

云南省呈贡县蔬菜地表层土壤 Pb Cu 和 Zn 的小尺度空间分布特征

祖艳群¹, 高红武², 范家友², 唐发静¹, 杨炜林¹, 李元¹

(1.云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2.昆明冶金高等专科学校, 昆明 650033)

摘要:应用地统计学对云南省呈贡县蔬菜生产基地 2 个典型区域(湖滨区和平坝区)3 种微量元素(Pb、Cu 和 Zn)含量和土壤理化参数(CEC、<0.01 mm 粘粒和有机质含量)进行了空间结构分析。结果表明:(1)Pb、Cu 和 Zn 含量在湖滨区低于平坝区, 湖滨区 Pb 含量的变异系数较大, 达到 88.7%;(2)Pb、Cu 和 Zn 含量在不同方向上呈带状各向异性, 方向都为 WS-NE 和 SE-NW;(3)Pb、Cu 和 Zn 含量表现出强烈的空间变异, 空间相关度介于 25%和 75%之间。在湖滨区 Pb 的变异强度高, Cu 和 Zn 在平坝区的变异强度大于湖滨区;(4)CEC 在湖滨区受到随机因素引起的变异强度大于平坝区, 而粘粒含量和有机质含量的空间相关度均介于 25%和 75%之间。Pb、Cu 和 Zn 含量与 CEC 之间呈显著的负相关性;(5)5 个相邻的温室大棚湖滨区 Pb 含量高度变异, Cu 和 Zn 的变异系数小。平坝区各指标的变异系数接近。呈贡县蔬菜生产基地表层土壤 Pb、Cu 和 Zn 含量在小于 1 km² 的尺度上表现出明显的空间变异性, 空间变异与土壤结构、灌溉、耕作活动、管理水平、施肥水平、大棚蔬菜生产年限、地下水位、农田道路网络和城市排污沟渠的分布等有关。

关键词:土壤;微量元素;空间变异;空间分布

中图分类号:X833 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)02-0299-09

Spatial Distribution of Pb, Cu and Zn in Periurban Market Garden Soil in Chengong County, Yunnan Province

ZU Yan-qun¹, GAO Hong-wu², FAN Jia-you², TANG Fa-jing¹, YANG Wei-lin¹, LI Yuan¹

(1.College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2.Kunming Metallurgy College, Kunming 650033, China)

Abstract: The spatial distribution of 3 trace elements (Pb, Cu and Zn) in lacustrine and transition units of periurban market garden in Chengong County, Yunnan Province were studied with geostatistical analysis. The results showed that: (1) contents of Pb, Cu and Zn in lacustrine unit were lower than in transition unit. The variation coefficient (CV) of Pb was 88.7% in lacustrine unit. (2) Pb, Cu and Zn showed anisotropy with direction WS-NE and SE-NW. (3) the spatial variations of Pb, Cu and Zn were significant. The nugget (C_0) of Pb in lacustrine unit was higher than in transition unit, on the contrary for Cu and Zn. Values of nugget/sill of Pb, Cu and Zn ranged from 25% to 75%. (4) the nugget of CEC in lacustrine unit was higher than in transition unit. CEC was mainly affected by random factors. Values of nugget/sill of physical clay (<0.01 mm) and organic matter (OM) contents ranged from 25% to 75%. Negative relationships between CEC and Pb, Cu and Zn were observed. (5) Comparing with 5 greenhouses close together, CV of Pb>100% meant strongly spatial variation in lacustrine unit. CV of Cu and Zn were close, meant similar agricultural practice. In general, spatial variation of Pb, Cu and Zn with 100 m×100 m grid size was significant in two areas (1 km² and 0.49 km²). The spatial distribution of Pb, Cu and Zn was affected by soil texture, irrigation, fertilizers, greenhouse planting years, road and sewage channel net, underground water level and other agricultural management practice.

Keywords: soil; trace element; spatial variability; spatial distribution

收稿日期: 2009-09-24

基金项目: 国家自然科学基金 (30560034); 云南省学术带头人后备人才培养项目 (2006PY01-34)

作者简介: 祖艳群 (1966—), 女, 博士, 从事环境生态学的研究和教学工作。E-mail: zuyanqun@yahoo.com.cn

通讯作者: 李元 E-mail: liyuan03@yahoo.com.cn

关于不同尺度下土壤微量元素的空间分布特征已有不少报道^[1-3]。通常,对于蔬菜生产基地土壤,外源微量元素的迅速增加可使土壤微量元素空间分布特征发生一系列变化^[4-5]。长期高强度的蔬菜生产和农药、化肥的密集施用,使大量的微量元素在土壤迁移过程中受到土壤的吸附等留存于土壤中,发生较强的地表富集作用,并且由于蔬菜的类型、轮作的方式和土壤质地、地形等原因而形成小尺度空间分异^[6-7]。

地统计学是近几十年来发展起来的空间分析方法^[8-9],适合于对区域化变量空间特征进行描述。区域化变量具有不同于纯随机变量的特殊性质,具有结构性和随机性,地统计学中的半变异函数可用于反映区域化变量的空间变化特征,特别是被表观随机性掩盖的结构性。根据地统计学原理,对云南省呈贡县蔬菜生产基地典型区域 Pb、Cu 和 Zn 含量和土壤理化参数的小尺度空间结构进行了分析,以揭示城郊长期蔬菜生产条件下土壤微量元素含量的空间分布特征及其可能的影响因素,为蔬菜安全生产和土壤环境评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集和分析方法

土壤样品采自云南省呈贡县蔬菜生产基地 2 个典型区域土壤,分布在湖滨区(L)和平坝区(T)(图 1a、b),采样区面积在湖滨区(L)为 1 km²,平坝区(T)为 0.49 km²。大棚种植蔬菜,蔬菜生产时间均在 5~10 a 左右,每年生产 3~4 茬蔬菜。采样区内除横贯东西和南北的道路和水渠外,不存在明显的地形阻碍因素,地形平坦,土壤为红壤,土壤质地均一,pH 6.5 左

