

# 多嵌套空间尺度农田土壤重金属空间变异研究\*

王圣伟<sup>1,2</sup> 冯娟<sup>1,3</sup> 刘刚<sup>1</sup> 张天蛟<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 西北师范大学计算机科学与工程学院, 兰州 730070; 3. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001)

**摘要:** 运用地统计学技术对棕壤土典型地块进行了重金属多尺度嵌套空间变异和结构来源分析。选取5种反映土壤污染水平的典型重金属元素铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、铜(Cu)、铬(Cr)以及类重金属元素砷(As)进行采样检测。利用克里格法插值拟合,选择最优拟合模型,确定了合理采样间距。结合半方差和分维数分析,研究确定了合理采样尺度。采取主成分分析和半方差分析相结合的方法,确定土壤重金属来源,指导农业管理措施。研究表明,农田土壤重金属主要由成土母质、降水灌溉和农药施肥构成。中等尺度符合半方差模型拟合,变程的范围从319 m到752 m不等。其中球面模型更适合土壤重金属空间分布拟合描述。

**关键词:** 土壤重金属 空间变异 分维数 嵌套空间尺度 半方差函数

**中图分类号:** S151.9<sup>+</sup>5; TP399 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0128-08

## Multi-nesting Spatial Scales of Soil Heavy Metals in Farmland

Wang Shengwei<sup>1,2</sup> Feng Juan<sup>1,3</sup> Liu Gang<sup>1</sup> Zhang Tianjiao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

3. College of Information Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

**Abstract:** Multi-nesting spatial variability and source analysis of statistical technology were applied to the typical plots which consist of brunisolic soil. By means of the sample testing results on five elements of heavy metals: Pb, Cd, Hg, Cu, Cr, with As element, which could reflect the levels of the soil pollution, aforementioned geo-statistical analysis process was done. Optimal model was selected by kriging interpolation method. And then, the reasonable sampling spacing was well determined. Combined with semivariance and fractal dimension analysis, the reasonable sampling scale was obtained. The method combined PCA with semivariance analysis together to trace to the source was adopted forward to guide agricultural management measures. The results indicated that the origin of farmland soil heavy metal composition was composed of three main source formations, which were soil parent material, precipitation and irrigation, and pesticide application. Medium scale jibed with semivariance model fitting. The value of range varied from 319 m to 752 m. The spherical model was thought more suitable to describe space distribution of soil heavy metal.

**Key words:** Soil heavy metal Spatial variability Fractal dimension Nesting spatial scales Semivariogram

### 引言

耕作土壤中重金属含量对于农田作物的影响日

益受到研究者的关注,其对于食品健康安全和农业生产具有重要的研究意义<sup>[1]</sup>。土壤属性的空间变异性是指在不同空间位置上存在明显差异变化,且

收稿日期: 2012-10-26 修回日期: 2013-01-11

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100704)

作者简介: 王圣伟, 博士生, 西北师范大学讲师, 主要从事农业信息化和空间评价研究, E-mail: flaxwork\_mail@ qq. com

通讯作者: 刘刚, 教授, 博士生导师, 主要从事精细农业电子信息研究, E-mail: pac@ cau. edu. cn

土壤重金属的空间变异是普遍存在的<sup>[2-3]</sup>。近年来,越来越多的研究显示土壤重金属的变异能造成作物产量变化甚至作物品质改变<sup>[4-6]</sup>。表层土壤重金属含量的空间变异可能受成土母质和人为活动来源影响较多<sup>[7-8]</sup>。人类耕作活动对土壤变异的影响越来越大<sup>[9-10]</sup>,而对于土壤重金属的嵌套尺度空间变异研究较少。本文采用传统统计学与地统计学相结合的方法研究空间嵌套多尺度耕作农田土壤重金属含量的空间变异特征,研究采样点合理分布和数目,进行地统计分析和空间属性分析,探讨农田土壤重金属的来源特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与概况

研究区域在山东省滨州市农业示范基地的轮作耕种农田。农田种植小麦和棉花,采用一年两熟的轮作制,土壤以棕壤土为主,粒径细度主要为砂土颗粒。施用化肥以有机肥,过磷酸盐和氮肥为主。地块平均 pH 值 7.5,有机质质量分数 1.7%,有效磷 30.5 mg/kg,速效钾 103.7 mg/kg,水解性氮 80.6 mg/kg,全氮质量分数 1.23%,土壤养分具有较好土壤肥力质量,接近绿色农产品土地适宜要求<sup>[11]</sup>。采样区域面积为 9.154 08 hm<sup>2</sup>,属东亚暖温带亚湿润大陆性季风气候,冬冷夏热,雨热同期,四季分明。区域平均气温 13.7℃,极端气温 17.8 ~ 38.2℃。年平均降水量 537.2 mm,年平均日照 2 526.9 h。地处东经 117°47' ~ 118°09'、北纬 37°13' ~ 37°36'之间。区域高程在 7.5 ~ 10.5 m 之间,地势西高东低,北高南低。

