

土壤重金属铅的空间变异性研究^{*}

——以重庆市吴滩镇为例

冯 洋 刘洪斌 王正银

(西南农业大学资源环境学院 重庆 400716)

武 伟

王世平

(西南农业大学信息学院 重庆 400716) (江津市农业局土肥监测站 江津 402260)

摘 要 采用地统计学方法研究重庆吴滩镇土壤中重金属 Pb 的空间变异特性结果表明,该区土壤重金属 Pb 具有显著空间结构性特点,小尺度明显受施肥、作物和管理水平等人为因素的影响,且空间分布无明显变化规律;而中尺度具有一定渐变分布规律。受耕作管理措施和酸性有水环境因素影响,水稻土中 Pb 含量明显高于紫色土。该区土壤中 Pb 含量低于国家 1 级标准的占 29.79%,低于国家 2 级标准的占 70.21%,其中属轻度污染的占 49.16%,中度污染的占 21.05%。

关键词 土壤 Pb 克里格插值 空间变异 污染程度

Spatial variability of soil Pb—A case study from Wutan Town, Chongqing City . FENG Yang, LIU Hong-Bin, WANG Zheng-Yin (College of Resources and Environment, Southwest Agricultural University, Chongqing 400716, China), WU Wei (Information College of Southwest Agricultural University, Chongqing 400716, China), WANG Shi-Ping (Soil and Fertilizer Station of Jiangjin Agricultural Bureau, Jiangjin 402260, China), *CJEA*, 2006, 14(1): 104 ~ 107

Abstract The spatial variability characteristics of Pb in soil at Wutan Town in Chongqing were studied using geostatistics method. The results show that the Pb has a good spatial structures. The spational distribution of Pb in a small region is not obviously varied, which is correlated with fertilization, crop, the level of management and so on. But the spatial distribution of Pb has gradually changed in the secondary region. The Pb concentration in paddy field is obviously higher than that in dry land because of the technique of management and water condition. The content of Pb which is lower than the national arterial criterion accounts for 29.79%, and which is lower than the national secondary criterion accounts for 70.21% in the whole region. The light pollution area accounts for 49.16%, and the medium pollution area accounts for 21.05% in the whole studied region.

Key words Soil, Pb, Kriging interpolation, Spatial variability, Pollution degree

(Received July 31, 2004; revised Sept. 9, 2004)

据农业部环境监测系统近年调查表明,我国 24 个省市城郊、污灌区和工矿等经济发展较快地区 320 个重点污染中大田农作物污染超标的农产品种植面积为 60.6 万 hm^2 ,占监测调查总面积的 20%;其中重金属含量超标的农产品产量与面积约占污染物超标农产品总量与总面积的 80% 以上,尤其是 Pb、Cd、Hg、Cu 及其复合污染最为突出^[2],因此土壤重金属空间分布特征的研究迫在眉睫。

本研究应用地统计学方法和 GIS 技术探讨了重庆吴滩镇农田土壤重金属 Pb 的空间分布特征,为控制 Pb 污染提供了依据。

1 研究区域概况与研究方法

研究区域位于重庆吴滩镇,总面积 1km^2 ,监测区地貌以丘陵为主,海拔最低处为 300m,海拔最高处为 349.9m,相对高差 49.9m,土壤主要为侏罗系紫色砂泥岩发育的酸性紫色土。施肥结构以化肥为主,配施有机肥(主要为农家肥、绿肥和秸秆),施肥方式主要为窝施和撒施。

本研究采用网格取样法,共采集土壤样本 121 个(取样间隔 100m),其方法是在以网格点为圆心、10m 为

^{*} 加拿大 PPI/PPIC 项目(CHONGQING-02)和重庆市教委科技项目(011802)资助

收稿日期:2004-07-31 改回日期:2004-09-09

半径范围内采集 10 钻 0~20cm 耕层土壤组成该点混合样本(以求平均值或消除小距离范围内土壤变异),室内分析项目包括土壤 pH、有机质、P、K 及 Pb 含量。用 pH 值计测定 pH 值(土水比为 1:5),用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机质含量,用国际农化服务中心的 ASI 联合浸提剂同时浸提(0.25mol/L NaHCO₃-0.01mol/L EDTA-0.01mol/L NH₄F)土壤中 P 和 K 含量,用王水(硫酸和硝酸 1:3 混合溶液)提取、原子吸收光谱法测定重金属含量。本研究采用 GIS 和地统计学方法^[1](半方差分析及模型拟合用 VARIOWIN2.2 地统计学分析软件),用 SPSS 软件进行相关性分析,采用对数正态克立格法进行内插生成土壤 Pb 含量的等级分布图。其用于估计变异函数式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中, $N(h)$ 为距离等于 h 时的点对数, $Z(x_i)$ 为位置 x_i 处数值, $Z(x_i + h)$ 为距离 $(x_i + h)$ 处数值。为满足无偏最优估计(即估计方差最小的条件),权重系数 w_i 必须满足如下条件:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (2)$$

