

县域农田土壤铜、锌、铬含量空间变异特征及其影响因子分析

庞 夙¹, 李廷轩¹, 王永东¹, 余海英¹, 郭其灵², 陈东明²

(¹四川农业大学资源环境学院, 四川雅安 625014; ²四川省双流县农村发展局土壤肥料站, 四川双流 610200)

摘要:【目的】研究县域农田土壤重金属空间变异特征及影响因子, 可为保护农田环境质量提供有效信息。【方法】本研究利用地统计学和 GIS 相结合的方法, 对四川省双流县 623 个土样铜、锌、铬含量空间结构、分布特征进行分析, 并在此基础上对其影响因子进行了探讨。【结果】(1) 农田土壤铜、锌、铬含量属于中等变异强度, 其最大值与最小值之间的差异明显; (2) 土壤铜、锌、铬含量的空间相关距离分别为 28 281、45 613、45 892 m, 且具有中等程度的空间自相关性, 其空间变异受结构性和随机性因子的共同影响。【结论】普通 Kriging 插值表明, 土壤铜、锌、铬含量的空间分布趋势较为接近, 高值区主要集中在县境内西北部。影响因子分析表明, 土壤铜含量在不同地形条件下呈极显著差异; 成土母质对铜和锌含量空间变异有重要影响; 有机肥使用量是影响土壤铜、锌、铬含量空间变异的重要因子; 社会经济条件中, 农业基础条件和化肥使用量对土壤铜、锌、铬含量空间变异的影响程度最高。

关键词: 县域尺度; 农田土壤; 铜、锌、铬; 空间变异; 影响因子

Spatial Variability and Influencing Factors of the Concentrations of Cu, Zn, and Cr in Cropland Soil on County Scales

PANG Su, LI Ting-xuan, WANG Yong-dong, YU Hai-ying, GUO Qi-ling, CHEN Dong-ming

(¹College of Resource and Environmental of Sichuan Agriculture University, Ya'an 625014, Sichuang; ²Soil Fertilizer Station of Rural Development Council in Shuangliu County, Shuangliu 610200, Sichuang)

Abstract: 【Objective】 Studies on the spatial variability and influencing factors of heavy metals can provide useful informations for the protection of environmental quality of cropland. 【Method】 Geostatistics combined with GIS were used for the analysis of the spatial structural, spatial distribution and influencing factors of copper (Cu), zinc (Zn), and chromium (Cr) concentrations in cropland soil in Shuangliu county, Sichuan province, China. 【Result】 The concentrations of Cu, Zn and Cr in cropland soil belonged to moderate variability, the maximum value and minimum value of the three heavy metals were obviously different. The spatially dependent ranges of concentrations of Cu, Zn, and Cr in soil were 28 281, 45 613, and 45 892 m, respectively. The concentrations of Cu, Zn, and Cr in soil had a moderate spatial dependence, and their spatial variability was caused by structural factors and random factors. 【Conclusion】 The ordinary Kriging interpolation showed that the spatial distribution trends of concentrations of Cu, Zn, and Cr in soil were quite similar. The regions with high concentrations of Cu, Zn, and Cr in soil were mainly distributed in the northwet part of Shuangliu. The results of influencing factors showed that the concentration of Cu in cropland soil was very significantly different among different terrain conditions. Soil parental materials was an important factor affecting spatial variability of the concentration of Cu and Zn. The organic fertilizer application rate was the important factor which affected spatial variability of the concentration of Cu, Zn, and Cr in cropland soil. The influence degree of agricultural conditions and fertilizer application rate on spatial variability of the concentrations of Cu, Zn, and Cr in cropland soil was the highest in social economic conditions .

