

石娟娟,赵艳玲,何厅厅,等. 金矿区土壤铅和铜空间结构及变异规律[J]. 江苏农业科学,2014,42(7):373-376.

# 金矿区土壤铅和铜空间结构及变异规律

石娟娟,赵艳玲,何厅厅,刘亚萍,王亚云,冉艳艳

[中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所,北京 100083]

**摘要:**以某金矿区周边土壤重金属 Pb、Cu 为研究对象,采用 GIS、地统计学相结合的方法对该研究区土壤重金属的空间结构及变异规律进行研究。结果表明:Pb、Cu 含量均值分别为 713.358、108.828 mg/kg,两者的变异系数均大于 1,属于强变异。Pb、Cu 的空间分布相关系数为 0.978,达到极显著相关水平,表现出极强的协同作用。Pb、Cu 的含量分布均不符合正态分布,经对数变换后,K-S 值大于 0.05,且 P-P 图上 2 种重金属的特征数据均呈现直线趋势。Pb、Cu 存在半方差结构,且二者的最优拟合模型分别为指数模型、球状模型。Pb、Cu 的变程分别为 450、236 m,Pb 的变异程度强于 Cu。二者的块基比分别为  $0.51 \times 10^{-3}$ 、 $0.11 \times 10^{-2}$ ,均小于 0.25,说明二者有很强的空间自相关性。Pb 含量呈团状分布,Cu 含量呈条带状分布,均表现出东南高、西北低的特征。

**关键词:**空间结构;空间插值;空间自相关性;重金属污染

**中图分类号:** X53;S127;X753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)07-0373-03

土壤重金属容易通过扬尘、植物、人类活动等途径进入人体,从而严重影响人类健康。除此之外,重金属污染还具有环境危害持久性、地球化学循环性、生态风险性等<sup>[1-3]</sup>。矿山开采是重金属污染的重要来源,矿山开发过程中产生的大量废弃物如尾矿、废石随处堆放,不仅占用大量土地,而且破坏堆置场原有的生态环境<sup>[4-5]</sup>。研究矿区重金属的空间结构及分布特征对于制定重金属污染修复方案、提高土壤利用率具有重要意义。重金属在土壤中的分布是不均一的、连续变化的,具有高度的空间变异性。传统的统计分析方法通常将土壤看作是一个独立的均质区域,通过土壤的统计数据来描述土壤的空间变异,因此存在较多局限性。地统计学能定量描述区域化变量空间的变异特征,克里格插值能可视化土壤特性空间分布格局,并为其空间预测提供最优无偏估计<sup>[6]</sup>。Pb、Cu 是土壤重金属空间变异研究的重要对象。刘琼峰等对城郊农田土壤 Pb、Cd 的空间变异性研究发现,城市中人类活动在一定空间尺度内对近郊区农田土壤 Pb、Cd 含量有较大的影响,通过半方差函数分析,发现空间变异由结构性因素、随机因素共同作用<sup>[7]</sup>。白晓宇等对铜陵矿区土壤重金属元素的空间变异研究发现,铜陵矿区土壤重金属 As、Cd、Pb、Zn 元素的变异函数表现为各向异性,其方向性主要受矿床分布控制<sup>[8]</sup>。本研究以金矿区周边土壤重金属 Pb、Cu 为材料,利用 GIS、地统计学分析方法对该矿区 Pb、Cu 的空间结构及变异规律进行分析,以期为该矿区 Pb、Cu 污染治理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

该研究区属暖温带大陆性雨热同季的季风性干旱气候,

温差较大,降水较少,气候比较干燥。受成土母质、外界环境影响,该区的土壤结构和类型差别较大,由南向北大体可分为棕壤、褐土、沙黏土、垆土 4 种土壤。

### 1.2 样品采集与分析

采用网格法布设采样点,采集耕作层(0~20 cm)的土壤样品,除去杂草、草根、砾石等杂物。每采样点以 1 点为中心,在周围 50 m 范围内采集 3 处子样,通过混合四分法,保留 1 kg 样品,装入布袋。采样、样品保存、样品处理过程中均采用非金属容器,避免样品污染。布设土壤采样点时综合考虑研究区成土母质、土壤类型、地形条件等因素,采用网格法、分层抽样法进行设计。野外样品采集过程中利用 1:50 000 地形图、GPS 进行定位,并根据实地情况进行调整,共获得 46 个土壤样点(图 1)。

