

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,王翥 (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(NH ₃ 和N ₂ O)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CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 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)
甯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酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖肖翠 (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)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 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-TiO ₂ 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Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 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)	

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

(浙江农林大学环境与资源学院, 浙江省土壤污染修复重点实验室, 临安 311300)

摘要: 在温岭电子垃圾拆解较为集中的区域系统采集 90 个土壤样品, 研究土壤重金属的污染特征及空间异质性。结果表明, 土壤重金属 Cd、Cu、Zn、Pb 和 Ni 的平均含量分别为 0.38、35.13、121.38、35.40 和 28.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与背景值相比较, 这些重金属在研究区均有不同程度的累积, 与国家二级标准相比, 土壤重金属局部污染严重, 尤其土壤 Cd 污染极为明显。土壤重金属 Cd 和 Pb 属于高度变异, 其变异系数分别为 121.05% 和 109.38%, 其他重金属属于中度变异。地统计学空间插值和局部 Moran's I 指数结果表明土壤 Cd、Cu、Zn 和 Pb 的高值主要分布在大溪镇和泽国镇, 这与电子垃圾拆解和其他的人为活动有关。土壤 Ni 的分布特征主要受到土壤母质的影响。重金属污染对当地生态和居民健康存在潜在的威胁。

关键词: 电子垃圾; 重金属; 空间特征; 地统计学; Moran's I; GIS

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3151-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.042

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, DAI Wei

(Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, School of Environmental and Resources Science, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China)

Abstract: A total of 90 soil samples were collected from the study area. The spatial variation of soil heavy metals and their spatial distribution characteristics were studied. The results indicated that the mean soil concentrations of five heavy metals including Cd, Cu, Zn, Pb and Ni were 0.38, 35.13, 121.38, 35.40 and 28.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Compared with the background values in Zhejiang, the heavy metals were enriched in paddy soils of the study area. Part of study area was seriously contaminated by heavy metals. For the soil Cd, it had obvious contamination characteristics with a high $P_{i\text{Ave}}$ value (>1). The Cd, and Pb concentrations in paddy soil had strong coefficients of variance (C.V.): 121.05% and 109.38%, respectively. Soil pH and organic matter (SOM) had significant correlations with most of the total heavy metals and their available fractions in soils. The total heavy metals and their available fractions also had strong correlations, such as total Cd and available Cd in soils. Geostatistics and the Local Moran's I were used to identify the contaminated hotspots of these five metals. It was found out that the high soil Cd, Cu, Zn, Pb were located in Daxi and Zeguo towns, which could be attributed to E-waste dismantling and other anthropogenic activities. Soil Ni was mainly influenced by the parent material. The heavy metals in soils may pose a potential threat to local ecosystem and human health.

Key words: E-waste; heavy metals; spatial characteristics; geostatistics; Moran's I; GIS

随着世界人口的快速增长、工业生产规模的日趋扩大和城市化进程的不断加快, 人类对土壤的开发强度越来越大, 向土壤中排放的污染物越来越多, 土壤污染问题日益突出。在众多污染物质中, 重金属具有非生物降解性和持久性, 因而具有较高的毒性^[1~3], 土壤重金属污染已引起全世界的普遍关注, 成为国内外环境污染研究的热点问题之一^[4~6]。据报道, 我国受 Cd、Cr 和 Pb 等重金属污染的耕地面积近 2 000 万 hm^2 , 被重金属污染不能食用的粮食达到 1 200 万 t ^[7]。由于工业的发展和农业化学物质的不合理使用, 导致素有“鱼米之乡”的长江三角洲地区农业土壤重金属富集, 已不同程度地受到了 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 等重金属的污染^[8~11]。

农业产地土壤重金属污染来源广泛, 主要包括:

工业三废、污水灌溉、农业化学品的过量使用、采矿和冶炼、大气污染颗粒的沉降等。在众多重金属污染源中, 电子垃圾 (E-waste) 是一个日渐突出的重要来源。电子垃圾是电脑、打印机、电视、手机等电子产品的淘汰品, 这些产品的组成成分复杂, 如何处理电子垃圾已经成为全球性的环境问题^[12]。在中国, 每年约有 514 多万台家电和 448 万台个人电脑成为电子垃圾, 同时, 由于廉价劳动力和较宽松的环境监管, 约有 100 万 t 的电子垃圾从发达国家运至中国^[13], 使我国成为发达国家电子垃圾的主要输

收稿日期: 2016-01-14; 修订日期: 2016-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41201538); 浙江省公益性技术应用研究计划项目 (2014C32036)

作者简介: 赵科理 (1981~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为产地环境质量与食品安全, E-mail: kelizhao@zafu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: fuweijun@zafu.edu.cn

入地. 人们在电子垃圾拆解过程中利用一些简单的技术,如焚烧、熔融、泡酸等等,从中提取金以及其他一些贵金属^[14];另外,电子垃圾拆解之后就在周围环境中随意堆放,这些人为活动极易造成周围环境中重金属累积. 目前,中国的电子垃圾拆解区主要集中分布在中国的东南沿海地区. 例如,广东的汕头,浙江的台州等地,由电子垃圾拆解所产生的各类重金属污染,势必影响该拆解区的土壤环境质量,威胁农产品的安全生产.

