

川中典型丘陵区土壤砷和汞空间变异特征及影响因素分析

徐小逊, 张世熔, 李丹阳, 李 婷, 李 云, 唐美英

(四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014)

摘 要:采集耕层(0~20 cm)土样 325 个,在 ArcGIS9.0 平台上运用地统计学方法研究川中典型丘陵区土壤中砷和汞含量的空间变异特征及其主要影响因素。结果表明,研究区土壤砷和汞含量分别为 $(8.57\pm 0.175)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(0.078\pm 0.067)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均未超过国家土壤环境质量一级标准。土壤砷含量在空间上整体呈环状分布,以西北部云绣-赵镇一带和中东部黄家乡-三溪-金龙一带呈现出 2 个高值中心($>10.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),并由这两个中心向北部和东南部两侧逐渐降低。汞含量整体也呈环状分布,但局部出现斑点、块状区域,高值中心($>0.090\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)有 4 处,分别位于赵镇、西沟、白果及淮口附近,汞含量沿中心区向两侧逐渐递减。影响因素分析表明,土壤砷和汞含量总体呈现出灌溉水田最高,疏林地最低的特点。不同土壤质地间砷、汞含量差异显著,砷含量在粘土($10.09\pm 2.93\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)中最高,汞含量在中壤土($0.112\pm 0.120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)中最高。此外,土壤 pH 值与砷、汞含量呈显著负相关关系,而土壤有机质与二者均呈极显著正相关关系。

关键词:砷;汞;空间分析;影响因素

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)07-1320-06

Spatial Variability Characteristics and Influencing Factors of Soil Arsenic and Mercury in the Typical Hilly Region of Central Sichuan, China

XU Xiao-xun, ZHANG Shi-rong, LI Dan-yang, LI Ting, LI Yun, TANG Mei-ying

(College of Resources and Environment, Sichuan Agriculture University, Yaan 625014, China)

Abstract: The heavy metal accumulation in soils has become a potential threat. Understanding spatial variability and influencing factors of soil heavy metals is an important precondition for safety in agricultural production. 325 random sampling points in topsoil (0~20 cm) from the typical hilly region of Central Sichuan were assembled for testing the content of As and Hg, and geostatistical methods were used to analyze their spatial distribution. The results showed that the average contents of As and Hg were $(8.57\pm 0.175)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $(0.078\pm 0.067)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. And the contents of heavy metal were lower than the soil threshold levels of the Grade I criteria for the Chinese environmental quality standard. The highest value regions ($>10.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) of As mainly distributed in northwest and middle-eastern area, then reduced gradually towards north and southeast, presenting annular distribution on the whole. While the lowest value regions ($<6.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) located in southeast part of study area. Relatively, the distribution pattern of Hg was more complicated. There were four highest value regions ($>0.09\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and mainly distributed in northwest, east and southwest. Taking the highest part as the center, the Hg content decreased towards northwest and southeast. On the other hand, the lowest value regions ($<0.045\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) were situated in southwest and middle-eastern area. The distribution of soil As and Hg was influenced by land use types, soil texture, soil pH and organic matter (OM). In different land use types, the content of As and Hg were highest in paddy field and lowest in woodland. The content of As and Hg in soil had significant difference with soil texture. The content of As was highest in clay ($10.09\pm 2.93\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and Hg was highest in loam ($0.11\pm 0.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Additionally, the content of As and Hg exhibited significant negative correlation with soil pH and remarkable positive correlation with soil OM.

Keywords: arsenic; mercury; spatial variability; influencing factors

收稿日期:2010-01-26

基金项目:国家科技支撑计划(2007BAD89B15, 2008BAK51B01 和 2008BAK51B02)

作者简介:徐小逊(1979—),男,四川乐山人,硕士,讲师,主要从事农业生态与生态工程研究。E-mail: flying3386@126.com

通讯作者:张世熔 E-mail: rsz01@163.com

土壤重金属作为生态环境质量好坏的重要指示物,越来越受到人们的广泛关注。重金属含量受自然因素和人类活动的共同影响,农业原料、土地利用方式、农药以及化肥施用等都会影响土壤重金属的含量及分布,土壤重金属在作物中不断积累并通过食物链破坏及改变动物和人的生理机能,造成一系列危害^[1-4]。因此,掌握土壤重金属的空间变异特征对于环境管理和农产品生产安全至关重要^[5-6]。砷的性质和金属很相似,在土壤重金属研究中也把砷包括在内^[7]。砷和汞都是引起土壤污染的重要元素,其含量、分布规律、影响因素及对生物体的危害日益受到广泛重视^[8-11]。