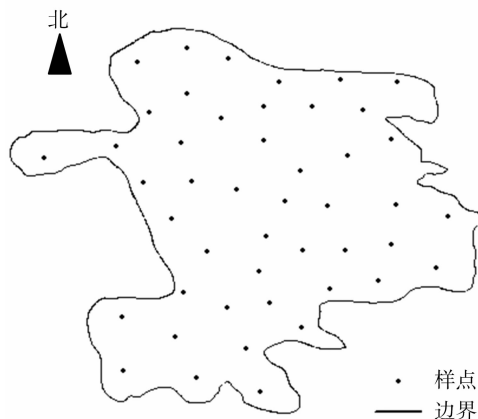


图1 研究区域采样点分布

采集的土壤样品经自然风干后,用木棒研碎,过 20 目筛。室内用高铝钵粉碎均匀,待样品粒度达到一定程度后过 100 目筛。采用等离子体质谱法(ICP-MS)测定土壤样品中 Pb、Cu 2 种重金属的含量。测定结果如表 1 所示。

### 1.3 方法

地统计学也被称为地质统计学,是以具有空间分布特点

收稿日期:2013-10-24

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(编号:NCET-12-0964)。

作者简介:石娟娟(1987—),女,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事国土资源遥感研究。E-mail:sjj090312@163.com。

的区域化变量理论为基础,以半方差函数为基本工具,运用克里格插值法,对自然现象的空间变异问题进行分析研究<sup>[9]</sup>。本研究采用 SPSS19.0 软件对 Pb、Cu 的空间含量分布进行正态分布检验并剔除异常值,采用 GS + 9.0 进行模型最优拟合,最后在 ArcGIS9.3 软件中应用 Kriging 插值模块,输入拟合参数,内插生成土壤中 Pb、Cu 的空间含量分布图。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量的经典统计分析

经数据检查、特异值剔除等预处理后,采用 SPSS19.0 软件进行描述性统计分析、正态分布检验(表 1)。结果显示,Pb、Cu 含量差异极大。Pb 含量均值为 713.358 mg/kg,介于 35.81 ~ 6 314.65 mg/kg 之间。Cu 含量均值为 108.828 mg/kg,介于

23.21 ~ 664.24 mg/kg。Pb 超出 Cu 近 6 倍。与《土壤环境质量标准》(GB/T15618—1995)(二级)相比,Pb、Cu 平均含量均高于国家标准(Pb 350 mg/kg,Cu 100 mg/kg)。Pb、Cu 二级以上采样点分别占总数的 34.78%、26.09%,说明研究区重金属 Pb、Cu 污染严重,这主要是由于金矿长期开采、冶炼、不合理堆积造成的。由表 1 可知,2 种重金属均不符合正态分布。对其进行对数变换,消除可能存在的比例效应,K-S 值分别为 0.372、0.225,均大于 0.05,P-P 图上二者特征数数据均呈现直线趋势,说明对数变换后的数据符合正态分布(图 2)。Pb、Cu 的变异系数分别为 1.807、1.373,根据变异系数划分,当  $CV < 0.1$  时,表现为弱变异性;当  $0.1 < CV < 1.0$  时,表现为中等变异性;当  $CV > 1.0$  时,表现为强变异性<sup>[10-11]</sup>。两者均属于强变异且 Pb 的变异程度大于 Cu。

表 1 土壤重金属 Pb、Cu 的描述性统计

统计特性	均值	标准差	最小值	最大值	偏度	峰度	变异系数	K-S 值
Pb	713.358	1 288.834	35.81	6 314.65	2.999	9.379	1.807	0
Cu	108.828	149.411	23.21	664.24	2.476	5.587	1.373	0
LogPb	2.415	0.586	1.55	3.80	0.702	-0.357	0.243	0.372
LogCu	1.800	0.406	1.37	2.82	1.149	0.350	0.225	0.225