本文以浙江省电子垃圾拆解区土壤为研究对象,采集足够的水稻田土壤样品,融合多种空间分析方法,系统分析拆解区土壤重金属的空间分布特征与变化规律,以期为指导实际产区农业安全生产提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区与采样地概况

温岭市地处浙江省东南沿海,长江地区的南翼,三面濒海,亚热带季风气候,地理坐标为东经 121°10′~121°44′,北纬 28°13′~28°32′. 主要土壤类型包括红壤、水稻土、盐土、潮土和黄壤等 5 个土类. 粮食生产以水稻为主. 温岭市既是农业生产基地也是重要工业生产加工基地. 基于前期调研,本采样区设置在温岭市电子垃圾拆解相对集中的西北乡镇区,包括:大溪镇、泽国镇、新河镇、温峤镇、城西街道和城北街道.

2013 年 10 月,在研究区系统布设 90 个水稻田土壤采样点(图 1),利用 GPS 导航和定位,采集耕层土壤样品(0~15 cm). 在每个采样点周围的 10 m 半径圆形范围内设置多个子采样点(>5 个),各子采样点用竹铲子采取耕层土壤 1 kg 左右,混匀子采样点样品.

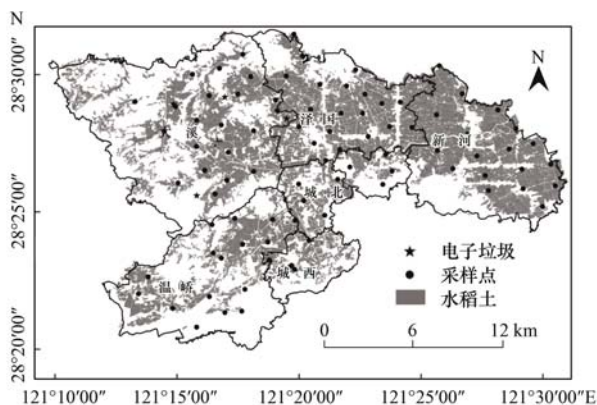


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Spatial distribution map of soil sampling sites

1.2 土壤样品测定分析

土壤样品在室温情况下自然风干,研磨过 2 mm 尼龙筛子用于土壤理化性状分析. 再从 2 mm 的土壤样品中取出一部分,用玛瑙研钵研磨过 100 目的筛子,用塑封袋装好,保存备用.

土壤理化性状的测定均采用常规分析方法^[15]. 土壤 pH 值按土水比为 1:2.5 体积比测定;土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法-外加热法;速效钾的测定采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法;有效磷的测定采用 $\text{NH}_4\text{F-HCl}$ 浸提-钼锑抗比色法;全氮的测定采用半微量开氏法;碱解氮的测定采用碱解扩散法.

土壤重金属全量的测定采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 三酸消解法,土壤重金属有效态的测定采用 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 稀盐酸提取法. 重金属 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量采用电感耦合等离子发射光谱仪 ICP-OES (Optima 7000 DV, 美国 PE 公司)进行测定.

1.3 污染评价方法

单因子污染指数法是常用的环境污染评价方法,其计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为污染物 i 的污染指数; C_i 为污染物 i 的浓度; S_i 为污染物 i 的评价标准; 若 $P_i \leq 1$, 表示土壤未受到人为污染; 若 $P_i \geq 1$, 表示土壤已经受到污染, 指数越大污染越严重.

土壤重金属污染的综合评价通常采用内梅罗综合污染指数法,其计算公式为:

$$I = \sqrt{(P_{i\text{Max}}^2 + P_{i\text{Ave}}^2)/2} \quad (2)$$

式中, I 为综合污染指数; $P_{i\text{Max}}$ 为污染物最大污染指数; $P_{i\text{Ave}}$ 为污染物污染指数平均值. 若 $I \leq 0.7$, 则属于未污染; 若 $0.7 \leq I \leq 1$, 则属于污染预警值水平; 若 $1 < I \leq 2$, 则属于轻度污染; 若 $2 < I \leq 3$, 则属于中度污染; 若 $I > 3$, 则属于重度污染.

1.4 空间自相关分析

空间自相关分析是一种研究同一变量在某一区域内的空间分布特征的方法,它可以有效检测某一变量在区域内不同空间位置上的相关性^[16]. 空间自相关系数包括全局自相关和局部自相关, Moran's I 是表示变量空间自相关性大小最常用的指标.

$$\text{全局 Moran's } I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (z_i - \bar{z}) (z_j - \bar{z})}{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} \right) \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2} \quad (3)$$

$$\text{局部 Moran's } I = \frac{z_i - \bar{z}}{\sigma^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n [W_{ij}(z_j - \bar{z})]$$

(4)

式中, $\bar{z}$ 为变量 z 的平均值; z_i 、 z_j 分别是变量在空间 i 、 j 处的数值($i \neq j$); σ^2 是变量 z 的方差; W_{ij} 是 z_i 与 z_j 之间的空间权重函数,在选定尺度内时赋予权重值 1,超过尺度时权重值为 0. Moran's I 值大于 0 表示样点具有空间集聚性,通常表现为高-高值集聚和低-低值聚. Moran's I 小于 0 表示样点是空间离散点,主要表现为高-低值离散和低-高值离散^[17].

