

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

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

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)

中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)

基于长时间序列的北京 PM_{2.5}浓度日变化及气象条件影响分析 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)

2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)

抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)

成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)

嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翡 (2871)

泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)

城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)

桂林市酸雨变化特征及来源分析 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)

农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH₃和N₂O)减排效果比较:以夏玉米季为例 范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)

青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO₂、CH₄和N₂O通量的观测 吴建国,周巧富 (2914)

三峡库区香溪河秋末至中冬CO₂和CH₄分压特征分析 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)

气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)

三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)

入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)

库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)

农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)

农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)

三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)

重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)

深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)

柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)

北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)

昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)

甬醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)

漳沱河冲洪积扇地下水中酞酸酯的污染现状与分布特征 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,乔翠琴 (3041)

雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)

Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)

Ce³⁺与Cu²⁺协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)

Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)

石墨烯-TiO₂光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)

单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)

硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)

膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)

ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)

活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)

低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)

超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)

活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)

山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)

电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)

我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)

流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)

聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu²⁺、Zn²⁺的吸附特性 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)

新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)

纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)

鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)

不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)

中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)

贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)

不同氮水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)

《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)

山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估

王菲¹, 吴泉源^{1*}, 吕建树^{1*}, 董玉龙², 曹文涛¹, 康日斐¹, 曹见飞¹

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014; 2. 山东省地质环境监测总站, 济南 250014)

摘要: 以山东省典型金矿区——焦家式金矿带为研究区, 系统采集了 77 个表层土壤样品并对 Cu、Pb、Zn 和 Cr 的含量进行了测定; 采用空间统计分析方法对重金属的空间变异结构、分布规律及潜在污染风险进行了研究. Cu、Pb、Zn 和 Cr 的平均含量分别为 19.41、27.32、49.81 和 39.27 mg·kg⁻¹. 半方差函数拟合表明 Cu 和 Pb 属于中等空间自相关, 空间分布呈岛状; 而 Zn 和 Cr 为结构性空间变异, 受自然因素的控制, 空间分布呈带状和岛状. 热点分析与指示克里金插值结果表明, 金城镇、辛庄镇与蚕庄镇的交界地带重金属环境风险较高, 南部则为安全区, 其中 Pb 的超标概率最大且中高风险区分布范围广泛. 研究结果可为研究区土壤重金属污染评价和调控提供参考和依据.

关键词: 土壤重金属; 空间变异; 热点分析; 指示克里金; 环境风险

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3144-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.041

Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province

WANG Fei¹, WU Quan-yuan^{1*}, LÜ Jian-shu^{1*}, DONG Yu-long², CAO Wen-tao¹, KANG Ri-fei¹, CAO Jian-fei¹

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China; 2. Geological Environmental Monitoring Station of Shandong Province, Ji'nan 250014, China)

Abstract: In order to reveal the influence of anthropogenic factors on soil environment quality, a total of seventy-seven samples in topsoils were collected from Jiaojia gold mining area in Shandong province and were determined for Cu, Pb, Zn, Cr contents. Spatial structure, spatial distributions of concentrations and risk probability of heavy metals were analyzed using spatial statistic analysis. The average concentrations of Cu, Pb, Zn and Cr were 19.41 mg·kg⁻¹, 27.32 mg·kg⁻¹, 49.81 mg·kg⁻¹ and 39.27 mg·kg⁻¹, respectively. Pb, Zn and Cr were distributed normally and Cu was distributed normally after logarithm transformation. Semivariance analysis demonstrated that Pb could be fitted to exponential model, and Cu, Zn and Cr were fit for spherical model. Nugget coefficients of Cu and Pb were between 0.25 and 0.75, which illustrated middle spatial autocorrelation; Zn and Cr showed the structural variation with nugget values below 0.25. Cu and Pb in the topsoils were distributed dispersedly due to effects of some human factors, whereas contents of Zn and Cr indicated relatively regular distributions and were mainly affected by natural factors. Spatial distributions of the 4 heavy metals were approximately consistent and the high value areas appeared in the gold mines band. The result of hot spot analysis and indicator kriging interpolation revealed that the relatively high risk areas were located in Jincheng town, the boundary zone of Xinzhuang town and Canzhuang town, while the safe zone was situated in south part of the study area. Pb had higher probability exceeding the threshold and the middle or high environmental risk areas of Pb were distributed widely, which should be paid more attentions.