为便于统计分析,在线性统计分析中要求研究区域的变量服从正态分布^[3]。但很多研究中一些变量服从对数正态分布^[4]或正偏态分布^[5],而异常值会使方差函数出现不连续现象,数据转换则可减少这种影响^[6]。因此研究者提出对数转换以减少因异常值带来的影响。其转换公式为:

$$Y = \ln(x) \quad (3)$$

其中 x 为被转换的变量, Y 为变量经过转换后的值。在样点分布图中输入 0~20cm 表层土壤养分分析数据,并生成属性数据,建立数据库,即可计算出半方差,用理论模型拟合。

2 结果与分析

2.1 土壤 Pb 含量变化

为建立适合的变异函数理论模型,对研究区域 121 个土壤样本重金属含量进行统计分析结果见表 1。由表 1 可知该区土壤 Pb 含量为 19.60~80.68mg/kg 内,均值为 33.529mg/kg,略低于国家标准土壤 Pb 背景值(35mg/kg),说明随着人类不合理的耕作管理,该区土壤 Pb 呈增加趋势;土壤中 pH 变化较小,其值为 4.09~5.89 间,均值为

表 1 Pb 与土壤理化性状统计特征

Tab.1 The statistical feature values of soil characteristic and Pb

项 目 Items	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	方 差 Variance	标准差 Standard variance	变异系数 % Coefficient of variation
Pb/ mg · kg ⁻¹	80.68	19.60	33.529	64.997	8.062	24.04
pH	5.89	4.09	4.699	0.094	0.306	6.51
有机质/ g · kg ⁻¹	27.96	5.85	15.093	17.037	4.14	27.43
速效磷/ mg · kg ⁻¹	141.82	2.31	31.774	782.699	27.977	88.05
有效钾/ mg · kg ⁻¹	271.23	18.10	73.148	1429.19	37.805	51.68

