

冲积平原区土壤颗粒组成的趋势效应与异向性特征

张世熔, 黄元仿, 李保国

(中国农业大学资源与环境学院土壤和水科学系, 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 农业部土壤和水重点实验室, 北京 100094)

摘要: 运用基于 ArcGIS 的地统计学组件分析了河北省曲周县 124 个耕层土壤颗粒组成的空间特征。结果表明, 区域土壤砂粒含量和粘粒含量在东西方向和南北方向的趋势分别为二阶趋势和一阶趋势; 粉粒含量在东西方向呈二阶趋势, 南北方向呈零阶趋势。在趋势参数为零阶、一阶和二阶条件下, 砂粒含量的异向性分析结果为长轴方向变程接近, 短轴方向分别为 17.83 km、16.12 km 和 21.16 km, 但它们都比各向同性且趋势参数为一阶时的变程长。从误差分析和反映区域与局部趋势的结果两方面看, 土壤砂粒含量在不同趋势参数或不同异向性参数条件下内插的等值线图以一阶趋势的内插结果最好。  
关键词: 土壤颗粒组成; 变异函数; 克里格插值; 趋势效应; 异向性  
中图分类号: S152.3 文献标识码: A 文章编号: 1002-6819(2004)01-0056-05

0 引言

近年来, 随着精准农业研究在我国的兴起, 影响区域农田作物水肥管理及其产量的土壤性质空间变异愈来愈受到重视<sup>[1-4]</sup>。其中, 土壤颗粒组成的空间变异性是影响农户确定水肥用量及其时期的重要依据, 但在区域研究中常因成土母质的影响呈明显的局部异向性特征。这种特性在地统计学中被称为方向性影响<sup>[5]</sup>。事实上, 在区域大尺度研究中除土壤性质和成土条件外, 灌水、施肥和耕作等管理措施也会产生某种程度的方向性差异, 这是造成部分农业工程措施难于定量建模的主要原因之一<sup>[6-8]</sup>。因此, 方向性影响受到了精准农业研究者的高度关注<sup>[9,10]</sup>。

区域土壤性质的方向性影响包括全局趋势和各向异性两种<sup>[11,12]</sup>。前者是研究区域内一种决定性的过程, 可用物理过程描述和数学公式表达, 后者是随机过程, 无法用某一物理过程和简单数学公式来描述。它由未知的因素或随机因素引起, 只能作为随机误差进行建模。这种随机过程的具体表现是研究对象在某一方向有比另一方向更高的自相关系数。由于区域土壤性质呈现出某种程度的方向性影响, 难于满足准二阶平稳或准本征假设, 造成地统计学直接建模困难。

地处黄淮海冲积平原区的河北曲周县, 其境内因河流条数多、季节性的水量变化和河道变迁, 土壤成土母质颗粒组成空间分布复杂, 具有明显的趋势效应与异向性特征。因此, 本文试图利用基于 ArcGIS 的地统计学组件探索趋势效应和异向性对变异函数建模和克里格

预测结果的影响。

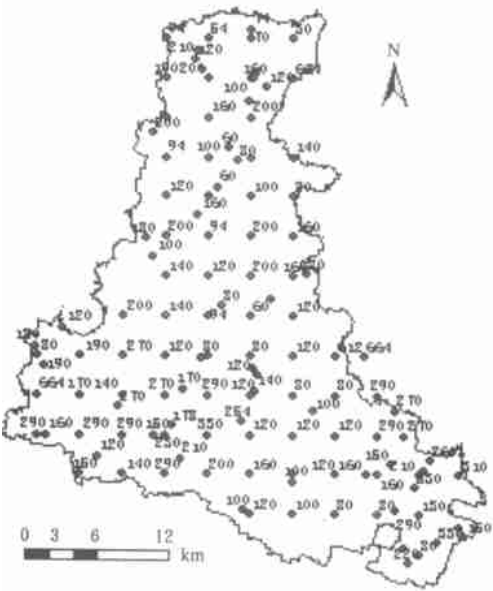
1 研究区域与方法

1.1 研究区域

本文选取位于黄淮海平原黑龙港流域上游的河北省曲周县作为研究区域。该县东与邱县、馆陶毗邻, 南与广平、肥乡接壤, 西与永年、鸡泽相连, 北与平乡、广宗交界, 地理位置位于东经 114°30'30"~115°13'30", 北纬 36°34'45"~36°57'57"。全县幅员面积 660 km<sup>2</sup>, 其中耕地面积 53 085.4 hm<sup>2</sup>, 占全县幅员面积的 80.43%。