### 1.2 样本采集与检验分析

样本于 2012 年 1 月在冬小麦出苗期采集,用 GPS 332 定位,采用网格采样法。采样间距为田间尺度采集嵌套模式,大粒度空间尺度为 2 km × 2 km,中粒度空间尺度为 200 m × 200 m,小粒度空间尺度为 20 m × 20 m,每个尺度各采集 30 个土样。在以网格点为圆心、半径分别为 50、5 和 0.5 m 的范围内采集 0 ~ 20 cm 土层 5 钻土,充分混匀后作为一个样本,共 90 个样本。样本分布如图 1 所示。另外采集辅助样本 4 类各 5 个样本,方式为:尘降(扫取农田周边无人影响枝干或窗台,每样本 100 g 左右);灌溉水(取自农田周边灌溉渠内,每样本 200 mL);雪降(取一次降雪后累积无破坏雪层,每样本 200 mL);降水(采用后期补样方式在 4 月雨水期采样沉积淤泥 100 g)。土样经风干、磨碎及过筛后,按 GB/T 15337—2008 标准通则,分别选取对农田环境危害性强的土壤中重金属 Pb、Hg、Cd、Cr、Cu

以及毒性危害类似重金属的类重金属元素 As 进行含量检测。采用国家土壤标准物质 GBW07403 (GSS-3) 进行参照检验,检验误差均在 5% 以内。对采集的水质样本同样进行重金属检测。检测方法:As 和 Hg 采用氢化物原子荧光法测定,Pb 和 Cd 采用石墨炉原子吸收光谱法测定,Cr 和 Cu 采用火焰原子吸收光谱法测定。同时遵照标准对土壤样本作养分检测:水解性氮(N)按 TF/JF-23—2005(碱解蒸馏法)、有效磷(P)按 LY/T 1233—1999(钼锑抗比色法)、速效钾(K)按 LY/T 1236—1999(火焰光度法)和有机质含量(OM)按 NY/T 85—1988(重铬酸钾容量法)。

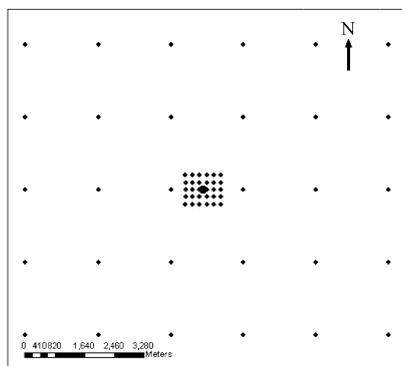


图1 嵌套采样分布图

Fig. 1 Nesting sampling distribution map

### 1.3 数据统计分析方法

用 SPSS 17.0 进行描述性统计分析,用 GS + 9.0 进行地统计学分析,选取最优拟合模型。利用 Arcgis 9.3 的 spatial statistics 和 geostatistical analyst 模块进行空间拟合验证检验和克里格插值分布制作。

#### 1.3.1 理论合理采样数

对空间随机分布基础的经典统计学而言,合理采样数值是指满足一定置信水平要求的抽样样本容量。在样本满足正态分布的情况下,采用 Cochran 提出的区域随机合理采样公式,即

$$N = t^2 (C_v/k)^2 \quad (1)$$

式中  $N$ ——区域随机合理采样数

$t$ ——一定置信水平下的  $t$  分布值

$C_v$ ——变异系数  $k$ ——相对误差

#### 1.3.2 空间自相关法

空间自相关分析是研究某一变量空间分布特征的一种常用方法,它可以检测该变量的空间变化是否存在自相关性<sup>[12]</sup>。因此,空间自相关是区域化变量的属性之一。Moran's  $I$  系数是检测变量空间自相关性大小的有效指标,其定义为

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中  $W_{ij}$ ——研究范围中每一个空间单元  $i$  与  $j$  区域空间单元的空间相邻权重矩阵

$x_i$ ——变量在空间  $i$  处的值

$\bar{x}$ ——变量  $x_i$  的平均值

$n$ ——空间点对数

$I$  值在 1 到 -1 之间变化,反映了由空间相邻相似的正相关向空间相邻相异的负相关的过渡<sup>[13]</sup>。自相关指标正、负和趋零分别呈现空间极化、空间扩散和随机分布的特征。

### 1.3.3 半方差函数及模型

半方差函数是土壤空间变异研究的关键,反映了测定区域所考察区域化变量的空间变异结构,无论在确定土壤合理采样数,还是在克里格插值计算中都起着至关重要的作用<sup>[14]</sup>。

在一个测定区域把所考察的土壤参数看作一个区域化随机变量  $Z(y)$ ,  $y$  表示测定参数的空间坐标。 $Z(y)$  是样点  $Z$  在位置  $y$  的实测值, $Z(y+h)$  是与  $y$  距离为  $h$  处样点的值。区域化随机变量  $Z(y)$  满足二阶平稳和本征假设,其数学期望未知,协方差函数  $c(h)$  及变异函数  $\gamma(h)$  存在,则用于估计半方差的公式为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}E(Z(y) - Z(y+h))^2 \quad (3)$$

通过半方差公式计算半变异函数值,分别用不同类型的理论模型拟合。根据得到模型的相关参数,得到拟合半方差模型。在验证阶段,一般选取残差平方和(RSS)最小、决定系数( $R^2$ )最接近于 1 的