Key words: heavy metals in soils; spatial variability; hotspot analysis; indicator kriging; environmental risk

随着区域工农业快速发展, 金属矿山开采、化肥农药施用和污水灌溉成为威胁土壤环境质量的重要因素. 金属矿山在开采过程中, 矿体的暴露往往使得伴生元素被释放到环境中; 矿渣、尾矿无序堆放与不当处理也会造成重金属在土壤中的积累. 积累初期重金属的毒理效应并不明显, 当累积量超过土壤自净能力时, 便会造成土壤重金属污染, 并通过食物链被人体吸收, 进而威胁人体健康^[1]. 因此对矿区土壤重金属进行空间分布特征和环境风险研究对重金属污染防控和土壤修复有重要意义.

目前, 空间统计分析, 包括空间自相关与地统计, 与 GIS 被广泛应用于土壤重金属空间结构特征分析与制图中, 许多学者对此开展了卓有成效的研

收稿日期: 2016-03-30; 修订日期: 2016-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371395); 龙口矿区及周边海岸带遥感监测研究项目(鲁勘字[2012]110号); 山东省焦家金成矿区及周边矿区环境地质遥感调查研究项目(鲁勘字[2013]141号); 黄河三角洲高效生态经济区(潍坊)海咸水入侵调查与监控预警系统建设项目(鲁勘字[2011]14号); 山东师范大学青年培育基金项目

作者简介: 王菲(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染评价, E-mail: fei1226h@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wqy6420582@163.com; lvjianshu@126.com

究^[1-6]。空间自相关分析不仅可以研究整个区域的空间自相关程度与尺度,还可以通过区域自相关探索重金属含量的空间集聚区,预估潜在的污染风险。常见的内梅罗指数、地累积指数、污染负荷指数、潜在生态危害指数等土壤重金属污染评估方法均以土壤元素的自然背景值为参考,仅能对采样点的污染状况进行评价,而无法推广到未采样地区^[7-9]。为了获得未采样地区的土壤环境质量状况,通常会对评价结果进行空间插值^[7,10-12],而指示克里金法为区域土壤重金属潜在污染风险的评估提供了新思路。

焦家式金矿为山东省典型金矿区,由于金矿体内与冶炼废弃物中多含有 Pb、Zn、Cu 和 Cr 等元素,易于被人为富集和扩散,金矿的集中与城镇人口的密集分布也会在一定程度上加速重金属在土壤中的积累^[13]。但目前尚未有针对研究区土壤重金属空间特征及环境风险评估的研究,因此本文依托空间统计分析与 GIS 技术,对金矿区内 Cu、Pb、Zn 和 Cr 的空间结构特征与分布规律进行分析;利用热点分析寻找高值集聚点与低值集聚点,探索潜在污染风险区位置;以研究区内土壤元素自然背景值为基准,通过指示克里金技术获取整个区域重金属超标的概率,并验证与热点分析得到的风险区的一致性,以期为研究区土壤环境质量监测和预警提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省烟台市西北部,地跨莱州和招远两个县级市,主要涉及金城、朱桥、辛庄和蚕庄这 4 个镇,地理坐标为 120°05' ~ 120°15'E, 37°20' ~ 37°32'N,属于温带季风性气候,年平均降水约为 600 mm;土壤类型以棕壤土和褐土为主;地势东南高西北低,东南多丘陵,西北多为平原,海拔介于 -2 ~ 298 m 之间。研究区位于我国焦家式金矿带^[14],受北东向焦家断裂严格控制,多期多因的强烈岩浆活动使得区域内金矿资源十分丰富,开采和保有储量均为全国第一;其中焦家金矿早在 1980 年就建成并投入生产,是我国黄金行业生产规模最大的现代化矿山之一,生产规模日处理矿量可达 1 500 t。

1.2 样品采集与测试分析

根据研究区土地利用类型及矿区分布情况,同时考虑道路的通达性和样点分布的均匀性,利用研究区遥感影像图和手持 GPS 进行野外调查和选点。本研究共采集了 77 个土壤样品,采样工作分两次完

