

# 不同地形部位耕地微量元素空间变异性研究<sup>①</sup>

## —以永济市为例

毕如田<sup>1</sup> 李 华<sup>2</sup>

(1 山西农业大学资源环境学院 山西太谷 030801; 2 山西大学环境资源学院 太原 030006)

**摘 要** 在永济市耕地资源管理信息系统和传统地统计学的支持下,以半变异函数为主要工具,通过 GS+ 软件对永济市耕地土壤的 6 种微量元素的空间变异特征进行了初步研究。结果表明,研究区耕地土壤中 6 种微量元素中 Zn 和 Mo 属于中等变异强度的范围,Fe、Mn 和 B 属于中等偏低的变异强度范围,而 Cu 则在河漫滩区属于中等变异强度,在其他地形部位则表现为中等偏低的变异强度。河漫滩区微量元素 Cu、Zn 和 Mo,盆地区微量元素 Zn、B、Mo,丘陵区微量元素 Zn、Mo 以及山地区的 Zn 和 Mo 属于中等变异强度,其他则属于中等偏低的变异强度。丘陵区 6 种微量元素含量在所研究的尺度上的总变异中既受到自然因素所引起的空间变异影响,同时也受到一些随机因素的影响,影响力为中等尺度;河漫滩区 6 种微量元素含量的总变异具有强烈的空间相关性,说明在河漫滩区自然因素对空间格局的影响起主导作用。通过对研究区耕地土壤中 6 种微量元素的统计特征与空间变异性分析,为进一步合理地进行土地利用规划提供了理论依据,并且对土壤养分综合管理以及进行土壤改良和耕作都具有一定的指导作用。

**关键词** 微量元素;空间变异;地统计学;永济市

**中图分类号** S153.6<sup>+</sup>1; X131.3

土壤受成土母质、地形及人类活动等自然和人为因素的影响,使得土壤成为不均一和变化的时空连续体,并具有高度的空间变异性,空间变异是土壤本身存在的一种自然特性,认识土壤空间变异对于评价和有效地利用土壤都是十分重要的。20 世纪 70 年代开始,国外许多学者进行土壤特性空间变异性规律的研究,Burgess、Webster、Yost 等<sup>[1-3]</sup>将地统计学理论用于土壤科学中,并作了大量介绍和研究,Tom Mcgraw 等<sup>[4]</sup>研究了土壤中 P、K、Zn 的空间变异性,指出了建立在传统的平均的土壤测试基础上的施肥方法所存在的问题。我国土壤学学者在 20 世纪 80 年代初开始从事土壤空间变异性研究,目前在土壤养分空间变异性方面的研究非常活跃<sup>[5~11]</sup>。本文拟在前人研究的基础上,应用地统计学的基本原理和方法,在永济市耕地资源管理信息系统的支持下<sup>[12]</sup>,对永济市耕地土壤微量元素的空间变异性进行研究,探讨微量元素在不同地形部位的变化特征和规律,为合理施肥提供科学依据。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 研究区的基本情况

永济市地处黄河中游,山西省西南部,位于东经 110°14'~110°45'、北纬 34°40'~35°04'之间。全市东西长 49 km,南北宽 43.5 km,国土总面积 1221.06 km<sup>2</sup>。全市共有土地 122364 hm<sup>2</sup>,其中农用地 73809 hm<sup>2</sup>,含耕地 52975 hm<sup>2</sup>、林地 14374 hm<sup>2</sup>、园林地 5373 hm<sup>2</sup>、牧草地 1087 hm<sup>2</sup>;建设用地 11800 hm<sup>2</sup>;未利用地 36755 hm<sup>2</sup>。永济市属北温带大陆性气候,四季分明,光热资源丰富。全市年平均气温 13.9℃,日照时数 2375.0 h,年降水量 500~550 mm,降水集中在 6~9 月间,无霜期长达 216 d,农业生产条件较好,并适宜于一年两熟农作物的生长。

全市农业生产以小麦、棉花为主,近年来大力发展芦笋、蔬菜、畜禽、林果、食用菌、水产养殖,不断调整产业结构,走产业化发展之路,成为国家“优质棉生产基地”、“淡水商品鱼生产基地”和山西省“商品粮生产基地”、“商品牛基地”等。农、林、牧、渔业的生产优势十分明显。

#### 1.2 资料来源

本研究所采用的数据来源于永济市耕地资源管

<sup>①</sup>山西省自然科学基金项目(20041098)资助。

理信息系统<sup>[12]</sup>, 大田采样点总数为 417 个, 其中针对不同地形部位的采样点数分别是: 河漫滩 47 个, 盆地 137 个, 丘陵 145 个, 山地 88 个, 采用全球定位系统 (GPS) 进行定位采样, 各样点的位置 (经度和纬度) 如图 1 所示。