Key words: county scales; cropland soil; copper; zinc; chromium; spatial variability; influencing factors

收稿日期: 2009-06-19; 接受日期: 2009-09-19

基金项目: 四川省青年基金 (06ZQ026-020)、四川省教育厅重点项目 (2006A008)、四川省教育厅青年基金项目 (2006B009)

作者简介: 庞 夙, 硕士研究生。E-mail: jiang_jing617@163.com. 通信作者李廷轩, 教授, 博士。Tel: 0835-2882216; E-mail: litinx@263.net

0 引言

【研究意义】农田土壤环境质量是保证农作物品质和粮食安全的基础。随着工农业生产的高速发展,农田土壤重金属污染问题日益加剧,严重威胁着人类健康^[1]。为了保障农产品质量安全的可持续性,对农田土壤重金属状况进行检测及掌握区域内的重金属污染空间变异特征极为重要^[2]。**【前人研究进展】**近年来,许多学者利用 3S 技术和地统计学等方法,对县域尺度^[3-5]、市域尺度^[6-7]和地域尺度^[8-11]农田土壤重金属的空间变异性做了大量研究。**【本研究的切入点】**但由于样点密度小,难以真实反映区域内农田土壤重金属空间变异特征及其影响因子^[12-13]。成都平原是中国著名的粮食生产基地,其土壤环境质量直接影响着四川省农业可持续发展及生物健康。自 20 世纪 80 年代起,成都平原的农田土壤重金属污染问题引起了科技工作者的关注^[14-16],但对其周边县区的研究却鲜见报道。**【拟解决的关键问题】**双流县位于成都平原东南部,区域内地貌组合完整,农田土壤分布具有较好的连续性,自然因素分布差异明显且具有很强的规律性,人类活动频度和社会经济条件差异明显,对研究农田土壤重金属空间变异特征及其影响因子具有典型性。因此,本文采用地统计学和 GIS 方法,在高密度采样的基础上,研究双流县农田土壤铜、锌、铬污染的空间变异特征及其影响因子,以期研究区农业可持续发展及农田土壤污染防治措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

双流县位于成都平原东南部,地处东经 103°43'—104°15',北纬 30°13'—30°40',东西宽 46 km,南北长 49 km,面积 1 072 km²。县境内地貌组合完整,西北部为成都平原的一部分,东南部为低山区,西南至东北部为丘陵区。气候类型为亚热带湿润季风气候,年均气温 16.2℃,年均降雨量 985.1 mm。区域内经济发达,是西南航空港所在地。全县辖 25 个乡镇、3 个开发区,人口 90.64 万。

1.2 土样采集

采样点在研究区尽量均匀分布,同时兼顾土壤类型和地形特点,在保证样品代表性的前提下,平均每 1.72 km²左右布设一个采样点,在人为活动频繁的原区,加密布点。每个土样以取土点为中心,在 10 m

半径内取 5—10 个耕层土样(0—20 cm)混合而成,同时用 GPS (Garmin 72) 记录中心点的位置,全县共采集 623 个土样(图 1),采样时间为 2007 年 10 月。

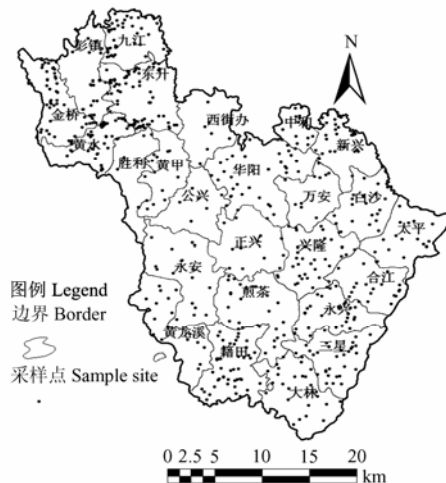


图 1 土壤样点分布图

Fig. 1 Distribution map of sampling sites

1.3 测定项目及方法

土壤铜、锌、铬含量采用 HNO₃-HF-HClO₄ 消化,原子吸收分光光度法^[17]测定。

1.4 数据处理

1.4.1 地统计学方法 利用半方差函数的相关参数对土壤铜、锌、铬含量进行空间结构特征分析;利用普通克里格插值对土壤铜、锌、铬含量进行空间分布特征分析^[18-20]。

1.4.2 软件平台 SPSS11.5: 描述性统计分析、相关性分析、单因素方差分析、多重比较; GS+5.3: 半方差函数分析; ArcGIS9.0: 数字化地图、ordinary-kriging 插值。

2 结果与分析

2.1 铜、锌、铬含量的描述性统计特征

偏度和峰度检验表明,农田土壤铜、锌、铬含量呈正态或对数正态分布(表 1)。3 种重金属的变异系数在 19.65%—33.48%之间,变异程度较低,表明其受到外界的影响比较一致,变化并不显著。3 种重金属最小值和最大值之间差异明显,表明其在研究区内的值域分布范围广,需要进一步探讨空间分布模式。