右。湖滨区东邻滇池,西北角为呈贡县城,采样点北部有一条连通滇池和呈贡县城的乡间道路,与道路平行有一条城市排污沟渠。平坝区采样点位于两个自然村之间,东南邻山,中间有一条连接两村的道路。采样按均匀布点方式进行,湖滨区共采集 10 行(L0~L9)10 列共计 100 个表土(0~20 cm)样品,平坝区共采集 7 行(T0~T6)7 列共计 49 个表土样品,南北向采样点间距为 100 m,东西向采样点间距 100 m,一般包含 3×(20~22) 个大棚。土壤样品为该点所在大棚内的多点混合样。

同时,为了进一步了解农业生产措施对土壤微量元素含量的影响,在每个采样区域的中心采样点选择 5 个温室大棚,每个大棚按照“之”字形采集 5 个表层(0~20 cm)土壤点样。湖滨区和平坝区分别 25 个土壤样品。

土样在室内风干,过 1 mm 尼龙筛,用比重计法测定<0.01 mm 粘粒含量^[10],用 BaCl₂-MgSO₄ 强迫交换法测定阳离子交换量^[11]。少量样品用玛瑙研钵碾至 100 目以下,用重铬酸钾法测定有机质(OM)含量^[11],用硝酸-高氯酸-氢氟酸对土壤样品进行消化,提取液中的 3 种元素(Pb、Cu 和 Zn)含量用原子吸收分光光度计进行测定^[12]。

1.2 数据处理和统计分析

全部数据采用 EXCEL 和 SPSS 进行常规分析。采用 ArcCatalog 将采样点及相关数据形成点数据文件,ArcGIS 9.0 下的 Geostatistical Analyst 模块进行半方差函数拟合和空间特征参数分析。在地统计分析中,各元素含量和土壤理化参数数据多呈对数正态分布,仅有少量异常值被剔除。根据拟合的半方差函数

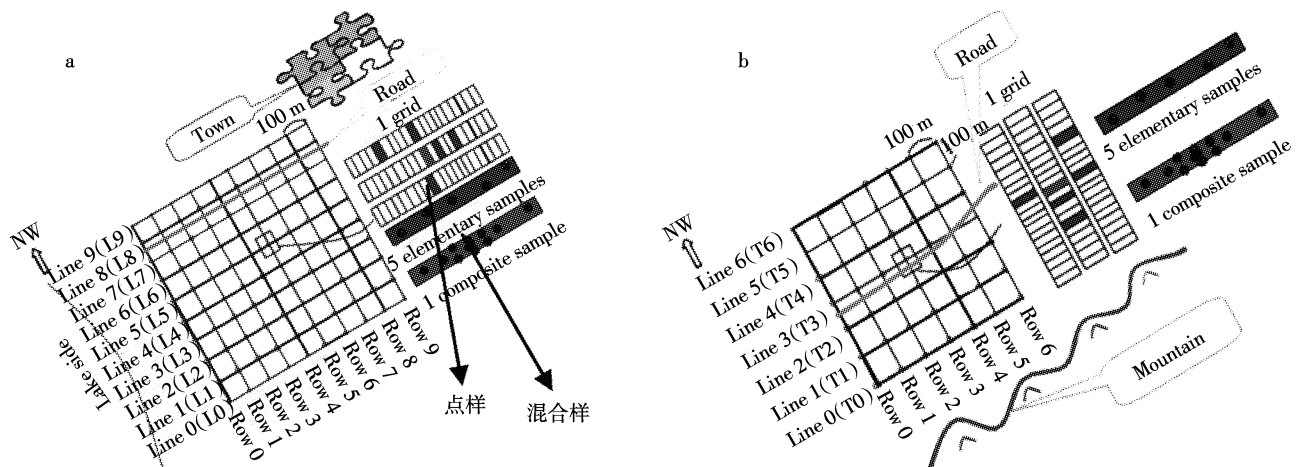


图 1 湖滨区(a)和平坝区(b)土壤样品分布图

Figure 1 Distribution of soil samples in the lacustrine (a) and transition unit (b)

模型,应用普通克里格法(Ordinary Kriging, OK)进行最优内插,形成最优半方差函数模型及相关参数^[2,8]。

2 结果

2.1 小尺度土壤重金属含量

湖滨区 Pb、Cu 和 Zn 的平均含量分别为 $10.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($2.7 \sim 29.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), $84.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($49.3 \sim 126.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 $83.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($23.7 \sim 149.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。平坝区 Pb、Cu 和 Zn 的平均含量分别为 $17.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($10.5 \sim 29.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), $137.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($53.9 \sim 202.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 $117.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($48.1 \sim 192.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (表 1)。

表 1 表层土壤重金属含量及相关理化参数

Table 1 Soil trace element contents and physic-chemical parameters

变量	湖滨区(Lacustrine unit)			平坝区(Transition unit)		
	算术平均值 (Mean)	标准差 (SD)	变异系数/% (CV)	算术平均值 (Mean)	标准差 (SD)	变异系数/% (CV)
Pb/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	10.3	9.2	88.7	17.5	5.1	29.4
Cu/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	84.5	18.7	22.2	137.3	32.8	23.9
Zn/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	83.2	28.3	34.1	117.7	31.8	27.0
CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	46.2	18.0	38.9	29.3	22.3	76.1
<0.01 mm 粘粒/%	38.6	11.5	29.7	32.9	6.9	20.8
有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	46	0.7	14.3	29	0.8	26.3