1.5 地统计学

地统计学是以区域化变量理论为基础,以变异函数为主要工具,研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性的自然现象的科学^[18]. 其空间结构特征可用半方差函数来表征^[19, 20]. 普通克里格法是地统计学中最常用的一种无偏最优估计的插值法,利用变量原始数据和半方差函数的结构性,来估算其他位置上的区域化变量的数据^[21]. 克里格法克服了内插中误差难以分析的问题,具有不产生边界效应,能有效估测变量的空间变异分布等优点. 该方法要求数据符合正态分布,根据峰度、偏度结合 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 联合法检验,土壤重金属 Zn 和 Ni 符合正态分布,土壤 Cd、Cu 和 Pb 则不符合正态分布,因此对其进行对数转换,转换后较好地符合正态分布,可用于克里格空间插值.

析取克里格可以估计在未取样位置变量超过指定阈值的可能性^[22]. 其公式为:

$$\Omega[z(x_0) \geq z_c] \approx P[z(x_0) \geq z_c | z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_N)]$$

(5)

式中,随机变量 $z(x)$, x 表示两个维度的空间坐标. 定义一个阈值浓度 z_c ,将其分割为两类,定义为判断

预测值的标准,将 0 和 1 分配给这两类,作为二进制变量或指标,用 $\Omega[z(x_0) \geq z_c]$ 表示. 对任意点 x_0 近似条件概率的估测值 $z(x_0)$ 等于或超过 z_c ^[23]. 利用析取克里格描绘潜在污染区域.

1.6 数据的软件处理

采用 Microsoft Office Excel 2007 和 SPSS 18.0 对实验数据进行整理、计算和描述性统计分析;利用 Geoda0. 9. 5-i 识别高低值空间异常值和计算自相关系数;利用 ArcGIS 9. 2 对数据进行空间插值和图件制作.

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量及其富集效应

表 1 是研究区土壤重金属含量的描述性统计分析结果. 土壤中 Cd 的含量为 0. 13 ~ 3. 46 mg·kg⁻¹, 平均值为 0. 38 mg·kg⁻¹; 其余重金属 Cu、Zn、Pb、Ni 的平均值分别为 35. 13、121. 38、35. 40、28. 13 mg·kg⁻¹. 其中,Cd、Pb、Cu 和 Zn 的平均含量显著高于浙江省其他典型水稻产区(南浔和嵊州)^[24],与浙江省土壤背景值^[25]相比较发现,除 Ni 外,其余重金属 Cd、Cu、Zn、Pb 均值都已超过土壤背景值,尤其是 Cd,超过背景值 3 倍多.

土壤重金属 Cd、Cu、Zn、Pb 和 Ni 的变异系数分别为 121. 05%、62. 88%、23. 61%、109. 38%、和 43. 8%. 根据 Fu 等^[26]对变异程度的分类,变异系数 < 10% 表示弱变异,10% ~ 90% 表示中等变异,> 90% 表示高度变异. Cd 和 Pb 元素属于高度变异,Cu、Zn 和 Ni 元素均属于中等变异,其中 Cd 的最大值是背景值的 20 倍多,Pb 的最大值是背景值的 10 倍多,表明研究区某些地方的土壤已经呈现高度的 Cd、Pb 富集累积特征. 土壤 Cu 和 Zn 也表现了不同程度的富集特征,最大值超过背景值数倍.

表 1 土壤重金属描述统计分析/mg·kg⁻¹

Table 1 Descriptive statistics for heavy metals in soil/mg·kg⁻¹

元素	均值	标准差	极大值	极小值	变异系数/%	背景值	标准值
Cd	0. 38	0. 46	3. 46	0. 13	121. 05	0. 13	0. 30
Cu	35. 13	22. 09	168. 5	14. 51	62. 88	30. 54	100. 00
Zn	121. 38	28. 66	206. 63	68. 04	23. 61	107. 79	300. 00
Pb	35. 40	38. 72	342. 08	10. 92	109. 38	30. 46	350. 00
Ni	28. 13	12. 32	64. 77	3. 80	43. 80	36. 48	60. 00

2.2 土壤重金属污染评价

本研究中,土壤 pH 平均值为 5. 67,属于酸性土壤,据此,以浙江省土壤重金属背景值和《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)中二级 pH < 6. 5 的含量限值分别作为重金属累积和污染判断

阈值.

以浙江省土壤重金属背景值为评价标准,土壤 Cd 的污染指数平均值 $P_{i Ave}$ 最大,为 2. 92,其次为 Pb、Cu、Zn 和 Ni,污染指数分别为 1. 16、1. 15、1. 13 和 0. 77(表 2),在所研究的重金属中,Cd 超过

背景值的样品数最多,超标率为 98.41%,其次是 Zn,超标率为 65.56%,其他重金属也有不同程度的超标,表明该研究产区土壤重金属累积明显. 与国家二级标准值相比,土壤 Cd 的污染指数平均值 $P_{i Ave}$ 仍然大于 1,表明该区域土壤受 Cd 污染比较严重,其余 4 种重金属元素的污染指数平均值 $P_{i Ave}$ 均未超过 1. 部分土壤样品的 Cd 和 Cu 含量超过二级标准限值,超标率分别为 35.48% 和 3.33%,由此可见,研究区的局部地区土壤已经受到了 Cd 和 Cu 重金属污染. 张金莲等^[27]的研究发现,广东清远地区电子垃圾拆解区周围农田重金属污染较为严重,其中尤以重金属 Cd 和 Cu 污染比例高. 与本研究

结果较为一致.

