

# 杭州市城乡结合带蔬菜地土壤铅铜含量的时空变异研究\*

陈涛 施加春 刘杏梅 吴建军 徐建明<sup>†</sup>

(浙江大学国土资源与环境研究所, 杭州 310029)

**摘要** 土壤重金属时空变异研究在土壤可持续利用和生态环境保护过程中具有重要的意义。通过 2001 年和 2005 年两个时期在杭州市东郊传统蔬菜基地取样分析, 用空间自相关全局 Moran's I 系数、地统计学以及分形维数三种空间分析方法研究了土壤重金属 Pb 和 Cu 的时空变异特征。两个时期的 Pb 和 Cu 平均含量分别由 38.73、31.20 mg kg<sup>-1</sup> 增加至 46.14、36.56 mg kg<sup>-1</sup>, 并经检验, Pb 和 Cu 含量增加达到了显著水平。它们在 0.05 显著水平的自相关距分别由 3500 m、3300 m 降低至 2700 m、2800 m, 呈递减趋势, 空间随机性增强。土壤 Pb 和 Cu 的空间分布呈西高东低, 并且在研究区绝大部分范围内出现不同程度的累积趋势。人为污染与干扰是土壤 Pb 和 Cu 含量增加与空间变异性增强的主要原因。

**关键词** 城乡结合带; 土壤重金属; 时空变异; 空间自相关; 地统计学; 分形理论

中图分类号 X131.3 文献标识码 A

土壤不仅是植物赖以生存的物质基础, 而且还是接纳和扩散各种污染物的库与源<sup>[1]</sup>。作为重要的污染传播媒介, 其可以将污染物扩散、迁移、转化到空气、地下水以及各种植物体内, 甚至间接通过食物链影响到人们的身体健康。在众多的污染物中, 土壤重金属污染由于其非生物降解性及较长的半衰期<sup>[2]</sup>, 能够在整个物质循环中长期存在, 对人类健康构成了严重的威胁。因此, 土壤重金属污染近年来已经成为土壤学、环境学和地球化学等多学科的研究热点之一。揭示土壤重金属的空间分布及时间变异规律也已经成为实现土壤可持续利用和生态环境保护的重要前提。

国内外已有许多学者分别用空间自相关分析、地统计学以及分形理论对各种尺度条件下的土壤重金属空间变异进行了研究<sup>[3-14]</sup>。张朝生等<sup>[4]</sup>运用 Moran's I 统计指标研究了天津市平原地区 13 种土壤重金属的空间自相关关系, 并揭示了人为活动对部分表层土壤元素空间结构的影响; 姜勇等<sup>[12]</sup>在沈阳郊区使用分形维数成功地描述了耕地土壤 Mn 的空间分布特点, 并将地统计与分形理论相结合共同刻画了 Mn 作为一种营养元素在沈阳郊区耕地土壤中的空间结构状况。在这三种不同的方法和理

论中, 地统计学既可以通过块金值或变程等指标来定量描述空间结构特点, 还可为 Kriging 插值提供依据, 因此, 其在土壤空间变异研究中使用的较为广泛<sup>[4]</sup>。少数研究者也曾将空间自相关分析与分形理论相结合对重金属的空间变异进行了初步探讨<sup>[3]</sup>; 但用三种空间分析手段共同刻画重金属空间变异的研究还鲜见报道, 特别是对不同时间梯度的土壤重金属空间变化规律的研究在国内外尚属空白。

城乡结合带作为城市-农村交互作用的界面, 土地利用多样性、污染来源复杂性及高度的变异性, 为这一特殊地区的土壤保护与利用带来了诸多影响。位于杭州市东郊的部分下城区与江干区, 是杭州市重要的蔬菜生产基地, 具有典型的城乡结合带特点。本研究以杭州市东郊传统的蔬菜基地为研究区域, 通过在 2001 年与 2005 年两个时期的采样分析, 运用空间自相关方法、地统计学以及分形理论, 共同揭示了土壤 Pb 和 Cu 的时间变化规律及其可能的影响因素, 为该地区的农业结构调整和污染防治提供科学依据, 这对阐明我国城乡结合带土壤环境质量与农产品安全生产的关系具有重要的理论和现实指导意义。

\* 国家重点基础研究发展规划项目 (2005CB121104)、浙江省和杭州市科技项目 (2005E10004 20061123B10) 资助

<sup>†</sup> 通讯作者: 徐建明, 男, 教授, 博士生导师, 从事土壤化学与环境方面的研究。Tel 0571-86971955 E-mail jxm@zju.edu.cn