湖滨区重金属含量均低于平坝区,而 CEC、<0.01 mm 粘粒和有机质则表现为湖滨区高于平坝区。一般来讲,变异系数 $\text{CV} \leq 10\%$ 为弱变异性; $10\% < \text{CV} < 100\%$ 为中等变异性, $\text{CV} \geq 100\%$ 为强变异性^[13]。两个采样区 CV 均在 14.3%~88.7%之间,属于中等变异性。其中湖滨区 Pb 变异最大,达到 88.7%,Cu 和 Zn 含量的变异系数接近,为 22.2%~34.1%。而且 Cu 在两

个区域的变异性接近,分别为 22.2%和 23.9%。

2.2 小尺度土壤重金属空间分布特征

利用 ArcGIS 9.0 软件对全部数据进行半变异函数分析,采用球状模型、指数模型或高斯模型进行拟合(表 2,表 3)。在长期蔬菜生产的条件下,由于肥料的施用方式、微域地形以及土壤粘粒、有机质和阳离子交换量等因素空间分布的影响,土壤微量元素含量的空间变异特征在不同方向上不同,半变异函数分析所有变量的空间结构均呈带状各向异性,方向为 WS-NE 或 SE-NW。

湖滨区 Pb 和 Zn 含量的空间分布特点表现出沿古城到江尾村沟渠和道路附近的积累, L6~L9 行的 Pb 和 Zn 含量显著高于其他区域,而且在可乐村附近 Pb 含量相对较高。而 Cu 含量在江尾村和可乐村附近较高,其中 L7 行的 Cu 含量显著高于其他行。从北到南,各行间 Pb、Cu 和 Zn 含量具有一定的差异,而从东到西各列间没有显著的差异(图 1a)。

Pb、Cu 和 Zn 含量表现出强烈的空间变异,特别是 Cu 的空间相关度 $C_0/(C_0+C)$ 为 73.2%,Cu 含量主要受到随机因素的影响^[9,13]。Pb 和 Zn 的空间相关度 $C_0/(C_0+C)$ 分别为 37.3%和 31.7%,其空间变异是系统因素和随机因素共同作用的结果。变程可以表明重金属元素的空间自相关距离。湖滨区各指标的变程短轴为 254~646 m,均大于采样点间距(100 m),说明各样点之间存在一定的空间依赖性(表 2,图 2)。

CEC 和粘粒含量的 C_0 分别为 123.86 和 110.90,说明 CEC 和粘粒含量受到随机因素引起的变异强度大,而且 CEC、粘粒含量和有机质含量的空间相关度介于 25%和 75%之间,受到系统因素和随机因素的影响(表 2,图 2)。

平坝区 Pb 含量的空间分布特点表现出从南到北

表 2 湖滨区表层土壤微量元素和理化参数的半变异函数模型及相关参数

Table 2 Optimal semi-variogram models of soil trace element contents and their physic-chemical parameters and corresponding parameters in lacustrine unit

变量 (Parameters)	拟合模型 (Model)	块金常数 C_0 (Nugget)	基台值 (C_0+C)(Sill)	空间相关度 $C_0/(C_0+C)$	变程(Range)/m		方向(Direction)	决定系数(R^2)
					长轴	短轴		
Pb	球状	31.76	85.19	0.373	889	440	SE-NW	0.631*
Cu	指数	360.28	492.36	0.732	889	646	SE-NW	0.659*
Zn	球状	325.44	1 025.75	0.317	822	495	WS-NE	0.712*
CEC	高斯	123.86	421.08	0.294	889	560	SE-NW	0.645*
<0.01mm 粘粒	球状	113.90	186.37	0.611	889	254	WS-NE	0.821*
有机质	球状	39.09	64.40	0.607	889	607	SE-NW	0.690*

注: * 表示相关性为 0.05 显著性水平($P < 0.05$),下同。

表 3 平坝区表层土壤微量元素和理化参数的半变异函数模型及相关参数

Table 3 Optimal semi-variogram models of soil trace element contents and their physic-chemical parameters and corresponding parameters in transition unit

变量 (Parameters)	拟合模型 (Model)	块金常数 C_0 (Nuggst)	基台值 (C_0+C)(Sill)	空间相关度 $C_0/(C_0+C)/\%$	变程(Range)/m		方向(Direction)	决定系数(R^2)
					长轴	短轴		
Pb	球状	13.82	34.19	0.404	592	534	WS-NE	0.612*
Cu	高斯	774.71	1 519.40	0.510	592	413	WS-NE	0.674*
Zn	高斯	743.48	1 367.43	0.544	592	375	WS-NE	0.845*
CEC	高斯	0.56	559.37	0.100	586	259	SE-NW	0.634*
<0.01 mm 粘粒	球状	45.03	67.96	0.663	592	471	WS-NE	0.654*
有机质	球状	42.02	76.69	0.548	592	368	WS-NE	0.741*