表 3 为内梅罗综合污染指数评价结果. 以国家二级标准值评价,清洁、尚清洁(警戒线)、轻度污染、中度污染和重度污染比例分别为 42%、38%、14%、4% 和 2%,研究区土壤重金属污染程度主要属于清洁和警戒线等级,占总样品数的 80%,其次为轻污染等级,还有少量样品污染程度达到中度污染和重度污染. 从单因子评价和内梅罗综合污染指数评价结果来看,温岭电子垃圾拆解区的土壤几乎全都已存在重金属 Cd、Zn、Pb、Cu 和 Ni 的累积,局部污染严重,清洁安全田地比例偏低,农田安全生产已经受到威胁.

表 2 研究区土壤重金属单因子污染指数评价结果

Table 2 Evaluation results of single factor pollution index for soil heavy metals in the study area

元素	以浙江土壤背景值为参考				以国家二级标准为参考			
	平均值	最小值	最大值	超标率/%	平均值	最小值	最大值	超标率/%
Cd	2.92	0.98	26.79	98.41	1.25	0.42	11.52	35.48
Cu	1.15	0.48	5.52	41.11	0.35	0.15	1.68	3.33
Zn	1.13	0.63	1.92	65.56	0.40	0.23	0.69	0
Pb	1.16	0.36	11.23	43.33	0.10	0.03	0.98	0
Ni	0.77	0.1	1.78	28.89	0.47	0.06	1.08	1.11

表 3 研究区重金属污染评价结果/%

Table 3 Evaluation results of soil heavy metal pollution in the study area/%

标准	清洁 $I < 0.7$	警戒线 $0.7 < I < 1$	轻度污染 $1 < I < 2$	中度污染 $2 < I < 3$	重污染 $I > 3$
国家二级	42	38	14	4	2

2.3 相关性分析

利用 Spearsman 相关系数矩阵,分析土壤重金属与理化性状之间的相关性(表 4). pH 与 Pb 及 Zn_{有效态} 存在显著负相关关系, pH 与 Ni 存在极显著正相关. 土壤有机质与 Zn、Pb 及其有效态存在显著正相关关系,与 Cd 存在显著负相关关系. 可以看出土壤 pH 与土壤有机质对重金属的含量和活性存在强相关关系,与前人总结^[28, 29] 的土壤 pH 和有机质是影响土壤重金属活性和植物吸收的重要因素较为一致. 除了 pH 和有机质外,土壤其他因子如 N、P、K 也对重金属活性存在一定影响,表明土壤重金属在土壤里的活性和被吸收难易受土壤 pH、有机质、氮、磷、钾等各种理化性质影响.

重金属全量和其有效态存在极显著正相关,其中 Cd 全量和 Cd_{有效态} 的相关系数最高,说明土壤 Cd 的活性最强,易于被水稻植株吸收^[28]. 从重金属 Cd、Pb、Cu、Zn 和 Ni 的相关关系可以看出,重金属之间的关系存在一定的相关性,重金属元素间的形态和含量也会互相影响其他元素的形态和含量,土

壤是一个复杂的生态系统,土壤重金属的存在形态和迁移也都受各种因素影响,Cu 和 Zn、Ni 存在极显著正相关, Zn 和 Pb、Ni 存在显著正相关,这类重金属之间的显著相关性指示了人类活动的影响^[30],说明这几种重金属污染源极可能相同.

2.4 土壤重金属的空间自相关特征

全局 Moran's I 值表明土壤重金属全量都有显著空间自相关性(图 2),其中 Pb 和 Ni 的全局 Moran's I 值高于其他元素,呈现极显著空间自相关性($P < 0.01$)^[26].

局部 Moran's I 空间分布特征揭示土壤 Cd、Cu、Zn 的高值集聚区主要集中在研究区的北部, Ni 的高值集聚区在研究区的东北部, Pb 的高值集聚区在研究区的西北部(图 2). Ni 的低值集聚区出现在研究区西部, Zn 的低值集聚区出现在研究区南部的温峤镇, Cu 的低值集聚区出现在研究区西部,根据调查发现,在高值集聚区出现的低值空间异常值主要是由于当地地貌和发展程度及模式影响,在低值集聚区出现的高值空间异常值主要是由于当地的小