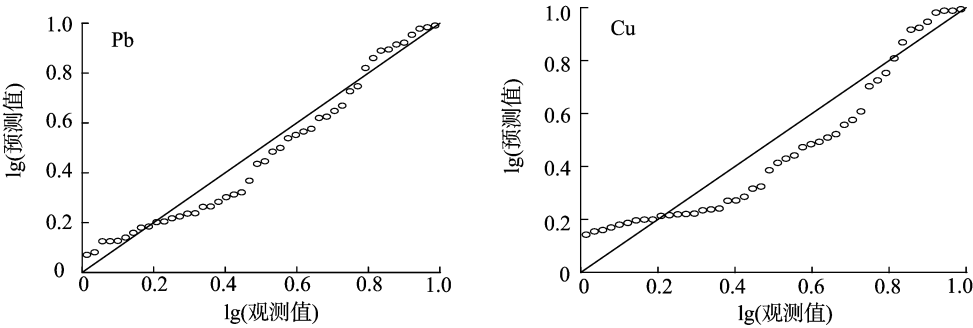


图2 土壤重金属Pb、Cu的P-P分布图

2.2 土壤重金属的空间变异分析

半方差函数是地质统计分析特有的函数,是分析变量空间结构变异的主要工具。土壤重金属空间变异性的差异主要表现方式有两种:变程、块基比。变程反映了土壤性质空间变异特性。在变程以外,土壤性质具有空间独立性;在变程以内,土壤重金属是空间非独立的;变程越大,空间的自相关程度就越大<sup>[12]</sup>。块基比是指块金值( $C_0$ )/基台值( $C + C_0$ ),其中块金值( $C_0$ )表示由于试验误差和小于试验采样尺度所引起的变异,不同重金属的块金值之间不具有可比性<sup>[13-14]</sup>。基台值( $C + C_0$ )表示重金属含量在空间的最大变异,其值越大表明总的空间变异程度越高,但由于它受自身因素及测量单位的影响较大,不同重金属的基台值不具有可比性<sup>[15]</sup>。所以

一般采用块金值与基台值的比值来衡量空间相关程度的尺度,该值越高,说明由随机部分引起的空间变异性程度较大;相反,由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大<sup>[16]</sup>。采用地统计学软件 GS + 9.0 计算 Pb、Cu 的半方差值。分别用线性、球状、指数、高斯模型进行拟合,得知 Pb、Cu 的最优拟合模型分别为指数型、球状型。由表 2 可知,Pb、Cu 的变程分别为 450、236 m,说明 Pb 的空间自相关性强于 Cu。Pb、Cu 的块基比均较小,说明 Pb、Cu 的空间自相关性均较强,且 Pb 强于 Cu。由此可知,2 种表现空间变异性差异的方式得出的结论一致,Pb 的相关性强于 Cu。如图 3 所示,在采样尺度范围内,2 种重金属的分布均表现出一定的空间相关性,说明取样尺度满足空间变异分析的要求。

表 2 研究区土壤重金属 Pb、Cu 半方差特征参数表

重金属	理论模型	块金值 $C_0$	基台值 $C + C_0$	块基比 $C_0 / (C + C_0)$	变程 $R$ (m)	决定系数 $r^2$	残差 RSS
Pb	指数型	0.001	1.956	$0.51 \times 10^{-3}$	450	0.774	0.391
Cu	球状型	0.001	0.887	$0.11 \times 10^{-2}$	236	0.771	0.088