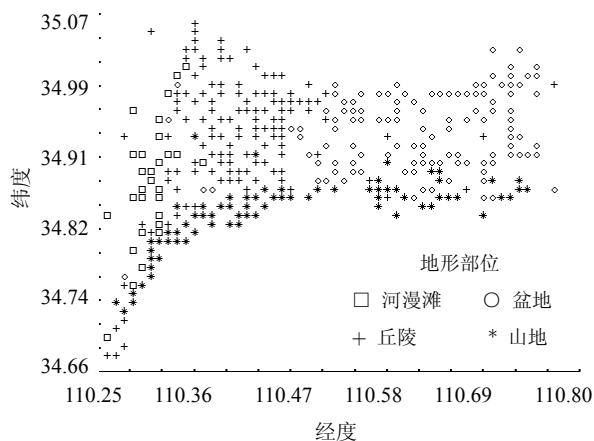


图 1 研究区土壤取样点空间分布图

Fig. 1 Sample distribution of soil sampling sites in the studied area

### 1.3 研究方法

本文的数据分析主要采用地统计学方法, 采用 GS+ 软件计算半方差函数、半方差模型和半方差图。

半方差函数也称为半变异函数, 它是地统计学中研究土壤变异性的关键函数, 是用来描述土壤性质的空间连续变异的一个连续函数, 反映土壤性质的不同距离观测值之间的变化。所谓半方差函数就是两点间差值的方差的一半, 可以表示为如下形式<sup>[13]</sup>:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中  $N(h)$  是以  $h$  为间距的所有观测点的成对数目。某个特定方向的半方差函数图通常是由  $\gamma(h)$  对  $h$  作图而得。在通常情况下, 半方差函数值都随着样点间距的增加而增大, 并在样点间距大于相关距离时, 该值趋于一个基本稳定的常数。

由于土壤在空间上是连续变异的, 其土壤性质的半方差函数也就是连续函数, 而由于样品的半方差图是由一批间断点组成的, 这就需要运用半方差函数的理论模型进行拟合。半方差函数的理论模型有多种<sup>[13]</sup>, 常用的有线性模型、指数模型、球形模型、高斯模型 (Gauss) 和立体模型等。本研究中对 6 种微量元素进行分析后, 分别采用了指数模型、

球状模型和高斯模型。

指数模型 (Exponential):

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp(-h/a)] & h > 0 \\ \gamma(0) = 0 & h = 0 \end{cases}$$

球状模型 (Spherical):

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C[1.5h/a - 0.5(h/a)^3] & 0 < h \leq a \\ \gamma(h) = C_0 + C & h > a \\ \gamma(0) = 0 & h = 0 \end{cases}$$

高斯模型 (Gaussian):

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp(-h^2/a^2)] & h > 0 \\ \gamma(0) = 0 & h = 0 \end{cases}$$

运用 GS+ 进行分析计算时, 首先将永济市耕地资源管理信息系统中的点位数据信息导出到 Foxpro 下的 dbf 格式, 其中导出的数据包括样点的经度、纬度及各样点的 Cu、Zn、Fe、Mn、B 和 Mo 等 6 项微量元素的含量值, 然后将样点的经纬度经过变换转换为大地坐标, 这样即可将导出的 dbf 文件作为 GS+ 软件的数据源进行分析计算。采用地统计学软件 GS+7.0 可自动选择最佳的半方差函数理论模型。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微量元素的统计特征

对 417 个样点按照不同地形部位分别计算分析 6 种微量元素的统计特征, 表 1 列出了耕地不同地形部位 6 种微量元素的变异系数。按不同微量元素进行分析, Zn 和 Mo 的变异系数基本都在 50% 左右, 属于中等变异强度的范围, Fe、Mn 和 B 的变异系数基本都在 30% 左右, 属于中等偏低的变异强度范围, 而 Cu 则在河漫滩区属于中等变异强度, 在其他地形部位表现为中等偏低的变异强度。按不同地形部位分析, 河漫滩区微量元素 Cu、Zn 和 Mo, 盆地微量元素 Zn、B、Mo, 丘陵区微量元素 Zn、Mo 以及山地区的 Zn 和 Mo 的变异系数都在 50% 左右, 属于中等变异强度, 其他则均在 30% 左右, 属于中等偏低的变异强度。变异系数最大的是丘陵区的 Zn, 最小的是山地区的 Mn。这与当地人多地少和农民历史上有重视施用有机肥的习惯有关, 特别是近年来在自然条件和经济条件较好的地域, 较多施用含 Zn、Mo 等作物敏感的微肥和农药, 因此 Zn、Mo 等变异较高的微量元素受到种植方式和自然条件双重作用的影响。另外, 变异系数较小的 Mn、Fe 等在研究区内受自然因素的影响总体含量水平比较高, 是其变异较小的原因之一。

