

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 白举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)
臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

北京市近郊区土壤砷累积特征

戚洁^{1,2}, 王美娥², 汪自强¹, 欧阳志云^{2*}

(1. 浙江大学农业与生物技术学院, 杭州 310058; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 城市近郊区土地利用类型多元化, 同时也承载着巨大环境压力, 研究近郊区土壤污染特征对城市规划及发展有着重要意义。通过 3 km × 3 km 网格布点, 系统采样调查了北京市近郊区 5 ~ 6 环路之间 167 个样点的 0 ~ 20 cm 表层土壤样品中砷的含量, 分析了城市近郊区土壤砷的累积特征。结果表明, 北京市近郊区土壤砷含量为 2.89 ~ 11.38 mg·kg⁻¹, 平均值为 7.11 mg·kg⁻¹。平均值在 90 年代末的背景值调查数据的范围之内, 但是各个分位数级别的值均小于 80 年代初的北京市土壤背景值调查数据。因子分析结果发现北京市近郊区土壤砷与来源于成土母质的 Co、Mn 和 Ni 元素一组。克里格插值得到的北京市近郊区土壤砷含量空间分布图表明, 西北与东部及东南部分土壤砷含量较东北和西南部高, 砷含量最高 25% 的土壤样点与点源污染有关, 而砷含量最低 25% 的样点大多远离污染源。不同土地利用类型土壤砷的比较结果表明人类活动在一定程度上影响土壤中砷的累积, 生活区与农田土壤砷含量相似且显著大于绿地和荒地。污染源对生活区和绿地与荒地土壤中砷的累积有显著影响, 工厂区附近的土壤砷含量显著比远离工厂区和交通区的土壤高。因此, 北京市近郊区土壤砷在整体空间分布上主要与成土母质有关, 然而人类活动在一定程度上也显著增加了土壤砷的累积。

关键词: 北京; 近郊区土壤; 砷累积; 污染源; 空间分布

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2849-06

Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing

QI Jie^{1,2}, WANG Mei-e², WANG Zi-qiang¹, OUYANG Zhi-yun²

(1. College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Various land uses and enormous environmental pressures are characteristics of suburbs. Full understanding of suburban soil pollution is necessary for urban planning and development. In this study, 167 surface soil samples (0-20 cm) located in suburbs of Beijing between the fifth and sixth ring road were collected based on the 3 km × 3 km grids. The purpose of our investigation is to reveal the accumulating characteristics of As in Beijing suburbs. Results showed that arsenic contents in suburban soils of Beijing ranged from 2.89 mg·kg⁻¹ to 11.38 mg·kg⁻¹, with mean of 7.11 mg·kg⁻¹. The means were in the range of the background values reported in late 1990s, but the values of each quantile were lower than the soil background values reported in early 1980s. Factor analysis suggested that As in Beijing suburban soil shared the same group as those elements coming from parent materials such as Co, Mn and Ni. The spatial distribution map using Kriging interpolation showed that As contents in northwestern, eastern and southeastern parts were higher than those in northeastern and southwestern parts. Those plots with contents of the highest 25% were all located near the pollution sources, while most of those with the lowest 25% contents located far from the pollution sources. Comparison of As contents in different land uses showed that human activities had influence on the accumulation of As in soils. Inhabitation areas and agricultural fields had higher As contents than the green lands and vacant lands. Pollution sources significantly affected the accumulation of As in soils of inhabitation areas, green lands and vacant lands. Arsenic contents in soils near factories were significantly higher than those far from factories and traffic corridors. To sum up, the spatial distributions of As contents in soils in Beijing suburban area were generally determined by the distributions of parent materials, while human activities increased the accumulation of As in soils to some degree.

