

基于 GIS 和 GPS 的沱江中游土壤镉和铅空间变异研究

刘洁¹, 张世熔¹, 李婷¹, 王琼瑶¹, 黄元仿², 孙丹峰², 李保国²

(1.四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014; 2.中国农业大学资源环境学院, 北京 100094)

摘要:采用 ArcGIS9.0 和 GPS 技术对沱江中游 314 个土壤样点的耕层中(0~20 cm)镉和铅含量空间变异分布特征及影响因素进行了研究。结果表明,该区土壤镉和铅呈对数正态分布,土壤镉平均含量为 $(0.11\pm 0.13) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,铅平均含量为 $(30.03\pm 9.82) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤镉空间分布是以赵家镇为高值区($0.15\sim 0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),并向东南和西北两侧条带状递减,东南部土壤镉含量主要为 $0.06\sim 0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤铅空间分布以西北部钦北-关帝庙($35\sim 38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和东南部广兴一带($>38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)两个高值中心分别向两侧逐渐减少。影响因素研究表明,不同质地间土壤镉含量差异不显著,但粘土的铅含量显著高于其他质地土壤。pH 与土壤镉含量呈显著正相关,与铅含量呈极显著正相关;酸性、中性土壤镉和铅含量均极显著少于碱性和强碱性土壤。有机质与土壤镉和铅含量均呈极显著相关性,林地、旱地、果园、宅基地林盘和水田 5 种土地利用方式中镉和铅含量依次增加。土壤镉和铅含量与坡度的相关性关系,表现出土壤镉和铅含量与坡度呈正相关渐变的过程。

关键词:镉;铅;空间分析;GIS;GPS;影响因素

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)10-2035-07

Spatial Distribution Characteristics of Soil Cadmium and Lead in the Middle Reaches of Tuojiang River Basin Based on GIS and GPS

LIU Jie¹, ZHANG Shi-rong¹, LI Ting¹, WANG Qiong-yao¹, HUANG Yuan-fang², SUN Dan-feng², LI Bao-guo²

(1. College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China; 2. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: According to the chemical analysis data of Cd and Pb content which were from the 314 random sampling points in topsoil (0~20 cm), we studied the spatial distribution characteristics and influential factors of soil Cd and Pb in the middle reaches of Tuojiang River Basin based on the software ArcGIS9.0 and the software of Statistical Product and Service Solutions. The results indicated that the contents of soil Cd and Pb were $(0.11\pm 0.13) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $(30.03\pm 9.82) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The highest value regions ($>0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) of Cd content were mainly distributed in the northeast part of study area, and then reduced gradually towards both sides, presenting zonal shapes. On the other hand, the lowest value regions ($<0.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) were located in north and the south part of study area. Taking the middle part as the center, the Pb content first increased to the both sides and then decreased towards its southeast and northwest. Further more, the highest value region ($>38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) was mainly distributed in the east part, while the lowest value region ($<22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) was distributed in the middle part of the study area. The analysis of influential factors showed that the content and spatial distribution of Cd and Pb was influenced by soil texture, pH, and the content of organic matter, land use types and slopes. In different soil texture, the content of Cd was highest in light loam [$(0.150\pm 0.105) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$], then in heavy loam [$(0.107\pm 0.064) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] and loam [$(0.097\pm 0.072) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$], it was lowest in clay [$(0.096\pm 0.065) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] and sandy loam [$(0.086\pm 0.040) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]; The content of Pb in clay [$(31.65\pm 8.15) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] was significantly higher than that of heavy loam [$(28.15\pm 6.94) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$], loam [$(27.63\pm 7.73) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] and sandy soil [$(23.60\pm 4.85) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]. pH was the power positive correlation with soil Cd content, and highly positive correlative with soil Pb content. The concentrations of Cd and Pb in acid and neutral soil were significant-

收稿日期:2009-03-27

基金项目:科技部科技支撑计划(2006BAD10A01, 2006BAD10A06 和 2008BAK51B02)

作者简介:刘洁(1988—),女,四川广元人,主要从事土地利用与土壤污染调查。E-mail:helena813j@163.com

通讯作者:张世熔 E-mail:rsz01@163.com

ly lower than those in alkali and strong alkali soils. Correlation analyses indicated that the relationships between soil organic matter and the content of Cd or Pb were highly significance. The contents of Cd and Pb were decreased from woodland, dry field, orchard, house site to paddy field. Furthermore, both Cd and Pb contents in soils were highly significantly grew as the increase of the slopes.