表 1 土壤铜、锌、铬含量描述性统计分析

Table 1 Description statistics of the concentrations of Cu, Zn, and Cr in cropland soil ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

	平均值	中值	最小值	最大值	标准差	变异系数	偏度	峰度	分布类型
	Mean	Median	Min.	Max.	S.D.	CV(%)	Skewness	Kurtosis	Distribution type
铜 Cu	36.57	36.25	13.03	88.01	9.24	25.27	1.298	4.231	对数正态 Lognormal
锌 Zn	159.73	156.35	43.90	336.19	53.48	33.48	0.523	0.268	正态 Normal
铬 Cr	59.90	60.15	25.30	137.73	11.77	19.65	0.343	3.254	对数正态 Lognormal

2.2 铜、锌、铬空间结构分析

土壤特性空间结构分析的关键是拟合出精度较高的半方差函数模型，选择最佳模型时，首先要考虑决定系数 (R^2) 和残差 (RSS)，其次综合考虑块金值与变程的大小，以保证变量在采样条件下具备较高的空间相关性。块金值和基台值之比可以揭示变量的空间相关程度，若比值 $<25\%$ ，表明变量具有强烈的空间相关性，且空间变异主要受结构性因子影响；若比值 $>75\%$ ，则说明变量的空间相关性很弱，且空间变异主要受随机性因子影响^[21]。

分析表明，农田土壤铜、锌、铬含量的变化全域均为 51 062.09 m，其中铜和锌在 42 551.74 m、铬在

38 296.57 m 步长变化域内变化相对平稳，呈现各向同性趋势。在 42 551.74 m 步长变化域内对铜和锌，以及在 38 296.57 m 步长变化域内对铬在不同步长间距下半方差函数模型进行拟合，得到了效果较好的模型。由表 2 可知，铜以 1 000 m 步长下的球状模型为最佳模型，锌以 3 595 m 步长下的指数模型为最佳模型，而铬则以 3 871 m 步长下的指数模型为最佳模型。3 种重金属的变程均较大，表明其在研究区内具有空间相关性的范围非常广泛，适合进行空间变异特征研究。从块金值和基台值之比可以看出，3 种重金属含量都具有中等程度的空间自相关性，其空间变异受到结构性和随机性因子的共同影响。

表 2 土壤铜、锌、铬含量各向同性半方差函数理论模型及有关参数

Table 2 Theoretical isotropic semivariogram model and corresponding parameters of the concentrations of Cu, Zn, and Cr in cropland soil

	模型	步长	块金值	基台值	变程	$C_0/(C_0+C)$	决定系数	残差
	Model	Lag (m)	C_0	C_0+C	Range (m)	(%)	R^2	RSS
铜 Cu	S	1000	0.03034	0.06984	28281	43.44	0.845	1.142E-06
锌 Zn	E	3595	2251.50	4284.0	45613	52.56	0.743	1.337E-06
铬 Cr	E	3871	0.02996	0.04910	45892	61.02	0.795	1.497E-04

S 表示球状模型，E 表示高斯模型。下同 S refers to spherical model, E refers to exponential model. The same as below

2.3 铜、锌、铬空间分布特征

根据上述元素得到的半方差函数模型，利用普通克里格插值得到了 3 种重金属含量的空间分布图 (图 2)。从图 2 可以看出，研究区农田土壤铜、锌、铬含量分布趋势较为接近，高值区主要分布在县境内西北部，这表明其空间变异是有规律可循的。相关性分析表明，铜含量与锌和铬的相关系数分别达到 0.313** 和 0.310**，而锌与铬的相关系数则达到 0.324**，均表现出极显著的正相关性，说明 3 种重金属在研究区内来源可能具有同源性。此外，锌在东南部的含量也较高，具体原因有待于进一步调查分析。

2.4 影响因子分析

空间结构分析表明，研究区农田土壤铜、锌、铬含量空间变异受结构性因子和随机性因子的共同影

响。调查表明，研究区域内的地形条件、成土母质、有机肥施用量、社会经济条件差异明显。因此，本研究选择地形条件、成土母质作为结构性因子，选择有机肥施用量、社会经济条件中的多个指标作为随机性因子，探讨其对农田土壤铜、锌、铬含量空间变异的影响。