Key words: Beijing; suburban soil; arsenic accumulation; pollution sources; spatial distribution

城市近郊区指城市建成区的外围地带, 是城市向郊区的过渡区域, 近郊区土地利用类型多元化, 同时也面临巨大的环境压力^[1]。20 世纪 70 ~ 90 年代北京地区经历了快速地城市化过程^[2], 尤其在近郊区, 工矿业的发展以及人口数量和密度的快速增长, 导致大量的工业三废、生活垃圾输入近郊区土壤; 此外, 由于现代农业的迅猛发展, 使近郊区土壤同时面临着农药和杀虫剂等面源污染。城市化过程还使近郊区农业用地、居民住宅用地、工业用地等土地

利用类型之间竞争激烈, 因此, 研究近郊区土壤污染特征以及污染状况对城市规划及发展有着重要意义。

砷是一种致癌物质, 过量砷会导致皮肤癌、肺癌等多种疾病^[3]。20 世纪后, 砷被越来越广泛地用

收稿日期: 2011-10-31; 修订日期: 2011-12-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030744)

作者简介: 戚洁(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: mewang@rcees.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

于制造业及农业,土壤中砷污染主要来源于化学工业、有色金属开采、冶炼工业及电子工业的含砷三废,此外,区域地质异常、含砷农药及含砷量高的磷肥也是导致土壤砷积累的原因^[4]. 由于在世界范围内发生了多起砷环境污染和饮用水砷中毒事件^[5,6],土壤砷污染的研究和监测也因此一直是环境科学与环境管理的重点. 北京市土壤砷污染状况的调查始于20世纪70年代初,当时环境科学工作者在北京西郊和东南郊调查了包括砷在内的几种土壤重金属背景值^[7],对北京市东南郊污灌区土壤砷的研究一直延续至2000年以后,并且近10年来对北京市农田和工业区土壤砷进行了重点调查研究^[7~11]. 然而,随着近几年北京市城市的不断扩展,郊区的土地利用类型,尤其是近郊区5~6环之间区域发生了很大变化,而近10年对5~6环之间的土壤砷调查主要集中在农业用地土壤,因此有必要对5~6环之间近郊区土壤砷做系统、全面的调查和研究.

本研究以北京市近郊区5~6环之间表层0~20 cm土壤为主要调查对象,通过系统的土壤取样调查,分析北京市近郊区土壤砷的累积特征及其主要来源,揭示城市化发展对近郊区土壤砷空间分布格局的影响,以期为城市近郊区土壤质量评价与环境保护提供基础数据与理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京市位于北纬39°56',东经116°20',地处华北平原的北部,全市土地面积约1.6万km². 本项目以北京市近郊区5~6环之间为研究区域,总面积约1600多km²,采样点按照不同土地利用类型分为生活区、农田、绿地和荒地,每种土地利用类型又分为工厂区附近、交通区附近以及远离前两者(污染源)3个区域(图1).

1.2 采样与分析

采用网格均匀布点法,按照3 km×3 km把整个研究区域分为167个网格,每个网格内采集0~20 cm混合表层土壤样品. 每个混合样品由10 m×10 m区域内的5个小样点样品混合. 总共采集167个样品,采样时间为2010年9月. 样品分布情况如下:75个农田、60个生活区和32个绿地和荒地(图1). 相应的采样区域用GPS定位. 所要指出的是,所有样品采自有植被覆盖的绿地,如农田、草地和草坪、树林等.

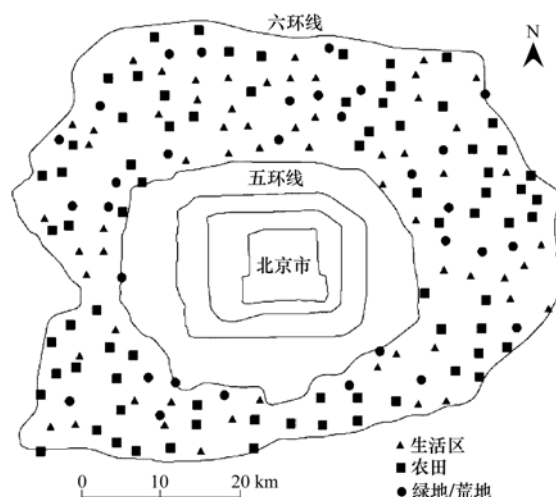


图1 土壤样点分布示意

Fig. 1 Location of soil sampling sites

土壤样品的准备:将采集的土壤样品(一般不少于500 g)混匀后用四分法缩分至100 g,缩分后的土样室内风干后,除去土样中石子和动植物残体等异物,用木棒碾压,通过2 mm尼龙筛,混匀. 一部分过2 mm筛的土壤继续用玛瑙研钵研磨,通过100目尼龙筛混匀后备用.