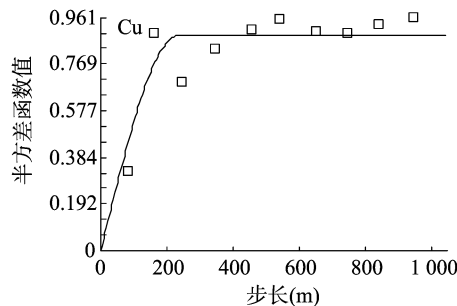
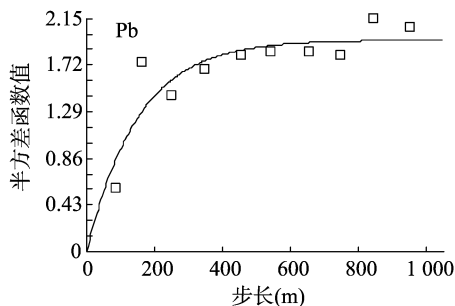


图3 重金属Pb、Cu的半方差函数

### 2.3 土壤重金属的空间插值分析

Kriging 插值是一种空间局部估计方法,在综合考虑变量的随机性及结构性基础上,根据采样点的监测数据、采样点的相互位置关系及半方差函数模型来估测未知区域的监测值<sup>[7]</sup>。本研究采用 Kriging 中的泛克里格插值对研究区的重金属 Pb、Cu 进行空间插值分析。由图 4 可知,Pb 的含量主要呈团状分布,Cu 的含量主要呈条带状分布,且东南地区的含量相对较高,西北地区的含量相对较低,空间分布变异主要发

生在东南-西北方向。Pb、Cu 的高值区分布在山前冲积斜源地区,这与该区的矿业活动密切相关。该区分布选(冶)厂、尾矿库、氧化池以及随意堆放的尾矿渣。2 种重金属在其他地区的含量随着距离矿业污染源的远近呈现规律性变化。在河流冲积平原区 Pb、Cu 的含量最低,该区距离东南地区的矿业污染源较远而且研究区西北角金矿选矿厂较少,矿业活动强度低。由图 4 可知,Pb 分布图中的图斑数目明显多于 Cu,这是由于 Pb 的块基值小,相对于 Cu 来说空间变异性较强。