随着地理信息系统的广泛应用,利用地统计学空间分异研究中的变异函数和克里格插值研究土壤中重金属元素的空间分布特征,已成为目前土壤重金属污染研究的热点^[12-15]。Luis Rodríguez Lado 等利用欧洲地质勘测数据集和地统计学方法分析了欧洲 26 个国家砷、汞等重金属在农田耕层土中的空间变异特征^[16],Dou Lei 等研究了东莞市农田重金属的空间分布及影响因素^[17]。但是在人口稠密的川中丘陵区利用地统计学方法进行土壤砷、汞空间变异及影响因素的研究还不多见。

川中丘陵区位于四川盆地中部,以中、浅切割的丘陵地貌为主,抗蚀性较弱的紫色土广泛分布。区域总面积 8.77 万 km²,占四川省国土面积的 18.1%,人口密度达 750~1 000 人·km⁻²,是四川省人口的主要承载地和农产品的主要供给地,也是我国西部生态环境敏感脆弱区。因此,本文以川中丘陵区西缘作为典型研究区,分析区域内土壤砷和汞的空间变异特征及其影响因素,旨在为该区土地资源的合理利用和农产品

无公害生产基地的选择提供参考。

1 研究区概况与分析方法

1.1 研究区概况

研究区属川中丘陵区西缘,地理位置介于东经 104°25′06″~104°51′54″,北纬 30°29′30″~30°58′41″,面积 1 154 km²。地貌多样,以丘陵为主,低山和平坝兼有,地貌呈典型的三分性,西北部属于平坝浅丘区,东南部属于丘陵区,中西部则系龙泉山脉低山地带,地势由中部偏西地带逐渐向东西部降低,海拔高度 385~1 046 m。以侏罗系蓬莱镇组、白垩系城墙岩群紫红色砂岩、泥岩为成土母质。区域属亚热带季风气候,气候温和,四季分明,雨量充沛,年均降雨量 920.5 mm,年均日照时数 1 268.7 h,年平均雾蒸发量为 1 169.1 mm,无霜期长,年平均 285 d。植被类型以常绿落叶混合林为主,柏树分布较多。主要土壤类型为紫色土和水稻土,土地利用类型以旱地、灌溉水田、果园、疏林地为主。农业生产采用多熟制,主要种植玉米、小麦和水稻;经济作物种植油菜、柑桔等,土地垦殖率较高。

1.2 土壤样品采集及化学分析

土壤采样点的布设综合考虑研究区成土母质、土壤类型、地形条件和植被条件等因素,按网格法和分层抽样法进行设计。野外样品采集过程中利用 1:5 万地形图和 GPS(Etrex)进行样点定位,并根据实地情况进行样点调整后,共获得 325 个土壤样点(图 1)。每个样点在同一地块内随机钻取相邻的 3 个(0~20 cm)耕作层土样混匀组成样品。称取土样 1.000 0 g 于聚四氟乙烯坩埚内,加几滴蒸馏水润湿后加入 15 mL HF 与 10 mL 1:1HClO₄-HNO₃ 混合液,低温加热至冒