作者简介: 陈涛 (1977~), 男, 河南鹤壁人, 博士研究生, 主要从事空间分析与统计方面的研究。E-mail davillp77@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-12-08 收到修改稿日期: 2007-03-12

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于杭州市东郊, 总面积为  $35.57 \text{ km}^2$ , 在北纬  $30^\circ 27' \sim 30^\circ 33'$ , 东经  $120^\circ 18' \sim 120^\circ 25'$ , 地势平坦, 海拔  $6 \sim 9 \text{ m}$ , 成土母质是河(湖)相或浅海

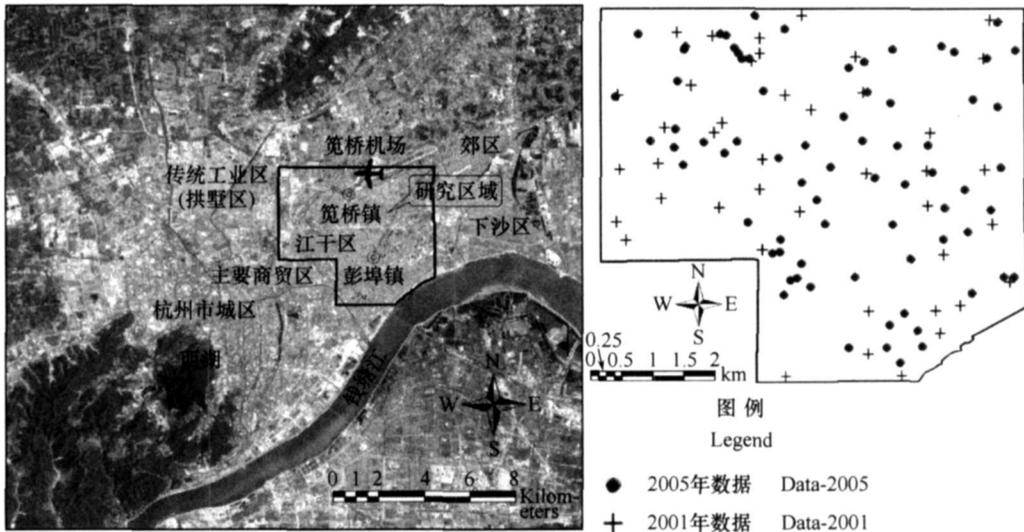


图 1 研究区域与 2001年、2005年取样点分布图

Fig. 1 Study area and soil sampling points in 2001 and 2005

### 1.2 样品的采集与处理

在两期数据中, 2001年数据共有 43个土壤样品, 采样密度约为每  $\text{km}^2$  1个样品; 在此基础上, 为了进一步研究重金属的空间变异特征, 于 2005年 4月采取土壤样品 74个, 约每  $\text{km}^2$  2个样品。2005年采样, 除了在靠近 2001年原采样点采集土样外, 还考虑蔬菜基地面积大小, 区域位置, 以及空间结构特点, 采用梅花形采样方法, 在每个样点周围  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  正方形范围内设置 6~8个采集点, 在各采集点用塑料铲采取表层土壤 ( $0 \sim 20 \text{ cm}$ ) 500 g左右, 均匀混合后取 2 kg 用美国 Garmin公司手持 GPS记录正方形中心为该点定位坐标。采集的土壤样品在室温条件下 ( $18 \sim 20^\circ \text{C}$ ) 晾晒自然风干, 捡除石块、植物根茎等异物, 用木棒碾碎过 2 mm 尼龙筛, 然后再从已过 2 mm 筛的土样中取出 50 g 用玛瑙研钵研磨过 0.25 mm 尼龙筛, 装瓶备用。两期的土壤重金属 Pb、Cu 均用氢氟酸-高氯酸-硝酸消煮, 定容, 过滤上清液, 用原子吸收分光光度计(岛津 AA6800)测定。

### 1.3 数据处理

两个时期数据描述统计参数采用 SPSS 13.0 处

相沉积物, 质地匀细, 土层深厚肥沃, 地下水较浅, 年均降水量  $1100 \sim 1600 \text{ mm}$ , 土壤以黄松土与乌潮土为主。该区有 30 多年的蔬菜种植历史, 是杭州市传统的蔬菜种植基地。由于近些年来经济发展, 城市扩张, 大量的菜园地被建设用地所占用。因此, 该研究区域是具有城乡结合带双重污染来源特点的典型蔬菜种植区。

理, 半方差分析和分形维数计算利用 GS+ 7.0 完成, 研究区域图、Kriging 插值图以及重金属空间变化图均在 ArcGIS 8.3 中完成, 全局 Moran's I 的计算在 CrimeStat 3.0 中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属 Pb、Cu 含量的描述统计