2.4.1 地形条件 不同的地形条件影响着水分在自然界的重新分配及人类活动的频度，导致重金属含量因地形条件变化而产生差异。统计分析表明 (表 3)，土壤铜和铬含量变化为平原 $>$ 丘陵 $>$ 山地，其中铜含量的差异达到了极显著水平，而铬含量在丘陵和山地间的差异不显著，但均极显著小于平原；土壤锌含量变化为平原 $>$ 山地 $>$ 丘陵，平原和山地间的差异并不显著，但均极显著高于丘陵。以上分析表明，地形条

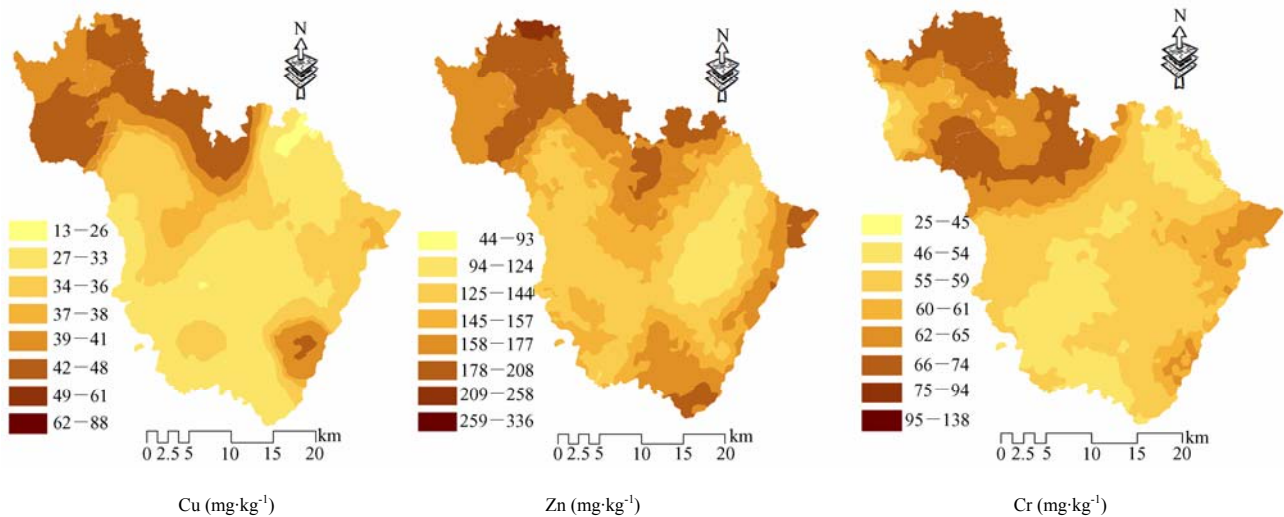


图2 土壤铜、锌、铬含量空间插值图

Fig. 2 Interpolation maps of the concentrations of Cu, Zn, and Cr in cropland soil

表3 不同地形条件对农田土壤铜、锌、铬含量的影响

Table 3 The concentrations of Cu, Zn, and Cr in cropland soil as affected by different terrain conditions

地形 Terrain	样点数 Sample No.	铜 Cu (mg·kg ⁻¹)	锌 Zn (mg·kg ⁻¹)	铬 Cr (mg·kg ⁻¹)
平原 Plain	274	41.43aA	179.95aA	63.84aA
丘陵 Hills	297	33.30bB	138.78bB	57.12bB
山地 Mountains	54	29.55cC	172.81aA	54.93bB

数据后的小写字母表示 $P \leq 0.05$ 水平上差异显著, 大写字母表示 $P \leq 0.01$ 水平上差异极显著。下同

Values followed by different small and capital letters indicate significant level at $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively. The same below

件是影响研究区农田土壤铜含量空间变异的重要因子。3种重金属在平原区含量较高, 这也与平原区域人类活动的频度密切相关。资料显示, 双流县平原区的工业、运输业、商饮业和服务业收入分别占全县各项收入的 92.45%、63.06%、82.70%和 96.55%, 表明平原区人类活动频繁, 因此带来大量的工业污染物和生活垃圾, 对农田土壤重金属含量的空间变异造成较大的影响。