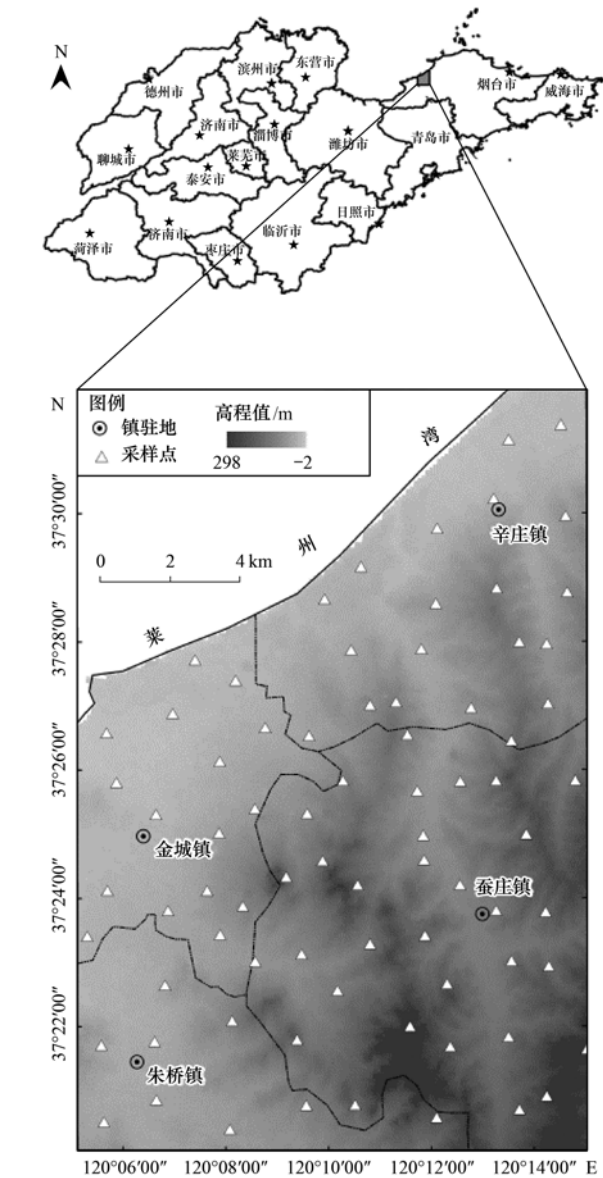


图 1 研究区与采样点位置示意

Fig. 1 Location of the study area and the sampling sites

成,2014 年 11 月采集 35 个土样,2015 年 3 月又增加了 42 个土样。研究区及采样点位置见图 1。样方内均采用多点混合法采样,即沿样方对角线采点,在对角线 4 等分点处各选一个采样点,共 5 个采样点,每点用木铲取 0 ~ 20 cm 表层土,剔除杂物,均匀混合后装入聚乙烯塑料袋中,采样同时记录坐标。

将采集的土样带回实验室后,置于木盘中通风阴干,用玛瑙研钵压碎并过 100 目尼龙筛。土壤样品经 HNO₃-HCL-HF-HCLO₄ 消解,采用电感耦合等离子体原子发射光谱法 (ICP-AES) 对 Cu、Pb、Zn 和 Cr 的含量进行测定。分析所用试剂均为优级纯,测试精度采用国家标准土壤样品 (GBW07401) 检验,回收率介于 100% ± 10% 之间,测试结果符合研

究要求.

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关

空间自相关分析是检验具有空间位置的变量,其观测值是否与相邻空间点观测值显著相关的方法^[15],通常分为全局性与区域性.全局性分析是对空间自相关的全局评估,但往往会掩盖反常的局部状况与小范围的不稳定性,而区域性分析能更好地发掘随机因素影响下的空间分布模式^[16].热点分析(getis-ord G_i^*)是局部空间自相关分析的方法之一,以全局空间集聚为前提,通过计算 G_i^* 统计量揭示集聚模式并反映高值或低值要素在空间上发生聚类的位置.显著的正 G_i^* 表示在该区域单元周围,高观测值的区域单元趋于空间集聚,即“热点”(hotspot);而显著的负 G_i^* 值表示低观测值的区域单元趋于空间集聚,即“冷点”(coldspot).

1.3.2 地统计学方法

地统计以区域化变量理论为基础,以半方差函数为工具,是研究土壤空间变异的范式性方法.普通克里金是最常用的地统计方法,可以分析土壤重金属含量的空间连续性变异;而指示克里金作为非参数地统计方法,可以估计土壤重金属在给定位置超出或小于规定阈值的概率(P)^[17],进而表征其环境风险.普通克里金要求数据符合正态分布,因此利用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验法检验数据的正态分布情况.

1.4 数据处理

本研究利用 SPSS 20.0 软件(IBM Inc.)对研究区表层土壤内重金属含量进行描述性统计分析、正态分布检验以及 Pearson 相关性分析;空间结构分析在 GS + 9.0 (Gamma Inc.) 中完成;重金属含量空间分布、热点分析以及风险概率评估均借助 ArcGIS 10.2 (Esri Inc.) 中的地统计模块(Geostatistical Analyst)实现.

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量特征分析

土壤重金属含量描述性统计结果(表1)表明,Zn、Pb 和 Cr 符合正态分布,但 Pb 和 Cr 的 K-S 检验显著性较差,含量值正偏态明显,特别是 Cr,偏度达 3.3;Cu 为非正态分布,经对数转换(logarithm transformation)后 Asymp. Sig. 为 0.253,达到正态分布标准.当数据本身为正态分布时,以算术平均值作为数据均值;当数据变换后符合正态分布的则使用几何平均值,因此 Cu、Pb、Zn 和 Cr 含量平均值分别为 19.41、27.32、49.81 和 39.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.除 Pb 外,其余重金属含量平均值均低于研究区自然背景值^[13],表现贫化,Pb 相对富集.重金属 Cr 和 Zn 含量值的分布范围较大,对应极差达到 134.23 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 80.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,相应标准差也表现出两者含量的高离散程度;Cu 和 Pb 的含量数据则分布相对均匀.