1.2 土壤样品的采集与测定

全县土壤样点的设计分格网状样点和分层抽样样点两类, 共 124 个(图 1)。布设前者是为了调查区域土壤颗粒的整体状况, 布设后者则是为了解因分布面积较



注: 图中数字为砂粒含量/g·kg<sup>-1</sup>  
图 1 土壤样点与砂粒含量分布图

Fig 1 Distribution of soil sampling points and sand particle contents

收稿日期: 2003-06-23  
基金项目: 国家重点基础研究专项经费(G1999011700); 国家自然科学基金(40201023, 50349012); 北京市科技新星计划(2003A 57)  
作者简介: 张世熔(1963-), 男, 四川泸县人, 博士, 教授, 主要从事农业资源调查及评价研究工作。四川雅安 四川农业大学资源环境学院, 625014  
通讯作者: 黄元仿(1968-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水土资源优化利用与信息技术方面研究工作。北京 中国农业大学资源与环境学院土壤和水科学系, 100094

小在格网布点时遗漏的质地类型。其中, 设置间距 3 km 的方形格网样点 76 个, 设置分层抽样样点 48 个。样品采集前, 将全部设计样点布置于 1 : 10 000 地形图上; 野外样品采集时, 利用 1 : 10 000 地形图和 GPS38 型全球定位仪进行样点定位。每个样点 0~ 20 cm 的耕层土样用土钻钻取, 相邻不同的 3 钻土样经混合后组成待测样品。土壤颗粒含量按美国分类制用比重计法测定。

1.3 地统计学分析方法

利用 ArcGIS 8.1 新增加的地统计学组件 Geo-statistics 进行土壤耕层颗粒的基本统计、直方图分析、概率累积分析、趋势分析、异向性分析、变异函数建模和克里格插值<sup>[9]</sup>。

1.3.1 趋势效应和异向性参数的选取

由 ArcGIS 地统计学组件提供的趋势分析工具首先获得区域土壤颗粒组成在不同方向上的变化趋势, 从而将其合适的趋势参数提供给变异函数建模和克里格插值时使用。在 ArcGIS 8.1 的地统计学模块中, 一般把趋势效应分成 0 阶(没有趋势效应)、1 阶(区域化变量沿一定方向呈直线变化)、2 阶或多阶(区域化变量沿一定方向呈多项式变化)。ArcGIS 对趋势效应的处理方法是在变异函数建模时去掉它, 而在克里格预测时把它追加回来。

1.3.2 误差分析

其变异函数建模和克里格插值的误差由交叉验证法或 Jackknife 法检验。它的基本思路是依次假设每一个实测数据点未被测定, 由所选定的变异模型, 根据  $N - 1$  个其它测定点数据用特定的克里格方法估算这个点的值。设测定点的实测值为  $Z(x_i)$ , 预测值为  $\hat{Z}(x_i)$ , 二者的标准化值分别为  $Z_1(x_i)$  和  $Z_2(x_i)$ , 则它们的平均误差  $ME$  (Mean Error)、标准化平均误差  $MSE$  (Mean Standardized Error)、平均标准误差  $ASE$  (Average Standard Error)、均方根误差  $RME$  (Root Mean-Square Error) 和标准化均方根误差  $RMSSE$  (Root Mean-Square Standardized Error) 可分别表示为:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)] \tag{1}$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z_1(x_i) - Z_2(x_i)] \tag{2}$$

$$ASE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - (\sum_{i=1}^N \hat{Z}(x_i))/N]^2} \tag{3}$$

$$RME = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)]^2} \tag{4}$$

$$RMSSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z_1(x_i) - Z_2(x_i)]^2} \tag{5}$$