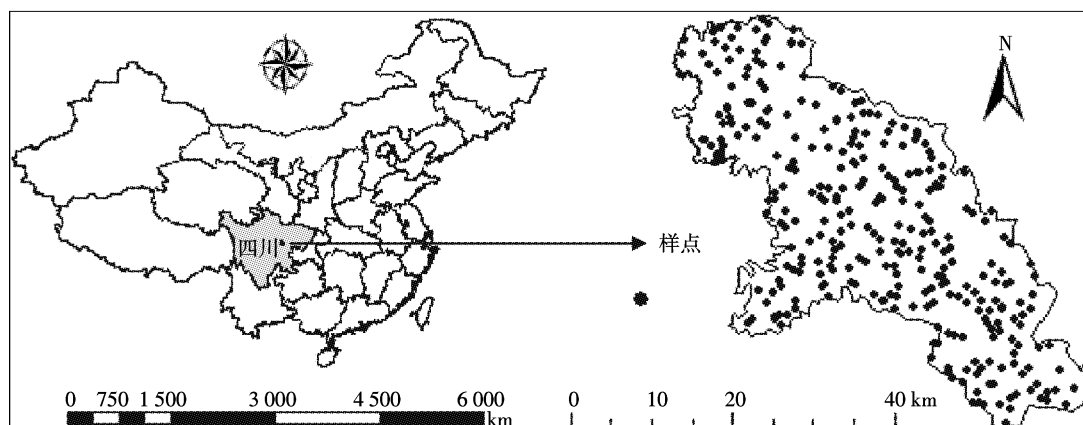


图1 样点分布图

Figure 1 Distribution map of sampling points

白烟,再加入 5 mL HNO₃ 加热至白烟冒尽,冷却后取下加入 5 mL 2 mol·L⁻¹ HCl,溶解摇匀,定容至 25 mL,最后过滤至白色塑料瓶中待测。待测液采用美国热电公司的 ICP-AES(IRIS Intrepid II)测定。

1.3 常规统计分析

采用 SPSS13.0 计算土壤砷和汞参数的统计特征值,利用相关回归分析、单因素方差分析(ANOVA)进行影响因素分析,平均数比较采用最小显著差数法(LSD)。

1.4 空间变异特征分析

利用 ArcGIS9.0 软件将 GPS 测到的带有坐标记录的采样点转换为具有空间坐标的空间点,并进行投影转换,生成具有砷和汞含量的样点分布图。计算土壤砷和汞的半方差函数值,采用球状模型(Spherical Model)进行拟合,用普通克里格法(Ordinary Kriging)进行内插获得土壤砷和汞含量空间变异的等值线图。

2 结果与分析

2.1 土壤砷和汞统计特征值分析

统计分析结果表明,研究区土壤中砷和汞含量均服从正态分布,其含量分别为(8.57±3.15)mg·kg⁻¹和(0.077±0.067)mg·kg⁻¹(表 1)。根据国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995),土壤砷含量达到国家一级和二级标准的样点数分别占总样点数的 96.6%和 3.4%,土壤汞含量达到国家一级和二级标准的样点数分别占总样点数的 89.2%和 10.8%。从变异系数来看,土壤砷和汞均属于强度变异,变异系数分别为 36%和 86%,说明土壤汞比土壤砷相对其均值离散程度更高,表明土壤汞含量在各采样点间存在明显差异。从偏度上看,土壤砷和汞均呈右偏度,从峰度系数上看,

土壤砷和汞均为正值。

2.2 土壤砷和汞的空间变异特征分析

描述性统计分析只能说明土壤样点中砷和汞的含量特征,不能很好反映研究区土壤砷和汞含量的空间分布特征。运用地统计学方法,根据一个采样点的状况推测其周围未采样点的特征,将不连续的点状数据形成连续的面状区域,从而能更清晰、准确地描述整个研究区域的土壤砷和汞空间变异特征。

2.2.1 变异函数分析

运用 ArcGIS9.0 中的地统计学模块计算不同间距的半方差,分别用球状、高斯和指数等理论模型进行拟合检验,选择拟合度最好的球状模型进行套合,获得土壤砷和汞的各项参数(表 2)。土壤砷和汞的 C₀/(C₀+C)分别为 61.03%、53.58%,说明二者均具有中等空间相关性,由随机部分引起的空间异质性程度较高。这表明研究区土壤砷和汞的空间变异中除了一些内在因子的作用(如气候、母质、地形、土壤质地、土壤类型等)导致土壤中化学元素强的空间相关性,一些外在因子(如施肥、耕作措施、种植制度等)也同时起了重要的作用,这些人为活动使砷和汞空间相关性减弱。从变程来看砷和汞空间自相关范围差异较大。

2.2.2 普通克里格插值分析

通过所得到的半方差函数模型,应用普通克里格法进行最优内插,获得土壤砷和汞的空间插值结果(图 2、图 3)。研究区土壤砷含量整体上呈环状分布,以西北部云绣-赵镇一带和中东部黄家乡-三溪-金龙一带呈现出两个高值中心(>10.5 mg·kg⁻¹),并由这两个中心向北部和东南部两侧逐渐降低。低值区(<6.5 mg·kg⁻¹)主要分布在东南部的广镇-又新一带及南部的云合附近,此外北部青山处有少量低值分布。