表 1 给出了两期土壤重金属 Pb 和 Cu 的描述统计结果。从中可知, 2001 年和 2005 年土壤 Pb 的平均含量分别为  $38.73 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $46.14 \text{ mg kg}^{-1}$ , 与 20 世纪 80 年代第二次土壤普查时的平均含量相比, 分别增加了 51.23%、80.16%; 土壤铅含量随时间的变化, 表现出增加的趋势, 从 2001 年至 2005 年, 4 年中增加了  $7.41 \text{ mg kg}^{-1}$ 。土壤 Cu 含量也表现出相同的趋势, 两期的平均含量分别较第二次土壤普查增加了 75.68% 和 105.9%, 在所研究的 4 年中平均含量增加  $5.36 \text{ mg kg}^{-1}$ 。与国家制定的土壤环境质量标准 (GB15618-1995) 相比较, 两期的土壤 Pb 和 Cu 含量均未超过所对应的二级污染界限。

表 1 土壤 Pb、Cu含量的描述统计

Table 1 The descriptive statistics of soil Pb and Cu in 2001 and 2005

项目 <sup>1)</sup> Items	样点数 Sample number	平均值	最小值	最大值	变异系数 C. V.	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	背景值 <sup>2)</sup> Background values(mg kg <sup>-1</sup> )
		Mean	Min.	Max.				
Pb-01	43	38.73	13.79	64.85	0.33	-0.71	0.10	25.61
Cu-01	43	31.20	14.47	58.32	0.31	-0.10	0.45	17.76
Pb-05	74	46.14	19.60	87.32	0.36	-0.39	0.40	25.61
Cu-05	74	36.56	14.30	77.60	0.38	0.59	0.77	17.76

1) 01、05分别表示 2001年和 2005年 01 is the symbol for 2001 and 05 for 2005

2) 背景值为浙江省第二次土壤普查重金属平均含量值 The background value is the mean concentration of each heavy metal in the second soil survey of Zhejiang province

众所周知, 变异系数在一定程度上可以定量刻画样本数据的离散、变异特点<sup>[5]</sup>。在本研究中, 两时期土壤 Pb和 Cu的变异系数在 0.31~ 0.38, 属中等变异。其中以 2005年 Cu变异最大, 达到 0.38, 而 2001年 Cu变异最小, 仅为 0.31。从 2001年至 2005年, 土壤 Pb的变异系数由 0.33增加至 0.36, 而土壤铜则从 0.31增加至 0.38, 两元素的变异性随着时间的变化, 呈增加趋势, 这可能与近年来人为

因素影响程度增强有关。

表 1显示土壤 Pb、Cu含量随时间变化而增加, 表 2则给出两个时期土壤 Pb和 Cu的均值多重比较, 发现达到显著水平。由表 2可看出, 土壤 Pb和 Cu均通过 Levene's方差齐性检验, 显著性分别为 0.134和 0.076, 因此, 均值比较选用方差齐性条件下的 *t*检验, 检验结果拒绝  $H_0$ 假设, 即从 2001年至 2005年该研究区土壤 Pb和 Cu均发生了显著变化。

表 2 2001年与 2005年土壤 Pb、Cu的 Levene's检验与均值 *t*检验Table 2 Levene's test and *t* test of soil Pb and Cu between 2001 and 2005

元素与假设条件 Elements and assumed conditions		方差相等 Levene's检验		均值相等 <i>t</i> 检验	
		Levene's test for equality of variances	显著性 Significance	<i>t</i>	显著性(双尾) Significance (2-tailed)
Pb	方差假设相等 Equal variances assumed	2.282	0.134	-2.492	0.014
	方差假设不等 Equal variances not assumed			-2.671	0.009
Cu	方差假设相等 Equal variances assumed	3.213	0.076	-2.204	0.030
	方差假设不等 Equal variances not assumed			-2.418	0.017

## 2.2 空间自相关性分析

空间自相关分析是空间统计学中的一个重要方法<sup>[3,8]</sup>。在本文中采用全局 Moran's I系数来分析两个时期土壤 Pb和 Cu的空间自相关特点(图 2)。

由图 2可知, 2001年与 2005年土壤 Pb和 Cu在采样范围内呈现出相似的结构, 大致趋势为: 距离较近采样点之间呈显著正空间自相关, 随距离增加, 自相关系数向负方向变化, 达到显著负相关, 随距离的继续增加, 负相关程度减小。这与张朝生等<sup>[4]</sup>研究的天津市平原地区土壤微量元素空间相关特征类似。这种变化趋势说明了土壤 Pb和 Cu的空间分布格局呈简单斑块分布。具体的自相关