表1 土壤重金属含量描述性统计分析¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Descriptive statistical analysis of heavy metal contents in soils / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

重金属	最大值	最小值	极差	均值	标准差	背景值	峰度	偏度	K-S 检验 (Asymp. Sig.)
Cu	55.5	7.1	48.4	19.41 ^a	8.41	24.5	5.20	1.93	0.01
Pb	50.3	17.1	33.2	27.32 ^b	5.18	27.2	4.75	1.39	0.13
Zn	100.3	19.8	80.5	49.81 ^b	13.13	60.4	2.71	0.77	0.49
Cr	153.4	18.8	134.6	39.27 ^b	18.32	55.8	18.88	3.30	0.14

1) a 代表几何平均值, b 代表算术平均值

Pearson 相关性分析(表2)表明,Cu、Pb、Zn 和 Cr 之间均存在 0.01 显著性水平上的相关关系;Pb-Zn、Pb-Cu 相关系数大于 0.5,表现为较强的相关性,Chen 等^[18]、解宪丽等^[19]和戴彬等^[20]等学者研究同样发现三者相关系数较高,表明可能拥有共同的来源,通常源于交通及工业活动等. Cr 与 Pb、Cu 虽显著相关,但与 Zn 的相关系数更高($r=0.61$),两者更有可能受相同因素控制;结合描述性统计结果(表1)可知,Cr 和 Zn 的平均值低于自然背景值,受人类活

动干扰小; Borůvka 等^[21]、赵彦锋等^[22]的研究结果表明 Cr 和 Zn 受地质背景控制,属于自然来源.

表2 土壤重金属相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis between heavy metals

	Cu	Pb	Zn	Cr
Cu	1			
Pb	0.552**	1		
Zn	0.450**	0.528**	1	
Cr	0.338**	0.348**	0.611**	1

1) ** 代表在 0.01 水平下显著相关

2.2 土壤重金属空间变异结构分析

土壤重金属的空间变异结构利用半方差函数进行拟合. 变异模型参数中, 块金值 (Nugget) 由测定误差和小于最小采样尺度的非连续性变异引起, 属于随机变异; 基台值 (Sill) 通常表示系统内的总变异, 它是结构性变异和随机性变异之和. 块金值与基台值之比是反映区域化变量空间异质性程度的重要指标, 又称为块金效应 (Nugget effect), 该比值用以反映空间变异影响因素中区域因素 (自然因素) 和非区域因素 (人为因素) 的作用. 当 $C_0/(C_0 + C) < 0.25$ 时, 变量以结构性变异为主, 变量具有强烈的空间自相关; 当比值大于 0.25 而小于 0.75 时, 变量为中等程度空间自相关; 当系数 > 0.75 时, 则以随机变异为主, 变量的空间自相关性微弱^[23]. 而变程 (Range) 表示了在某观测尺度下, 空间自相关的作用范围, 即在变程范围内, 变量有空间自相关性, 反之则不存在.

表 3 土壤重金属半方差函数理论模型拟合结果

Table 3 Fitting results of semivariance models of heavy metals in soils

项目	理论模型	块金值(C_0)	基台值($C_0 + C$)	块金系数 $[(C_0 + C)/C_0]$	决定系数	残差平方和	变程/m
lg Cu	Spherical	0.076	0.153	0.497	0.849	0.00120	13450
lg Pb	Exponential	0.017	0.042	0.394	0.946	0.00002	19260
lg Zn	Spherical	0.017	0.085	0.204	0.831	0.00100	8050
lg Cr	Spherical	0.010	0.173	0.059	0.953	0.00145	9050

2.3 土壤重金属空间分布特征分析

重金属含量空间分布情况如图 2 所示, Cu 和 Pb 呈岛状的空间分布特征, Zn 和 Cr 含量表现为条带状和岛状结合的特点. Pb 含量的高值区主要位于金城镇和辛庄镇东部; 低值区则位于研究区南部、蚕庄镇中部及辛庄镇西部等部分地区. Cu 空间分布特点与 Pb 基本一致, 但 Cu 元素在朱桥镇北部存在明显高值区, 且岛状区域多而零散, 这主要与 Cu 元素空间变异性明显有关. Zn 和 Cr 含量全局性规律十分明显, 表现为由研究区中部向两侧递减的梯度变化, 高值区位于金城镇和辛庄镇与蚕庄镇的交界带, 低值区位于辛庄镇北部与研究区东南部.