片地区电子拆解厂微集聚造成的点源影响,土壤的重金属集聚主要受外界人为活动的影响。

表 4 研究区重金属与土壤理化性状的非参数相关关系¹⁾

Table 4 Non-parametric correlations between soil heavy metals and soil properties in the study area									
	pH	有机质	全磷	全氮	速效钾	有效磷	碱解氮	Cu	Zn
pH									
有机质	—								
全磷	—	—							
全氮	—	0.835 **	—						
速效钾	0.459 **	—	—	—					
有效磷	—	-0.282 **	0.658 **	-0.227 *	—				
碱解氮	—	0.688 **	—	0.589 **	-0.243 *	-0.253 *			
Cu	—	—	—	—	—	—			
Zn	—	0.220 *	—	0.236 *	—	—	—	0.692 **	
Pb	-0.401 **	0.323 **	—	0.264 *	-0.551 **	—	0.356 **	—	0.228 *
Cd	—	-0.283 *	—	-0.253 *	—	—	-0.306 *	—	—
Ni	0.341 **	—	—	—	0.678 **	-0.332 **	—	0.327 **	0.222 *
Cu _{有效态}	—	—	—	—	—	—	—	0.772 **	0.559 **
Zn _{有效态}	-0.227 *	0.407 **	—	0.299 **	-0.452 **	—	0.301 **	0.338 **	0.426 **
Pb _{有效态}	—	0.371 **	-0.258 *	0.221 *	-0.509 **	—	0.401 **	—	—
Cd _{有效态}	—	—	—	—	—	—	-0.266 *	0.255 *	—
Ni _{有效态}	—	0.259 *	—	0.243 *	0.458 **	-0.329 **	—	0.385 **	0.366 **
	Pb	Cd	Ni	Cu _{有效态}	Zn _{有效态}	Pb _{有效态}	Cd _{有效态}	Ni _{有效态}	
Cd	—								
Ni	-0.636 **	—							
Cu _{有效态}	—	—	0.310 **						
Zn _{有效态}	0.653 **	—	-0.457 **	0.332 **					
Pb _{有效态}	0.623 **	—	-0.528 **	—	0.583 **				
Cd _{有效态}	—	0.961 **	—	—	—	—			
Ni _{有效态}	-0.265 *	—	0.657 **	0.409 **	—	-0.286 **	—		

1) “**”、“*”、“—”分别表示 0.01 显著性水平、0.05 显著性水平、相关系数不显著

2.5 土壤重金属的结构特征

使用地统计方法对样品数据进行半方差函数拟合,并选择最优模型.研究区土壤重金属全量 Cd 和 Ni 符合指数模型,Cu 和 Pb 符合高斯模型,Zn 符合球状模型(表 5).块基比 $[C_0/(C_0+C)]$ 表示随机部分引起的空间变异性在总变异中所占的比重,可以用来度量所研究变量的空间相关性强弱.若比值 $<25\%$,则表明变量具有强空间自相关性;比值在 $25\% \sim 75\%$ 之间,则为中度空间相关性;比值 $>75\%$,则表示弱空间自相关性^[29].变程是半方差函数的另一重要参数,其反映在一定尺度

下,空间自相关性的作用范围.有研究发现,AIC 值越小, RMSE 值越接近 0,表明半方差函数模型拟合越好^[31,32].土壤全量 Ni 的块基比为 0.079 (<0.25),变程值为 34.37 km,说明 Ni 的空间变异主要受结构性因素比如成土母质等的影响,表现出较强的空间格局特征.其他重金属 Cd、Cu、Zn、Pb 的块基比处在 $0.25 \sim 0.75$ 之间,属于中等程度空间相关性,且变程较短,说明 Cd、Cu、Zn、Pb 的空间变异受结构性因素和随机性因素共同作用影响,电子垃圾拆解厂的污染源排入等工业活动削弱了其空间相关性^[33,34].

表 5 研究区土壤重金属浓度的变异函数理论模型及其相关参数

Table 5 Summary of the theoretical semivariogram models and the corresponding parameters for soil heavy metals in the study area								
重金属	分布类型	理论模型	块金值 (C_0)	偏基台值 (C)	变程/km	块基比 [$C_0/(C_0+C)$]	RMSE	AIC
Cd	对数正态	指数模型	0.946	1.471	17.87	0.391	0.006	-95.12
Cu	对数正态	高斯模型	0.004	0.007	9.61	0.364	0.002	-116.70
Ni	正态	指数模型	6.795	79.456	34.37	0.079	0.012	-90.81
Zn	对数正态	球状模型	0.034	0.032	17.02	0.515	0.057	-144.5
Pb	正态	高斯模型	0.003	0.008	5.48	0.273	0.006	-92.82