距分别为: 2001年土壤 Pb的 0.05显著自相关距为 3500m, Cu为 3300m, 至 2005年, Pb变为 2700m, Cu为 2800m, Pb和 Cu的显著自相关距随着时间的变化而减小。同时发现, 空间自相关距与变异系数具有很好的一致性。自相关距随时间变化而减小, 变异系数则随时间变化而增大, 两者变化规律相反, 却从地学意义上相互提供了印证。2001年 Pb和 Cu的自相关距大, 反映其结构较 2005年好, 结构性好意味着空间分布规律强, 变异性差, 变异系数低。相反, 2005年, 由于可能受到人为污染或其他干扰因素的影响增加了 Pb和 Cu的变异性, 从而自相关距减小。

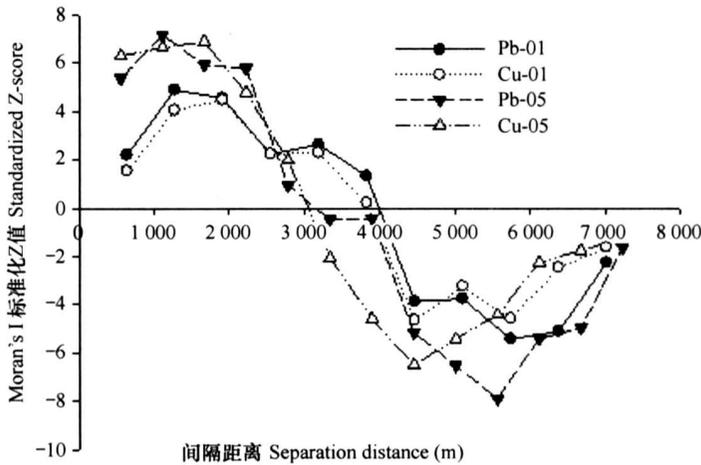


图 2 2001年与 2005年土壤 Pb和 Cu含量的空间自相关图(Moran's I经标准化)

Fig 2 Spatial correlogram of soil Pb and Cu in 2001 and 2005 (standardized Moran's I)

2.3 变异函数结构与分维数分析

在地统计学中,数据的非正态分布易引起比例效应,增大估计误差<sup>[10]</sup>。故本文采用了环境变量常用的对数转换以及 Box-Cox 转换,并进行 Spapiro-Wilk 检验,分析结果见表 3。

由表 3 看出,2001 年土壤 Pb、Cu 原始数据通过 Shapiro-Wilk 检验 (S-W 检验),而 2005 年未通过检验。因此,对 2005 年数据进行对数转换和 Box-Cox

转换,其 Shapiro-Wilk 检验概率显著提高。经对比,Box-Cox 正态转换效率更高,结果更接近正态分布的要求,所以本文采用 Box-Cox 数据转换进行地统计分析及 Kriging 插值。

通过半方差分析,计算了不同步长  $h$  所对应的实际半方差  $r(h)$ ,并分别采用不同模型进行拟合,以决定系数 ( $R^2$ ) 最大和 MSS 最小为原则选择最佳模型,得到对应参数 (表 4)。

表 3 2001 年与 2005 年土壤 Pb 和 Cu 含量数据转换

Table 3 Skewness, kurtosis and significance level of Shapiro-Wilk test for normality (S-W p) of the raw, log transformed and Box-Cox transformed data sets

项目 Items	原始数据 Original data			对数转换后数据 Logarithmic transformation			Box-Cox 转换后数据 Box-Cox transformation			$\lambda^{1)}$
	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	S-W p	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	S-W p	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	S-W p	
	Pb-01	0.10	-0.71	0.68	1.52	2.76	0.00	-0.07	-0.70	
Cu-01	0.45	-0.10	0.44	-0.24	-0.53	0.79	-0.02	-0.55	0.91	0.32
Pb-05	0.40	-0.39	0.04	-0.30	-0.74	0.05	-0.04	-0.75	0.15	0.38
Cu-05	0.77	0.59	0.01	-0.22	-0.32	0.38	-0.01	-0.30	0.59	0.22

1)  $\lambda$  为进行 Box-Cox 数据转换时的转换指数  $\lambda$  is the transform index during the process of Box-Cox transformation

表 4 2001 年与 2005 年土壤 Pb 与 Cu 半方差函数拟合模型及分维数

Table 4 Best fitted semi-variogram model and their fractal dimension of soil Pb and Cu in 2001 and 2005