模型作为最优拟合模型,并采用交叉验证法修正模型参数。

### 1.3.4 分维数

在多尺度的自然结构中,分维数主要揭示斑块及斑块组成的景观的形状和面积之间的相互关系,它反映了在一定的观测尺度上斑块和景观格局的复杂程度。许多自然界物体具有明显的分形特征,分形结构最重要的特征之一就是自相似性,即整体结构可由其结构单元的反复叠加而形成。

Mandelbrot<sup>[15]</sup> 论证了分形几何现象存在于各种自然系统中,并提出 WM 函数具有分形特征。Berry 和 Lewis<sup>[16]</sup> 论证 WM 函数的方差函数或半方差函数近似在 原点与  $t^{4-2D}$  呈比例,如果分维数  $D > 1.5$ ,则说明变差函数具有自仿射分形特征。Burrough<sup>[17]</sup> 提出可将这理论结果应用于地统计土壤环境数据的数据序列。并利用双对数回归公式估算分维数  $D$ 。

$$D = 2 - \frac{d \lg V(t)}{2 d \lg t} = \frac{4 - m}{2} \quad (4)$$

式中  $D$ ——Hausdorff 维数

$m$ ——半方差与抽样间距间双对数回归斜率

即分维数随着半方差对数曲线斜率的增加而减小,而分维数越小,说明数据的空间依赖性越强。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属基本统计特征

按照统计和空间地统计方法,对样点数据值进行了分析,结果如表 1 所示。

表 1 不同尺度重金属统计特征值

Tab. 1 Statistical characteristics of soil heavy metal with different scales

元素	间距 /m	平均值/ mg·kg <sup>-1</sup>	最小值/ mg·kg <sup>-1</sup>	最大值/ mg·kg <sup>-1</sup>	标准差	变异 系数 $C_v$	K-S 检验	$I$	$N$
Pb	20	12.97	9.4	17.0	1.969	0.152	0.2 *	0.5313	10
	200	16.05	11.0	19.0	2.038	0.127	0.135	0.1448	7
	2000	22.41	14.5	29.5	4.540	0.203	0.2 *	-0.1363	17
Hg	20	0.100	0.082	0.12	0.0113	0.113	0.063	0.1800	5
	200	0.099	0.075	0.12	0.0126	0.127	0.052	0.0370	7
	2000	0.133	0.045	0.25	0.0470	0.353	0.2 *	-0.1367	51
Cd	20	0.042	0.027	0.060	0.0096	0.226	0.2 *	-0.1284	21
	200	0.040	0.015	0.063	0.0128	0.315	0.2 *	0.2028	41
	2000	0.085	0.010	0.180	0.0296	0.350	0.12	-0.0114	50
Cu	20	19.90	17.00	24.0	1.517	0.076	0.05	0.3488	2
	200	26.00	19.00	50.0	6.383	0.246	0.108	0.1146	25
	2000	21.86	5.39	36.7	6.427	0.294	0.189	-0.0424	36
Cr	20	53.23	40.00	70.0	7.186	0.135	0.2 *	0.6060	8
	200	56.60	48.00	71.0	5.529	0.098	0.072	0.2866	4
	2000	58.20	43.67	75.2	8.497	0.146	0.2 *	-0.1418	9
As	20	4.23	3.40	4.800	0.352	0.083	0.187	-0.0515	3
	200	4.41	3.90	4.900	0.288	0.065	0.125	-0.1415	2
	2000	6.74	3.25	7.625	0.377	0.048	0.2 *	-0.0510	1

注: \* 为显著水平。

在置信水平为 95%、相对误差  $k$  为 10% 的情况下,计算统计水平的合理采样数  $N$  如表 1 所示。基本符合本研究的采样数要求。从表 1 可以看出,  $K-S$  非参数检验也表明,在 0.05 检验水平下,土壤各重金属含量均基本服从正态分布,不必对数据进行转换。在本研究多空间嵌套尺度上土壤重金属变异尺度各有不同。土壤各重金属的变异系数  $C_v$  反映了随机量的离散程度,也说明了土壤中重金属的富集强度和富集能力<sup>[18]</sup>。以 200 m 尺度为例,其中 Cr、As 呈现弱变异 ( $C_v < 0.1$ ),而 Pb、Hg、Cd、Cu 则表现为中等变异 ( $0.1 < C_v < 1$ )。各重金属变异系数递增顺序为 As、Cr、Hg、Pb、Cu、Cd。空间自相关全局系数  $I$  除 As 以外均表现出空间正相关性,具有不同程度的空间数据分布聚类效果。正相关系数值递减顺序为 Cr、Cd、Pb、Cu、Hg, As 的负相关可能是农田耕作措施的不同和农药化肥施用量的差异造成的<sup>[19]</sup>。从分析可得出对于相应的空间自相关程度较强的重金属,可考虑适当增大采样间距。图 2 为不同尺度下的各元素和重金属空间自相关性全局系数  $I$  的变化趋势曲线。