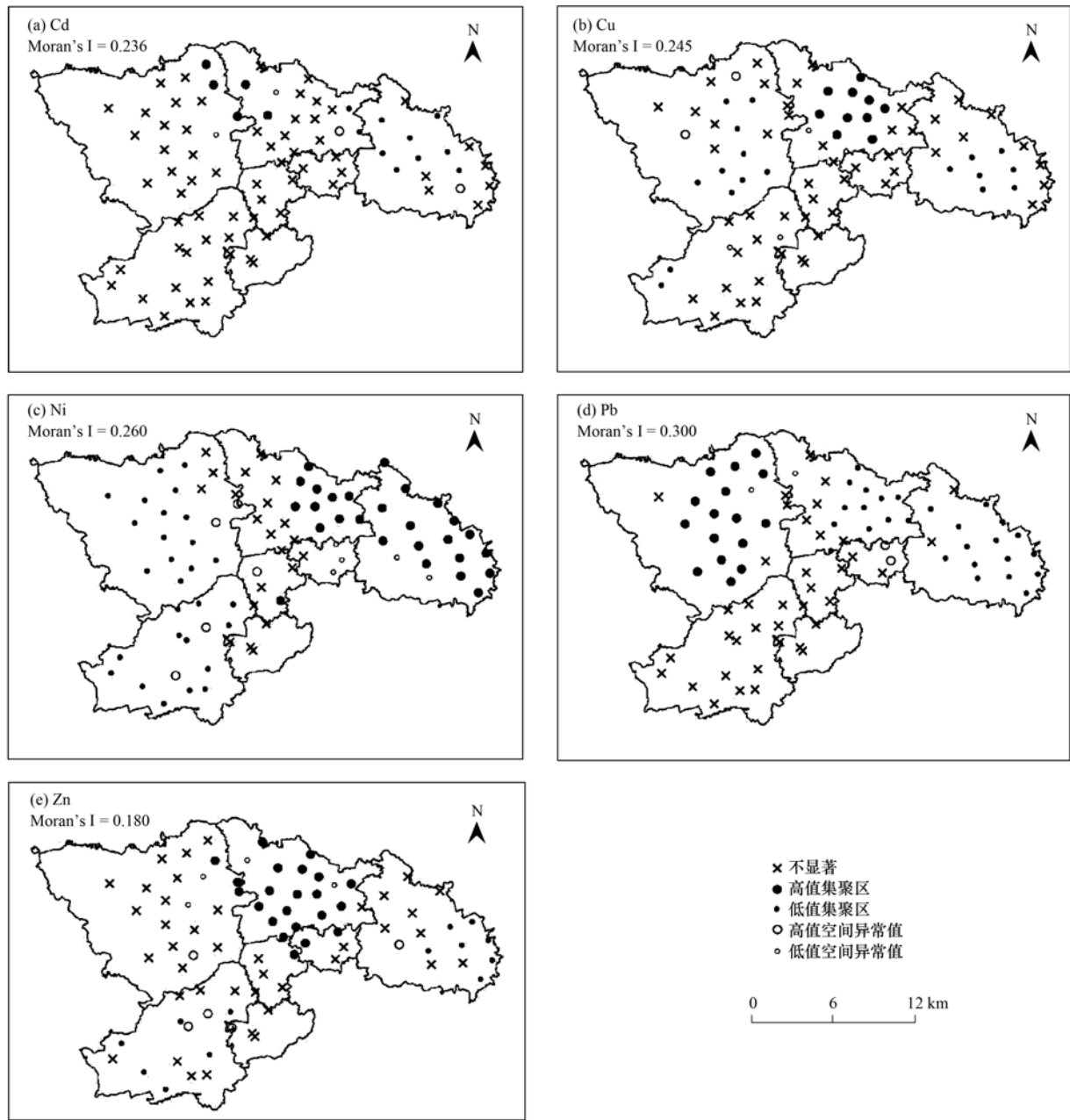


图2 土壤中Cd、Cu、Ni、Pb和Zn浓度的LISA局部空间自相关类型

Fig. 2 Local indicators of spatial association in terms of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn concentrations in soil

2.6 土壤重金属空间分布格局

通过普通克里格插值,绘制重金属全量的空间分布图(图3). 土壤重金属全量Cd和Pb的空间分布特征较为相似,在研究区的西北部含量高,东北部和南部相对较低,呈现自西北向东南递减趋势;土壤Cu在研究区北部和南部较高,西部和东部较低,呈现中部向东、西递减趋势;Zn是北部高南部低的空间分布特征,呈现自北向南递减趋势;Ni在研究区东北部含量高,其他地区都较低,呈现局部高度集聚特征. 土壤重金属Cd、Cu、Zn和Pb的高值主要

分布在大溪镇和泽国镇,这与大溪镇、泽国镇是电子垃圾拆厂集中区有关. 酸液的排放和重金属垃圾的堆积都会对周边土壤造成重金属集聚影响,电子产品种类的多样和拆解厂的类聚导致上述两镇Cd、Cu、Zn和Pb含量高;此外,电子垃圾通常含有几种重金属,造成土壤复合污染,不受监管加工和处理的电子垃圾通过一些简单的方法如燃烧和熔化能获得有价值的金属,结果,重金属进入环境在土壤中富集^[27]. 其分布特征与Moran's I所揭示的空间格局结果较为一致.