重金属 Heavy metals	模型 Model <sup>1)</sup>	块金值 Nugget $C_0$	基台值 Sill $C + C_0$	块金值/基台值 Nugget/Sill $C_0 / (C + C_0)$	变程 Range (km)	决定系数 Determined coefficient $R^2$	分形维数 Fractal dimension	相关系数 Correlated coefficient $r$
Pb-01	球状 Spherical	33.00	376.9	0.088	13.10	0.958	1.698	0.924
Cu-01	球状 Spherical	27.30	137.1	0.199	7.060	0.958	1.759	0.930
Pb-05	高斯 Gaussian	0.70	3.89	0.180	5.663	0.968	1.660	0.957
Cu-05	高斯 Gaussian	0.20	0.93	0.213	4.036	0.751	1.724	0.784

1) 各元素在模型拟合时,最大步长距离均为 7 000 m During the process of modeling the maximal lag distances for all elements are 7 000 m

2001年土壤 Pb、Cu的最佳模型为球状模型,2005年则为高斯模型。所有拟合的变程范围在4 000~13 100 m之间,其中2005年Cu的变程最小,为4 036 m,2001年Pb最大,达到了13 100 m,其他介于两者之间。经比较发现2005年的变程均要小于2001年的,说明2005年Pb和Cu的空间变异性较2001年的更大,自相关距更短。这与空间自相关分析结果相吻合,但其变程距离要较Moran's I的自相关距离明显增加,表明这两种方法均可以衡量空间自相关特征,但严格程度不同<sup>[3]</sup>。

一般以块基比作为衡量空间变量自相关程度和随机因素引起空间变异大小的尺度<sup>[5~11]</sup>。从表4可知,两个时期Pb和Cu的 $C_0/(C+C_0)$ 主要在0.088~0.213之间,均具有空间强自相关性,其空间变异主要由结构因素所控制。其中2005年Cu含量的比值最大,达到0.213,2001年Pb含量最小,仅有0.088,其他介于两者之间;另外,还发现2005年的比值均要大于2001年所相应元素的比值,表明随机因素所造成的影响在2005年较2001年更大,这与自相关距分析相一致。

除了空间自相关和地统计学分析外,两个时期土壤Pb和Cu的空间结构特点还可用分形维数来描述。分形维数 $D$ 为半方差 $\gamma(h)$ 与步长 $h$ 双对数直线回归中的斜率,可以用来表征样本的空间结构。 $D$ 值越小,样本之间土壤变异越大,即均一程度越差<sup>[11]</sup>。本研究两个时期的土壤Pb和Cu存在着较好的分形特征,相关系数( $r$ )在0.784~0.957之间。其中,2005年土壤Pb分维数最小(1.660),2001年土壤Cu分维数最大(1.759)。同时,2005年Pb和Cu的分维数均小于2001年对应元素的分维数,说明2005年土壤Pb和Cu的空间变异性更大,结构性更差。这也印证了空间自相关和地统计学的分析,从另一个侧面说明了2005年土壤Pb和Cu可能受到人为因素的影响而具有更大的空间变异性。

综合三种方法,所反映的结果是一致的,但侧重角度不同:空间自相关分析主要从空间相关性的角度来描述变量的正负空间自相关特点,可以对空间相关的显著性进行检验,得到显著自相关距,但不能进行空间插值;地统计学则弥补了这一不足,其不仅可以通过块基比或变程来定量表征空间变异特点,还可为Kriging插值提供依据,缺点是不能描述具有离散特点(即空间负相关)的空间变量特征,也不能对变程等指标提供显著性检验;分维数

则主要从变量空间复杂性的角度进行度量,是一种综合的、间接指标,可以从总体上反映研究对象的空间结构特点,对空间自相关或地统计分析提供佐证。这三种方法各有优缺点,只有将三者相结合,才能更客观完整地描述变量的空间结构特征。

#### 2.4 时空分布特征

根据半方差分析,利用普通Kriging最优内插法,绘制了本研究区两个时期土壤Pb和Cu的空间分布图(图3A~图3D)。又通过栅格计算,按照 $(X_{2005}-X_{2001})/X_{2001}$ 分别得到了Pb和Cu在2001年至2005年的增长变化图(图3E~图3F)。