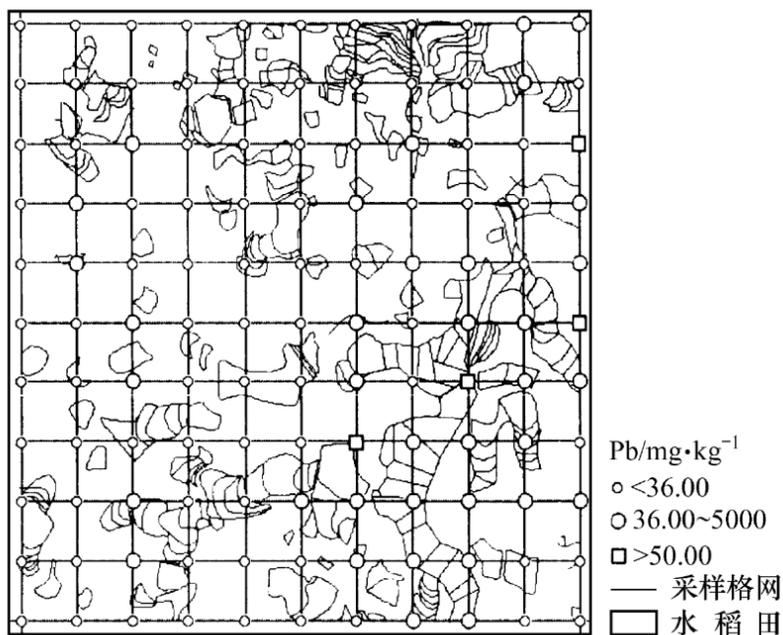


图 1 研究区域土壤 Pb 浓度取样分布图

Fig.1 Sampling locations of soil Pb concentration in study field

4.699,表明该区土壤呈强酸性;土壤有机质含量较平稳,为 5.850~27.96g/kg 间,均值为 15.093g/kg;而土壤速效磷含量为 2.31~141.82mg/kg 间,均值为 31.774mg/kg,远高于国家标准土壤速效磷临界值(12 mg/kg);土壤有效钾含量为 18.10~271.23mg/kg,均值为 73.148mg/kg,略低于国家标准土壤速效钾临界值(80mg/kg),表明该区长期施用 P、K 肥,导致土壤中 P、K 肥的积累,速效磷严重超标,造成 P 肥浪费和环境污染,但也有些地块长期未施用 P、K 肥,使土壤速效磷和有效钾含量远低于临界值,严重缺 P、K,故这些地块应补施 P、K 肥培肥地力,以提高土壤生产性能。各项变异系数中 pH 的变异系数最小,而 Pb 与土壤有机质的变异系数也较小,速效磷和有效钾的变异系数则较大,尤以速效磷变异系数最大,这与该区大量施用 P、K 肥及施肥结构差异等因素有关,土壤 Pb 浓度空间分布特征见图 1。由图 1 可知该区土壤中 Pb 含量大部分满足国家 1 级

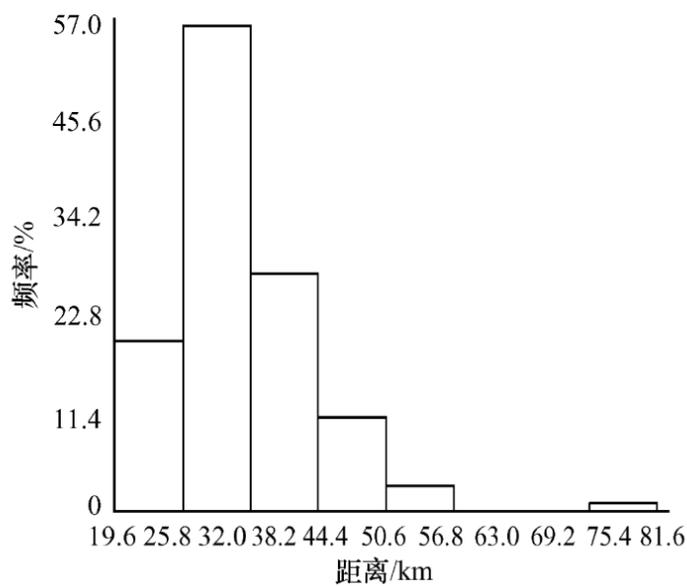


图 2 原始数据 Pb 的柱状图

Fig. 2 Histogram of original data Pb

标准值 (GB 15618-1995, 下同), 所取样点 < 1 级标准值的占 66.94%, 有 33.06% 的样点浓度 > 1 级标准, 但远低于国家 2 级标准值, 且水田中 Pb 含量明显高于旱地 (其含量超过国家 1 级标准基本均为水田), 其原因之一可能与土壤呈强酸性有关, 采样区域土壤类型为沙溪庙组发育形成的紫色土和水稻土, pH 值多为 4.0 ~ 5.0, 而其最大 pH 值也仅为 5.89, 强酸性且有水溶液条件下加速了 Pb 从土壤中溶滤出来。121 个取样点中有 4 个点 Pb 含量值为 50.00 ~ 80.68 mg/kg 间, 这说明 Pb 污染日渐严重。该区土壤中 Pb 含量与 pH 值呈显著负相关 (-0.202^*), 说明土壤中 Pb 含量随土壤中 pH 值的增加而减少; 土壤中 Pb 含量与速效磷呈极显著负相关 (-0.257^{**}), 表明土壤中 Pb 含量随土壤中速效磷的增加而减少; 而土壤中 Pb 含量与有机质呈极显著相关 (0.275^{**}), 说明土壤中 Pb 含量随有机质的增加而

增加; 而土壤中 Pb 与有效钾含量相关系数为 0.142, 经检验相关性不显著, 这与实际调查结果相一致。图 1 还显示东南方向的 Pb 含量明显高于其他方向, 而这些样点大部分取自朗家八村, 实际调查结果表明该村施肥结构与其他地方相比, 在施用大量有机肥 (人粪尿, 猪粪水) 条件下还以堆渣肥作底肥, 其中肥料含量与人粪尿、猪粪水有一定差异, 这是导致该区土壤 Pb 浓度偏高的因素之一。研究区域土壤 Pb 原始数据柱状分布见图 2, 与经对数转换后 Pb 的柱状图 (见图 3) 相比, 由于一些偏离值的影响, 前者呈正偏态分布, 而后者呈正态分布, 偏离值影响数据的正态分布, 且在数据分析时导致错误的结论, 因此对研究区域土壤 Pb 含量分析时须对原始数据进行对数转换。