Keywords: cadmium; lead; spatial distribution; GIS; GPS; influence factor

镉和铅是环境中危害较大的重金属^[1-2],它们在农田土壤中含量过高会通过粮食、果蔬等农产品经食物链的传递危害人体健康^[3]。因此,其含量、空间分布特征与作物品质关系以及影响因素受到广泛重视^[4-8]。其中,镉和铅在土壤中的分布已从少数样点的研究转向样点较多的农田尺度或区域尺度下的空间分布特征研究^[9-11]。近年来,随着全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)和地统计学(Geostatistics)在环境研究中的采用,土壤重金属空间分布也逐渐采用这些方法进行研究^[12-14]。McGrath 等(2004)用地统计学和 ArcView 结合研究爱尔兰 Silvermines 地区土壤铅的空间分布及其风险评价^[15],曹会聪等(2007)报道了东北农田黑土中 Cd、Pb 等重金属的含量空间分异特征^[16],Liu 等(2006)用地统计学和 GIS 结合研究水田土壤重金属样点的抽样不定性和风险评估^[17],Rodríguez Martín 等(2006)用多变量地统计学方法研究了西班牙农田表层土的重金属含量^[18],Rodríguez Lado 等(2008)用地统计学分析欧洲土壤重金属分布^[19]。但是在地形破碎且人口稠密的中国南方丘陵地区,将上述几种方法与常规生物统计学相结合用于农田土壤镉铅的空间分布特征及其影响因素的研究却鲜见报道。

沱江流域中部地貌以丘陵为主,丘谷相间,且平坝、浅丘、中丘、高丘和低山皆有分布。该区是四川重要的粮、油及蔬菜生产基地,人口密度达 750~1 000 人·km⁻²。因此,本文选择该区为典型区域,研究人口稠密的丘陵地区土壤铅和镉的空间分布特征及其影响因素,以期为本区无公害生产基地或绿色食品生产基地的选择和农田土壤污染的控制提供依据。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区域位于四川盆地沱江中游,地理位置介于东经 104°25′06″~104°51′54″,北纬 30°29′30″~30°58′41″,幅员面积 115 560 hm²。区内西北部、中西部和东南部分属平坝浅丘、高丘低山和中低丘地貌,地势由中西部逐渐向东、西两侧降低。气候为亚热带湿润季风气候,气温温和,雨量充沛,年均降雨量 920.5 mm,蒸发

量为 1 169.1 mm,年日照时数 1 268.7 h,无霜期 285 d。植被类型以柏树为主的次生林。成土母质以侏罗系蓬莱镇组、白垩系城墙岩群紫红色砂岩、泥岩的残坡积物为主,沱江及其支流沿岸分布有第四系近代河流冲积物;土壤类型主要为紫色土、水稻土和潮土。旱地、水田和林地是区内主要利用方式。该区为四川省小麦、水稻、玉米、油菜和柑桔的主产区之一。

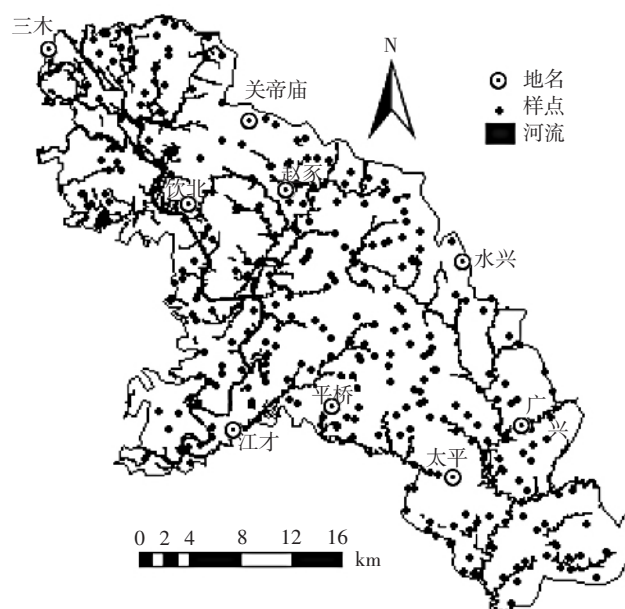


图 1 样点分布图

Figure 1 Distribution map of sampling points

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集及分析

土壤样品采集:考虑到研究区域的社会经济条件以及自然环境如成土母质、土壤类型、地形条件和土地利用等因素,共调查样点 314 个,每个样点土样由同一地块的 3 个表层(0~20 cm)土壤样品混合组成。