由图3A~图3D可见,2个时期Pb和Cu含量空间分布规律基本一致,总体趋势是西高东低。西部位于杭州传统工业区下城区与笕桥镇大部地区,其土壤Pb含量明显高于东部新开发的下沙区,且呈大块状分布规律;土壤Cu的高值区位于左中部具有多年种植蔬菜历史的笕桥镇,低值区则位于该研究区的西北角,是近年蔬菜基地外迁新建区域。土壤Pb和Cu从西到东,沿着城区扩张方向逐渐增加,一方面可能是由于西部区域耕种时间更长,更临近工业区,长期高强度农用化学品和有机肥的施用以及工业活动导致该区Pb和Cu的累积;另外该区域虽已基本纳入城市范围,但完备的基础设施仍没有完全建立,大量的城市垃圾、生活污水成为一个不可忽视的输入来源;还有更为密集的交通网络也是导致该区域土壤铅含量较高的重要因素<sup>[14]</sup>。因此,过度农化产品和有机肥料的施用,大气沉降,以及污水灌溉等(除了个别区域受到工业污染外)可能是导致该区域蔬菜土壤Pb和Cu空间分布格局形成的主要原因。这与其他城市的重金属污染研究结果<sup>[14,8,16]</sup>相一致,具有普遍性,应引起重视。从图3A~图3D,还可看到2005年Pb和Cu较2001年明显增加。

图3E~图3F是研究区4年来土壤Pb和Cu的空间变化图。从2001年至2005年,土壤Pb和Cu在研究区的绝大部分区域由于人类活动导致不同程度增加,尤其在西部和中部地区增幅最大,东部增幅较低。土壤Pb显著增加区域主要集中在北部笕桥机场附近,以及传统的工业区下城与拱墅交界处,在4年中,增幅超过40%。据Nicholson等<sup>[15]</sup>对英格兰及威尔士农业土壤的研究发现,大气沉降对农业土壤Pb的输入贡献率最大。陈同斌等<sup>[16]</sup>对北京菜地土壤Pb的研究也证实了这一点。虽然国家已经在2000年停止了含铅车用汽油的生产和使用,

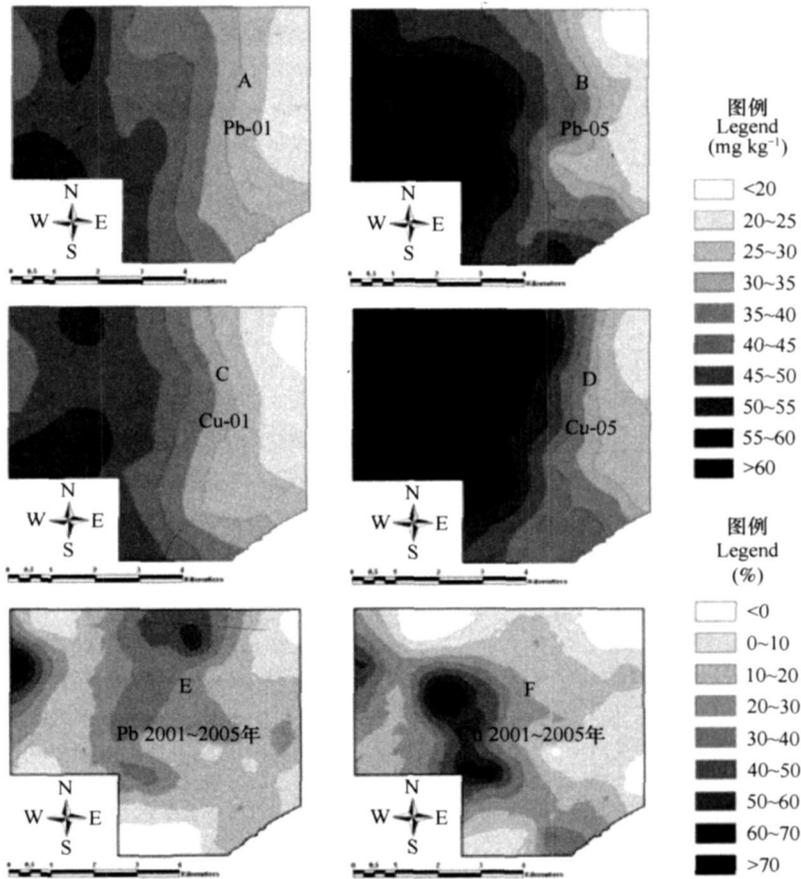


图 3 2001~2005年之间土壤 Pb和 Cu的变化

Fig 3 Change in soil Pb and Cu between 2001 and 2005

但是由于航空发动机的特殊要求以及生产工艺限制,目前全世界的航空汽油仍然采用四乙基铅作为添加剂<sup>[17]</sup>。航空汽油虽属低铅汽油,但长期使用仍然可能是笕桥机场附近土壤 Pb含量明显增加的主要原因。另外,下城与拱墅交界处分布着一些电子、机械加工等产业,成规模的工业生产可能是该