表4 不同成土母质对农田土壤铜、锌、铬含量的影响

Table 4 The concentrations of Cu, Zn, and Cr in cropland soil as affected by different soil-forming materials

	样点数 Sample No.	铜 Cu (mg·kg ⁻¹)	锌 Zn (mg·kg ⁻¹)	铬 Cr (mg·kg ⁻¹)
灰色冲积物 Grey alluvium	266	41.73aA	181.41aA	64.45aA
老冲积物 Old alluvium	118	30.93cC	129.56cC	55.07bB
紫色岩风化物 Purplish rock saprolith	239	33.60bB	150.49bB	57.23bB

2.4.2 成土母质 成土母质影响着土壤元素组成、风化与淋失, 进而影响着重金属元素的积累与流失。

Facchineli 等对意大利皮埃蒙地区受污染土壤的研究表明, 铬, 钴和镍的区域性分布和在大范围内的变异主要受成土母质控制^[22]。区域内成土母质主要包括第四系全新统灰色冲积物、第四系更新统老冲积物以及紫色岩层风化物。统计分析表明(表4), 3种成土母质发育的土壤中铜、锌、铬含量的变化顺序为灰色冲积物>老冲积物>紫色岩层风化物, 其中, 铜和锌的差异均达到极显著水平, 而铬在老冲积物和紫色岩层风化物发育形成的土壤中差异并不明显。上述分析表明, 成土母质是影响土壤铜和锌空间变异的重要因子。

2.4.3 有机肥用量 目前, 中国广大农村的畜禽养殖户普遍以露天堆肥后作为有机肥使用的方式处理畜禽粪便。农业污染源普查资料表明, 研究区西北部规模化养殖面积大、密度高, 而当地农民以作为有机肥使用方式处理畜禽粪便的占 80%以上。相关研究表明^[23-25], 畜禽粪便对农田土壤重金属含量及其迁移能

力有重要影响,进而导致区域内土壤重金属变异强度增加。据报道^[24],动物饲料中常添加大量的重金属作为添加剂,其中大部分不能被动物吸收而随粪便排出体外,当施入土壤后,其重金属等有害物质会逐渐积累而增加。因此,有机肥使用量较高的区域,其农田土壤重金属含量较高。相关性分析表明,研究区农田土壤有机质含量与铜、锌、铬含量的相关系数分别为0.146**、0.202**、0.211**,表现出极显著的正相关性。而农田土壤有机质主要来源于有机肥的施用,表明有机肥施用量是影响铜、锌、铬含量空间分布的重要因子。

2.4.4 社会经济条件 社会经济条件汇总了区域内人口、生产及生活状况,能够综合反映区域内人类活动的频度和特征。根据研究区的实际情况,筛选全县26个乡镇社会经济条件中的农药使用量等14个因子作为影响农田土壤铜、锌、铬含量空间变异的具体因子,对其进行主成分分析,以获得信息更为综合的因子,并在此基础上对各类因子的影响程度进行研究。

由各成分的特征值及贡献率可以看出(表5),成分1、2、3、4、5的特征值均大于1且累积贡献率超过80%,表明其可以较完整地反映研究区社会经济条件对农田土壤铜、锌、铬含量空间变异的影响。而5个成分中,成分1和成分2的累积贡献率占到全部成分的一半以上。进一步的因子载荷分析表明(表6),农业人口、农用柴油使用量、通汽车村数量及通电话

村数量在成分1中的载荷较高,表明成分1代表农业基础条件的影响;氮肥、磷肥、钾肥和复合肥施用量4个因子在成分2中的载荷相对较高,表明成分2代表化肥施用量的影响;而成分3代表畜牧业的影响,成分4代表工、商业的影响,成分5代表农药施用量的影响。

表5 社会经济因子的特征值与累积贡献率

Table 5 Eigenvalue and cumulative contribution of social economic factors

成分 Component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution(%)	累积贡献率 Cumulative contribution(%)
1	4.643	33.165	33.165
2	2.570	19.642	52.807
3	1.765	12.604	65.410
4	1.476	10.540	75.950
5	1.181	8.436	84.386
6	0.881	6.294	90.680
7	0.551	3.934	94.614
8	0.310	2.215	96.829
9	0.182	1.297	98.125
10	0.125	0.896	99.022
11	0.099	0.705	99.727
12	0.027	0.196	99.924
13	0.011	0.076	100.000
14	1.74E-017	1.25E-016	100.000