土壤样品分析:土壤样品经自然风干,磨细,过 2 mm 筛,供分析测定用。称取 0.100 0 g 样品置于聚四氟乙烯塑料坩埚中,加几滴蒸馏水湿润,加 10 mL HNO₃:HClO₄ = 1:1 (体积比),15 mL HF,低温加热至冒白烟,再加 5 mL HNO₃,加热至白烟冒尽,冷却后,加入 5 mL 2 mol·L⁻¹ HCl 溶解,转移至 25 mL 容量瓶,定

容、过滤,待测。待测液采用美国热电公司的 ICP-AES (IRIS Intrepid II)测定。

1.2.2 数据统计分析

采用 SPSS13.0 软件包的 K-S 检验分析土壤镉和铅含量分布的正态性,通过相关回归分析、单因素方差分析(ANOVA)研究不同土壤质地、土壤 pH、有机质、土地利用方式和坡度对土壤镉和铅含量的影响,平均数比较采用最小显著差数法(LSD)。

1.2.3 空间变异特征分析方法

在 ArcGIS9.0 平台上,土壤的铅、镉含量的半方差分别用球状、指数和高斯等理论模型进行拟合,根据拟合误差大小选出最适模型,然后用普通克立格法(Ordinary kriging)内插获得空间变异分布图。

采用区域分析研究土地利用类型和坡度对土壤镉和铅含量的影响。在 ArcGIS9.0 平台上,先将镉和铅含量的空间分布图转化为栅格图,再与土地利用现状图一起进行区域分析(Zonal statistic)。

2 结果与分析

2.1 土壤镉、铅含量的统计特征

采用统计软件 SPSS13.0 单一样本 K-S 检验方法对四川省沱江中游土壤中镉和铅进行常规统计,结果表明(表 1),研究区 314 个土壤样点的镉和铅含量呈对数正态分布,其土壤镉、铅含量分别为 (0.10 ± 0.07) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(29.56\pm8.24)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根据国家环境土地标准,土壤镉含量达到国家一级、二级和三级含量标准的样点分别为总样点数的 92.7%、6.7%和 0.6%。土壤铅含量达到国家一级、二级含量标准的样点分别为总样点数的 79.6%和 20.4%。

2.2 镉和铅的空间分布特征

土壤镉和铅含量的空间变异函数分别用球状、指

数和高斯等理论模型进行拟合检验,均以球状模型最佳(表 2)。其中,土壤镉和铅的块金值与基台值之比分别为 63.82%和 56.57%,表明二者具有中等程度的空间相关。土壤镉和铅的空间变程分别为 39.492 km 和 47.982 km,表明土壤镉和铅的空间自相关范围差异较大。

土壤镉的空间分布总体上呈现以区内西北部城镇即赵家镇为高值区($0.15\sim0.30\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),并以该高值区东南的太平-宏缘一线和西北部的三水一带呈条带状递减至 $0.05\sim0.06\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的低值区;区域东南部土壤镉含量主要为 $0.06\sim0.15\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。调查区内土壤镉含量达到国家一、二级标准的土地分别占区域面积的 99.78%和 0.22%。

土壤中铅的空间分布则呈两个高值中心。研究区西北部以钦北-关帝庙一带为高值中心($35\sim38\text{mg}\cdot$

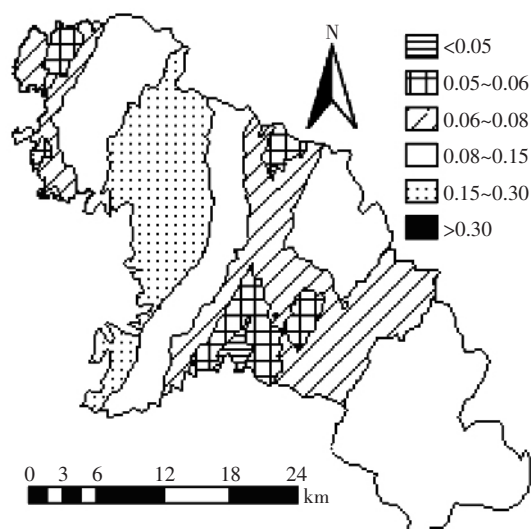


图 2 土壤镉空间分布图

Figure 2 Spatial distributions for soil Cd

表 1 土壤镉和铅统计特征

Table 1 Statistical characters of soil Cd and Pb

项目 Item	样点数 Sampling No.	分布类型 Distribution type	最小值 Min/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 Max/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 Mean/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 Std.Dev.	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
Cd	314	对数正态 Lognormal	0.01	0.36	0.10	0.07	1.026 ± 0.138	0.853 ± 0.274
Pb	314	对数正态 Lognormal	12.56	73.72	29.56	8.24	1.011 ± 0.138	2.831 ± 0.274