表 1 耕地不同地形部位微量元素变异系数

Table 1 C.V. of the trace elements in soils under different landforms

地形部位	变异系数 C.V. (%)						样本数
	Cu	Zn	Fe	Mn	B	Mo	
河漫滩	52.45	54.83	37.69	27.18	38.23	48.60	47
盆地	25.55	46.23	33.92	30.38	42.73	52.74	137
丘陵	37.47	63.99	38.64	26.84	39.24	53.97	145
山地	34.64	58.78	38.47	21.52	35.58	59.21	88

## 2.2 半方差函数分析

在选取土壤性质的半方差模型时, 首先根据样点经度和纬度运用 GS+软件计算出  $r(h)$  的散点图, 然后用 GS+软件进行拟合, 计算得到拟合度最优的半方差函数模型的类型与参数, 并计算出离差平方和 SSQ 与决定系数  $R^2$ 。半方差模型及其参数值见表 2。

表中  $C_0$  称为块金方差 (nugget variance), 表示间距为 0 时的半方差, 它代表了随机因素引起的变

异, 通常由测定误差或土壤性质的微变异所造成;  $C$  为结构方差, 代表了系统因素引起的变异;  $C_0+C$  为基台值 (sill), 是半方差函数随间距递增到一定程度后出现的平衡值, 表示系统内总的变异;  $a$  为变程 (arrange), 表示半方差达到基台值时的样本距离, 当样本的某变量观测值之间的距离大于该值时, 说明它们之间是相互独立的; 若小于该值时, 则说明它们之间存在着空间相关关系; 决定系数  $R^2$  表示

表 2 土壤微量元素半方差函数模型的参数值

Table 2 Parameters of the semi-variance function of the trace elements

项目	地形部位	模型类型	块金方差	基台值	变程*(a')	残差	决定系数	比值
			( $C_0$ )	( $C_0+C$ )	(km)		$R^2$	$C_0/(C_0+C)$
Cu(mg/kg)	河漫滩	Gaussian	0.0161	0.2762	4.10	0.0617	0.414	0.058
	盆地	Spherical	0.0808	0.1626	19.94	0.0014	0.706	0.497
	丘陵	Spherical	0.1637	0.3284	11.88	0.0089	0.743	0.498
	山地	Spherical	0.0752	0.2244	9.37	0.0346	0.490	0.335
Zn(mg/kg)	河漫滩	Spherical	0.0049	0.1870	8.74	0.0151	0.751	0.026
	盆地	Exponential	0.0118	0.1666	0.82	0.0065	0.259	0.071
	丘陵	Exponential	0.1187	0.4670	3.37	0.0433	0.181	0.254
	山地	Exponential	0.1128	0.4290	2.82	0.1270	0.245	0.263
Fe(mg/kg)	河漫滩	Spherical	1.1909	6.4060	21.29	9.2700	0.750	0.186
	盆地	Spherical	0.0400	3.0230	5.09	1.1310	0.013	0.013
	丘陵	Spherical	2.2469	4.4883	8.92	1.9100	0.725	0.501
	山地	Spherical	2.6106	8.6400	13.01	21.000	0.729	0.302
Mn(mg/kg)	河漫滩	Gaussian	0.1064	3.8661	4.26	9.5000	0.561	0.028
	盆地	Exponential	0.8206	7.3389	9.83	7.6312	0.546	0.112
	丘陵	Exponential	1.8971	6.9630	13.92	7.1520	0.626	0.272
	山地	Gaussian	2.6860	5.2870	7.91	4.6709	0.546	0.508
B(mg/kg)	河漫滩	Gaussian	0.0019	0.1262	4.37	0.0092	0.535	0.015
	盆地	Spherical	0.1993	0.4236	10.47	0.0108	0.872	0.470
	丘陵	Exponential	0.0586	0.1912	7.37	0.0037	0.501	0.306
	山地	Spherical	0.0290	0.0691	12.65	0.0013	0.647	0.420
Mo(mg/kg)	河漫滩	Gaussian	0.0023	0.0177	3.55	0.0031	0.514	0.013
	盆地	Exponential	0.0015	0.0152	4.91	0.0005	0.260	0.099
	丘陵	Spherical	0.0051	0.0191	4.55	0.0047	0.284	0.267
	山地	Gaussian	0.0028	0.0176	2.73	0.0026	0.178	0.158