称取过0.1 mm筛的土壤样品0.5 g于50 mL比色管中,加入5 mL王水,混匀,放置12 h后加盖,沸水浴消煮2 h. 冷却后加超纯水定容至50 mL,混匀过滤,取25 mL滤液至新50 mL比色管中加10 mL 50 g·L⁻¹硫脲+50 g·L⁻¹抗坏血酸混合溶液,10 mL盐酸(37%),超纯水定容至50 mL,原子荧光光谱仪(AF-610B)测砷. 采用相同方法消煮,冷却后加超纯水定容至50 mL,取滤液用ICP-AES测定Cu、Zn、Ni、Co、Mn、Fe的含量.

1.3 数据分析

用Pauta ($\mu \pm 3\delta$)对数据进行异常值剔除得到165个有效点数据,应用Excel 2007和SPSS 18.0软件进行因子分析、方差分析(ANOVA)和多重比较. 在因子分析中,提取特征值>1的因子. 在因子分析及皮尔逊相关分析之前,原始数据采用Minitab 15的Box-Cox转换法进行标准化. 采用Kriging插值法(ArcGIS 9.0)进行空间分布分析,在插值前原始数据进行自然对数转换.

2 结果与讨论

2.1 描述统计分析

由表1可知,本研究中北京市近郊区土壤砷含量符合正态分布,研究区内全部165个样品中,土

壤砷含量的最大值为 $11.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最小值为 $2.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $7.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与 90 年代的背景值(a)相比, 平均值处于 90 年代的背景值范围内, 但是最大值和标准差差异较大, 而最小值略大于参考值. 由于 90 年代的背景值调查时, 取样范围为整个省级行政单元的北京市, 其分辨率

较小, 理论上小范围区域的实际背景值较调查数据大, 因此, 本研究的数据与实际背景值的差异会更大. 而与 80 年代背景值(b)的比较结果也表明, 各个百分位的数据以及平均值和标准差均显著降低. 因此, 可以认为北京市近郊区土壤中砷的含量随时间有降低趋势.

表 1 北京市近郊区土壤砷统计特征及背景值¹⁾

Table 1 Statistical characteristics of arsenic concentrations in suburban soils of Beijing and the background values									
项目	样点数 (n)	最小值 /mg·kg ⁻¹	25% 值 /mg·kg ⁻¹	中位值 /mg·kg ⁻¹	75% 值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准差	K-S(P)
本研究	165	2.89	6.01	7.12	8.22	11.4	7.11	1.58	0.49
背景值 a	115	1.39	—	—	—	19.0	7.81	3.22	—
背景值 b	40	4	8	10.4	11.4	14.1	9.7	2.54	—

1) 背景值 a 的采样时间从 1999 年开始^[12]; 背景值 b 采样时间为 20 世纪 80 年代^[13]; —表示无数值

对比本研究数据与近 10 年在北京市大兴区、北京城市 4~5 环边缘区、官厅以及密云水库等区域以及北京市省级行政单元的农田土壤所报道的数据发现(表 2), 本研究所获得的数据处于以上调查所获得的数据范围之内. 然而, 与本研究的调查结果类似, 以上调查中的土壤中砷含量尽管与 90 年代的背景值相比, 在同一个范围之内, 但是这些报道的数据均比相应区域的参照值低^[9,14~16]. 许多研究表

明, 土壤砷含量会随时间逐渐减低, Wu 等^[17]分析了 20 年间北京农村土壤中重金属含量的变化, 在相同位点采样比较后发现, 相比于 1985 年的测定结果, 2008 年相同位点土壤砷的平均值下降了 18.5%. 另外朱桂珍^[8]将 1999 年测定的通惠河灌区以及凉水河两岸土壤砷含量与 70 年代末东南郊污灌区调查协作组对东南郊污灌区土壤调查数据比较后也发现, 砷的平均值分别下降了 12.5% 和 20.8%.