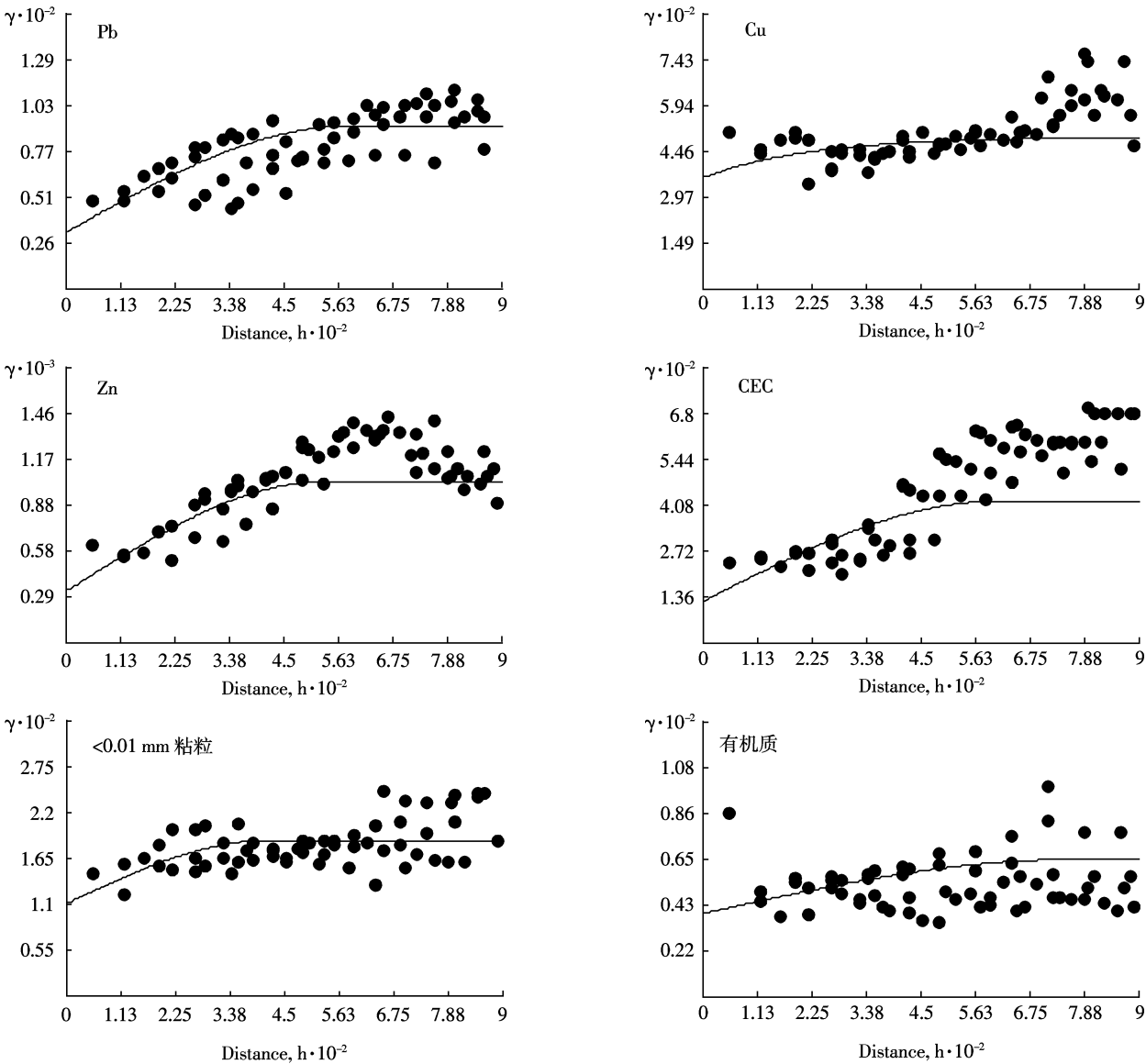


图 2 湖滨区表层土壤微量元素和理化参数的半变异函数模型图

Figure 2 Optimal semi-variogram models of soil trace element contents and their physic-chemical parameters in lacustrine unit

含量逐渐降低,越靠近山体 Pb 含量越高。其中 T0 的 Pb 含量显著高于其他行。Cu 和 Zn 含量表现出从东到西沿中间的村间道路附近的富积现象。其中 T3 行的 Cu 和 Zn 含量显著高于其他行。从北到南,各行间 Pb、Cu 和 Zn 含量具有一定的差异,而从东到西各列间没有显著的差异(图 1b)。

Pb、Cu 和 Zn 含量表现出一定的空间变异, $C_0/(C_0+C)$ 比值大于 25%而小于 75%,含量受到随机因素和系统因素的共同作用。而且 Cu 和 Zn 的空间相关度接近,说明 Cu 和 Zn 的空间变异性具有一定的一致性。平坝区各指标的变程短轴为 259~534 m,均大于采样点间距(100 m),说明各样点之间与湖滨区

一样存在一定的空间依赖性(表 3,图 3)。

CEC 的 C_0 为 0.56,说明 CEC 受到随机因素引起的变异强度小,且空间相关度为 10%,小于 25%,主要受系统因素的影响,而粘粒含量和有机质含量介于 25%和 75%之间,受到系统因素和随机因素的影响(表 3,图 3)。

比较湖滨区和平坝区两个采样点空间变异性,Pb 的变异强度(C_0)在湖滨区更高,Cu 和 Zn 在平坝区的变异强度大于湖滨区;Pb 和 Zn 的空间相关度为湖滨区小于平坝区,而 Cu 的空间相关度为湖滨区大于平坝区。与变异强度相反,Pb 的自相关距离在平坝区更高,Cu 和 Zn 在湖滨区的自相关距离大于平坝区。