\*: 对于球状模型, 变程 $a'=a$ ; 对于指数模型, 变程 $a'=3a$ ; 对于高斯模型, 变程 $a'=1.732a^{[13]}$ 。

拟合度。块金方差与基台值的比值  $C_0/(C_0+C)$  可以揭示变量的空间变异程度, 若比值  $<0.25$ , 表明变量具有强烈的空间相关性, 若比值  $>0.75$ , 则空间相关性很弱<sup>[8]</sup>, 说明由随机因素引起的空间异质性程度较高。如果该比值接近 1, 表明该变量在整个研究区域内各取样点之间是相互独立的, 即无空间相关性。

自然过程是土壤属性空间变异的内在驱动力, 它有利于土壤属性空间变异结构性的加强和相关性的提高, 尤其是在较大的尺度水平上表现更为明显; 而人为过程则是土壤属性变异的外在影响因素, 表现为较大的随机性, 它往往对变量空间变异的结构性和相关性具有削弱作用, 使土壤属性的空间分布朝均一化方向发展<sup>[10]</sup>。从表 2 中块金方差与基台值的比值可以看出, 丘陵区 6 种微量元素含量的该比值都在 0.254 ~ 0.508 之间, 表明在所研究的尺度上, 这 6 种微量元素的总变异中既受到自然因素所引起的空间变异的影响, 同时也受到一些施肥、灌水等人为或随机因素的影响, 影响力为中等尺度, 这也说明了丘陵区还没有达到完全破坏其原有空间格局的程度; 而河漫滩区 6 种微量元素含量的该比值都  $<0.25$ , 表明这 6 种微量元素的总变异具有强烈的空间相关性, 也说明在河漫滩区自然因素对空间格局的影响起主导作用; 盆地区中的微量元素 Cu、B 以及山地区的微量元素 Cu、Zn、Fe、Mn、B, 其块金方差与基台值的比值在 0.302 ~ 0.508 之间, 表明其空间变异同时受自然因素和人为因素作用, 而盆地区的 Zn、Fe、Mn、Mo 和山地区的 Mo 等微量元素的块金方差与基台值的比值都  $<0.25$ , 反映它们在所研究的尺度上具有强烈的空间相关性。总体来说, 研究区不同地形部位微量元素仍然保持着较高的空间变异性, 主要是受当地气候条件、地形、成土母质、地下水位、地下径流、土壤质地、土体构型以及这 6 种微量元素的迁移率等多种自然因素综合影响的结果。

从表 2 还可以看出, 所分析的 6 种微量元素在不同的范围内存在空间相关关系。河漫滩区有效 Fe 含量的变程最大, 为 21.29 km, 反映了微量元素 Fe 在研究区内中两个采样点位置在该距离内存在相关关系, 原因是有效 Fe 含量的大小主要与地下水位较高有关, 同时也与土壤母质的性质, 如土壤矿物类型, 粘粒含量等有关。变程较大的还有盆地区的 Cu、B, 丘陵区的 Cu、Mn 和山地区的 Fe, 其变程都  $>10$  km, 由于土壤中这些微量元素含量的影响因素很

多也很复杂, 不仅与土壤母质的性质有关, 而且与人类活动如土地利用方式及施肥灌溉等措施也有关, 在不同的时期起主要作用的因素也不同。变程较小的是山地区的 Zn 和 Mo, 其变程仅为 2 km 多, 原因是影响有效 Mo 和有效 Zn 含量的因素主要是区域因素, 如土壤类型、土地利用方式和是否施用有机肥等因素, 主要影响因素是农业耕作方式和制度, 施肥对它们的影响比较大, 它们均受到随机因素的影响较高, 导致了它们在一个较小的尺度范围内相关。

### 3 结论

(1) 对研究区 417 个样点的统计特征进行了计算, 并对其变异系数进行了分析。按不同微量元素分析, Zn 和 Mo 属于中等变异强度的范围, Fe、Mn 和 B 属于中等偏低的变异强度范围, 而 Cu 则在河漫滩区属于中等变异强度, 在其他地形部位则表现为中等偏低的变异强度。按不同地形部位分析, 河漫滩区微量元素 Cu、Zn 和 Mo, 盆地区微量元素 Zn、B、Mo, 丘陵区微量元素 Zn、Mo 以及山地区的 Zn 和 Mo 属于中等变异强度, 其他则属于中等偏低的变异强度。