表6 社会经济因子的载荷矩阵

Table 6 Loading matrix of social economic factors

因子 Factor	成分1 Component 1	成分2 Component 2	成分3 Component 3	成分4 Component 4	成分5 Component 5
农药使用量 The application rate of pesticide	0.325	0.248	0.153	-0.311	0.809
氮肥施用量 The application rate of nitrogen fertilizer	-0.107	0.791	0.173	0.187	-0.141
磷肥施用量 The application rate of phosphate fertilizer	-0.319	0.822	0.245	0.374	-0.024
钾肥施用量 The application rate of potassium fertilizer	-0.356	0.454	0.081	0.399	0.101
复合肥施用量 The application rate of compound fertilizer	0.408	0.780	-0.301	0.071	0.096
农业人口 Agricultural population	0.780	0.328	0.293	0.019	-0.052
农用柴油使用量 The application rate of agricultural diesel oil	0.727	0.094	-0.627	0.005	-0.054
通汽车村数量 Number of villages which recanalizing cars	0.864	0.110	0.294	-0.203	-0.175
通电话村数量 Number of villages which recanalizing telephone	0.864	0.110	0.294	-0.203	-0.175
畜牧业收入 The income of animal husbandry	0.499	-0.096	0.545	-0.094	-0.348
工业收入 The income of industry	0.590	-0.271	-0.144	0.624	0.005
运输业收入 The income of transportation industry	0.637	-0.242	0.204	0.225	0.532
商业收入 The income of commercial	0.273	-0.517	0.215	0.712	0.026
服务业收入 The income of service industry	0.650	0.152	-0.705	0.041	-0.124

所选择的 14 个因子均能够反映在提取的主成分中, 其对农田土壤铜、锌、铬含量空间变异均有较强的影响, 成分 1 和成分 2 的贡献率最高, 且累积贡献率超过 50%, 表明在社会经济条件中, 农业基础条件和化肥施用量对农田土壤铜、锌、铬含量空间变异的影响程度最高。

3 讨论

区域内农田土壤重金属含量空间变异特征对农业规划和环境治理具有重要意义。本研究表明, 双流县农田土壤铜、锌、铬含量变异系数均小于 35%, 与其它农业县区的的结果接近^[3], 但低于工业型县区^[12], 说明区域内主导产业的差异对于土壤重金属积累和变化的影响较大。而从空间结构特征上看, 研究区 3 种重金属的空间相关性与其它县域的相关研究结果有所差异^[3,26], 表明具体尺度范围和区域性影响因子的差异是影响各区域重金属含量空间结构特征的重要因素。此外, 与之前对成都平原的相关研究相比^[13-16], 本研究采样数量较大, 样点间的空间信息相对完整。因此, 3 种重金属均具有较大的变程, 克里格插值精确度较高, 表明采样数量对重金属含量空间变异研究的客观性和准确性有重要影响。

本研究采用多重比较和主成分分析的方法进行影响因素分析, 其结果在一定程度上反映了研究区内自然和社会经济条件对 3 种土壤重金属含量空间变异的影响。但对于道路、垃圾堆放、污水灌溉等因素考虑较少, 且对于因子之间的交互作用并没有进行深入探讨, 有待于进一步研究。

4 结论

4.1 农田土壤铜、锌、铬变异系数在 19.65%—33.48% 之间, 属于中等变异强度; 3 种重金属含量的值域分布范围均较广, 因此, 需要考虑不同地区之间重金属含量的差异, 综合提出治理和保护措施。

4.2 农田土壤铜、锌、铬含量存在空间自相关性的范围较广, 且具有中等程度的空间自相关性, 其空间变异受结构性和随机性因子的共同影响。3 种重金属含量在研究区内分布趋势具有相似性, 高值区主要分布在县境内西北部。

4.3 地形条件是影响农田土壤铜含量空间变异的重要因素; 铜和锌在不同成土母质发育形成的土壤间差异均达到极显著水平; 有机肥使用量对农田土壤铜、锌、铬空间变异有重要影响; 社会经济条件中, 农业