Cu、Pb、Zn 和 Cr 含量超过自然背景值的区域面积分别占研究区总面积的 82%、50%、96% 和 91%, 含量总体较低. 一般高值区均位于研究区中部的金矿条带区域, 而在条带两侧, 特别是东南部丘陵区含量则较低; 金矿越密集的区域重金属含量也越高. 这与 Rashed^[25]、徐友宁等^[26]、高彦鑫等^[27]的研究结果一致, 可以认为金矿开采和冶炼废弃物排放对土壤元素的含量和分布存在一定影

响. 本研究中首先对所有重金属含量进行了对数转换, 并根据决定系数 (R^2) 最大和残差平方和 (RSS) 最小的原则, 选取最佳空间变异模型. 由半方差函数理论模型拟合结果 (表 3) 可知, 所有模型的均 RSS 较小且 R^2 达到 0.8 以上, 效果理想; Cu、Zn 和 Cr 符合球状模型, Pb 则符合指数模型; Cu 和 Pb 的块金系数介于 0.25 和 0.75 之间, 表现为中等程度的空间自相关, 其含量可能受到自然和人为因素的双重作用; Zn 和 Cr 的块金系数均小于 0.25, 以结构性空间变异为主, 说明两种元素在土壤中的含量受内在因素 (如土壤类型、母岩、地形等) 控制, 这与 Pearson 相关性分析结果一致. 各变量的变程介于 8050 ~ 19260 m 之间, 大于实际最大采样的间隔 2284 m, 说明各样点均在空间变异范围内, 能够反映重金属的真实变异特征^[24]. Pb 的变程最大, 表明在更大尺度上存在空间自相关性, 其次为 Cu、Cr、Zn, 属于中等尺度空间自相关.

响.

2.4 土壤重金属含量热点分析

Cu、Pb、Zn 和 Cr 的全局 Moran's I 指数分别为 0.06、0.17、0.24 和 0.18, 均表现为集聚的空间模式, 即相似值 (高值或低值) 在空间上趋于集中分布. 为进一步区分集聚方式, 分别对 77 个采样点上 4 种重金属含量的 G_i^* 统计量进行计算, 得到了不同显著性水平下的“热点”与“冷点” (图 3). 重金属含量的热点区域为土壤环境研究的重点区域, 存在一定的潜在污染风险. 根据热点分析结果, Cu 的热点数量为 12、Pb 为 7、Zn 为 15、Cr 为 28, Cr 的污染风险点最多且 0.01 显著性水平的点所占比例最高; Cu 和 Pb 的高-高集聚点全部位于金城镇内, 低-低集聚点多分布于蚕庄镇内; Cu 有 6 个冷点位于其中部和南部, Pb 有 3 个冷点位于南部边界地区; Zn 和 Cr 的热点分布范围较 Cu 和 Pb 更为广泛, 呈条带状分布于研究区中部; 包括金城镇以及辛庄镇和蚕庄镇的交界地带. 总体来说, 热点均位于研究区中部金矿条带内, 同样与金矿分布位置与密度表现出较高的相关性.