表 1 土壤 As 和 Hg 的统计特征值
Table 1 Descriptive statistics of soil As and Hg

项目 Item	样点数 Sampling No.	分布类型 Distribution type	最小值 Min/ mg·kg ⁻¹	最大值 Max/ mg·kg ⁻¹	平均值 Mean/ mg·kg ⁻¹	标准差 Std. Dev./mg·kg ⁻¹	变异系数 CV	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
As	325	对数正态	1.34	24.52	8.57	3.15	36%	0.80	1.54
Hg	325	对数正态	0.006	0.459	0.077	0.067	86%	2.614	9.231

表 2 土壤砷和汞变异函数相关参数
Table 2 Semivariance models of soil As and Hg

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
As	球状模型 spherical	48.288	7.361 2	12.062 4	0.610 3	0.000 73	-0.000 187
Hg	球状模型 spherical	48.639	0.002 869 9	0.005 356 2	0.535 8	0.000 55	0.009 033

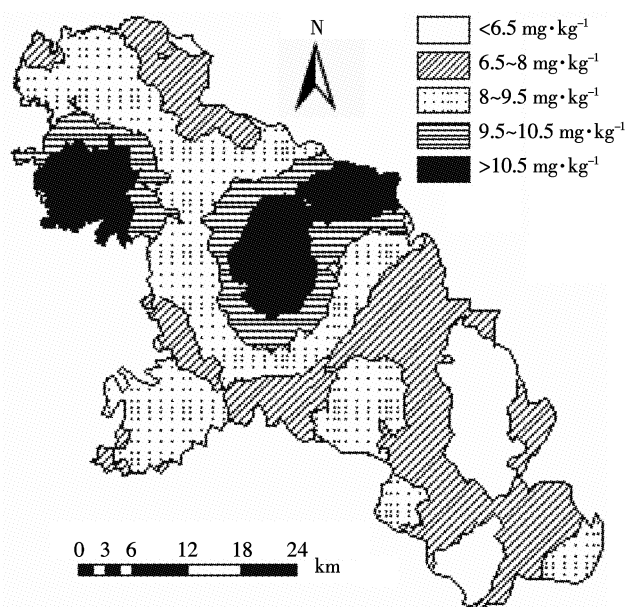


图2 土壤砷空间分布图

Figure 2 Spatial distributions for soil As

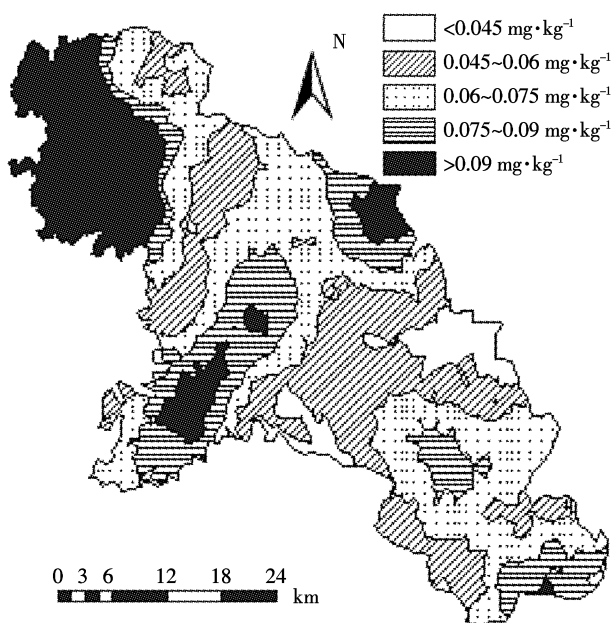


图3 土壤汞空间分布图

Figure 3 Spatial distributions for soil Hg

研究区内土壤砷含量在 $2.0\sim 6.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10.5\sim 25.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围的面积都很小,大部分区域砷含量处于 $6.5\sim 10.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。

汞的空间分布与砷的空间分布具有明显差异,汞含量整体主要呈环状分布,局部出现斑点、块状区域。高值中心($>0.090\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)有4处,其中西北部清江-

赵镇-云绣一带 Hg 含量达到 $0.090\sim 0.459\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 且分布面积最大,并以此区域向东和东南呈阶梯性递减,东部西沟附近及西南部的白果、淮口附近有3个高值中心,汞含量沿中心区向西北和东南两个方向逐渐递减,此外东南部平山有少量低值分布。低值区($<0.045\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)主要分布在西南部平桥和中东部石马附近。