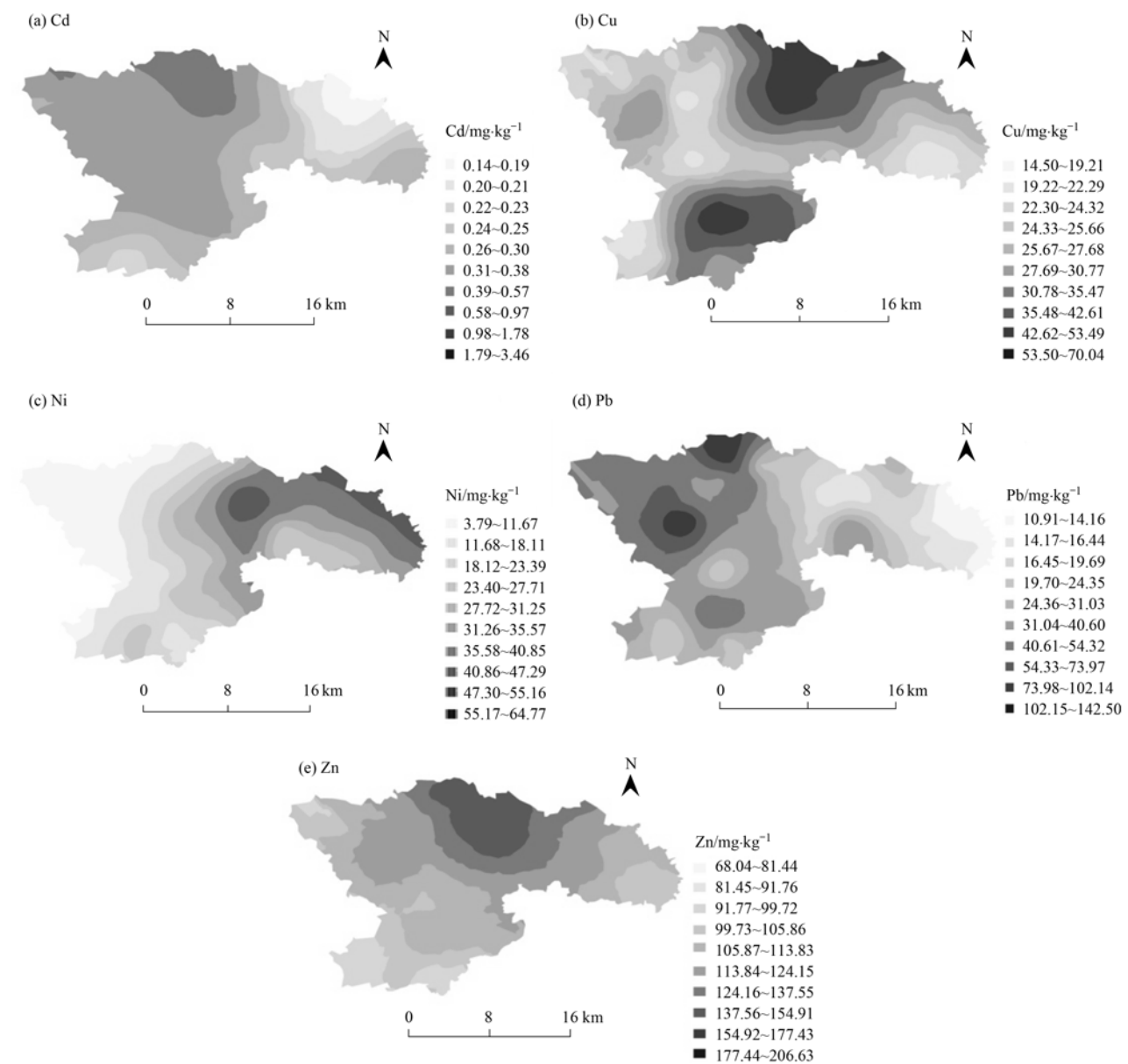


图3 土壤重金属含量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the heavy metals concentrations in soil

图4为研究区重金属超过标准值估计概率. 根据土壤环境质量标准,当土壤中Cd含量超过 $0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,将导致环境污染,最终威胁植物和人体健康. Cd高风险区分布北部,其估计概率 $\Omega[\text{Cd}\geq 0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 达到 $0.69\sim 0.87$,说明Cd的潜在风险极高. Zn超过标准值 $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 概率的高风险区分布在北部,Pb超过标准值 $350\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 概率的高风险区分布在西北部,高风险区主要分布在泽国、大溪一带,主要受当地电子垃圾拆解厂的影响,造成土壤重金属集聚^[27],高风险地区应当引起重视,加强防范和管理,注重农产品生产安全.

3 结论

- (1)与浙江省土壤重金属背景值相比,研究产区土壤重金属Cd、Cu、Ni、Pb和Zn均有不同程度的累积特征,表现出一定的污染特征. 与国家二级标准相比,研究区局部土壤Cd和Cu污染较为严重,电子垃圾拆解工业排入的污染物是土壤重金属污染的重要来源.
- (2)土壤重金属的含量与土壤理化性质如pH、SOM存在显著相关性,表明土壤理化性质对土壤重金属的积累与活性有着重要影响.

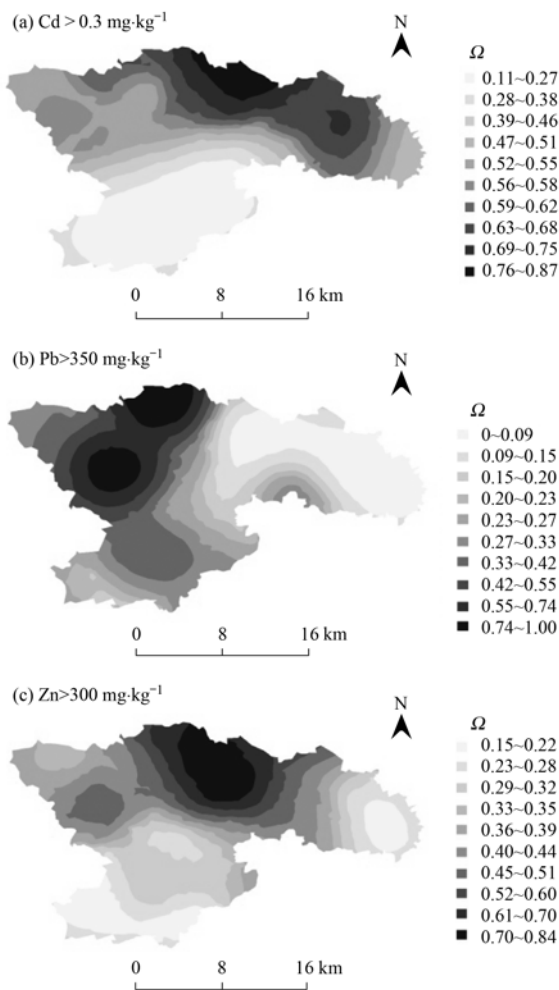


图4 土壤重金属 Cd、Pb 和 Zn 估计概率

Fig. 4 Estimated probability map of Cd, Pb and Zn distribution in soil

(3) 研究区土壤重金属具有明显的空间格局特征,高值主要分布在西北部泽国镇和大溪镇一带。根据析取克里格分析,电子垃圾拆解集中及工业活动活跃的区域,也是重金属污染高风险区,重金属积累威胁人体健康的潜在风险较大,因此应加强监控和防治。