表 2 北京市不同地区土壤砷含量及其与参照值的比较

Table 2 Arsenic concentrations in different areas of Beijing and the comparison with reference values				
地区	年份	平均值/mg·kg ⁻¹	参照值/mg·kg ⁻¹	差异/%
大兴区 ^[9]	2004	7.68	8.39	8.4
城市边缘(4~5 环) ^[14]	2005	7.67	8.70	11.8
官厅水库 ^[15]	2007	6.88	7.81	11.9
密云水库 ^[16]	2010	6.50	7.81	16.7
农村土壤(北京市省级行政单元) ^[17]	2010	7.90	9.70	18.5
本研究(5~6 环)	2009	7.11		

通过北京市土壤砷的输入和输出分析, 笔者认为土壤砷含量的降低主要因为土壤中砷的输出大于输入. 北京市土壤中砷的输入途径主要为工业和石化燃料引起的释放以及随郊区农田的农业化学品输入. 然而, Wu 等^[17]指出自 2001 年北京申奥成功以来, 为保障奥运会期间空气质量良好, 加强煤烟型污染治理, 使北京市煤炭消耗量大大降低^[18]. 而煤炭燃烧是大气中砷的主要来源^[19], 因此煤炭消耗的减少必然引起以大气沉降形式输入土壤的砷含量减少, 因而导致土壤中砷的输入减少. 并且由于城市化发展, 农业用地类型逐渐减少, 导致随着农业化学品输入的砷含量降低. 而另一方面, 土壤砷的输出途径包括微生物对砷的气化向大气释放, 植物对砷的同化和回归, 雨水淋洗等. 据报道, 在自然温度下, 土壤

中的砷由于微生物的甲基化作用, 能够以挥发性化合物逸入大气, 在还原环境中, 砷首先被还原成亚砷酸, 并被甲基化为甲基砷化合物, 并进一步被甲基化或还原成二甲基砷或三甲基砷, 最终逸入大气, 据估计, 因这一过程每年从陆地表面释放到大气中的砷有 $2.1 \times 10^7 \text{ kg}$ ^[4]. 在土壤砷输出量大于输入量的情况下, 必然导致土壤中的砷含量随时间逐渐降低.

2.2 因子分析

元素之间的相关关系能够为其来源提供有用的信息^[20], 本研究同时调查了 7 种金属元素(As、Cu、Zn、Ni、Co、Mn、Fe)(表 3). 为进一步分析北京市近郊区土壤砷的可能来源, 本研究对以上 7 种金属元素进行了因子分析, 总计提取了 2 个因子: ①As, Ni, Co, Mn, Fe; ②Zn, Cu(图 2), 两组因子一共能够

表 3 北京市近郊区土壤金属元素 Cu、Zn、Ni、Co、Mn、Fe 含量的统计特征值
Table 3 Statistical characteristics of heavy metal concentrations in suburban soils of Beijing

元素	最大值 /mg·kg ⁻¹	中值 /mg·kg ⁻¹	最小值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准差
Fe	29 282	21 210	13 138	20 696	2 769
Co	18.3	9.4	6.1	9.4	1.6
Ni	42.5	24.9	15.6	25.5	4.8
Cu	124	24.4	7.9	26.5	12.1
Zn	211	63.7	38.0	70.6	25.7
Mn	894	461	303	472	93.0

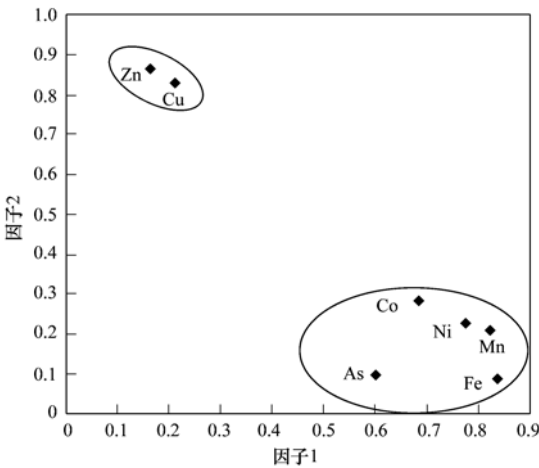


图 2 北京市近郊区土壤重金属因子分析结果
Fig. 2 Factor analysis of heavy metal elements in Beijing suburban soils

解释总变异量的 64.5%。

由图 2 可知,近郊区土壤中 As 与 Ni、Co、Mn、Fe 都属于因子 1,说明这 5 种元素具有相似的来源。许多研究认为北京市土壤中的 Ni、Co、Mn 来源于成土母质^[17],而 Fe 是土壤矿物质的重要组成成分,砷化物在土壤中多以带负电的砷氧酸根离子存在,它可与土壤成分通过化学吸附或配位体交换形成内表层复合物,这种复合物又以硫砷铁矿为主^[5],因此,因子 1 可以被认为代表成土母质。由此可见,北京市近郊区土壤砷的主要来源为成土母质。