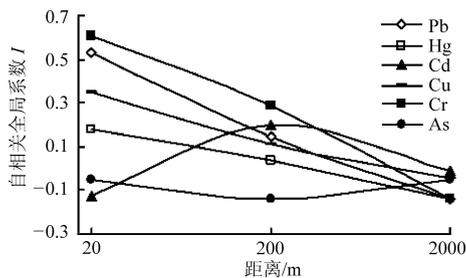


图 2 多尺度自相关全局系数  $I$  变化趋势  
Fig. 2  $I$  tendency chart of multiscale

随着间距的拉大,各元素的空间自相关性逐渐减小。其中 Pb、Hg、Cu、Cr 的自相关变化趋势相近,从小尺度到大尺度空间自相关性逐渐降低,空间依赖性减弱。Cd 和 As 的变化趋势不够明显,如主成分分析(表 2)所示,此类元素受到外界因素影响产生了与距离有关的空间自相关性变化。

表 2 各元素的主成分载荷分析  
Tab. 2 Principal component analysis

元素	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
Pb	0.725	0.260	-0.373
Hg	0.133	0.429	0.789
Cd	0.650	-0.062	-0.387
Cu	0.723	-0.222	0.485
Cr	0.603	-0.647	0.164
As	0.469	0.735	-0.370
特征值	2.072	1.263	1.177
贡献率/%	34.530	21.049	19.619

## 2.2 土壤重金属空间变异分析

土壤特性元素的空间变异性通常具有方向性。在地形和地貌以及土壤物理性质等因子的共同作用下,元素在不同方向上呈现不同的变化规律。对于土壤重金属的空间变异方向性而言,可按方向对半方差图进行观察。如果空间相关性具有方向性,那么,某一方向的半方差数值将比其他方向上的变化更快。以 Pb 为例,分别在 3 种尺度下各方向半方差值(图 3)的变化存在着一定程度的差异性。其中在中尺度下  $0^\circ$  方向(东-西)和  $90^\circ$  方向(南-北)存在较为明显的半方差值变化差别。小尺度和大尺度的各向半方差变化趋势较缓慢。值得注意的是,多个尺度变化过程呈现一种各向异性不明显到明显再到不明显的变化。小尺度由于间距过小、数值差异不大,属于微观尺度。大尺度在超出变程范围后,数据存在着独立随机性,同时受到外界重金属迁移趋势的影响,变化趋势趋于平缓。对比图 4 中 Cd 的各尺度半方差趋势变化, Cd 在全局自相关系数变化(图 2)中表现出数据自相关不同尺度趋于随机性的特征。在图 4 中同样表现出各向异性不明显到明显再到不明显的变化,各向异性表明数据空间相关不仅与距离变化有关,还与方向变化有关,而全局自相关系数只是表明了总体数据呈现聚集状态的情况。说明外界因素的普遍影响只是作为白化噪声存在,不影响空间变异各向异性的趋势性。这需要排除特定排放点源污染情况,而本研究区域周边未存在明显特定点源污染。而 Cd 的大尺度各向异性趋势呈现两极化趋势,这表明重金属的空间变异变异与施肥方向有关。本研究中其他重金属也基本表现出了不同尺度各向异性特征现象。由此看来,中尺度的变异较能反映农田土壤重金属的各向异性。

## 2.3 土壤重金属空间分布特点

半变异函数是距离的函数,对未知点属性的估值必须建立在空间依赖性基础上,这就要求对试验半变异函数进行模型拟合。模型拟合的好坏直接决定了插值的效果,也决定了空间结构分析的可靠性<sup>[20]</sup>。

利用地统计学方法对土壤重金属总量进行了半方差分析,表 3 为各尺度土壤重金属半方差函数特征值。在最优拟合模型中土壤重金属 Pb、Cd、As 的空间变异结构可以采用半方差高斯模型进行拟合。Hg、Cu、Cr 的空间变异结构用半方差球面模型进行拟合。