2.3 影响因素分析

2.3.1 土地利用方式

根据研究区土壤的块金系数可以看出,土壤砷、汞空间变异的影响因素中人为因素占有重要的比例,而土地利用是自然条件和人为活动的综合反映。本区土地利用方式主要为旱地(DL)、灌溉水田(PF)、果园(O)、疏林地(WL)和农村居民点(RL)。在 ArcGIS9.0 平台上,先将砷和汞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(图4)。土壤砷含量为灌溉水田 $[(8.94\pm 1.65)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ > 果园 $[(8.91\pm 1.57)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ > 农村居民点 $[(8.67\pm 1.55)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ > 旱地 $[(8.35\pm 1.46)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ > 疏林地 $[(8.07\pm 1.13)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$, 土壤汞含量为灌溉水田 $[(0.091\pm 0.043)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ > 农村居民点 $[(0.082\pm 0.037)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ > 果园 $[(0.081\pm 0.034)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ > 旱地 $[(0.070\pm 0.023)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ > 疏林地 $[(0.067\pm 0.018)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 。研究区土壤砷和汞含量总体呈现出灌溉水田最高,疏林地最低的特点。

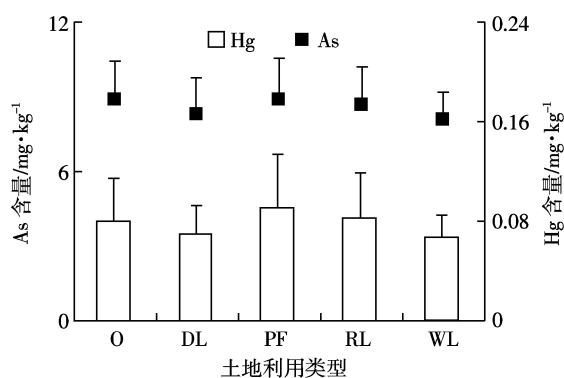


图4 不同土地利用方式下的土壤砷和汞含量

Figure 4 As and Hg contents with different landuse

2.3.2 土壤质地

土壤中各级土粒含量的相对比例构成了不同的土壤质地,这是影响土壤物理与化学性质的重要因素。依据卡庆斯基制可将研究区土壤分为砂土、砂壤土、轻壤土、中壤土、重壤土和粘土6种类型。

方差分析表明,6种质地之间的砷含量有极显著差异 [$F_{(5,319)}=20.770, P=0.000\ 1$],汞含量有显著差异

[$F_{(5,319)}=2.934, P=0.013\ 2$]. 进一步进行多重比较可知, 砷含量在粘土[(10.09 ± 2.93) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]中最高, 粘土和重壤土中显著高于轻壤土、砂壤土和砂土, 中壤土和轻壤土比较无差异, 但显著高于砂壤土和砂土(表3)。汞含量在中壤土[(0.112 ± 0.120) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]中最高, 显著高于轻壤土、砂壤土和砂土, 而与粘土和重壤土两种质地间无显著差异。砂土中砷和汞含量最低, 分别为(4.09 ± 1.68) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和(0.035 ± 0.032) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。产生这种情况的原因可能是由于砂土的土粒间孔隙大、总孔隙度低、毛管作用弱、保水性差、通气透水性强等使砷、汞不易附着, 而随着土壤颗粒变细, 土壤的黏结性、胀缩性和吸附能力加大, 从而增强了吸附能力。

表3 不同质地土壤中砷和汞的含量

Table 3 As and Hg contents under different texture in soil

质地 Texture	样点数 Sampling No.	As/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Hg/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
粘土 Clay	141	$10.09\pm 2.93\ a$	$0.078\pm 0.051\ ab$
重壤土 Heavy loam	128	$7.89\pm 2.26\ a$	$0.073\pm 0.066\ ab$
中壤土 Loam	33	$7.47\pm 3.71\ ab$	$0.112\pm 0.120\ a$
轻壤土 Light loam	7	$4.92\pm 4.31\ bc$	$0.051\pm 0.029\ bc$
砂壤土 Sandy loam	12	$4.57\pm 1.17\ cd$	$0.045\pm 0.026\ bc$
砂土 Sandy soil	4	$4.09\pm 1.68\ d$	$0.035\pm 0.032\ c$