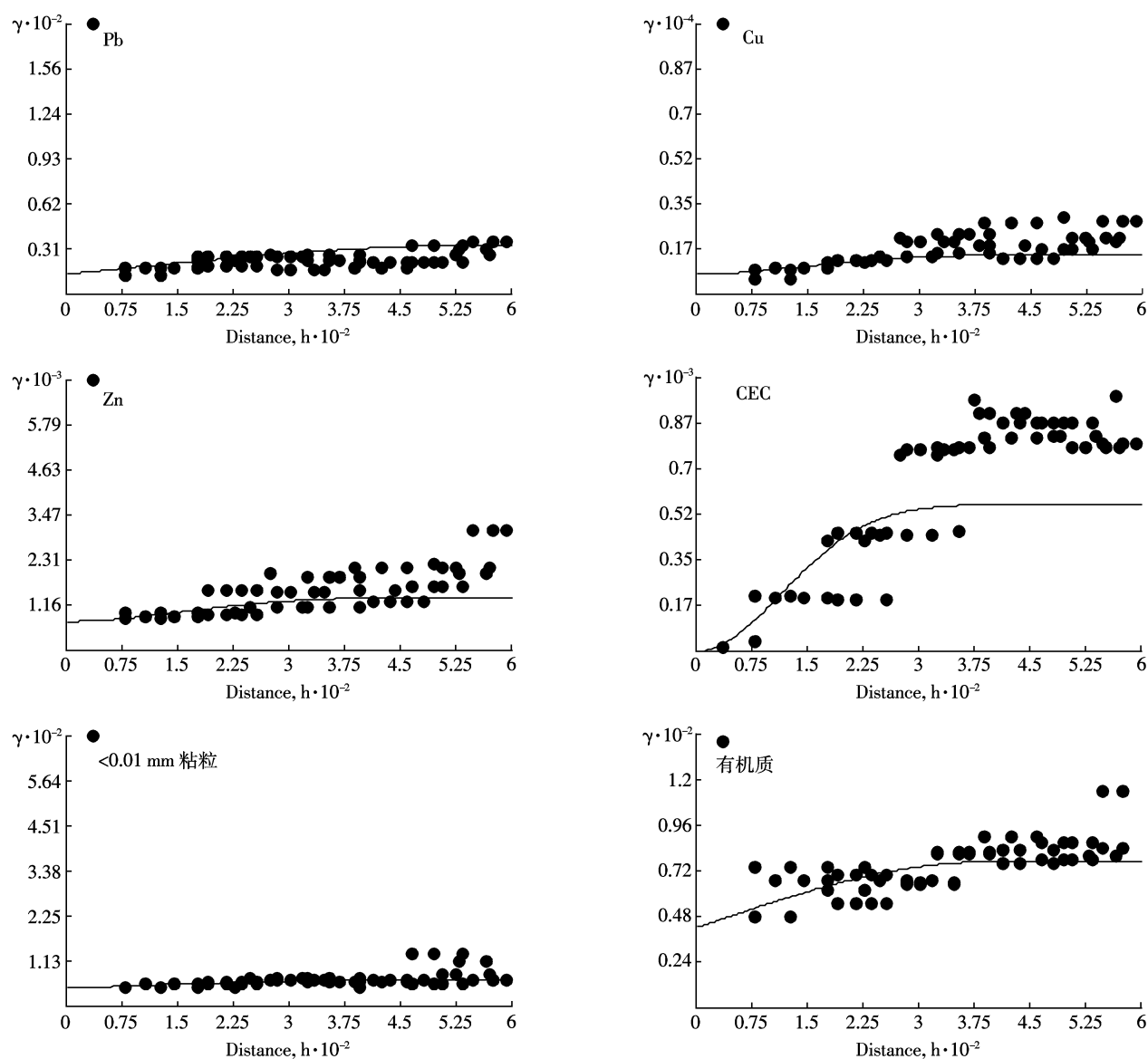


图3 平坝区表层土壤微量元素和理化参数的半变异函数模型图

Figure 3 Optimal semi-variogram models of soil trace element contents and their physico-chemical parameters in transition unit

CEC 的 C_0 和空间相关度在湖滨区大于平坝区,说明 CEC 在湖滨区受到随机因素引起的变异强度大于平坝区,主要受随机因素的影响。而粘粒含量和有机质含量的空间相关度在两个采样点接近,均介于 25%和 75%之间,受到系统因素和随机因素的影响,但湖滨区粘粒受到随机因素引起的变异强度大于平坝区。

2.3 不同温室大棚土壤重金属含量

湖滨区 5 个温室大棚 Pb、Cu 和 Zn 平均含量分别为 $5.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($1.8\sim25.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、 $91.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($72.1\sim109.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和 $91.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($63.5\sim106.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),如表 4。其中 1 号大棚中 Pb、Cu 和 Zn 平均含量最高。Pb 含量的变异系数大,Cu 和 Zn 含量的变异系数较小,为 10%左右。

平坝区 5 个温室大棚 Pb、Cu 和 Zn 的平均含量分别为 $17.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($9.1\sim30.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、 $177.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($87.2\sim222.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和 $141.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($67.9\sim195.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。其中 5 号大棚中 Pb 和 Zn 平均含量最高,2 号大棚中 Cu 平均含量最高。Pb、Cu 和 Zn 含量的变异系数接近,为 20%左右。

3 讨论

由于长期蔬菜生产,各元素在土壤中形成了一定的累积。段昌群等研究昆明地区各元素平均值为:Pb $43.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Cu $44.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 Zn $99.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [4]。相比之下,呈贡蔬菜生产基地 Pb 和 Zn 元素含量均低于昆明地区土壤的平均含量,而 Cu 含量却显著高于昆明地区土壤平均含量。但是研究区范围小于或等于 1 km^2 ,各元素含量变异系数较大,特别是 Pb 含量的变异系数偏大,局部变异性增强对于长期进行蔬菜生产的土壤,可能与长期的生产差异和管理水平等因素有关,特别是道路和城市排污沟渠污水中所含微量元素可能就近富集[15-16],导致局部微量元素含量增高,增大含量分布的空间差异,半变异差函数分析结果也反映