由表 3 可看出模型拟合效果,其中 200 m 尺度的决定系数均大于 0.8 以上, Hg、Cd 和 Cu 分别达

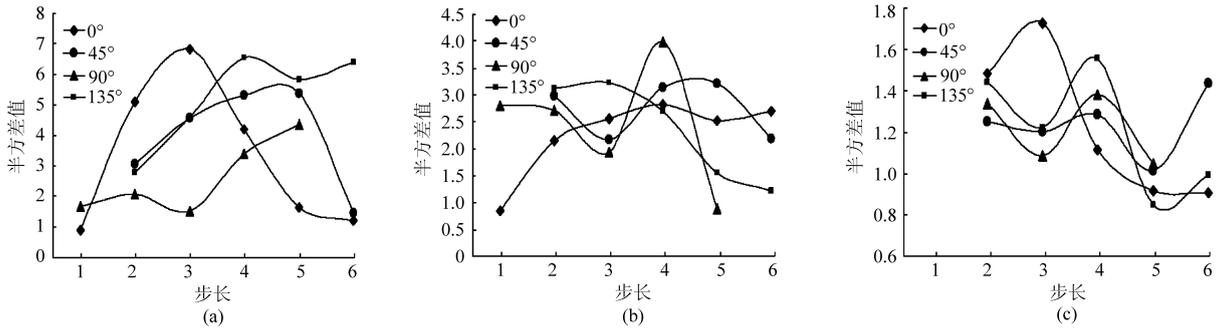


图3 Pb不同尺度各方向半方差值

Fig. 3 Pb anisotropy under different scales

(a) 20 m (b) 200 m (c) 2 000 m

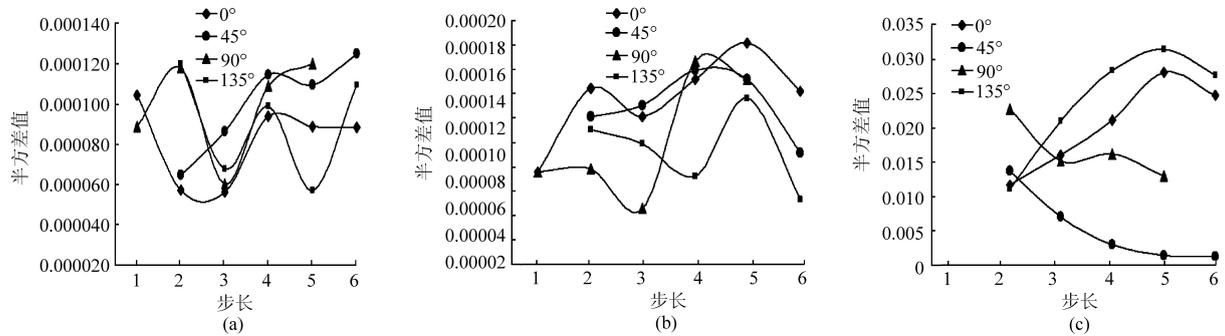


图4 Cd不同尺度各方向半方差值

Fig. 4 Cd anisotropy under different scales

(a) 20 m (b) 200 m (c) 2 000 m

表3 土壤重金属半方差函数特征值

Tab.3 Semivariogram characteristic values of soil heavy metals

元素	间距/m	拟合模型	块金值	基台值	变程/m	基底比/%	$R^2$	RSS	ME	RMSE
Pb	20	高斯	0.01	3.94	41.1	0.254	0.629	2.93	-0.041 22	1.461 7
	200	高斯	0.01	3.82	323.9	2.62	0.833	0.31	-0.084	1.582
	2 000	线性	1.196	1.196	10 441	100	0.697	0.127	0.016 98	1.134
Hg	20	球面	$1 \times 10^{-5}$	0.000 1	31	0.73	0.306	$1.14 \times 10^{-9}$	0.000 21	0.009 88
	200	球面	$7 \times 10^{-5}$	0.000 1	319	5.93	0.960	$2.03 \times 10^{-11}$	0.001 45	0.014
	2 000	线性	0.002 6	0.002 6	10 441	100	0.65	$3.81 \times 10^{-7}$	$5.26 \times 10^{-4}$	0.05
Cd	20	球面	$5 \times 10^{-5}$	$9.5 \times 10^{-5}$	19.6	5.26	0.002	$7.08 \times 10^{-10}$	$-8.23 \times 10^{-5}$	0.008 2
	200	高斯	0	0.000 2	498.8	0	0.949	$3.33 \times 10^{-10}$	-0.000 03	0.012 8
	2 000	高斯	0.010 3	0.209 1	50 194	4.93	0.810	$7.97 \times 10^{-5}$	$9.69 \times 10^{-4}$	0.117 3
Cu	20	高斯	0.203	2.121	24.08	9.57	0.016	2.72	-0.029 531	1.412 5
	200	球面	4.3	58.94	407	7.3	0.948	5.45	0.35	6.860 0
	2 000	指数	1.51	25.24	1 770	5.98	0.007	17.9	0.024 09	4.963 0
Cr	20	高斯	2.2	58.65	47.98	3.75	0.921	96.1	-0.045 7	4.602 1
	200	球面	6.5	42.68	752	15.23	0.848	0.020 3	-0.16	4.092 0
	2 000	线性	3.748	3.748	10 441	100	0.318	0.355	0.019 53	1.857 0
As	20	指数	0.02	0.130 8	43.2	15.6	0.310	$1.18 \times 10^{-3}$	0.001 605	0.271 8
	200	高斯	0.000 1	0.076 9	371.8	0.13	0.898	$5.68 \times 10^{-5}$	-0.004 8	0.219 0
	2 000	线性	0.144	0.143 8	10 441	100	0.146	$6.4 \times 10^{-4}$	$-4.95 \times 10^{-4}$	0.388 3

注:ME为平均误差, RMSE为均方根误差。

到了0.960、0.949和0.948。其他尺度的 $R^2$ 和RSS均没有中尺度的理想,说明按照中尺度得出的土壤重金属空间拟合模型是合理的。其中200 m尺度Pb、Hg和As具有较小的块金值,理论变程值都相对

较小。Cd块金值几乎没有,但理论变程值较大,说明Cd受微观尺度影响较小,母质分布较均匀。Cr和Cu具有较大块金值,基底比为15.23%和7.3%高于其他重金属的基底比,理论变程都较大,符合空

间分布的原理。结合之前的自相关全局系数  $I$  的分布情况和基底比的值,可以认为本文重金属的采样间距和分析尺度符合总体空间变异情况。可按照变程的大小调整相应的采样间距来得到农田空间的研究尺度。这里总体呈现空间相关密度  $Cr$  最小,即变程最大。 $Hg$  和  $Pb$  空间相关密度最大,变程最小,其余居中的分布情况。这为农田调查和分析提供了尺度依据。