区域铅输入的重要来源。除此之外,该区域的土壤 Pb积累可能还与含铅农药、磷肥的施用等有关。土壤 Cu含量增加主要集中在花园村与冯家桥一带,这里有长期施用鸡粪作为有机肥的习惯。大量施用鸡粪,除了增加土壤肥力外,还成为土壤 Cu增加的主要原因<sup>[18-19]</sup>。

表 5 2001~2005年期间 Pb和 Cu含量不同增幅的土壤面积及其比例

Table 5 Area and percentage of soils with increased Pb and Cu contents to a varying extent from 2001 to 2005

元素 Elements	面积和比例 Area and percentage	不同增加幅度范围 D different categories of content increase (%)				
		< 0	0~20	20~40	40~60	> 60
Pb	面积 Area (km <sup>2</sup> )	1.80	18.84	12.31	2.35	0.27
	占总面积比例 Percentage (%)	5.06	52.97	34.62	6.59	0.75
	Percentage (%)					
Cu	面积 Area (km <sup>2</sup> )	2.89	17.62	10.38	3.89	0.81
	占总面积比例 Percentage (%)	8.11	49.53	29.15	10.92	2.27
	Percentage (%)					

表 5给出了 2001年至 2005年,研究区域内土壤 Pb、Cu含量的增加比例及所占面积。在这 4年

中,共有 33.77 km<sup>2</sup>的土壤 Pb含量有不同程度的增加,占研究区总面积的 94.94%。其中,2.62 km<sup>2</sup>的

土壤 Pb 增幅超过 40%，增幅最大达到了 76.7%。对于土壤 Cu 则有 32.68 km<sup>2</sup> 的研究面积有不同程度的增加，其中 4.70 km<sup>2</sup> 的土壤铜增幅在 40% 以上，占总面积的 13.19%。

可见，在本研究范围内，从 2001 年至 2005 年，表层土壤绝大部分均有不同程度 Pb 和 Cu 元素的富集，而且部分区域富集较快，这将对该地区的蔬菜种植及蔬菜品质有很大的影响。

### 3 结论

1) 2001 年至 2005 年杭州市蔬菜地土壤 Pb 和 Cu 平均含量分别由 38.73、31.20 mg kg<sup>-1</sup> 增加至 46.14、36.56 mg kg<sup>-1</sup>，平均增长了 7.41 和 5.36 mg kg<sup>-1</sup>；并且通过均数多重比较，2001 年至 2005 年土壤 Pb 和 Cu 均发生了显著变化，即达到了显著增加。

2) 原始数据经对数转换和 Box-Cox 转换后，Shapiro-Wilk 检验概率值有较大提高，但经对比，Box-Cox 转换对于数据的正态化分布效率更高，结果更接近正态分布的要求。

3) 空间自相关分析、地统计学分析与分形方法的应用，从不同角度共同反映了 2001 年至 2005 年蔬菜地土壤 Pb 和 Cu 的空间结构变化规律，即空间相关性随时间变化而减弱，随机性增强。三种方法所反映结果一致，但侧重角度不同，只有将三者相结合，才能更客观完整地描述变量的空间结构特征。

4) 两个时期土壤 Pb 和 Cu 的空间分布规律呈现西高东低的趋势，并且在研究区的大部分范围内出现不同程度的累积，人为污染与干扰是主要的影响因素。因此，在该地区需要进行农业结构调整和采取必要的污染防治措施。