了这种差异性的存在。

3 种元素及土壤理化参数均存在着块金效应(表 2,表 3)。 C_0 为块金值,反映随机因素引起的变异强度,块金值小,说明有试验误差和小于试验取样尺度引起的土壤性质的变异小,反之,表明随机因素引起的变异较大[2,9]。湖滨区 Pb 含量由随机因素引起的变异强度大可能与道路和肥料的施用有关,Pb 是受到随机因素影响最大的元素[16-17]。 $C_0/(C_0+C)$ 比值为空间相关度,当 $C_0/(C_0+C)$ 比值 $<25\%$ 时,土壤性质主要由空间相关因素引起,变异主要受到系统因素的影响;当 $C_0/(C_0+C)$ 比值在 $25\%\sim75\%$ 之间时,土壤性质具有中等空间相关性,变异主要受到系统因素和随机因素的共同作用; $C_0/(C_0+C)$ 比值 $>75\%$ 时,土壤性质空间相关性较弱,变异主要受到随机因素的影响。两个采样点的 Pb、Cu 和 Zn 的空间相关度均为 $25\%\sim75\%$ 之间,变异都受到系统因素和随机因素的共同作用,但湖滨区 Cu 含量的空间相关度最高,接近 75% ,可见随机因素的影响具有较大的作用。而 Cu 的来源比较复杂,可能与波尔多液的使用和含 Cu 有机肥的施用有关,特别是饲料添加剂中大量 Cu 和 Zn 的使用,随着猪粪、牛粪和鸡粪等有机肥的使用,可能导致大量的 Cu 和 Zn 进入农田,引起 Cu 和 Zn 的小尺度空间的变异,应该引起高度重视[18-19]。

王学军等对污水灌溉土壤微量元素空间结构特征的研究,表明由于污水中的微量金属有较强的就近富集趋势,每一个污水排放口附近形成高浓度斑块,污染物浓度从斑块中心向周围骤降,由于斑块尺度大大小于采样密度,从而表现为块金效应[20]。由于采样区地势较为平坦,土壤质地较为均一,微域地形和土壤质地的影响可以忽略。由于长期的施肥、农药的施用、农田沟渠、城镇排污和农田道路网等差异,使得各元素含量的小尺度空间分布格局趋于复杂化。李红伟等研究认为潮土重金属有效态含量的空间变异与作物

表 4 温室表层土壤重金属含量及相关理化参数
Table 4 Soil trace element contents and physic-chemical parameters

变量(Parameters)	湖滨区 (Lacustrine unit)			平坝区 (Transition unit)		
	算术平均值 (Mean)	标准差 (SD)	变异系数/% (CV)	算术平均值 (Mean)	标准差 (SD)	变异系数/% (CV)
Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	5.2	6.6	129.3	17.7	4.0	22.7
Cu/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	91.1	10.7	11.8	177.3	32.2	18.2
Zn/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	91.2	11.5	12.6	141.1	25.7	18.2
CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	27.5	14.6	53.1	55.0	3.4	11.6
<0.01 mm 粘粒/%	39.2	16.3	41.6	35.7	6.7	18.9
有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	41.9	8.6	20.5	32.1	6.7	20.95

种植的行的方向和磷肥的施用有关^[13]。

根据半变异差函数分析结果,湖滨区各 Pb、Cu 和 Zn 的变量变程短轴在 440~646 m 之间,相差不大,尤其是 Pb、Cu、CEC、<0.01 mm 粘粒和有机质含量的长轴变程均为 889 m。而平坝区 Pb、Cu 和 Zn 的变程短轴在 375~534 m 之间,反映了各变量空间自相关范围具有很大的相似性,这在某种程度上说明各种污染物的空间分布特征具有相似性。

两个采样区 3 种元素和土壤理化参数半变异函数均呈带状各向异性,方向都为 WS-NE 和 SE-NW (湖滨区 Pb、Cu 和有机质含量、CEC)。这种分布格局的形成主要与贯穿该区域的农田交通道路、呈贡城和山体位置有关。湖滨区东北角是呈贡主城区,由主城区有一条排污沟渠穿过 L7 和 L8 之间,将城市生活污水排入滇池,同时一条重要的交通要道与排污沟渠平行连接城市与滇池。而在采样区东部也同样有一条连接村与村间的道路,形成了沿道路附近的金属元素的积累。而平坝区在 T2 和 T3 之间有一条横穿的村与村间的道路,东南部紧连山体,山体石灰岩重金属高背景值含量对农田重金属含量的分布具有一定的影响^[14,18]。

另外,Pb、Cu 和 Zn 含量的空间变异特征可能还与蔬菜生产的时间和地下水位有关。同一大棚连续蔬菜生产的时间在湖滨区为 10 a 左右,而平坝区为 5 a 左右。平坝区 Pb、Cu 和 Zn 含量高于湖滨区,表明年限为 10 a 的蔬菜地重金属含量有所下降。万红友等研究也显示出菜地种植的前 5 a 重金属含量相对较高,而 10 a 后相对较低^[21]。原因可能在于有机肥的施用量的增加和积累^[22-23]。地下水位在湖滨区为 60 cm 左右,而平坝区大于 100 cm。湖滨区较高的地下水位可能会影响土壤含水量和重金属元素在土壤中的垂直迁移,从而有效地降低表层土壤的重金属积累^[9]。

由于母质的影响,一般土壤中粘粒含量、有机质含量和 CEC 与重金属含量大多具有一定的相关性^[24-25]。农业土壤粘粒和有机质含量分布相对均匀,土壤微量元素含量和分布的空间差异性实际上主要取决于农田道路网的分布、农业生产措施和排污沟渠空间分布,粘粒和有机质的影响反而成为次要因素。在本采样区,粘粒和有机质的空间分布特征与各微量元素有相似之处。平坝区 Pb 含量与有机质含量之间具有显著的负相关性($y=27.28-0.32x$, $R^2=0.188$, $P<0.01$, $N=49$),可能平坝区施用的有机肥不是土壤 Pb 的来源,而是 Pb 含量的影响因素,有机质通过对 Pb 的结合

而影响 Pb 在土壤中的迁移,改变表土 Pb 含量。而在湖滨区和平坝区均表现出 CEC 与 Pb、Cu 和 Zn 含量显著的负相关性(表 5)。说明 CEC 能较好地反映土壤 Pb、Cu 和 Zn 的含量,影响表层土壤中 Pb、Cu 和 Zn 含量,特别是平坝区土壤 CEC 的空间自相关性强,分布均匀,主要受到系统因素的影响,在一定程度上影响了 Pb、Cu 和 Zn 含量的空间相关性程度。

