重性. 根据化学质量平衡原理,可以采用化学质量平衡模型来计算各单一源类对城市扬尘的分担率,对晋城市城市扬尘的来源构成进行解析,结果如表 4 所示.

表 4 各单一尘源类对城市扬尘的分担率

Table 4 Source apportionment of simplex source categories to re-suspended dust

源类	分担率/%	
	PM _{2.5}	PM ₁₀
土壤风沙尘	50	49
煤烟尘	3	6
建筑水泥尘	36	35
机动车尾气尘	9	7
合计	98	97

从表 4 可知土壤风沙尘对城市扬尘 PM_{2.5} 的贡献最大(分担率达 50%),其次为建筑水泥尘(分担率达 36%),机动车尾气尘(分担率达 9%),煤烟尘(分担率达 3%). 煤烟尘对城市扬尘 PM₁₀ 的贡献大于 PM_{2.5}. 城市扬尘主要来自土壤风沙尘和建筑水泥尘. 建筑水泥尘对城市扬尘的贡献仅次于土壤风沙尘,是城市扬尘中 Ca 含量较高的主要原因,说明晋城市的大规模建筑活动对城市扬尘有重大影响.

3 结论

(1) 晋城市城市扬尘中主量成分包括 Si、TC、Ca、OC、Al、Mg、Na、Fe、K 和 SO_4^{2-} , 质量分数总和为 61.14%; 城市扬尘中 TC、Na、Mg、V、Cr、Ni、Pb、 Cl^- 含量高于其他 5 个城市; Fe 含量低于其他 5 个城市.

(2) 地壳元素在城市扬尘中含量最丰富,离子在 PM_{2.5} 上的质量分数比 PM₁₀ 高,更易在细颗粒上富集. OC 在 PM_{2.5} 上的质量分数较高,EC 在 PM₁₀ 上的质量分数较高. 说明二次有机污染物主要集中在细颗粒上.

(3) 城市扬尘中 Pb 的富集因子最大,在 PM_{2.5} 中达 196.97,其次为 As、Cr、Ni、V、Zn、Cu,且这些重金属元素的富集因子均在 10 以上,表明这几种元素显著富集,受人类活动影响较大. 城市扬尘 PM₁₀、PM_{2.5} 中元素的富集程度基本一致,但是受人为源污染较大的元素在粗颗粒中富集程度较大,说明人为源对 PM₁₀ 影响较大,而主要来源于自然源的元素在细颗粒中较集中. 城市扬尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 潜在生态风险指数均为极强,且 PM_{2.5} 比 PM₁₀ 具有更强的生态危害性.

(4)根据化学质量平衡原理,利用化学质量平衡模型计算各单一尘对城市扬尘的分担率。土壤风沙尘对城市扬尘 $PM_{2.5}$ 的贡献最大(分担率达50%),其次为建筑水泥尘(分担率达36%),机动车尾气尘(分担率达9%),煤烟尘(分担率达3%)。

参考文献:

- [1] Cao J J, Shen Z X, Chow J C, *et al.* Winter and summer $PM_{2.5}$ chemical compositions in fourteen Chinese cities[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, **62** (10): 1214-1226.
- [2] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(1): 1-42.
- [3] Tie X X, Cao J J. Aerosol pollution in China: Present and future impact on environment[J]. Particuology, 2009, **7**(6): 426-431.
- [4] 刘凤娴,彭林,牟玲,等.忻州市市区大气颗粒物中的元素组成特征[J].环境化学,2014, **33**(2): 313-320.
- [5] Khan M F, Hirano K, Masunaga S. Quantifying the sources of hazardous elements of suspended particulate matter aerosol collected in Yokohama, Japan[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(21-22): 2646-2657.
- [6] 郭光焕,吴建会.城市扬尘及其来源解析技术[J].城市环境与城市生态,2007, **20**(4): 31-33, 41.
- [7] 王帅杰,朱坦,冯银厂,等.改变城市下垫面类型及控制道路尘环境效益评估方法[J].安全与环境学报,2004, **4**(5): 52-55.
- [8] Chow J C, Watson J G, Ashbaugh L L, *et al.* Similarities and differences in PM_{10} chemical source profiles for geological dust from the San Joaquin Valley, California [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(9-10): 1317-1340.
- [9] Bi X H, Feng Y C, Wu J H, *et al.* Source apportionment of PM_{10} in six cities of northern China [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(5): 903-912.
- [10] 崔伟伟,邸小坛,王志霞,等.城市扬尘污染的研究现状及展望[J].工程质量,2012, **30**(4): 32-34.
- [11] 方小珍,孙列,毕晓辉,等.宁波城市扬尘化学组成特征及其来源解析[J].环境污染与防治,2014, **36**(1): 55-59, 79.
- [12] Zhao P S, Feng Y C, Zhu T, *et al.* Characterizations of resuspended dust in six cities of North China[J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(30): 5807-5814.
- [13] 冯银厂,吴建会,朱坦,等.济南市环境空气中 TSP 和 PM_{10} 来源解析研究[J].环境科学研究,2004, **17**(2): 1-5.
- [14] 孔少飞.大气污染源排放颗粒物组成,有害组分风险评价及清单构建研究[D].天津:南开大学,2012.
- [15] 古金霞.天津市区 $PM_{2.5}$ 污染特征及灰霾等级评价方法研究[D].天津:南开大学,2010.
- [16] Kong S F, Ji Y Q, Lu B, *et al.* Similarities and differences in $PM_{2.5}$, PM_{10} and TSP chemical profiles of fugitive dust sources in a coastal oilfield city in China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2014, **14**(7): 2017-2028.
- [17] 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.
- [18] Thomaidis N S, Bakeas E B, Siskos P A. Characterization of lead, cadmium, arsenic and nickel in $PM_{2.5}$ particles in the Athens atmosphere, Greece[J]. Chemosphere, 2003, **52**(6): 959-966.
- [19] Kong S F, Ji Y Q, Lu B, *et al.* Characterization of PM_{10} source profiles for fugitive dust in Fushun-a city famous for coal [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(30): 5351-5365.
- [20] Qin Y J, Kim E, Hopke P K. The concentrations and sources of $PM_{2.5}$ in metropolitan New York city [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(2): 312-332.
- [21] 林海鹏,武晓燕,战景明,等.兰州市某城区冬夏季大气颗粒物及重金属的污染特征[J].中国环境科学,2012, **32**(5): 810-815.
- [22] 安立会,郑丙辉,张雷,等.渤海湾河口沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J].中国环境科学,2010, **30**(5): 666-670.
- [23] 孙龙仁,郑春霞,王文全,等.乌鲁木齐市大气 PM_{10} 中重金属元素的浓度和富集特征[J].新疆农业科学,2009, **46**(3): 582-588.
- [24] 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, (12): 4431-4438.
- [25] 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, **39**(2): 94-99.
- [26] 郝明途,高健,戴晓燕,等.大气颗粒物化学质量平衡源解析方法研究[J].环境科学与管理,2011, **36**(12): 54-61.

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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 Shao-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 ₂	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 ₂ with Nano-TiO ₂	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