2.3 北京市近郊区土壤砷含量的空间分布

砷在北京市近郊区表土中的空间分布见图 3,把北京市近郊区土壤砷含量按照分位数分级法从最低到最高分成 4 个等级,即:0 ~ 25%、25% ~ 50%、50% ~ 75%、75% ~ 100%,进行克里格插值,结果如图 3 所示。北京市近郊区土壤砷含量最高 50% 以上的样点主要集中在西北部以及东部和东南部,尤其是含量最高 25% 的样点都分布在这两个区域,另外西南部有一小部分含量在 50% 以上。而砷含量较低的区域主要分布在东北部与西南部,并且这两个区域的土

壤砷含量整体上比西北部与东部及东南部低。本调查结果与已报道的北京市大范围调查结果相似,Zheng 等^[21]对北京市省级行政单元范围内的表层土壤砷含量的空间分布格局调查结果也发现东部和西北土壤砷含量要高于东北和南部地区。

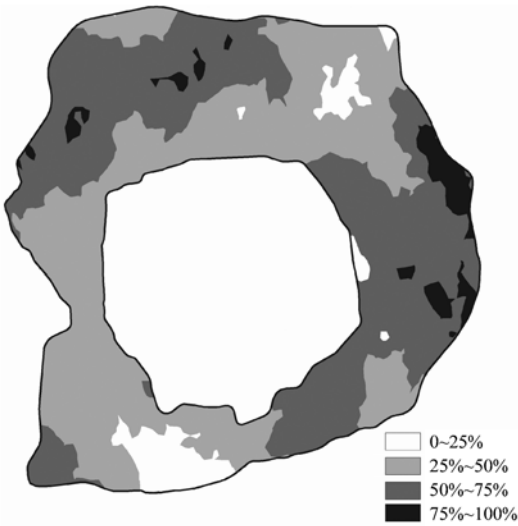


图 3 北京市近郊区土壤砷含量分布示意
Fig. 3 Distribution of arsenic content in Beijing suburban soils

从样点分布图 1 可以看出,东部及东南部地区土地利用类型以农田居多,同时位于此区域的朝阳区有较多生猪养殖场。过境河流通惠河为北京东郊排污河流,汇入大量市区生活污水并接纳了沿岸工厂排放的工业废水,同时它还是沿岸农田的浇灌河流^[22]。研究区内另一过境河流凉水河同样为排污河流。如今北京市东南郊依然进行污水灌溉,灌溉期长达 40 余年^[8]。长期使用工业和生活混合污水进行灌溉会造成土壤重金属积累^[23,24]。并且,该区域土壤砷含量在 25% 以上的样点大部分分布在农田区域。杨军等^[25]在分析北京市凉风灌区土壤重金属的积累及其变化趋势时发现,凉水河灌区及过渡带土壤砷含量分别为 9.14 mg·kg⁻¹ 和 8.19 mg·kg⁻¹,显著高于北京市的土壤背景值。此外,Li 等^[26]对朝阳区猪场粪便砷含量监测时发现其均值为 19.2

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,因此,畜禽粪便的农田施用也是砷输入农田土壤的途径之一.再加上含砷农药、除草剂等的使用,都可能导致东部及东南部某些样点土壤砷含量较高.

西北部分布有较多工厂,这些工厂长期大量燃烧煤炭,以及金属加工过程中使用的金属防腐剂等都可能造成土壤中砷累积,位于西北部的北京钨钼材料厂、北京首钢钢丝厂、三一重机厂附近采样点土壤中砷含量均在最高 25% 的范围内.

土壤砷含量最低 25% 的样点大多分布在远离工厂区和交通区等污染源的区域,这部分地区在整个研究区域内所占比例较小.