(2) 通过半方差函数模型分析, 发现 6 种微量元素均在一定的范围内存在空间相关关系。丘陵区 6 种微量元素含量在所研究的尺度上的总变异中既受到自然因素所引起的空间变异影响, 同时也受到一些随机因素的影响, 影响力为中等尺度; 河漫滩区 6 种微量元素含量的总变异具有强烈的空间相关性, 说明在河漫滩区自然因素对空间格局的影响起主导作用; 盆地区中的微量元素 Cu、B 以及山地区的微量元素 Cu、Zn、Fe、Mn、B 的空间变异同时受自然因素和人为因素作用, 而盆地区的 Zn、Fe、Mn、Mo 和山地区的 Mo 等微量元素在所研究的尺度上具有强烈的空间相关性。

(3) 通过对永济市耕地土壤中 6 种微量元素的空间变异性进行分析, 为进一步合理地进行土地利用规划提供了理论依据, 并且对土壤养分综合管理以及进行土壤改良和耕作都具有一定的指导作用。

### 参考文献

- 1 Burgess TM, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties I. The semivariogram and punctual Kriging. *J. Soil Sci.*, 1980, 31: 315 ~ 341

- 2 Webster R, Burgess TM. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties III. Changing drift and universal Kriging. *J. Soil Sci.*, 1980, 31: 505 ~ 524
- 3 Yost RS, Uehara G, Fox RL. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas I. Semivariogram. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 1028 ~ 1032
- 4 Tom McGraw, et al. Fertility variability in the Minnesota river valley watershed in 1993, as determined from grid testing result on 52,000 acres in commercial fields, *Site-Specific Management for Agricultural Systems. ASA-CSSA-SSSA*, 1995, 167 ~ 174
- 5 区美美, 王建武. 土壤空间变异研究进展. *土壤*, 2003, 35 (1): 30 ~ 33
- 6 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 程明芳. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究. *土壤学报*, 2003, 40 (1): 79 ~ 88
- 7 刘付程, 史学正, 王洪杰, 张庆利. 苏南典型地区土壤锌的空间分布特征及其与土壤颗粒组成的关系. *土壤*, 2003, 35 (4): 330 ~ 333
- 8 程先富, 史学正, 于东升, 潘贤章. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局. *应用与环境生物学报*, 2004, 10 (1): 64 ~ 67
- 9 姜勇, 张玉革, 梁文举, 闻大中. 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
- 10 王宏庭, 金继运, 王斌, 胡全才, 卢朝东, 米保明. 土壤速效养分空间变异研究. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10 (4): 349 ~ 354
- 11 雷咏雯, 危常州, 李俊华, 候振安, 冶军, 鲍柏杨. 不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究. *土壤*, 2004, 36 (4): 376 ~ 381
- 12 毕如田, 王宾, 段永红, 李华, 张耦珠, 王晋民. 耕地资源管理信息系统的建立及应用—以永济市为例. *土壤学报*, 2004, 41 (6): 962 ~ 968
- 13 葛剑平, 郭海燕, 仲莉娜. 地统计学在生态学中的应用. *东北林业大学学报*, 1995, 23 (2): 88 ~ 94

## SPATIAL VARIATION OF TRACE ELEMENTS WITH LANDFORM OF FARMLAND —A CASE STUDY OF YONGJI CITY

BI Ru-tian<sup>1</sup> LI Hua<sup>2</sup>

( 1 College of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801;

2 College of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan 030006 )

**Abstract** With the aid of the Farmland Resources Management Information System of Yongji City, the traditional geo-statistics, semivariance function, and the GS+ software, characteristics of spatial variation of 6 trace elements in the farmland soil in Yongji City were studied. Results show that among the 6 trace elements, Zn and Mo are medium in variation intensity; Fe, Mn and B, medium on the low side and Cu medium only in flood land, but medium on the low side in soils under other landforms. Cu, Zn, and Mo in flood land, Zn, B and Mo in basins, Zn and Mo on hills and Zn and Mo on mountain are all medium, but medium on the low side in soils under other landforms. In the hill area, the total spatial variation of the 6 trace elements does not only show impact of natural causes, but also those of human activities or random factors, whereas in the flood area, it does a strong spatial relativity, indicating that natural cause is the leading factor. The research on the statistical characters and the semi-variance structure of the 6 trace elements can provide land use programming with scientific basis and, overall management of soil nutrients, soil amelioration and cultivation with guidelines.

**Key words** Trace element, Spatial variability, Geo-statistics, Yongji City