以  $Cd$  为例,3 个不同粒度尺度对照分析如图 5 所示。对小尺度到大尺度过程进行标准化,总体半方差值的趋势呈现从平缓变化到剧烈幅度变化过程,变化频率基本保持不变(图 5b)。分维数在不同尺度上表现出由小变大的趋势(图 5c),说明元素的空间依赖性随着尺度的增大而降低。其中从 20 m 到 200 m 尺度分维数变化较陡,而 200 m 到 2 km 分维数变化趋于直线,这也说明元素的空间依赖性趋于临界位置,符合半方差拟合模型的参数指标,200 m 尺度适宜。同时注意到在 3 个尺度的克里格插值预测图中(图 5a),从景观视角发现不同尺度具有自相似性,这源于元素半方差函数具有分形几何特征,造成差异变化的自相似性。

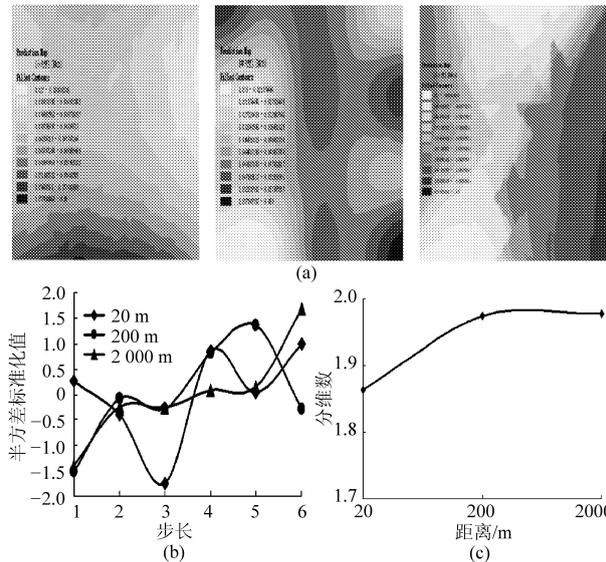


图 5 多粒度尺度对照图  
Fig. 5 Multiple granularity contrast

(a) 多尺度克里格插值 (b) 多尺度半方差值 (c) 分维数

### 2.4 空间土壤重金属来源分析

根据计算分析的半方差的拟合模型,按照去趋势项操作,去除空间干扰因素。进行中尺度 200 m 空间插值预测,得到对应区域地块的各种重金属空间拟合预测分布如图 6 所示。

本研究地块区域种植方向为东西方向,重金属分布图均呈现东西方向的阶梯分布。在农用施肥中一般过磷酸盐中含有较多的重金属  $Hg$ 、 $Cd$ 、 $As$ 、 $Zn$ 、

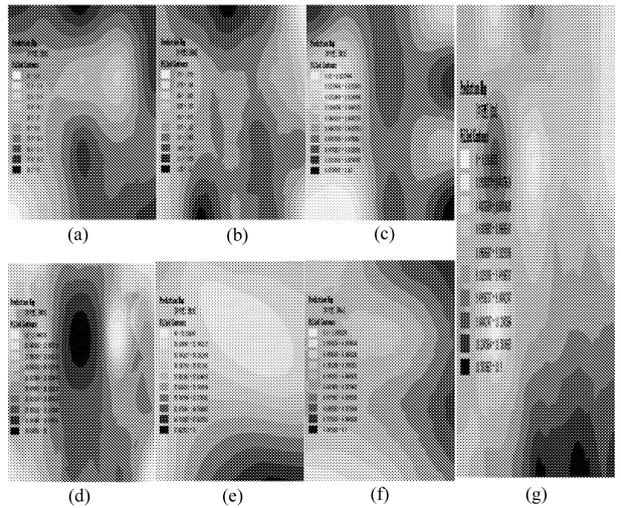


图 6 中尺度重金属预测分布

Fig. 6 Space prediction map of soil heavy metal

(a)  $Pb$  (b)  $Hg$  (c)  $Cd$  (d)  $Cu$   
(e)  $Cr$  (f)  $As$  (g) DEM

$Pb$ , 磷肥次之,氮肥和钾肥含量较低,但氮肥中铅含量较高,其中  $As$  和  $Cd$  污染严重<sup>[8]</sup>,分布图中部存在较高  $Pb$ 、 $Hg$ 、 $Cd$  和  $Cu$  的分布,这与农田肥种类有对应关系。同时  $Cu$  的聚集与 DEM(图 6)地势灌溉和母质聚集有关, $Cu$  的地球富集量较高,容易出现聚集现象。 $Pb$  呈现周边较高的分布,这与农田周边相邻道路因素有关。 $Pb$ 、 $Cr$  和  $As$  与高程分布形状较为相符,尤以  $Cr$  分布最显著,说明  $Cr$  的分布主要与成土母质和尘降有关。从图 6 分布情况可看出农田土壤重金属分布与农田耕作方向和施肥量有着较为密切的联系。

从中尺度各种金属在不同步长下的总体半方差标准化趋势图(图 7)中可以看出, $Pb$ 、 $Cd$  以及  $As$  存在着相似的半方差变异趋势。同样,在表 4 中各种金属的相关系数表现出  $Pb$  与  $Cd$ 、 $As$  的相关性较接近,说明它们受到同一来源的影响是一致的。