表 2 土壤镉、铅变异函数相关参数

Table 2 Semivariance models of soil Cd and Pb

项目 Item	模型 Model	变程 Range/km	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金值/基台值 $C_0/(C_0+C)$	预测误差 Predication errors	
						平均误差 Mean error	标准化平均误差 Mean standardized error
Cd	球状模型 spherical	39.492	0.003 0	0.004 7	0.638 2	-0.000 41	-0.006 58
Pb	球状模型 spherical	47.982	43.276	76.499	0.565 7	-0.037 96	-0.005 275

kg^{-1}),分别逐渐减少至西北的三水($22\sim 28\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和东南永兴-平桥一带($<22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);东南部除东南边缘为 $35\sim 38\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外,呈现以广兴为高值中心($>38\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)分别向东南和西北两侧条带状减少。调查区内土壤铅含量达到国家一级、二级标准的土地分别占区域面积的 92.30%和 7.70%。

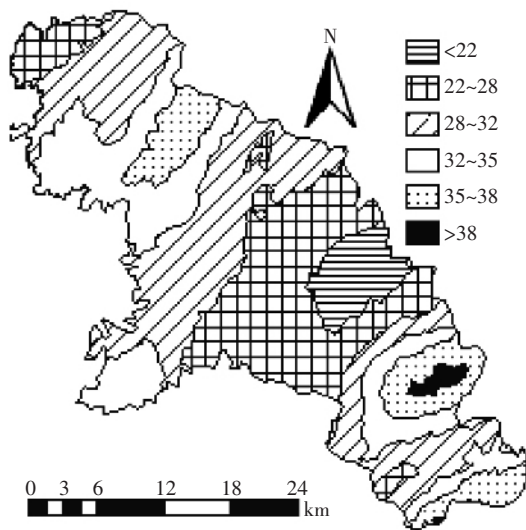


图 3 土壤铅空间分布图

Figure 3 Spatial distributions for soil Pb

2.3 镉和铅含量的影响因素分析

影响土壤镉和铅含量空间分布的因素包括土壤环境条件、土壤其他组分和土地利用等因素。下面仅就该区土壤质地、pH、有机质、土地利用方式和坡度对镉和铅含量空间分布的影响进行探讨。

2.3.1 质地

沱江中游土壤质地按卡庆斯基制分为砂土、砂壤土、轻壤土、中壤土、重壤土和粘土 6 种土壤类型进行统计(表 3)。

表 3 不同质地和不同 pH 下土壤镉、铅平均含量

Table 3 Cd and Pb contents under different texture and pH in soil

影响因素 Influential factors	分类 Classify	样点数 Sampling No.	Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
质地 Texture	砂土 Sandy soil	4	$0.06\pm 0.05\text{ b}$	$23.60\pm 4.85\text{ bB}$
	砂壤土 Sandy loam	12	$0.09\pm 0.04\text{ b}$	$27.59\pm 15.15\text{ bB}$
	轻壤土 Light loam	7	$0.15\pm 0.11\text{ a}$	$28.54\pm 11.54\text{ abAB}$
	中壤土 Loam	30	$0.10\pm 0.07\text{ ab}$	$27.63\pm 7.73\text{ bB}$
	重壤土 Heavy loam	124	$0.11\pm 0.06\text{ ab}$	$28.15\pm 6.94\text{ bB}$
	粘土 Clay	137	$0.09\pm 0.06\text{ b}$	$31.65\pm 8.15\text{ aA}$
酸碱度 pH	<5.0	3	$0.07\pm 0.00\text{ bB}$	$22.76\pm 7.64\text{ bB}$
	$5.0\sim 6.5$	39	$0.06\pm 0.04\text{ bB}$	$26.96\pm 7.59\text{ bB}$
	$6.5\sim 7.5$	33	$0.08\pm 0.05\text{ bB}$	$25.49\pm 6.42\text{ bB}$
	$7.5\sim 8.5$	245	$0.11\pm 0.07\text{ aA}$	$30.57\pm 8.36\text{ aA}$
	>8.5	5	$0.16\pm 0.03\text{ aA}$	$30.52\pm 5.79\text{ aA}$

注:多重比较采用最小显著差数法,小写字母代表 0.05 显著水平,大写字母代表 0.01 显著水平,处理之间有相同字母者差异不显著。

Notes: Lowercase represent $\alpha=0.05$, capital letter represent $\alpha=0.01$; Average values followed by the same letter in the table are not different at $\alpha=0.05$ or $\alpha=0.01$ using LSD test.