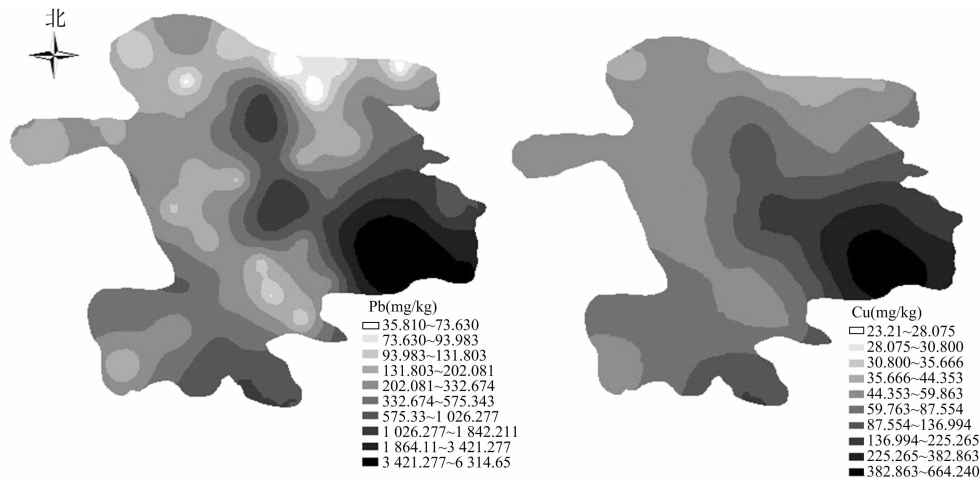


图4 土壤重金属Pb、Cu含量的空间分布

## 3 结论

本研究结果表明,Pb、Cu 含量均值分别为 713.358、108.828 mg/kg,均超过了国家土壤环境二级标准。两者的变异系数均大于 1,属于强变异。Pb、Cu 的空间分布相关系数为 0.978,达到极显著相关水平,表现出极强的协同作用,而非拮抗。Pb、Cu 的含量分布均不符合正态分布,经对数变换后,K-S 值大于 0.05,且 P-P 图上 2 种重金属的特征数据均呈现直线趋势,说明对数转换后的数据符合正态分布,可用于地统分析。Pb、Cu 存在半方差结构,且二者的最优拟合模型分别为指数模型、球状模型。Pb、Cu 的变程分别为 450、236 m,Pb 的变异程度强于 Cu。二者的块基比分别为  $0.51 \times 10^{-3}$ 、 $0.11 \times 10^{-2}$ ,均小于 0.25,说明二者有很强的空间自相关性,表明 Pb、Cu 的含量分布主要受人为活动的影响。Pb 含量呈团状分布,Cu 含量呈条带状分布,均表现出东南高、西北低的特征,高值区均分布在东南角的山前冲积斜源地区,且空间变异主要发生在东南到西北的方向。Pb 的空间分布图上图斑数目要明显多于 Cu,这与 Pb 的强变异性密切

相关。

### 参考文献:

- [1] 史贵涛,陈振楼,李海雯,等. 城市土壤重金属污染研究现状与趋势[J]. 环境监测管理与技术,2006,18(6):9-12,24.
- [2] 于小倬,唐 崑,胡 玉. 酸性土壤重金属含量的影响因素——以湖南壶瓶山自然保护区为例[J]. 广东农业科学,2011,38(9):54-55.
- [3] Lu 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.
- [4] 毛 竹,张世熔,李 婷,等. 铅锌矿区土壤重金属空间变异及其污染风险评价——以四川汉源富泉铅锌矿山为例[J]. 农业环境科学学报,2007,26(2):617-621.
- [5] 何佳芳,何腾兵. 某铅锌冶炼厂废弃地复垦整理区土壤重金属污染评价[J]. 水土保持学报,2006,20(2):97-101.
- [6] 张 博,赵耕毛,刘兆普,等. 江苏滩涂围垦区土壤养分空间变异研究[J]. 江苏农业科学,2010(5):461-464.

朱伟,韩光明,王艳,等. 水稻-克氏原螯虾共作模式的产量和效益分析[J]. 江苏农业科学,2014,42(7):376-377.

# 水稻-克氏原螯虾共作模式的产量和效益分析

朱伟<sup>1</sup>,韩光明<sup>2</sup>,王艳<sup>2</sup>,寇祥明<sup>2</sup>,张家宏<sup>2</sup>,王守红<sup>2</sup>,陆洋江<sup>1</sup>,毕建花<sup>2</sup>,陆建飞<sup>3</sup>,杨建春<sup>2</sup>,白和盛<sup>2</sup>

(1. 江苏省农业科学院六合动物科学基地,江苏南京 211500; 2. 江苏里下河地区农业科学研究所,江苏扬州 225007;

3. 扬州大学农学院,江苏扬州 225009)

**摘要:**开展了水稻和克氏原螯虾共作模式的试验,分析了共作模式下水稻和克氏原螯虾的产量和经济效益,试验表明:水稻和克氏原螯虾共作模式能够有效增加农民收入,具有重要的推广价值。

**关键词:**水稻-克氏原螯虾共作模式;产量;效益分析;农民收入

**中图分类号:** S511.048 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)07-0376-02

我国是水稻生产大国,利用稻田进行养殖是农业增效、农民增收的有效途径。推广稻田养殖克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*),可有效提高稻田单位面积的经济效益。为此,本研究在南京市六合区竹镇、扬州市邗江区公道镇、扬州市邗江区小纪镇开展了水稻-克氏原螯虾共作模式的试验,以期探讨水稻和克氏原螯虾共作模式下的经济产量和经济效益,为稻田养殖克氏原螯虾的推广提供技术依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地设在位于南京市六合区竹镇镇的江苏省农科院六合动物科学示范基地。试验水稻田长 97.93 m、宽 33.85 m,稻田四周田埂的坡比为 1:3,沿田四周 2 m 处挖宽 4 m、深 1.2 m 的环沟,田块中间挖宽 1.5 m、深 1 m 的“井”字形深沟,将稻田分成 12 个水系贯通的小块。改造后的田块水稻面