注:同一列数据后不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著,下同。

2.3.3 土壤 pH 值

土壤 pH 值是土壤化学性质的综合反映,同时也是影响重金属吸持及形态分布的重要因素。将研究区土壤 pH 值按 <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、强碱性土壤进行统计分析,结果(表4)表明,不同土壤 pH 之间的砷含量无显著差异[$F_{(4,320)}=1.587, P=0.178$],汞含量也无显著差异[$F_{(4,320)}=1.619, P=0.135$],多重比较结果与此相同。相关性分析表明,土壤 pH 值与土壤砷相关系数为 $r=-0.140\ 8^*$,与 Hg 相关系数为 $r=-0.115\ 2^*$,pH 值与二元素含量之间均呈显著的负相关关系 ($n=325$, $r_{0.05}=0.108\ 8$, $r_{0.01}=0.142\ 7$, $r>r_{0.05}$)。说明随着土壤 pH 值增大,土壤砷、汞含量呈现逐渐降低的趋势,这可能是

表4 不同土壤 pH 下砷和汞的含量

Table 4 As and Hg contents under different pH in soil

酸碱度 pH	样点数 Sampling No.	As/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Hg/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
<5.0	2	7.63 ± 6.75	0.056 ± 0.008
$5.0\sim 6.5$	39	9.34 ± 3.48	0.086 ± 0.081
$6.5\sim 7.5$	33	9.36 ± 3.20	0.110 ± 0.101
$7.5\sim 8.5$	246	8.38 ± 3.08	0.073 ± 0.059
>8.5	5	7.30 ± 1.13	0.044 ± 0.035

由于在土壤酸性和中性环境中,不同价位的砷、汞易被释放出来,而随 pH 值的增大土壤对重金属的吸附作用达到平衡,变化趋于平缓。

2.3.4 有机质

土壤有机质包括土壤中各种动、植物残体及微生物分解和合成的有机化合物。有机质的增加能改变土壤中重金属元素的化学形态分布,增加土壤中重金属的移动性。将研究区土壤有机质含量按照 <5 、 $5\sim 15$ 、 $15\sim 25$ 、 $25\sim 35\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $>35\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分为 I 级、II 级、III 级、IV 级和 V 级。方差分析表明,不同有机质分级间的砷含量有极显著差异[$F_{(4,320)}=5.045, P=0.000\ 6$],汞含量也有极显著差异[$F_{(4,320)}=25.901, P=0.000\ 1$]。进一步进行多重比较发现,砷、汞含量随有机质的增加呈明显增大趋势(表5)。其中,汞含量为 V 级显著高于其他几级。相关性分析表明,土壤有机质与土壤砷相关系数为 $r=0.248\ 8^{**}$,与汞相关系数为 $r=0.523\ 2^{**}$,有机质与二元素含量之间均呈极显著的正相关关系 ($n=325$, $r_{0.05}=0.108\ 8$, $r_{0.01}=0.142\ 7$, $r>r_{0.01}$)。这可能是由于有机质中多种酸性功能团解离使负电荷增多,因此对砷、汞等重金属阳离子具有较强的络合和富集能力。

表5 不同土壤有机质下砷和汞的含量

Table 5 As and Hg contents under different organic matter in soil

OM/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	样点数 Sampling No.	As/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Hg/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
<5	11	$7.95\pm 4.74\ a$	$0.043\pm 0.021\ d$
$5\sim 15$	199	$8.03\pm 3.00\ a$	$0.061\pm 0.042\ d$
$15\sim 25$	76	$9.35\pm 2.93\ a$	$0.092\pm 0.061\ c$
$25\sim 35$	33	$9.79\pm 3.31\ a$	$0.142\pm 0.090\ b$
>35	6	$10.95\pm 2.31\ a$	$0.234\pm 0.173\ a$

3 结论

(1)本研究区砷和汞均呈对数正态分布,土壤砷平均含量为 (8.57 ± 0.175) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,汞平均含量为 (0.078 ± 0.067) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均未超过国家土壤环境质量一级标准。