统计表明,6 种质地之间的镉含量差异未达到极显著水平($F_{(5,308)}=1.527, P=0.156$),但铅含量差异达到极显著水平($F_{(5,308)}=3.527, P=0.004^{**}$)。采用 LSD 方法得出铅在粘土中含量(31.65 ± 8.15) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 极显著高于重壤土(28.15 ± 6.94) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于中壤土(27.63 ± 7.73) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和砂土(23.60 ± 4.85) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.3.2 pH

研究区土壤 pH 范围在 4.89~8.74,若将它们按 <5.0 、 $5.0\sim 6.5$ 、 $6.5\sim 7.5$ 、 $7.5\sim 8.5$ 、 >8.5 分为强酸性、酸性、中性、碱性、强碱性土壤(表 3)。pH 与土壤镉含量呈显著正相关($P=0.026$),与铅含量呈极显著正相关($P=0.004$)(图 4)。

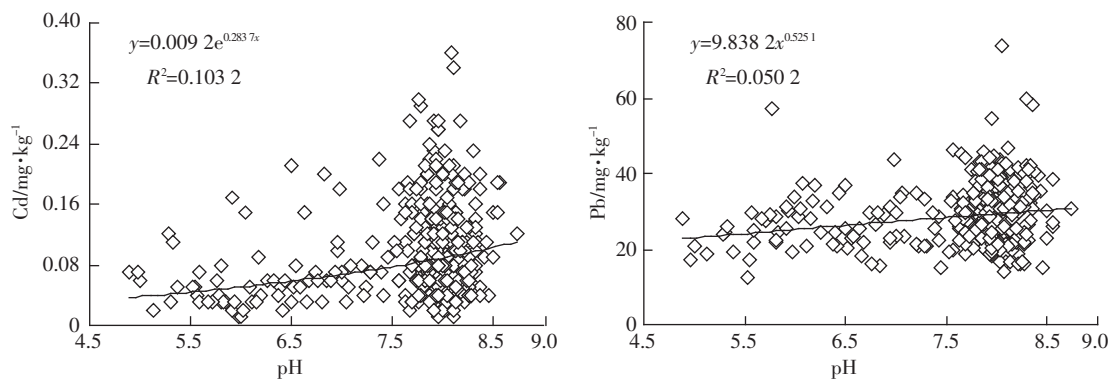


图 4 土壤镉和铅含量与 pH 关系

Figure 4 Cd and Pb contents with pH in soil

统计表明,5种pH之间的镉含量差异达到极显著水平($F_{(4,309)}=8.123^{**}$, $P=0.000$),采用LSD分析土壤镉含量与pH分级的关系为强碱性土壤(0.16 ± 0.03) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和碱性土壤(0.11 ± 0.07) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 极显著高于酸性(0.06 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于中性(0.08 ± 0.05) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤镉的含量随pH增大而逐渐增加,这是因为土壤中的镉易发生水解而可以被土壤吸附以及随着pH值增大加快了金属离子与腐植酸及粘土矿物表面的络合和吸附作用,因此土壤镉的溶解度都随酸碱度影响而增加^[20]。

统计表明,5种pH之间的铅含量差异达到极显著水平($F_{(4,309)}=4.338^{**}$, $P=0.002$),在强酸性土壤中铅含量最少为(19.66 ± 5.85) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这是因为在低pH值下, H^+ 与Pb离子发生强烈的竞争。LSD分析表明,铅含量在强碱性土壤[(30.52 ± 5.79) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]和碱性土壤[(30.57 ± 8.36) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]中极显著高于酸性[(26.96 ± 7.59) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]和中性土壤[(25.49 ± 6.42) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]。

2.3.3 有机质

沱江流域中游土壤有机质(OM)含量范围为2.60~53.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质含量与土壤镉和铅含量均呈极显著相关($P<0.001$)(图5)。