### 参考文献

- [ 1 ] Chen T B, Wong J W C, Zhou H Y, *et al*. Assessment of trace metal distribution and contamination in surface soils of Hong Kong. *Environmental Pollution*, 1997, 96: 61~68
- [ 2 ] Raghunath R, Tripathi R M, Kumar A, *et al*. Assessment of Pb, Cd, Cu, and Zn exposures of 6- to 10-Year Old Children in Mumbai. *Environmental Research*, 1999, 80(3): 215~221
- [ 3 ] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——空间自相关与分形方法. *地理学报*, 1998, 53(1): 87~96. Zhang C S, Zhang S, He J B. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjiang River system — Spatial autocorrelation and fractal methods (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(1): 87~96
- [ 4 ] 张朝生, 陶澍, 袁贵平, 等. 天津市平原土壤微量元素含量的空间自相关研究. *土壤学报*, 1995, 32(1): 50~57. Zhang C S, Tao S, Yuan G P, *et al*. Spatial autocorrelation analysis of trace element contents of soil in Tianjin Plain area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(1): 50~57
- [ 5 ] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性变异性初步研究. *水利学报*, 1985(9): 10~20. Lei Z D, Yang S X, Xu Z R, *et al*. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985(9): 10~20
- [ 6 ] 姜勇, 梁大举, 闻大中. 沈阳郊区农业土壤中微量元素. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2003. Jiang Y, Liang D J, Wen D Z. *Microelements in Cultivated Soils of Shenyang Suburbs* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2003
- [ 7 ] 李哈滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 651~657. Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6): 651~657
- [ 8 ] 夏学齐, 陈骏, 廖启林, 等. 南京地区表土镉汞铅含量的空间统计分析. *地球化学*, 2006, 35(1): 1~5. Xia X Q, Chen J, Liao Q L, *et al*. Spatial statistics for cadmium, mercury and lead contents in topsoil of Nanjing (In Chinese). *Geochimica*, 2006, 35(1): 1~5
- [ 9 ] 韦玉春, 陈锁忠. 地理建模原理与方法. 北京: 科学出版社, 2005. Wei Y C, Chen S Z. *Theory and Method of Geography Modeling* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2005
- [ 10 ] 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. *Application of Geostatistics in Ecology* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999
- [ 11 ] 龚元石, 廖超子, 李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征. *土壤学报*, 1998, 35(1): 10~15. Gong Y S, Liao C Z, Li B G. Spatial variability and fractal dimension for soil water content and bulk density (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1): 10~15
- [ 12 ] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 沈阳市郊耕地土壤交换性锰含量的空间变异性. *土壤*, 2004, 36(1): 61~64. Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J, *et al*. Spatial variability of exchangeable manganese content in cultivated soils of Shenyang suburbs (In Chinese). *Soils*, 2004, 36(1): 61~64
- [ 13 ] Hu K L, Zhang F R, Li H, *et al*. Spatial Patterns of soil heavy metals in urban-rural transition zone of Beijing. *Pedosphere*, 2006, 16(6): 690~698
- [ 14 ] Liu X M, Xu J M, Zhang M K, *et al*. Application of geostatistics and GIS technique to characterize spatial variabilities of bioavailable micronutrients in paddy soils. *Environmental Geology*, 2004, 46: 189~194
- [ 15 ] Nicholson F A, Smith S R, Allway B J, *et al*. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *The Science of the Total Environment*, 2003, 311(1/3): 205~219
- [ 16 ] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜铅含量

- 及其健康风险评估. 中国农业科学, 2006, 39(8): 1589~1597. Chen T B, Song B, Zheng Y M, *et al*. A survey of lead concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risks (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(8): 1589~1597
- [17] 陈文. 通用航空用的新燃料和新发动机. 国际航空, 2004, 5: 41~42. Chen W. New fuel and engine for general aviation (In Chinese). *International Aviation*, 2004, 5: 41~42
- [18] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822~829. Zhang S Q, Zhang F D, Liu X M, *et al*. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feed lots (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11(6): 822~829
- [19] 沈根祥, 谢争, 钱晓雍, 等. 上海市蔬菜农田土壤重金属污染物累积调查分析. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 37~40. Shen G X, Xie Z, Qian X Y, *et al*. Investigation and analysis of heavy metal accumulation in the soil of vegetable cropland in Shanghai (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 37~40

## SPATIAL-TEMPORAL VARIABILITY OF LEAD AND COPPER CONTENTS IN VEGETABLE SOIL IN THE PERI-URBAN AREA OF HANGZHOU CITY

Chen Tao Shi Jiachun Liu Xingmei Wu Jianjun Xu Jianming<sup>†</sup>

(*Institute of Soil and Water Resource and Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China*)

**Abstract** The study on spatio-temporal variation of soil heavy metals is of important significance in sustainable utilization of the soil and protection of the eco-environment. Soil samples were collected from vegetable fields (0~20 m) in the pre-urban areas of Hangzhou City, 43 in 2001 and 74 in 2005, determined for total Pb and total Cu, and analyzed with the Moran's I, Geostatistics and the Fractal methods for their spatio-temporal variation of soil heavy metals. Results show that the mean content of soil Pb and Cu increased from 38.73 mg kg<sup>-1</sup> and 31.20 mg kg<sup>-1</sup> in 2001 to 46.14 mg kg<sup>-1</sup> and 36.56 mg kg<sup>-1</sup> in 2005, respectively, demonstrating a significant increase. The autocorrelated distance of soil Pb and Cu at the 0.05 significance level decreased from 3500 m to 2700 m and from 3300 m to 2800 m, respectively, showing a decreasing trend in spatial distribution of soil Pb and Cu from west to east across the study area. The accumulation of soil heavy metals might be attributed to intensified human activities.

**Key words** Urban-rural transitional area; Soil heavy metal; Spatio-temporal variability; Spatial autocorrelation; Geostatistics; Fractal