(2)土壤砷的空间分布整体以西北部云绣-赵镇一带和中东部黄家乡-三溪-金龙一带呈现出两个高值中心($>10.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),并由这两个中心向北部和东南部两侧逐渐降低。低值区($<6.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)主要分布在东南部的广镇-又新一带及南部的云合附近。汞的空间分布整体主要呈环状分布,局部出现斑点、块状区域。高值中心($>0.090\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)有 4 处,其中西北部清江-赵镇-云绣一带 Hg 含量达到 $0.090\sim 0.459\ \text{mg}\cdot$

kg⁻¹ 且分布面积最大,并以此区域向东和东南呈阶梯性递减,东部西沟附近及西南部的白果、淮口附近有 3 个高值中心,汞含量沿中心区向西北和东南两个方向逐渐递减。低值区(<0.045 mg·kg⁻¹)主要分布在西南部平桥和中东部石马附近。

(3)土壤中砷、汞的块基比分别为 61.03%、53.58%,说明二者均是具有中等的自相关性,这也表明研究区土壤砷和汞含量在影响因素上受自然因素和人为活动的共同影响。影响因素分析表明,土地利用方式、土壤质地、pH 值及有机质对土壤 As、Hg 含量存在着不同程度的影响。土壤砷和汞含量总体呈现出灌溉水田最高,疏林地最低的特点。不同土壤质地间对砷、汞含量差异显著。此外,土壤 pH 值与砷、汞含量呈显著负相关关系,而土壤有机质与二者均呈极显著正相关关系。

参考文献:

- [1] N Sridhara Chary, C T Kamala, D Samuel Suman Raj. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 69:513-524.
- [2] S Khan, Q Cao, Y M Zheng, et al. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152:686-692.
- [3] Pingguo Yang, Renzhao Mao, Hongbo Shao, et al. An investigation on the distribution of eight hazardous heavy metals in the subarn farmland of China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167:1246-1251.
- [4] PingZhuang, Murray B McBride, Hanping Xia, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407:1551-1561.
- [5] S C Wong, X D Li, G Zhang, et al. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119:33-34.
- [6] K L Hu, F R Zhang, H Li, et al. Spatial patterns of soil heavy metals in urban-rural transition zone of Beijing[J]. *Pedosphere*, 2006, 16:690-698.
- [7] Prosun Bhattacharya, Alan H Welch, Kenneth G Stollenwerk, et al. Arsenic in the environment: Biology and Chemistry[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 379:109-120.
- [8] Rui-Qing Huang, Shu-Fang Gao, Wei-Ling Wang, et al. Soil arsenic availability and the transfer of soil arsenic to crops in suburban areas in Fujian Province, southeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368:531-541.
- [9] M P Elless, B W Ferguson, C A Bray, et al. Collateral benefits and hidden hazards of soil arsenic during abatement assessment of residential lead hazards[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156:20-28.
- [10] Yuan-Ming Zheng, Yu-Rong Liu, Hong-Qing Hu, et al. Mercury in soils of three agricultural experimental stations with long-term fertilization in China[J]. *Chemosphere*, 2008, 72:1274-1278.
- [11] Jennifer Harris-Hellal, Tatiana Vallaeys, Evelyne Garnier-Zarli, et al. Effects of mercury on soil microbial communities in tropical soils of French Guyana[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41:59-68.
- [12] Xingmei Liu, Jianjun Wu, Jianming Xu. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141:257-264.
- [13] G J Rebecca, K Anna. A spatially-evaluated methodology for assessing risk to a population from contaminated land[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 142:227-234.
- [14] A P Reis, L Menezes de Almeida, E Ferreira da Silva, et al. Assessing the geochemical inherent quality of natural soils in the Douro river basin for grapevine cultivation using data analysis and geostatistics[J]. *Geoderma*, 2007, 141:370-383.
- [15] Tao Chen, Xingmei Liu, Xia Li, et al. Heavy metal sources identification and sampling uncertainty analysis in a field-scale vegetable soil of Hangzhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157:1003-1010.
- [16] Luis Rodríguez Lado, Tomislav Hengl, Hannes I Reuter. Heavy metals in European soils: A geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database[J]. *Geoderma*, 2008, 148:189-199.
- [17] Dou Lei, Zhou Yongzhang, Ma Jin, Li Yong, et al. Using multivariate statistical and geostatistical methods to identify spatial variability of trace elements in agricultural soils in Dongguan City, Guangdong, China[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2008, 19:343-353.