本文将研究区内土壤样点的有机质含量按照 <5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、5~15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、15~25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、25~35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 >35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分为Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级。研究区内土壤镉含量为Ⅴ级[(0.15 ± 0.10) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] $>$ Ⅲ级[(0.10 ± 0.07) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] $>$ Ⅱ级[(0.10 ± 0.06) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]=Ⅳ级[(0.10 ± 0.06) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] $>$ Ⅰ级[(0.08 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]。这是因为土壤中的有机质,通过土壤微生物作用,形成土壤腐殖质,由此增加了土壤表面积和表面活性,使土壤对镉的吸附能力随有机质增加而增加,但各个有机

质含量分级土壤中镉的含量差异并不显著($P>0.05$)。研究区内土壤铅含量高低顺序为Ⅰ级[(34.13 ± 13.49) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] $>$ Ⅳ级[(31.09 ± 7.72) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] $>$ Ⅲ级[(30.51 ± 7.84) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] $>$ Ⅴ级[(29.16 ± 3.74) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] $>$ Ⅱ级[(28.70 ± 8.08) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]。其中,有机质含量为Ⅱ级与其余级别的土壤中铅含量差异显著,而其他级别间差异均不显著(表4)。

表4 不同有机质下土壤镉、铅平均含量

Table 4 Soil Cd and Pb average content under different

organic matter			
OM/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	样本数 Sampling No.	Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
<5	11	0.08 ± 0.04	34.13 ± 13.49 a
5~15	195	0.10 ± 0.06	28.70 ± 8.08 b
15~25	72	0.10 ± 0.07	30.51 ± 7.84 a
25~35	32	0.10 ± 0.06	31.09 ± 7.72 a
>35	4	0.15 ± 0.10	29.16 ± 3.74 a

2.3.4 土地利用方式

沱江中游农业发达,土地利用方式多样。在研究区内土地利用类型以旱地、水田、宅基地林盘居多,其他土地利用类型较少且分布较为零星。因此,本文重点分析区内林地(WL)、旱地(DL)、果园(O)、宅基地林盘(HS)以及水田(PF)5种利用方式下土壤镉和铅含量的差异(图6)。

在ArcGIS9.0平台上,先将镉和铅含量的空间分布图转化为栅格图,再与土地利用现状图一起在spatial analysis模块的Zonal Statistic工具分析中表明,在不同利用方式下,研究区内土壤镉含量为水田[(0.13 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] $>$ 宅基地林盘[(0.11 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]=果园[(0.11 ± 0.03) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] $>$ 旱地[(0.10 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] $>$ 林地[(0.08 ± 0.03) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$],而土壤铅含量为水田