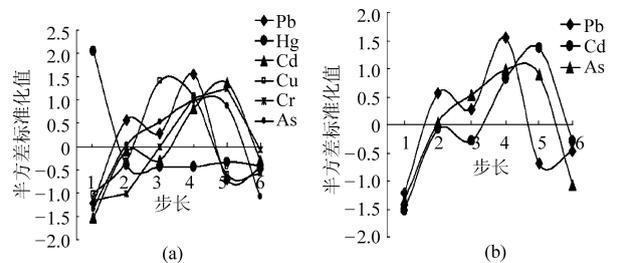


图 7 中尺度半方差标准化趋势

Fig. 7 Semivariance standardizing tendency chart

(a) 6 种重金属 (b) 重金属  $Pb$ 、 $Cd$ 、 $As$

采用中尺度样本的重金属数据进行主成分分析时,在主成分分析中根据特征值呈现的 3 种主要成分累计贡献率达到 75.199% (表 2)。第 1 主成分来自于土壤岩石的自然风化与侵蚀过程包括尘降,主

成分载荷与重金属比重比例相近。第2主成分根据辅助样本平均值表(表5)可看出主要来源于农田灌溉以及降水等作用,在相应的雪降和灌溉水样本中检验 Pb、Hg 和 As 表现出较高的数值,而 Cd、Cr 以及 Cu 呈现较低数值或是未检出,这与第2主成分载荷表现相符。第3主成分根据之前半方差分析以及重金属和土壤养分相关系数表(表6),表明土壤养分与重金属元素具有较高的相关性,尤其是有机质含量。分析认为主要来自于农药化肥的施用以及土壤有机质的降解合成作用。载荷的指标值无论正负,根据值的大小表现出其同方向的协同作用<sup>[21]</sup>。Pb、Cd 和 As 的载荷数值协同一致,说明来自于同一来源:氮肥的施用。土壤有机质降解作用同样带来较高的 Hg 载荷<sup>[22]</sup>。分析认为农田土壤重金属主要来源于成土母质风化侵蚀、降水灌溉以及农药化肥施用3个主要方面。

表4 各重金属间 Pearson 相关系数 ( $p < 0.05$ )

Tab.4 Heavy metal correlation coefficients

元素	Pb	Hg	Cd	Cu	Cr	As
Pb	1	-0.020	0.526	0.212	0.250	0.524
Hg		1	-0.087	0.252	-0.075	0.163
Cd			1	0.278	0.212	0.149
Cu				1	0.529	0.187
Cr					1	-0.099
As						1

表5 各来源重金属平均值

Tab.5 Heavy metals mean values of different sources

元素	降水	尘降	雪降	灌溉水
Pb	16	11	0.056	0.018
Hg	0.06	0.065	0.024	0.014
Cd	0.02	0.014	—	—
Cu	23	20	—	—
Cr	59	53	—	—
As	4.7	4.7	0.0012	0.048

注:—表示未检出。

表6 重金属和土壤养分间相关系数

Tab.6 Correlation coefficients between soil nutrient and heavy metals

元素	N	P	K	有机质
Pb	0.534	0.745	-0.410	0.621
Hg	-0.381	-0.397	-0.049	0.568
Cd	0.424	-0.382	0.093	0.670
Cu	-0.139	-0.312	-0.261	-0.122
Cr	-0.234	-0.724	0.185	-0.287
As	0.688	0.609	-0.578	0.728

### 3 结论

(1) 比较多个尺度模型得出农田土壤重金属采样以 200 m 中尺度为宜。土壤重金属存在各向异性特征,其中土壤重金属 Pb、Cd、As 的空间变异结构可用半方差高斯模型进行拟合,Hg、Cu、Cr 的空间变异结构可用半方差球面模型进行拟合。农田土壤重金属的空间变异性具有逐渐变化的趋势,不同尺度下存在不同空间拟合的表象模型,而非模型的最佳形式,存在局部特征。

(2) 借助空间插值预测方法对区域农田土壤重金属实现分布预测,并与 DEM 分布特征进行比对。通过重金属分布特性和地理位置、农田耕作特点等因素,解释分析了农田区域土壤重金属的分布特点和原因。本文认为农田土壤重金属分布与农田耕作方向和施肥量有着较为密切的联系。

(3) 在对元素不同粒度的嵌套尺度进行分维数和半方差比对和分析后,认为农田土壤重金属元素的空间依赖性随着尺度的增大而降低,并在大尺度 2 000 m 取样间距处趋于临界。不同尺度下的元素具有一定的自仿射相似性。

(4) 利用主成分分析法结合半变异函数分析得出农田土壤重金属的主要来源于成土母质风化侵蚀、降水灌溉以及农药化肥施用3个主要来源。并根据特征值和贡献率得到来源的比重分别是 34.53%、21.049% 和 19.619%。

### 参 考 文 献

- 樊燕,刘洪斌,武伟. 土壤重金属污染现状评价及其合理采样数的研究[J]. 土壤通报,2008,39(2):369~374.  
Fan Yan, Liu Hongbin, Wu Wei. Evaluation to soil heavy metals' pollution and the study of reasonable sampling number [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(2):369~374. (in Chinese)
- 郭天文,赖丽芳,胡志桥,等. 甘肃省河西走廊中部新垦荒地土壤养分空间变异特征[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(4):151~156.  
Guo Tianwen, Lai Lifang, Hu Zhiqiao, et al. Spatial variability of nutrients in newly cultivated soil of Xiaojingzi farm [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(4):151~156. (in Chinese)
- 陆安祥,王纪华,潘瑜春,等. 小尺度农田土壤中重金属的统计分析与时空分布研究[J]. 环境科学,2007,28(7):1578~1583.  
Lu Anxiang, Wang Jihua, Pan Yuchun, et al. Multivariate geostatistical and GIS-based approach to study the spatial distribution of soil heavy metals in field scale [J]. Environmental Science, 2007, 28(7):1578~1583. (in Chinese)