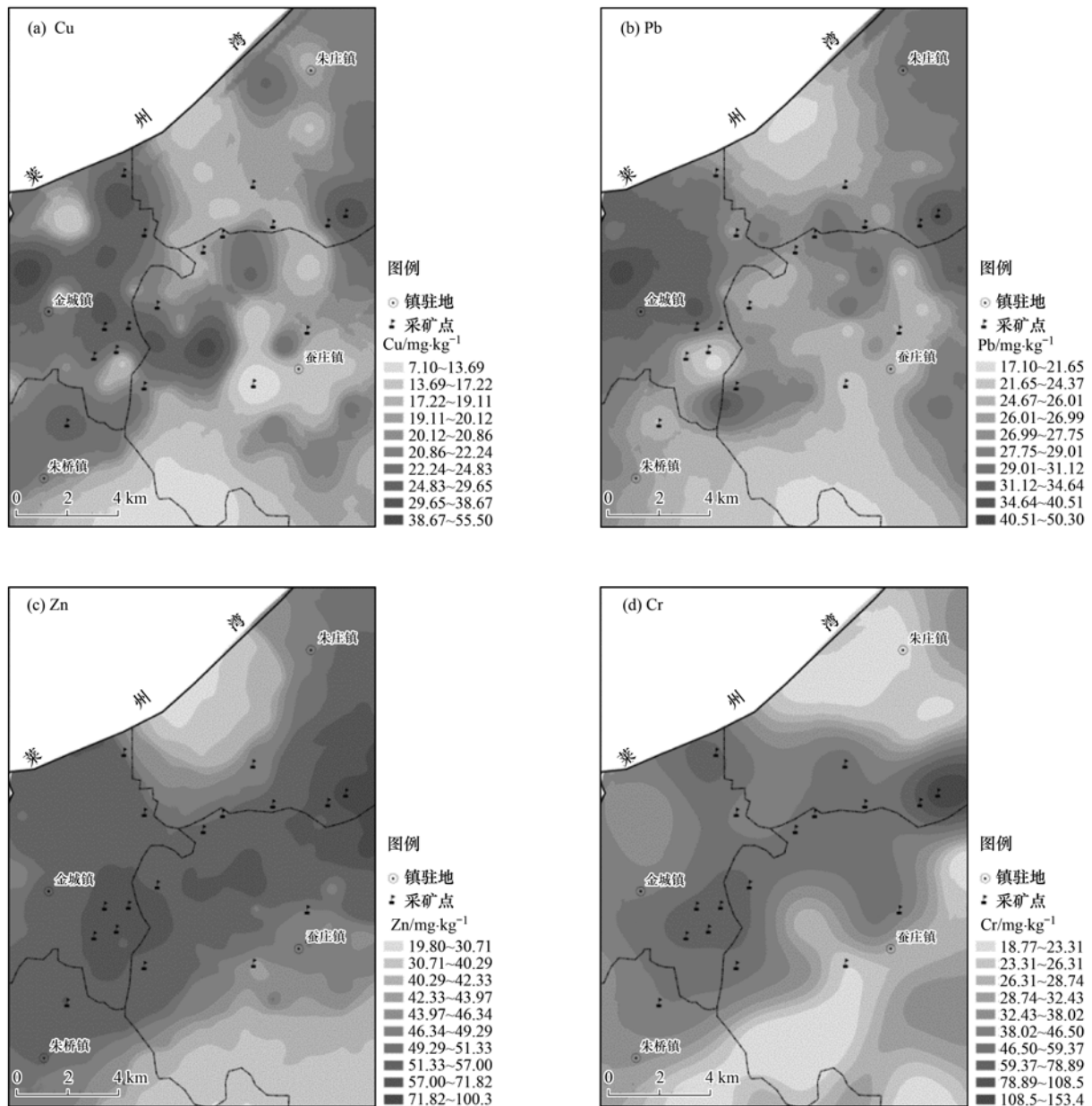


图2 土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of heavy metals in soils

2.5 土壤重金属环境风险分析

土壤重金属环境风险概率如图3所示,本研究依据等间距法^[1,28]将环境风险分为无风险($P \leq 0.2$)、低风险($0.2 < P \leq 0.4$)、中等风险($0.4 < P \leq 0.6$)、较高风险($0.6 < P \leq 0.8$)与高风险($0.8 < P \leq 1$)5类. Cu元素低风险区位于金城镇、辛庄镇南与蚕庄镇北部,其他区域为无风险区. Zn与Cu的低风险区分布相似,集中于研究区中部,但Cu的低风险区面积较Zn更大; Zn元素存在一定的中等风险,表现在金城镇东,面积仅为532 hm²,占总面积的2%. Cr在研究区内基本不存在环境风险,仅

有一处低风险区位于金城镇东部. Pb元素在金城镇西北部存在高风险等级,更有中等风险以上的区域分布于金城镇与研究区东部,风险概率小于0.4的区域则集中分布于研究区中部条带. Pb的风险概率高且中高等级环境风险区域在研究区内广泛分布,应引起警惕.

通过指示克里金法得到的风险概率结果与热点分析结果基本一致. 热点及周边地区一般存在低等级及以上的环境风险,而冷点区域均为无风险区. Pb元素的高风险区位置与热点所在位置有所差异,表现在辛庄镇东北部,这可能与热点分析所采用的