然而,从整体的空间分布看,东北部与西南部土壤中的砷含量比西北部与东部及东南部低.从北京市土壤资源管理信息网^[27]的数据可知,砷含量偏低的东北和西南地区土壤类型主要为潮土,而砷含量较高的东部和西北地区土壤类型主要为褐土.潮土

的成土母质主要由河流冲积土形成;褐土主要由山地土发育而成,矿质养分丰富,相比于褐土,潮土中砷含量较低.陆安祥等^[28]的研究中也发现北京市农田潮土和褐土这 2 种不同类型的土壤中砷含量有差异,潮土中砷含量低于褐土中含量.

空间分布分析结合因子分析结果表明,北京市近郊区土壤砷的空间分布总体上受成土母质影响,然而个别累积较高的样点与土地利用类型以及点源污染有关.

2.4 土地利用类型对土壤砷累积的影响

如表 4 所示,首先,不同土地利用类型中土壤砷含量存在差异,生活区土壤砷平均值最高,但与农田土壤砷含量差异不显著,绿地和荒地土壤中砷平均值在 3 种土地利用类型中最小,与生活区土壤砷含量差异显著.绿地和荒地相对生活区和农田受人类活动干扰较小,因此可以认为人类活动在一定程度上能够增加土壤中砷的累积.

表 4 不同土地利用类型下土壤砷含量¹⁾

Table 4 As concentration in the soils under different land use types

土地利用类型	样本数(<i>n</i>)	标准差	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	污染源	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
生活区	60	1.37	7.37a	工厂区附近	7.70a
				交通区附近	7.30ab
				远离污染源	6.50b
农田	73	1.72	7.12ab	工厂区附近	7.11a
				交通区附近	6.98a
				远离污染源	7.20a
绿地和荒地	32	1.51	6.57b	工厂区附近	7.82a
				交通区附近	6.81ab
				远离污染源	5.96b

1) 同列不同小写字母表示分组间差异显著($P<0.05$)

其次,在每一种土地利用类型土壤中,点源污染对土壤砷的累积影响显著.生活区中工厂区附近土壤砷的平均值显著大于远离污染源区的土壤.工厂区主要为水泥厂、木材防腐厂、金属加工厂、污水处理厂等.而砷的来源除来自提供工业能源的煤炭,还有木材防腐剂、金属防腐剂以及去污剂等^[5].同样绿地和荒地土壤中工厂区附近砷平均值也显著大于远离污染源区的土壤.然而,工业和交通污染源对农田土壤中砷的累积影响较小,原因可能有两个方面:首先农田灌水、含砷农药和除草剂等的使用对土壤砷含量的影响较大掩盖了工业、交通对农田土壤砷的影响;其次由于农田土壤翻耕,表层土壤与下层土壤不停交换更新,表层土壤砷累积不明显.

综上所述,污染源及人类活动在一定程度上确

实影响了土壤砷的累积.

3 结论

(1)北京市近郊区土壤砷含量的统计结果表明,数据整体服从正态分布,最大值为 $11.38\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最小值分别为 $2.89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $7.11\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.平均值在 90 年代末调查的北京市土壤背景值范围之内,但是各个分位数级别的数值均小于 80 年代初北京市土壤背景值调查数据.结合其它北京市土壤砷的研究结果发现,土壤砷输入小于输出的情况下,北京市土壤砷的含量随时间在逐渐下降.

(2)因子分析结果表明,北京市土壤砷与主要来源于成土母质的 Ni、Co、Mn 等元素一组.

(3)对北京市近郊区土壤砷含量的空间插值结

果表明,西北部和东部及东南部土壤中砷含量整体比东北以及西南部地区高,含量最高 25% 的样点都分布在污染源附近,而含量最低 25% 的样点都分布在远离工厂区与交通区的区域。

(4)综合因子分析及空间分析结果,北京市近郊区土壤砷主要来源于成土母质,其空间分布总体上主要受成土母质的影响,然而土地利用类型在一定程度上对土壤砷累积有显著影响。

(5)对不同土地利用类型土壤砷的比较结果表明:人类活动以及点源污染显著影响土壤中砷的累积,人类活动干扰较小的绿地和荒地土壤中砷含量显著低于生活区;工厂区附近土壤中砷含量显著比远离工厂区和交通区的土壤高;然而,工业和交通污染源对农田土壤中砷的累积影响较小。

参考文献:

- [1] 陈晶中, 陈杰, 谢学俭. 城市边缘区土地利用类型及其面临的环境压力[J]. 城市环境与城市生态, 2003, **16**(S1): 12-14.
- [2] 何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 北京地区城市化过程与机制研究[J]. 地理学报, 2002, **57**(3): 363-371.
- [3] Gomez-Camirero A, Howe P, Hughes M, *et al.* Environmental health criteria 224: Arsenic and arsenic compounds [M]. Geneva: World Health Organization, 2001. 234-236.
- [4] 谢正苗, 黄昌勇, 何振立. 土壤中砷的化学平衡[J]. 环境科学进展, 1998, **6**(1): 22-37.
- [5] 蒋成爱, 吴启堂, 陈杖榴. 土壤中砷污染研究进展[J]. 土壤, 2004, **36**(3): 264-270.
- [6] 沈雁峰, 孙殿军, 赵新华, 等. 中国饮水型地方性砷中毒病区和高砷区水砷筛查报告[J]. 中国地方病学杂志, 2005, **24**(2): 172-175.
- [7] 付华, 吴雁华, 魏立华. 北京南部地区农业土壤重金属分布特征与评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(1): 182-185.
- [8] 朱桂珍. 北京市东南郊污灌区土壤环境重金属污染现状及防治对策[J]. 农业环境保护, 2001, **20**(3): 164-166, 182.
- [9] 胡克林, 张凤荣, 吕贻忠, 等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(3): 463-468.
- [10] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市不同土地利用类型的土壤砷含量特征[J]. 地理研究, 2005, **24**(2): 229-235.
- [11] Luo W, Lu Y L, Wang G, *et al.* Distribution and availability of arsenic in soils from the industrialized urban area of Beijing, China[J]. Chemosphere, 2008, **72**(5): 797-802.
- [12] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(1): 117-122.
- [13] 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. 330-332.
- [14] 陈晶中, 陈杰, 谢学俭, 等. 北京城市边缘区土壤重金属污染物分布特征[J]. 土壤学报, 2005, **42**(1): 149-152.
- [15] Luo W, Wang T Y, Lu Y L, *et al.* Landscape ecology of the Guanting Reservoir, Beijing, China: Multivariate and geostatistical analyses of metals in soils [J]. Environmental Pollution, 2007, **146**(2): 567-576.
- [16] Luo W, Lu Y L, Zhang Y, *et al.* Watershed-scale assessment of arsenic and metal contamination in the surface soils surrounding Miyun Reservoir, Beijing, China[J]. Journal of Environmental Management, 2010, **91**(12): 2599-2607.
- [17] Wu S, Xia X H, Lin C Y, *et al.* Levels of arsenic and heavy metals in the rural soils of Beijing and their changes over the last two decades (1985-2008) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **179**(1-3): 860-868.
- [18] 刘达, 康薇. 北京市终端能源消费结构特点分析[J]. 电力需求侧管理, 2008, **10**(4): 78-80.
- [19] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. Journal of Environmental Management, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [20] Chen T, Liu X M, Zhu M Z, *et al.* Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban-rural transitional area of Hangzhou, China [J]. Environmental Pollution, 2008, **151**(1): 67-78.
- [21] Zheng Y M, Chen T B, He J Z. Multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoils from Beijing, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2008, **8**(1): 51-58.
- [22] 陈仓, 刘喜悦. 北京主要水系不同污染河段污灌对蚯蚓种群的影响[J]. 中国环境科学, 1988, **8**(4): 39-43.
- [23] Liu W H, Zhao J Z, Ouyang Z Y, *et al.* Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China[J]. Environment International, 2005, **31**(6): 805-812.
- [24] 卢桂兰, 韩梅, 李发生. 北京市通州污灌区土壤环境质量监测和蔬菜重金属污染状况研究[J]. 中国环境监测, 2005, **21**(6): 54-56.
- [25] 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 北京市凉风灌区土壤重金属的积累及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(9): 1175-1181.
- [26] Li Y X, Chen T B. Concentrations of additive arsenic in Beijing pig feeds and the residues in pig manure [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2005, **45**(4): 356-367.
- [27] 北京市土壤肥料工作站. 北京市土壤资源管理信息[EB/OL]. <http://202.112.163.254:8008/new%20soil/trfb.html>, 2007.
- [28] 陆安祥, 孙江, 王纪华, 等. 北京农田土壤重金属年际变化及其特征分析[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(18): 3778-3789.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-jiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行