- 4 Li Qusheng, Chen Xiaojiao, Luo Xuan, et al. Phytoavailability of heavy metals in tidal flat soils after fresh water leaching[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 79(5): 22 ~ 27.
- 5 Zhao Yongcun, Wang Zhigang, Sun Weixia, et al. Spatial interrelations and multi-scale sources of soil heavy metal variability in a typical urban-rural transition area in Yangtze River Delta region of China [J]. *Geoderma*, 2010, 156(3~4): 216 ~ 227.
- 6 崔邢涛, 栾文楼, 吴景霞, 等. 冀东平原表层土壤重金属元素的空间变异及模拟研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(4): 957 ~ 964.  
Cui Xingtao, Luan Wenlou, Wu Jingxia, et al. Study of the spatial variation and distribution of heavy metal contents in surficial soil from eastern Hebei province, China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 957 ~ 964. (in Chinese)
- 7 Jose Antonio Rodriguez Martin, Manuel Lopez Arias, Jose Manuel Grau Corbi. 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): 1 001 ~ 1 012.
- 8 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(1): 79 ~ 84.  
Zheng Xishen, Lu Anhuai, Gao Xiang, et al. Contamination of heavy metals in soil present situation and method [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(1): 79 ~ 84. (in Chinese)
- 9 Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(3): 313 ~ 324.
- 10 Jose Antonio Rodriguez, Nikos Nanos, Jose Manuel Grau, et al. Multiscale analysis of heavy metal contents in Spanish agricultural topsoils [J]. *Chemosphere*, 2008, 70(6): 1 085 ~ 1 096.
- 11 张汪寿, 李晓秀, 黄文江, 等. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 311 ~ 318.  
Zhang Wangshou, Li Xiaoxiu, Huang Wenjiang, et al. Comprehensive assessment methodology of soil quality under different land use conditions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(12): 311 ~ 318. (in Chinese)
- 12 赵龙山, 张青峰, 梁心蓝, 等. 基于 Moran's I 指标的黄土坡耕地填洼量的空间自相关性研究[J]. *土壤*, 2011, 43(3): 446 ~ 452.  
Zhao Longshan, Zhang Qingfeng, Liang Xinlan, et al. Study on spatial autocorrelation of depression storage in loess sloping field based on Moran's I [J]. *Soils*, 2011, 43(3): 446 ~ 452. (in Chinese)
- 13 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 湿润和干旱条件下喀斯特地区洼地表层土壤水分的空间变异性[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2 277 ~ 2 282.  
Zhang Jiguang, Chen Hongsong, Su Yirong, et al. Spatial variability of surface soil moisture content in depression area of karst region under moist and arid conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2 277 ~ 2 282. (in Chinese)
- 14 陈翠英, 江永真, 袁朝春. 土壤特性空间变异性研究[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(10): 121 ~ 124.  
Chen Cuiying, Jiang Yongzhen, Yuan Chaochun. Study on soil property spatial variability using R Language [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(10): 121 ~ 124. (in Chinese)
- 15 Mandelbrot B B. *The fractal geometry of nature* [M]. San Francisco: W. H. Freeman and Co., 1982.
- 16 Berry M V, Lewis Z V. On the Weierstrass-Mandelbrot fractal function [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1980, 370: 459 ~ 484.
- 17 Burrough P A. Fractal dimension of landscapes and other environmental data [J]. *Nature*, 1981, 294: 240 ~ 242.
- 18 张世熔, 黄元仿, 李保国. 冲积平原区土壤颗粒组成的趋势效应与异向性特征[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 56 ~ 60.  
Zhang Shirong, Huang Yuanfang, Li Baoguo. Trend effect and an isotropy of soil particle composition in alluvial regions [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(1): 56 ~ 60. (in Chinese)
- 19 Mandal B K, Suzuki K T. Arselic round the world; a review[J]. *Talanta*, 2002, 58(1): 202 ~ 209.
- 20 吴黎军, 贺军亮, 冯晓森. 地统计学及其在土壤生态学研究中的应用与进展[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(25): 12 353 ~ 12 356.  
Wu Lijun, He Junliang, Feng Xiaomiao. Geostatistics and its applications and advance in the studies of soil ecology[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 2009, 37(25): 12 353 ~ 12 356. (in Chinese)
- 21 白雪梅, 赵松山. 对主成分分析综合评价方法若干问题的探讨[J]. *统计研究*, 1995, 68(6): 47 ~ 51.
- 22 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. *环境科学*, 2006, 27(1): 137 ~ 141.  
Li Yu, Yu Zhiming, Song Xiuxian. Application of principal component analysis (PCA) for the estimation of source of heavy metal contamination in marine sediments [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(1): 137 ~ 141. (in Chinese)