积为 2 320.6 m<sup>2</sup>,水沟面积为 993.3 m<sup>2</sup>。在环沟和田间沟四周栽植水草。沟中种植伊乐藻、金鱼藻、苦草、浮萍等水生植物,水草面积为水沟面积的 60%~70%。

### 1.2 虾种投放

试验虾苗来源于扬州市邗江区公道镇的江苏省克氏原螯虾良种繁育基地。虾苗平均规格为 3.12 g/尾。于 5 月 19 日晚放置地笼捕虾苗,20 日早上收地笼捕获虾苗放入网箱暂存,下午 16:00 左右,阳光照射变弱时,将虾苗装箱启运。使用网筐盛放虾苗,先在网筐中铺置黑色遮阳网,放置轮叶褐藻、伊乐藻等水草,再放入虾苗后层层堆放绑定并洒水,保持虾体湿润。虾苗经过 3 h 的运输,于夜间 21:00 到达目的地。投放虾苗时,先在水边铺上网片,让虾苗自然爬入水中,共设置 6 个放养点。次日早上,清点网片上的死虾数目,计算虾苗的运输成活率为 93.6%。

### 1.3 水稻种植

在稻田中靠近田埂边选择一小块地,于 5 月 22 日播种水稻(品种为南粳 506,来自江苏省农业科学研究院粮食作物研究所)育苗,6 月 29 日开始拔苗移栽。于 7 月 9 日、7 月 18 日、8 月 12 日施用尿素,每次 35 kg。根据水质状况适当施用有机肥,主要为沼气液,共 4 t。分别于 7 月 26 日、8 月 16 日、8 月 22 日喷洒苏云金杆菌开展生物防治水稻害虫。10 月 19 日收割水稻。

### 1.4 日常管理

每天分别于早上 08:00 和下午 17:00 投喂饲料,下午饲

收稿日期:2013-09-04

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(13)4036];江苏省扬州市科技计划(编号: YZ2011167)。

作者简介:朱伟(1964—),男,江苏睢宁人,硕士,副研究员,主要从事生态农业技术和产品的研发及推广工作。E-mail: zhuwei196405@126.com。

通信作者:张家宏,硕士,研究员,主要从事生态农业技术和生态农业产品的研发和推广工作。E-mail: yzzhangh@126.com。

[7]刘琼峰,李明德,吴海勇,等. 城郊农田土壤 Pb、Cd 的空间变异与评价研究——以长沙市为例[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(2):195-203.

[8]白晓宇,袁峰,李湘凌,等. 铜陵矿区土壤重金属元素的空间变异及污染分析[J]. 地学前缘,2008,15(5):256-263.

[9]黄勇,郭庆荣,任海,等. 地统计学在土壤重金属研究中的应用及展望[J]. 生态环境,2004,13(4):681-684.

[10]吴文勇,尹世洋,刘洪禄,等. 污灌区土壤重金属空间结构与分布特征[J]. 农业工程学报,2013,29(4):165-173.

[11]姚荣江,杨劲松,杨奇勇. 典型农区耕作土壤重金属空间变异的稳健性分析[J]. 环境科学与技术,2012,35(S2):1-7.

[12]Wang X J, Zhang Z P. A comparison of conditional simulation, kriging and trend surface analysis for soil heavy metal pollution pattern

analysis[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 1999, 34(1):73-89.

[13]孙波,周生路,赵其国. 基于空间变异分析的土壤重金属复合污染研究[J]. 农业环境科学学报,2003,22(2):248-251.

[14]蔡德所,王魁,黄景新,等. 喀斯特峰丛洼地原生林区土壤矿物质元素空间异质性研究[J]. 中国水土保持,2010(5):33-36.

[15]葛剑平,郭海燕,仲莉娜. 地统计学在生态学中的应用(I)——基本理论和方法[J]. 东北林业大学学报,1995,23(2):88-94.

[16]Zhao Y C, Wang Z G, Sun W X, et al. Spatial interrelations and multi-scale sources of soil heavy metal variability in a typical urban-rural transition area in Yangtze River Delta region of China[J]. Geoderma, 2010, 156(3/4):216-227.