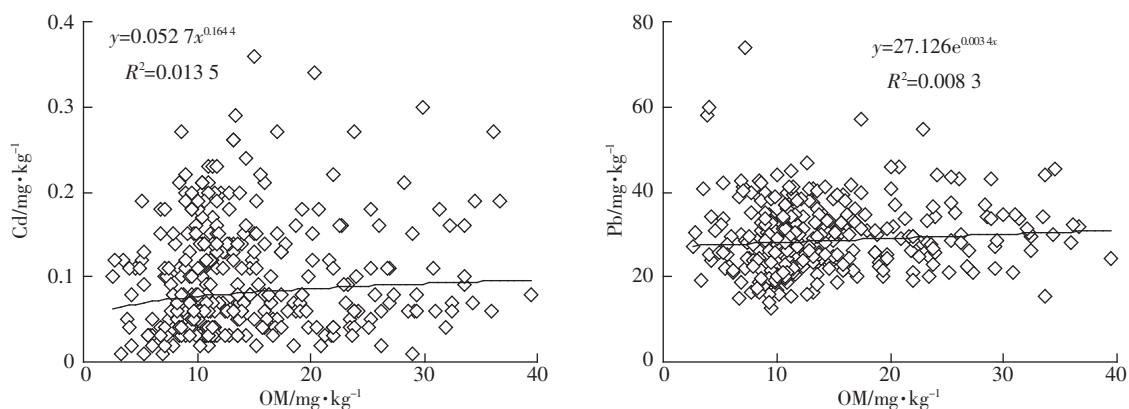


图5 土壤镉和铅含量与有机质的关系

Figure 5 Cd and Pb contents with organic matter in soil

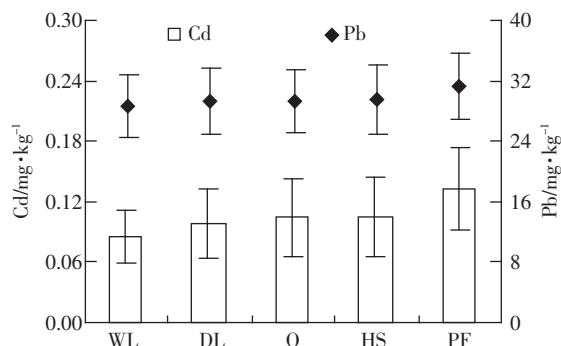


图 6 不同土地利用土壤中镉和铅的含量

Figure 6 Cd and Pb contents with different landuse

$[(31.27 \pm 4.41) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}] > \text{宅基地林盘} [(29.59 \pm 4.60) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}] > \text{果园} [(29.34 \pm 4.17) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}] > \text{旱地} [(29.25 \pm 4.32) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}] > \text{林地} [(28.62 \pm 4.10) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 。因此,研究区域内土壤镉和铅含量均在林地土壤含量最低,在水田土壤含量最高。

2.3.5 坡度

若将坡度 $0^\circ \sim 5^\circ$ 、 $5^\circ \sim 10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 25^\circ$ 、 $>25^\circ$ 用 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级、VI 级表示,则在不同坡度上土壤镉和铅的含量有一定的变化(图 7)。在 ArcGIS9.0 平台上,首先利用纸质地图上的等高线建立数字高程模型(Digital elevation model, DEM),然后由 DEM 模型提取坡度栅格图。最后将该坡度栅格图层分别与镉或铅的栅格图层进行区域分析统计(Zonal Statistic)获得各坡度土壤的镉或铅平均含量,得到土壤镉在随坡度增加呈逐渐增加的变化趋势,依次分别为 0.09、0.11、0.12、0.13、0.15 和 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由图 7 可看出,土壤镉含量与坡度的相关性关系,表现出土壤镉含量与坡度呈正相关渐变的过程。土壤铅的含量与坡度也呈正相关,且随坡度增加呈逐渐增加趋势,依次分别为 1.10、7.38、12.31、

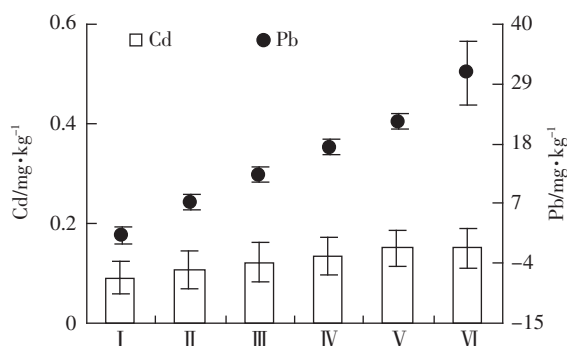


图 7 不同坡度土壤中镉和铅的含量

Figure 7 Cd and Pb content with different gradient

17.27、22.16 和 $31.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3 结论

(1)本研究区选在具有人口稠密丘陵区的代表性的沱江中游,选取 314 个土壤样本中镉和铅均呈对数正态分布。土壤镉含量为 $(0.11 \pm 0.13) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铅的含量为 $(30.03 \pm 9.82) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(2)研究区域土壤镉的空间分布总体上呈现以区内西北部城镇即赵家镇为高值区($0.15 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),并以该高值区东南的太平-宏缘一线和西北部的三水镇一带呈条带状递减至 $0.05 \sim 0.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的低值区;区域东南部土壤镉含量主要为 $0.06 \sim 0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤中铅含量则呈两个高值中心。研究区西北部以钦北-关帝庙一带为高值中心($35 \sim 38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)分别逐渐减少至西北的三水镇($22 \sim 28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和东南永兴-平桥一带($<22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);东南部除东南边缘为 $35 \sim 38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 外,呈现以广兴为高值中心($>38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)分别向东南和西北两侧条带状减少。

(3)影响因素的分析表明,土壤质地、pH、有机质含量、土地利用方式以及坡度是土壤铅镉空间分布的主要因素。不同质地镉含量差异不显著,但粘土铅含量($31.65 \pm 8.15) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 极显著高于重壤土($28.15 \pm 6.94) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于中壤土($27.63 \pm 7.73) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和砂土($23.60 \pm 4.85) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。pH 与土壤镉呈显著正相关,和铅含量呈极显著正相关;不同 pH 之间的镉和铅含量差异达到极显著水平,酸性、中性土壤镉和铅含量极显著少于碱性和强碱性土壤。有机质与土壤镉含量和铅含量均呈极显著相关。林地、旱地、果园、宅基地林盘和水田 5 种土地利用方式中镉和铅含量依次增加。土壤镉和铅含量与坡度的相关性关系,表现出土壤镉和铅含量与坡度呈正相关渐变的过程。