参考文献:

- [1] Raghunath R, Tripathi R M, Kumar A V, *et al.* Assessment of Pb, Cd, Cu, and Zn exposures of 6-to 10-year-old children in Mumbai[J]. *Environmental Research*, 1999, **80**(3): 215-221.
- [2] Adriano D C. Trace elements in the terrestrial environments [M]. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [3] Tembo B D, Sichilongo K, Cernak J. Distribution of copper, lead, cadmium and zinc concentrations in soils around Kabwe town in Zambia[J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(3): 497-501.
- [4] Li X D, Lee S L, Wong S C, *et al.* The study of metal contamination in urban soils of Hong Kong using a GIS-based approach[J]. *Environmental Pollution*, 2004, **129**(1): 113-

124.

- [5] Huang P M, Gobran G R. Biogeochemistry of trace elements in the rhizosphere [M]. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 2005.
- [6] Violante A, Huang P M, Gadd G M. Biophysico-chemical processes of heavy metals and metalloids in soil environments [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2008.
- [7] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. *生态学报*, 2001, **21**(7): 1196-1203.
- [8] 李恋卿, 潘根兴, 张平究, 等. 太湖地区水稻土表层土壤 10 年尺度重金属元素积累速率的估计[J]. *环境科学*, 2002, **23**(3): 119-123.
- [9] 袁旭音, 陶于祥, 王润华, 等. 湖州市不同土壤重金属的污染现状[J]. *上海地质*, 2002, (3): 6-11.
- [10] 章明奎, 王美青. 杭州市城市土壤重金属的潜在可淋洗性研究[J]. *土壤学报*, 2003, **40**(6): 915-920.
- [11] Liu X M, Wu J J, Xu J M. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **141**(2): 257-264.
- [12] 王颖, 马贵. 电子垃圾处理研究现状及对策[J]. *环境科技*, 2011, **24**(S): 127-129.
- [13] Zhang J H, Min H. Eco-toxicity and metal contamination of paddy soil in an E-wastes recycling area [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **65**(1-3): 744-750.
- [14] Fu J J, Zhou Q F, Liu J M, *et al.* High levels of heavy metals in rice (*Oryza sativa* L.) from a typical E-waste recycling area in southeast China and its potential risk to human health [J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(7): 1269-1275.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005. 25-99.
- [16] 赵龙山, 张青峰, 梁心蓝, 等. 基于 Moran's I 指标的黄土坡耕地填注量的空间自相关性研究[J]. *土壤*, 2011, **43**(3): 446-452.
- [17] Zhao K L, Fu W J, Liu X M, *et al.* Spatial variations of concentrations of copper and its speciation in the soil-rice system in Wenling of southeastern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(11): 7165-7176.
- [18] Webster R, Oliver M A. Geostatistics for environmental scientists [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [19] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives[J]. *Geoderma*, 1999, **89**(1-2): 1-45.
- [20] Liu X M, Xu J M, Zhang M H, *et al.* Spatial variability of soil available Zn and Cu in paddy rice fields of China [J]. *Environmental Geology*, 2008, **55**(7): 1569-1576.
- [21] Fu W J, Tunney H, Zhang C S. Spatial variation of soil test phosphorus in a long-term grazed experimental grassland field [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, **173**(3): 323-331.
- [22] Zhao K L, Fu W J, Ye Z Q, *et al.* Contamination and spatial variation of heavy metals in the soil-rice system in Nanxun county, southeastern China [J]. *International Journal of*

- Environmental Research and Public Health, 2015, **12**(2): 1577-1594.
- [23] von Steiger B, Webster R, Schulin R, *et al.* Mapping heavy metals in polluted soil by disjunctive kriging[J]. Environmental Pollution, 1996, **94**(2): 205-215.
- [24] 赵科理, 傅伟军, 戴巍, 等. 浙江省典型水稻产区土壤-水稻系统重金属迁移特征及定量模型[J]. 中国生态农业学报, 2016, **24**(2): 226-234.
- [25] 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.
- [26] Fu W J, Zhao K L, Zhang C S, *et al.* Using Moran's I and geostatistics to identify spatial patterns of soil nutrients in two different long-term phosphorus-application plots[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, **174**(5): 785-798.
- [27] 张金莲, 丁疆峰, 卢桂宁, 等. 广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2633-2640.
- [28] Kirkham M B. Cadmium in plants on polluted soils: effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments [J]. Geoderma, 2006, **137**(1-2): 19-32.
- [29] Cambardella C A, Moorman A T, Parkin T B, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, **58**(5): 1501-1511.
- [30] 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.
- [31] 龙军, 张黎明, 沈金泉, 等. 复杂地貌类型区耕地土壤有机质空间插值方法研究[J]. 土壤学报, 2014, **51**(6): 1270-1281.
- [32] 罗幼喜, 田茂再. 面板数据的分位回归方法及其模拟研究[J]. 统计研究, 2010, **27**(10): 81-87.
- [33] 魏志远, 郭彬, 漆智平. 海南省文昌市水稻土重金属污染评价[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(35): 17616-17619.
- [34] 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1139-1146.

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-ning, 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