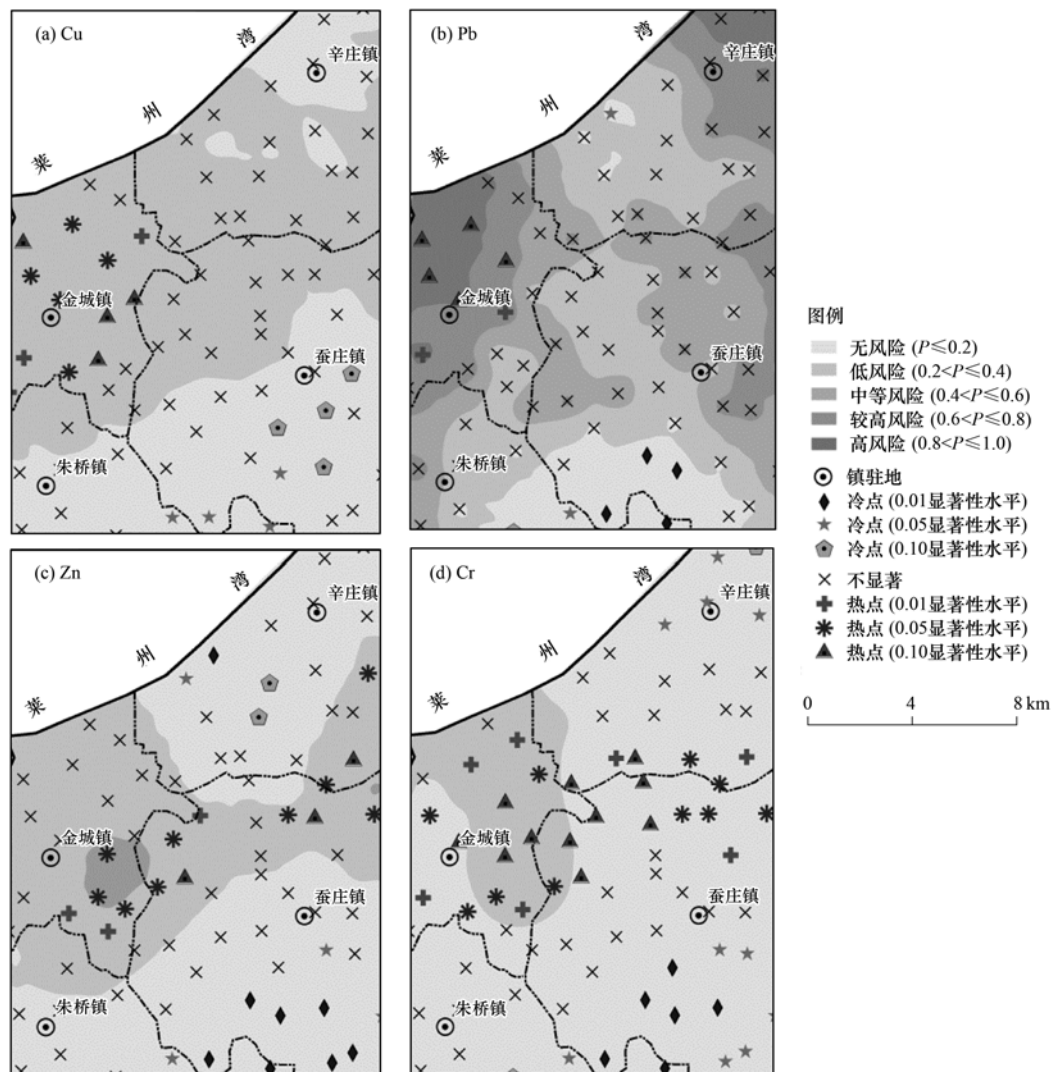


图3 土壤重金属热点分布与环境风险

Fig. 3 Spatial distributions of hotspots and risk probability of heavy metal contamination in soil

空间距离有关. 因此, 热点分析与指示克里金均能很好地反映研究区重金属的土壤环境风险, 不同的是热点分析仅能评估点且必须为已知点数据, 而指示克里金能够对未采样区域进行潜在污染风险评估, 弥补了热点分析的不足.

环境风险分析结果与土壤重金属的空间分布状况也较为吻合, 说明了潜在污染风险评估结果的可靠性. 但 Cr 元素两者分析结果存在偏差, 特别是辛庄镇东南部的岛状区域含量值介于 $108.5 \sim 153.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 但表现为无风险等级. 这可能因在辛庄镇东南角仅有一个样点表现出异常高值, 而该样点周围的样本含量均为低值且在阈值之下, 使得该岛状区域及其邻接单元表现为高-低的空间集聚模式, 在插值时被视为异常点而予以剔除. 同时, 重金属的潜在污染风险区也与金矿的密集区呈现出密切

的空间相关性, 说明在研究区内, 采矿等工业活动对土壤中 Cu、Pb、Zn 和 Cr 含量的现状与发展产生着不可忽视的影响.

3 结论

(1) Pb 元素含量介于 $17.1 \sim 50.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值与自然背景值相比呈现富集状态, 说明 Pb 在研究区土壤中存在一定积累; Cu、Zn 和 Cr 的含量表现相对贫化.

(2) Cu、Zn、Cr 的最优变异模型为球状模型, Pb 为指数模型. Cu 和 Pb 属于中等空间自相关, 两者含量可能受到自然和人为因素的共同影响; 而 Zn 和 Cr 的块金系数小于 0.25, 表现为强烈的空间自相关, 为自然来源.