2.2 土壤 Pb 的空间结构

采用 VARIOWIN2.2 软件以不同类型模型进行拟合, 选取拟合度最好的模型类型 (最适模型的值最小, 见图 4), 最后选择较适合的模型——高斯和幂函数套合结构模型 ($G+P$), 该模型展示了研究区域土壤 Pb 的空间结构。块金方差/基台值 ($C_0/C+C_0$) 表示空间变异性程度^[1], 若该比值较高, 说明由随机部分引起的空间变异性程度较大; 相反, 则由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大; 若该比值接近 1, 则说明该变量在整个尺度上具有恒定变异。研究区域土壤 Pb 含量由随机因素

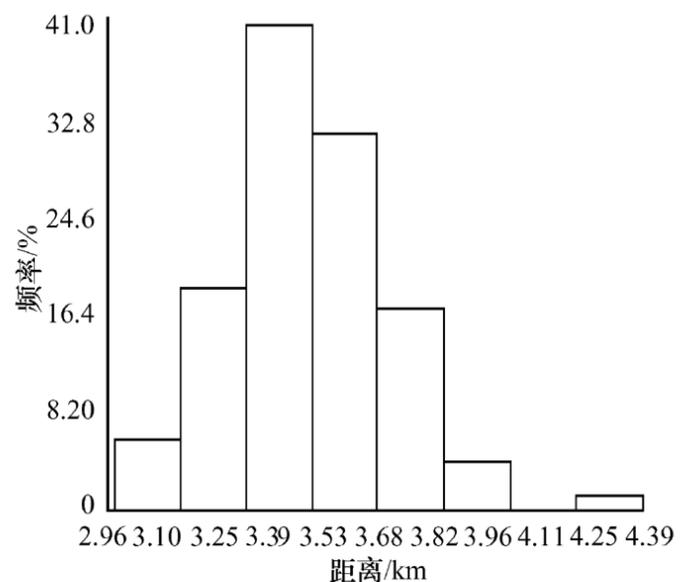


图 3 对数转换后 Pb 的柱状图

Fig. 3 Histogram of Pb after logarithmic transformation

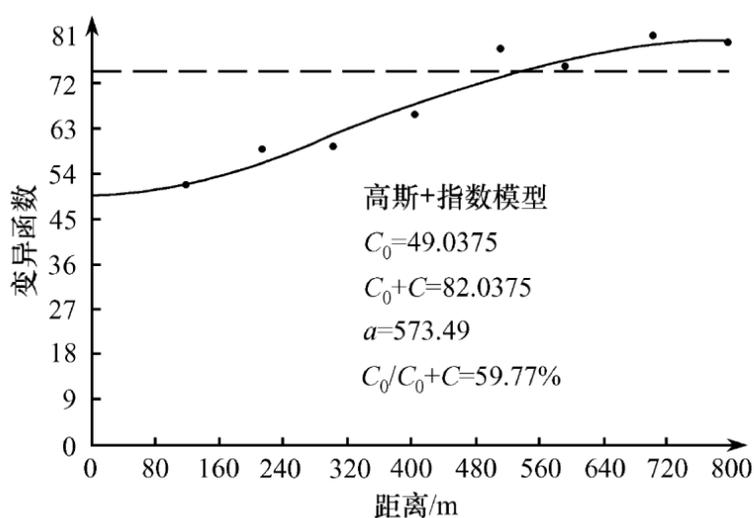


图 4 Pb 的变异函数模型

Fig. 4 The variance model of Pb

引起的空间变异性占总空间变异性的 59.77%, 主要体现在小尺度上 (相当于数据最小分辨率, 即样点间最小距离), 而由空间自相关引起的空间变异性占总变异性的 40.23%, 主要体现在中尺度范围内 (相当于样点间最小距离到最大相关距离范围), 这表明小尺度上土壤 Pb 含量无明显变化规律, 其空间变异受施肥、作物和管理水平等人为因素的影响较大, 而中尺度具有一定的渐变性分布规律。按照区域化变量空间相关性程度的分级标准^[7], 该区土壤 Pb 变异函数的 $C_0/C+C_0$ 为 59.77%, 表明其具有中等强度空间相关性。由图 4 可知该区土壤 Pb 的空间自相关变程范围 (574.39m) 大于取样点间距 (100m), 因此该区采样设计在克里格内插时显示了较好的空间相关性。

2.3 土壤 Pb 的克里格插值

因土壤中 Pb 的分布类型符合对数正态分布, 故应采用对数正态克里格法进行内插, 其插值结果见图 5。图 5 表明该区土壤 Pb 的空间分布特点是正北方含量低, 低于国家 1 级水平临界值, 而正东方向、东南和东北方向含量较高超过国家 1 级标准。根据国家标准 (GB 15618-1995) 将该区土壤中 Pb 含量插值后划分为两