表 5 重金属含量与 CEC 之间的相关性分析

Table 5 Relationships between soil trace elements and CEC

元素	区域	方程	R^2	P	N
Pb	湖滨区	$y=21.87-0.25x$	0.233	<0.01	100
	平坝区	$y=19.84-0.08x$	0.119	<0.05	49
Cu	湖滨区	$y=99.89-0.34x$	0.103	<0.01	100
	平坝区	$y=158.39-0.72x$	0.240	<0.01	49
Zn	湖滨区	$y=122.55-0.86x$	0.291	<0.01	100
	平坝区	$y=142.54-0.85x$	0.355	<0.01	49

土壤微量元素含量是典型的区域化变量,在不同尺度下元素含量空间变化可能具有相同的特征,随取样间距由小变大,样品变化的随机成分不断增加^[13]。本次采样密度在相当程度上反映土壤元素含量的微域分异特征。为了反映更小尺度的元素空间分异特征,对紧密相连的 5 个温室大棚的采样比较则能更加准确反映农业生产措施的个体间差异对土壤重金属含量的影响。

湖滨区即使是在 5 个相邻的温室大棚,Pb 含量的变异系数>100%,表现出高度变异性。其次为 CEC 和粘粒含量,变异系数分别为 53.2%和 41.6%,而 Cu 和 Zn 的变异系数小。可见,湖滨区农业生产措施和管理水平对 Pb 含量因素影响较大,而对 Cu 和 Zn 含量的空间变异影响较小。Cu 和 Zn 含量受到随机因素的影响可能更多与田间道路的分布和城市距离有关。而平坝区各指标的变异系数接近,均在 20%左右或低于 20%,说明平坝区农业生产措施和管理水平比较一致。平坝区 Pb、Cu 和 Zn 含量的空间变异受到的随机因素的影响可能更多与田间道路的分布和山体距离有关。

4 结论

昆明市城郊蔬菜生产基地土壤典型地块微量元素含量及土壤理化参数空间结构特征的研究表明:

(1)湖滨区重金属含量均低于平坝区,除湖滨区 Pb 含量的变异系数较大,达到 88.7%外,其他变异系数接近,为 30%左右。

(2)土壤微量元素含量在不同方向上呈带状各向异性,方向都为 WS-NE 和 SE-NW。这种分布格局的形成与贯穿该区域的农田交通道路分布、呈贡县城和山体位置有关。

(3)Pb 的变异强度在湖滨区更高,Cu 和 Zn 在平坝区的变异强度大于湖滨区。Pb、Cu 和 Zn 含量表现出强烈的空间变异,空间相关度介于 25%和 75%之间,受到系统因素和随机因素共同作用。特别是湖滨区 Cu 的空间相关度 $C_0/(C_0+C)$ 为 73.2%,Cu 含量主要受到随机因素的影响。

(4)CEC 的 C_0 和空间相关度在湖滨区大于平坝区,CEC 在湖滨区受到随机因素引起的变异强度大于平坝区,主要受随机因素的影响。而粘粒含量和有机质含量的空间相关度在两个采样点接近,均介于 25%和 75%之间,受到系统因素和随机因素的影响。湖滨区和平坝区均表现出 Pb、Cu 和 Zn 含量与 CEC 之间呈显著的负相关性,平坝区 Pb 含量与有机质含量之间具有显著的负相关性。

(5)5 个相邻的温室大棚在湖滨区 Pb 含量的变异系数>100%,表现出高度变异性,农业生产措施和管理水平对 Pb 含量影响因素较大。Cu 和 Zn 的变异系数小。平坝区各指标的变异系数接近,均在 20%左右或低于 20%,平坝区农业生产措施和管理水平比较一致。

总之,呈贡县蔬菜生产基地表层土壤 Pb、Cu 和 Zn 含量在等于或小于 1 km^2 的尺度上空间变异的原因可能与土壤结构、灌溉、耕作活动、管理水平、施肥水平、大棚蔬菜生产年限、地下水位、农田道路网络和城市排污沟渠的分布等有关。

参考文献:

- [1] 刘晓文,丁海霞,南忠仁,等.干旱区矿业城市郊区农田土壤重金属有效态含量及空间分布特征[J].生态环境学报,2009,18(1):138-142.
LIU Xiao-wen, DING Hai-xia, NAN Zhong-ren, et al. Research on the bioavailability and spatial distribution of heavy metals in suburb cropland, Jinchang City, Gansu, China[J]. *Ecology and Environment*, 2009, 18(1): 138-142.
- [2] 陈守莉,孙波.污染水稻土中有效态重金属含量的空间分布及影响因素[J].土壤,2008,40(1):66-72.
CHEN Shou-li, SUN Bo. Spatial distribution of available heavy metals in polluted paddy soil and its influencing factors[J]. *Soils*, 2008, 40(1): 66-72.
- [3] 李宏艳,藤彦国,王金生,等.德兴地区土壤重金属含量空间分布特征[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2008,27(3):465-468.
LI Hong-yan, TENG Yan-guo, WANG Jin-sheng, et al. Spatial distribution of concentrations of soil heavy metals in Dexing area, Jiangxi Province[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2008, 27(3): 465-468.
- [4] 李红伟,刑维芹,赵财,等.长期耕作条件下潮土重金属空间分布及变异性研究[J].河南农业科学,2007(9):67-71.
LI Hong-wei, XING Wei-qin, ZHAO Cai, et al. Spatial distribution and variation of heavy metals in Chaotu soil with long-term farming history[J]. *Journal of Henan Agricultural Science*, 2007(9): 67-71.
- [5] 赵彦锋,史学正,于东升,等.工业型城乡交错区农业土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的空间分布及影响因素[J].土壤学报,2007,44(2):227-234.
ZHAO Yan-feng, SHI Xue-zheng, YU Dong-sheng, et al. Spatial distribution of Cu, Zn, Pb and Cd in agricultural soils of industry-based peri-urban regions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 227-234.
- [6] 杨炜林,祖艳群,李元.土壤重金属化学形态的空间异质性及其影响因素研究[J].云南农业大学学报,2007,22(6):912-916.
YANG Wei-lin, ZU Yan-qun, LI Yuan. Spatial variability of sequential extraction parts of heavy metals and its affecting factors in soil[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2007, 22(6): 912-916.
- [7] 史舟,李艳.地统计学在土壤中的应用[M].北京:中国农业出版社,2006:1-9.
SHI Zhou, LI Yan. Geostatistics and its application in soil science[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2006: 1-9.
- [8] 王学军,李本纲,陶澍,等.土壤微量金属含量的空间分析[M].北京:科学出版社,2005:1-30.
WANG Xue-jun, LI Ben-gang, TAO Shu, et al. Spatial analysis of soil trace elements[M]. Beijing: Science Press, 2005: 1-30.
- [9] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:110-113.
Institute of Soil Science of Chinese Academy of Science. Soil physical-chemical analysis[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 110-113.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:25-35,152-169.
BAO Shi-dan. Soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 25-35, 152-169.
- [11] 奚旦立,陆雍森,蒋展鹏.环境工程手册-环境监测卷[M].北京:高等教育出版社,1998:80-120.
XI Dan-li, LU Rong-sen, JIANG Zhan-peng. Booklet of environmental engineering: environmental monitoring[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998: 80-120.
- [12] 李红伟,李立平,刑维芹.不同小尺度下潮土重金属有效性空间变异研究[J].土壤,2006,38(6):782-789.
LI Hong-wei, LI Li-ping, XING Wei-qin. Spatial distribution of heavy metal availability in fluvo-aquic soil under different small scales[J]. *Soil*, 2006, 38(6): 782-789.
- [13] 段昌群,王红华,杨双兰.无公害蔬菜生产理论与调控技术[M].北京:科学出版社,2006:273-278.
DUAN Chang-qun, WANG Hong-hua, YANG Shuang-lan. Pollution-free vegetable production: theory and practices [M]. Beijing: Science Press, 2006: 273-278.

- [14] 陈怀满, 郑春荣, 周东美, 等. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 23–53.
CHEN Huai-man, ZHENG Chun-rong, ZHOU Dong-mei, et al. Behavior of chemicals in soils and its relation to environment quality [M]. Beijing: Science Press, 2002: 23–53.
- [15] 张庆利, 史学正, 黄 标, 等. 南京城郊蔬菜基地土壤有效态铅、铜和镉的空间分异及其驱动因子研究[J]. 土壤, 2005, 37(1): 41–47.
ZHANG Qing-li, SHI Xue-zheng, HUANG Biao, et al. Characteristics of spatial variability of soil available lead, zinc, copper, and cadmium in a vegetable base in the suburbs of Nanjing[J]. *Soils*, 2005, 37(1): 41–47.
- [16] Hernandez L, Probst A, Probst J L, et al. Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 31(2): 195–219.
- [17] Zu Y Q. Trace elements in soils and vegetables in a periurban market garden in Yunnan Province (P. R. China): evaluation and experimentation[D]. Ph. D. Dissertation, Gembloux, Belgium: Gembloux Agricultural University, 2008: 75–116.
- [18] 胡克林, 余 艳, 张凤荣, 等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 463–468.
HU Ke-lin, YU Yan, ZHANG Feng-rong, et al. Spatial distribution of concentrations of soil heavy metals in Daxing County, Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(3): 463–468.
- [19] 王学军, 邓宝山, 张泽浦. 北京东郊污灌区表层土壤微量元素的小尺度空间结构特征[J]. 环境科学学报, 1997, 17(4): 412–416.
WANG Xue-jun, DENG Bao-shan, ZHANG Ze-pu. Spatial structures of trace element contents in sewage irrigation soil at the eastern suburb of Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(4): 412–416.
- [20] 万红友, 周生路, 赵其国. 不同种植年限菜地土壤基本性质和重金属含量变化[J]. 河南农业科学, 2006, 11: 79–82.
WAN Hong-you, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo. Variation of basic property and heavy metal contents in vegetable soils with different planting years[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2006, 11: 79–82.
- [21] 王 俊, 郭 颖, 吴 蕊, 等. 不同种植年限和施肥量对日光温室土壤锌累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 89–94.
WANG Jun, GUO Ying, WU Rui, et al. Effects of different planting years and organic manure fertilization on Zn accumulation in greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 89–94.
- [22] 李德成, 李忠佩, 周 祥, 等. 不同使用年限蔬菜大棚土壤重金属含量变化[J]. 农村生态环境, 2003, 19(3): 38–41.
LI De-cheng, LI Zhong-pe, ZHOU Xiang, et al. Contents of heavy metal elements in soils of vegetable greenhouse different in age[J]. *Rural Eco-Environment*, 2003, 19(3): 38–41.
- [23] Zu Y Q, Li Y, Bock L, et al. Soil affects on the Cd and Zn contents of Chinese cabbage in Yunnan Province, China [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2009, 1–11.
- [24] 赵永存, 汪景宽, 王铁宇, 等. 吉林公主岭土壤中砷铬和锌含量的空间变异性及分布规律研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(5): 372–376.
ZHAO Yong-cun, WANG Jing-kuan, WANG Tie-yu, et al. Spatial variability and distribution pattern of arsenic, chromium and zinc contents in soils in Gongzhuling area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(5): 372–376.