基础条件和化肥施用量对农田土壤铜、锌、铬含量空间变异的影响程度最高。

References

- [1] Khan S, Cao Q, Zheng Y M, Huang Y Z, Zhu Y G. Health risks of contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 2008 (152): 686-692.
- [2] 王 波, 王元仲, 李东梅, 高云凤, 毛任钊. 迁安市农田重金属含量空间变异性. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1495-1500.
Wang B, Wang Y Z, Li D M, Gao Y F, Mao R Z. Spatial variability of farmland heavy metals contents in Qian'an City. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1495-1500. (in Chinese)
- [3] 王 波, 毛任钊, 曹 健, 王元仲, 高云凤, 李冬梅. 海河低平原区农田重金属含量的空间变异性—以河北省肥乡县为例. *生态学报*, 2006, 26 (12): 4082-4090.
Wang B, Mao R Z, Cao J, Wang Y Z, Gao Y F, Li D M. Spatial variability of the heavy metal contents in cropland of low Hai River plain: a case study in Feixiang county of Hebei province. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (12): 4082-4090. (in Chinese)
- [4] Yang J, Huang Z C, Chen T B, Lei M, Zheng Y M, Zheng G D, Song B, Liu Y Q, Zhang C S. Predicting the probability distribution of Pb-increased lands in sewage irrigated region: A case study in Beijing, China. *Geoderma*, 2008, 147: 192-196.
- [5] 刘 勇, 张 红, 尹京苑. 汾河太原段土壤中 Hg、Cr 空间分布与污染评价. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 57-60.
Liu Y, Zhang H, Yin J Y. Pollution assessment and spatial distribution of soil Hg and Cr in the Taiyuan area of Fenhe river. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(5): 57-60. (in Chinese)
- [6] 徐理超, 李艳霞, 苏秋红, 吴 娟, 熊 雄, 宋 波, 郑国邸, 陈玉成. 阜新市农田土壤重金属含量及其分布特征. *应用生态学报*, 2007, 18 (7): 1510-1517.
Xu L C, Li Y X, Su Q H, Qu J, Xiong X, Song B, Zheng G D, Chen Y C. Contents of spatial distribution patterns of heavy metals in farmland soils of Fuxin city. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1510-1517. (in Chinese)
- [7] 郑袁明, 陈 煌, 陈同斌, 郑国邸, 吴泓涛, 周建利. 北京市土壤中 Cr、Ni 含量的空间结构与分布特征. *第四纪研究*, 2003, 23(4): 436-445.
Zheng Y M, Chen H, Chen T B, Zheng G D, Wu H T, Zhou J L. Spatial distribution patterns of Cr and Ni in soils of Beijing. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(4): 436-445. (in Chinese)
- [8] 杨 梅, 刘洪斌, 武 伟. 重庆三峡库区耕地土壤重金属含量的空间变异性研究. *中国生态农业学报*, 2006, 14(1): 100-104.
Yang M, Liu H B, Wu W. Spatial variability of heavy metals in soil of Three-Gorges reservoir in Chongqing. *Chinese Journal of*