级,其中土壤 Pb 含量 $< 35\text{mg/kg}$ 的无污染或微污染为 1 级;而 2 级划分中根据其污染程度人为划分为轻度污染(土壤 Pb 含量为 $35 \sim 70\text{mg/kg}$)和中度污染(土壤 Pb 含量 $> 70\text{mg/kg}$),该区土壤中 Pb 含量低于国家 1 级标准的有 29.79hm^2 , 占该区总面积的 29.79% , 而 70.21hm^2 土壤中 Pb 含量属国家 2 级标准, 占该区总面积的 70.21% , 其中属中度污染土壤占总面积的 21.05% 。

3 小 结

重金属污染具有不可逆性、长期性、后果严重性和不易消除等特点,故应发展污染土壤修复技术,建立土壤重金属污染的预警指示体系,防范于未然。本研究结果表明所研究的尺度土壤 Pb 存在空间变异结构,具有一定程度的块金方差(C_0)和中等强度的空间相关性。Pb 分布类型符合对数正态分布,半方差图遵从指数和高斯的套合结构模型。该区水稻土中 Pb 含量明显高于紫色土,且水稻土中 Pb 含量大部分超过国家 1 级标准值,这一方面与人类耕作管理措施有关,如施肥方式、施肥结构的不同以及过量施用农药等;另一方面 Pb 在酸性环境且有水条件下更易从土壤中溶滤出来,而 Pb 又不具移动性,故易在水稻田中积累。该区土壤中 Pb 含量仅有 29.79% 面积属国家 1 级标准,有 70.21% 面积为国家 2 级标准,其中有 21.05% 面积属中度污染。该区郎家八村因施用堆渣肥为底肥,其土壤中 Pb 含量明显偏高,其原因一是增加了土壤有机质含量,使 Pb 含量偏高;二是其养分有别于人粪尿,从而影响土壤中 Pb 含量所致。

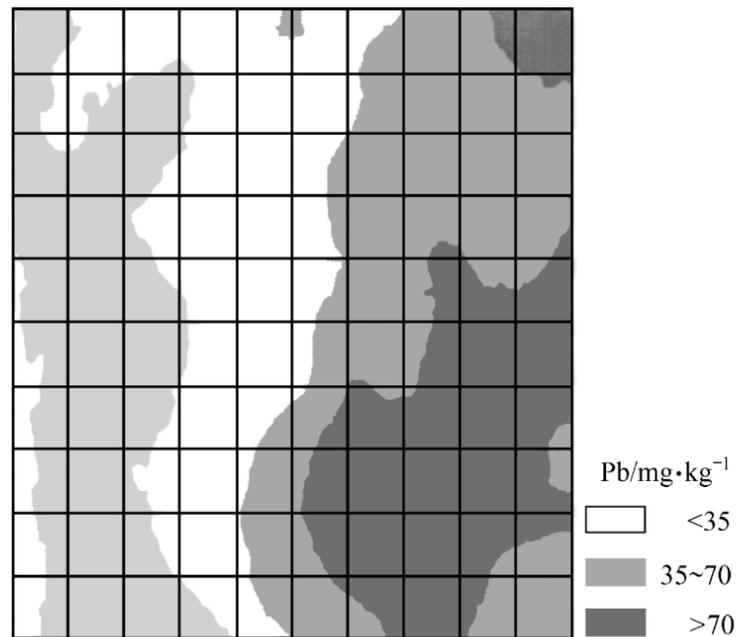


图 5 土壤 Pb 的克里格插值图

Fig.5 The interpolation map of Pb

参 考 文 献

- 1 王政权.地统计学及在生态学中的应用.北京:科学出版社,1999
- 2 Fisher M. Recent Development in Spatial Analysis. Berlin: Springer, 1997. 1 ~ 220
- 3 Clark E. B., Thornton I., Watt J., *et al*. Metal contamination in British urban dusts and soils. J. Environ. Qual., 1988, 17: 226 ~ 234
- 4 Krige D. G. On the departure of ore value distributions from lognormal models in South African gold mines. J. S. Afr. Inst. Mining Metall., 1960, 61: 231 ~ 244
- 5 Zhang C. S., Selinus O. Statistics and GIS in environmental geochemistry—Some problems and solutions. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 64: 339 ~ 354
- 6 Gringarten E., Deutsch C. V. Teacher's aide: variogram interpretation and modeling. Mathematical Geology, 2001, 33(4): 507 ~ 534
- 7 Cambardella C. A., Moorman T. B., Novak J. M., *et al*. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 1501 ~ 1511