参考文献:

- [1] Farrell K P, Brophy M C, Chisolm Jr, et al. Soil lead abatement and children's blood lead levels in an urban setting[J]. *American Journal of Public Health*, 1998, 88(12): 1837-1839.
- [2] Alonso E, Cambra K, Martinez T. Lead and cadmium exposure from contaminated soil among residents of a farm area near an industrial site[J]. *Archives of Environmental Health*, 2001, 56(3): 278-282.
- [3] Oymak T, Tokalioglu S, Yilmaz V, et al. Determination of lead and cadmium in food samples by the coprecipitation method[J]. *Food Chemistry*, 2009, 113(4): 1314-1317.
- [4] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 311: 205-219.

- [5] 张乃明, 李保国, 胡克林. 太原污灌区土壤重金属和盐分含量的空间变异特征[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3): 349-353.
ZHANG Nai-ming, LI Bao-guo HU Ke-lin, et al. Spatial variabilities of heavy metals and salt contents in soils of Taiyuan sewage irrigation region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(3): 349-353.
- [6] Krishna A K, Govil P K. Heavy metal contamination of soil around Pali Industrial Area, Rajasthan, India[J]. *Environmental Geology*, 2004, 47: 38-44.
- [7] Scancar J, Milacic R, Strazar M, et al. Total metal concentrations and partitioning of Cd, Cr, Cu, Fe, Ni and Zn in sewage sludge[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 250: 1-3.
- [8] Sippola J, Makela K R, Rantala P R. Effects of composted pulp and paper industry wastewater treatment residuals on soil properties and cereal yield[J]. *Compost Science and Utilization*, 2003, 11: 228-237.
- [9] Brus D J, de Gruijter J J, Walvoort D J J, et al. Mapping the probability of exceeding critical threshold for cadmium concentrations in soils in the Netherlands[J]. *J Environ Qual*, 2002, 31: 1875-1884.
- [10] Moreno-Jiménez E, Peñalosa J M, Manzanoa R, et al. Heavy metals distribution in soils surrounding an abandoned mine in NW Madrid (Spain) and their transference to wild flora[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162: 854-859.
- [11] Nuissl H, Haaseb D, Lanzendorf M, et al. Environmental impact assessment of urban land use transitions—A context-sensitive approach[J]. 2009, 26: 414-424.
- [12] Goovaerts P. Geostatistical modeling of uncertainty in soil science[J]. *Geoderma*, 2001, 103: 3-26.
- [13] Franco C, Soares A, Delgado J. Geostatistical modelling of heavy metal contamination in the topsoil of Guadamar river margins (Spain) using a stochastic simulation technique[J]. *Geoderma*, 2006, 136: 852-864.
- [14] Carme H S, Eusebi J B, Yulian G T, et al. Indirect geostatistical methods to assess environmental pollution by heavy metals[J]. *Case study: Ukraine*, 2005, 21(2): 661-667.
- [15] McGrath D, Zhang C S, Carton O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 127(2).
- [16] 曹会聪, 王金达, 张学林. 东北农田黑土中 Cd、Pb、As 含量空间分异特征分析[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 341-346.
CAO Hui-cong, WANG Jin-da, ZHANG Xue-lin. Spatial distribution characteristics of Cd, Pb and As contents in the farmland black soil in the Northeast of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 341-346.
- [17] Liu Xingmei, Wu Jianjun, Xu Jianming. 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.
- [18] José Antonio Rodríguez Martín, Manuel López Arias, et al. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geostatistical methods to study spatial variations[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3): 1001-1012.
- [19] Luis Rodríguez Lado, Tomislav Hengl, Hannes I Reuter. Heavy metals in European soils: a geostatistical analysis of the FORRGS Geochemical database[J]. *Geoderma*, 2008, 148(2): 189-199.
- [20] 林大松, 徐应明, 孙国红, 等. 土壤 pH、有机质和含水氧化物对镉、铅竞争吸附的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 510-515.
LIN Da-song, XU Ying-ming, SUN Guo-hong, et al. Effects of pH, organic matter and hydrous oxides on competitive adsorption of Cd²⁺ and Pb²⁺ by soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 510-515.