(3) 4 种重金属含量的空间分布基本一致, 高值

区位于金城镇、辛庄镇与蚕庄镇的交界地带,与金矿带位置吻合;而东南部丘陵区4种重金属含量总体较低,这主要与东南部地势相对高且没有金矿存在,受工业活动等影响因素小有关。

(4)潜在污染风险评估结果显示 Cu、Zn 和 Cr 在研究区表层土壤中环境状况良好,不存在中高等级的环境风险;重金属 Pb 的超标概率高,风险概率在40%以上的区域分布广泛。总体来说,金城镇、辛庄镇与蚕庄镇交界带的土壤环境质量较差,应引起足够的重视,而研究区南部可以认为是污染风险较小的环境安全区。

参考文献:

- [1] 吕建树,张祖陆,刘洋,等.日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J].地理学报,2012,67(7):971-984.
- [2] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(1): 163-178.
- [3] 谢小进,康建成,李卫江,等.上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J].环境科学,2010,31(3):768-774.
- [4] 孙贤斌,李玉成.淮南大通煤矿废弃地土壤重金属空间分布及变异特征[J].地理科学,2013,33(10):1238-1244.
- [5] 黄兴星,朱先芳,唐磊,等.北京市密云水库上游金铁矿区土壤重金属污染特征及对比研究[J].环境科学学报,2012,32(6):1520-1528.
- [6] Lin H Y, Sun T, Xue S F, *et al.* Heavy metal spatial variation, bioaccumulation, and risk assessment of *Zostera japonica* habitat in the Yellow River Estuary, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 435-443.
- [7] 刘硕,吴泉源,曹学江,等.龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J].环境科学,2016,37(1):270-279.
- [8] 何绪文,房增强,王宇翔,等.北京某污水处理厂污泥重金属污染特征、潜在生态风险及健康风险评价[J].环境科学学报,2016,36(3):1092-1098.
- [9] 孙超,陈振楼,毕春娟,等.上海市崇明岛农田土壤重金属的环境质量评价[J].地理学报,2009,64(5):619-628.
- [10] 李一蒙,马建华,刘德新,等.开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J].环境科学,2015,36(3):1037-1044.
- [11] 柳云龙,章立佳,韩晓非,等.上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J].环境科学,2012,33(2):599-605.
- [12] Huang J H, Li F, Zeng G M, *et al.* Integrating hierarchical bioavailability and population distribution into potential eco-risk assessment of heavy metals in road dust: A case study in Xiandao District, Changsha city, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 969-976.
- [13] 王存龙,庞绪贵,杨丽原,等.土壤重金属生态危害评价:以典型金矿区为例[J].地球化学,2013,42(6):557-566.
- [14] 李厚民,沈远超,毛景文,等.石英、黄铁矿及其包裹体的稀土元素特征——以胶东焦家式金矿为例[J].岩石学报,2003,19(2):267-274.
- [15] 霍霄妮,李红,孙丹峰,等.北京耕作土壤重金属含量的空间自相关分析[J].环境科学学报,2009,29(6):1339-1344.
- [16] Li W L, Xu B B, Song Q J, *et al.* The identification of 'hotspots' of heavy metal pollution in soil - rice systems at a regional scale in eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 407-420.
- [17] Diodato N, Ceccarelli M. Multivariate indicator Kriging approach using a GIS to classify soil degradation for Mediterranean agricultural lands [J]. *Ecological Indicators*, 2004, 4(3): 177-187.
- [18] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2005, 60(4): 542-551.
- [19] 解宪丽,孙波,郝红涛.土壤可见光-近红外反射光谱与重金属含量之间的相关性[J].土壤学报,2007,44(6):982-992.
- [20] 戴彬,吕建树,战金成,等.山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J].环境科学,2015,36(2):507-515.
- [21] Borůvka L, Vacek O, Jehlička J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils [J]. *Geoderma*, 2005, 128(3-4): 289-300.
- [22] 赵彦锋,郭恒亮,孙志英,等.基于土壤学知识的主成分分析判断土壤重金属来源[J].地理科学,2008,28(1):45-50.
- [23] Goovaerts P. *Geostatistics for natural resources evaluation* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [24] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 261: 387-397.
- [25] Rashed M N. Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 178(1-3): 739-746.
- [26] 徐友宁,张江华,刘瑞平,等.金矿区农田土壤重金属污染的环境效应分析[J].中国地质,2007,34(4):716-722.
- [27] 高彦鑫,冯金国,唐磊,等.密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价[J].环境科学,2012,33(5):1707-1717.
- [28] Qishlaqi A, Moore F, Forghani G. Characterization of metal pollution in soils under two landuse patterns in the Angouran region, NW Iran; a study based on multivariate data analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(1): 374-384.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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