- Eco-Agriculture*, 2006, 14(1): 100-104. (in Chinese)
- [9] 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. *Environmental Pollution*, 2006, 141: 257-264.
- [10] 施加春, 刘杏梅, 于春兰, 朱海平, 赵科理, 吴建军, 徐建明. 浙北环太湖平原耕地土壤重金属的空间变异特征及其风险评价研究. *土壤学报*, 2007, 44 (5): 824 - 830.
Shi J C, Liu X M, Yu C L, Zhu H P, Zhao K L, Wu J J, Xu J M. Spatial variability and risk evaluation of soil heavy metals in Taihu lake region of north Zhejiang province. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (5): 824-830. (in Chinese)
- [11] Lado L R, Hengl T, Reuter H I. Heavy metals in European soils: A geostatistical analysis of the FOREGS geochemical database. *Geoderma*, 2008 (14): 189-199.
- [12] 赵彦锋, 史学正, 于东升, 黄 标, 王洪杰, 孙志英, 赵永存, Öborn I, Blombäck K. 工业型城乡交错区农业土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cr 的空间分及影响因素研究. *土壤学报*, 2007, 44 (2): 227-234.
Zhao Y F, Shi X Z, Yu D S, Huang B, Wang H J, Sun Z Y, Zhao Y C, Öborn I, Blombäck K. Spatial distributions of Cu, Zn, Cr and Cr in agricultural soils of industry-based peri-urban regions. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (2): 227-234. (in Chinese)
- [13] Wu C F, Wu J P, Luo Y M, Zhang H B, Teng Y. Statistical and geostatistical characterization of heavy metal concentrations in a contaminated area taking into account map units. *Geoderma*, 2008, 144: 171-179.
- [14] 李启权, 王昌全, 李 冰, 杨 娟, 杨 艳. 成都平原土壤中砷的空间分布及污染评价. *土壤通报*, 2007, 38 (2): 357-360.
Li Q Q, Wang C Q, Li B, Yang J, Yang Y. Spatial distribution and pollution assessment of soil arsenic in the Chengdu plain. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38 (2): 357-360. (in Chinese)
- [15] 代 英, 张世榕, 李 婷, 魏 甦, 刘英华. 成都平原土壤 Hg 和 Pb 的空间分布及影响因素研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(3): 745-750.
Dai Y, Zhang S R, Li T, Wei S, Liu Y H. Spatial distribution and influencing factors of soil mercury and lead in Chengdu plain. *Journal of Aro-Environment Science*, 2006, 25(3): 745-750. (in Chinese)
- [16] 杨 娟, 王昌全, 李 冰, 李焕英, 何 鑫. 基于 BP 神经网络的城市边缘带土壤重金属污染预测——以成都平原土壤 Cr 为例. *土壤学报*, 2007, 44 (3): 430-436.
Yang J, Wang C Q, Li B, Li H Y, He X. Prediction of soil heavy metal pollution of peri-urban zone based on BP artificial neural network—A case study of the Chengdu plain. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 430-436. (in Chinese)
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, 1999.
Bao S D. *Soil and Agriculture Chemistry Analysis (3rd ed.)*. Beijing: China Agriculture Press, 1999. (in Chinese)
- [18] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
Wang Z Q. *Geostatistic and Its Application in Ecology*. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
- [19] 姜 勇, 庄秋丽, 梁文举, 施春健, 欧 伟. 空间变异在土壤特性长期定位观测及取样中的应用. *土壤通报*, 2005, 32 (4): 531-535.
Jiang Y, Zhuang Q L, Liang W J, Shi C J, Ou W. Application of spatial variability in long-term site specific observatory study of soil properties and sampling strategy. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 32 (4): 531-535. (in Chinese)
- [20] 赵良菊, 肖洪浪, 郭天文, 赖丽芳, 包兴国. 甘肃省武微地区漠土微量元素的空间变异特征. *土壤通报*, 2005, 36 (4): 536-540.
Zhao L J, Xiao H L, Guo T W, Lai L F, Bao X G. Spatial variability of micronutrients of irrigated desert soil in the Baiyun village of Wuwei region. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36 (4): 536-540. (in Chinese)
- [21] Wang Y D, Feng N N, Li T X, Zhang X Z, Liao G T. Spatial variability of soil cation exchange capacity in hilly tea plantation soils under different sampling scales. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7 (1): 101-105.
- [22] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environment Pollution*, 2001, 114(3): 313-324.
- [23] Marthley E, Gulson B L, Pfeifer H R. Metal concentrations in soils around the copper smelter and surrounding industrial complex of port kembla, NSW, Australia. *Science of the Total Environment*, 2004, 325: 113-127.
- [24] Nicholson F A, Chambers B J, Williams J R, Unwin R J. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales. *Bioresources Technology*, 1999, 70: 23-31.
- [25] 晁 雷, 周启星, 崔 爽, 陈 苏, 任丽萍. 堆肥对土壤重金属垂直分布的影响与污染评价. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1346-1350.
Chao L, Zhou Q X, Cui S, Chen S, Ren L P. Profile distribution and pollution assessment of heavy metals in soils under livestock faces composts. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1346-1350. (in Chinese)
- [26] Hu K L, Zhang F R, Li H, Huang F, Li B G. Spatial patterns of soil heavy metals in urban-rural transition zone of Beijing. *Pedosphere*, 2006, 16(6): 690-698.