评价模型及其参数是否合适或合适的程度可按以下标准综合进行: 平均误差  $ME$  的绝对值最接近于 0; 标准化平均误差  $MSE$  最接近于 0; 平均标准误差  $ASE$  与均方根误差  $RME$  最接近; 标准化均方根误差  $RMSSE$  最接近于 1。

2 结果与分析

2.1 土壤颗粒组成的统计特征

表 1 是按美国制分类的耕层土壤砂粒、粉粒和粘粒含量基本统计特征。变异系数的大小表明, 砂粒和粘粒含量的变异系数均大于 0.5, 属于高变异的项目; 而粉粒的变异系数为 0.15, 是低变异项目。当样本数  $n = 124$  时, 在 0.05 水平和 0.01 水平属正态分布的偏度值介于 - 0.353~ 0.353 之间和 - 0.509~ 0.509 之间; 样本在 0.05 水平和 0.01 水平属正态分布的峰度值介于 2.29~ 3.71 之间和 1.79~ 4.21 之间。因此, 根据偏度和峰度的统计标准, 表 1 中砂粒、粉粒和粘粒的含量分布均达不到正态分布的要求。但是, 若将三者进行对数转换后统计, 则三者的偏度值分别为 0.32、- 2.62 和 - 0.67; 三者的峰度值分别为 3.57、12.19 和 4.78。所以, 综合它们经对数转换后的偏度与峰度统计结果, 砂粒含量数据属正态分布, 但粉粒和粘粒仍达不到正态分布的要求。在该研究区域中, 尽管粉粒含量的变异系数较小, 但仍有一定的变化(表 1), 它同粘粒一起影响砂粒含量。

从偏度和峰度检验分析结果看, 土壤颗粒的偏度绝对值或峰度值与正态分布要求的范围偏离较远, 表明该区域土壤颗粒含量分布范围较宽, 但集中于其变幅中的某一小的含量范围。以砂粒含量的分布特征为例, 如果偏度的绝对值超过正态分布要求的范围, 反映土壤砂粒变幅较大, 区域土壤质地类型较多或成土母质来源复杂。如果峰度值过大, 说明区域土壤砂粒的含量过度集中于整个变幅中某一小的含量范围, 即区域土壤质地类型较多, 但其中某一质地类型的分布面积较大; 相反, 峰值过小, 则说明土壤砂粒的含量在整个变幅范围内分布较为均匀, 即区域土壤多种质地类型分布的面积较为接近。

表 1 土壤颗粒组成的统计特征  
Table 1 Statistical features of soil particle composition

| 颗粒 | 样本数 | 分布类型 | 最小值<br>/g · kg <sup>-1</sup> | 最大值<br>/g · kg <sup>-1</sup> | 均值<br>/g · kg <sup>-1</sup> | 变异系数 | 偏度     | 峰度    |
|----|-----|------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------|--------|-------|
| 砂粒 | 124 | 对数正态 | 30.0                         | 664.0                        | 175.9                       | 0.64 | 2.44   | 10.67 |
| 粉粒 | 124 | 非正态  | 270.0                        | 860.0                        | 685.6                       | 0.15 | - 1.53 | 6.86  |
| 粘粒 | 124 | 非正态  | 16.0                         | 390.0                        | 138.5                       | 0.56 | 1.29   | 4.73  |

2.2 土壤颗粒组成的区域趋势分析

在小尺度或农田地块土壤颗粒组成的空间变异研

究中, 因面积有限, 颗粒含量大都直接表现出明显的正态分布或对数正态分布, 在进行变异函数计算和克里格

内插时,可不作趋势分析或在某种程度上忽略趋势效应。但在区域土壤颗粒含量研究时,即使是偏峰度检验结果呈明显正态分布的颗粒含量,都有易于观察到的趋势效应(图2)。

在图2中, $X$ 轴表示正东方向, $Y$ 轴表示正北方向,

$Z$ 轴表示各点位测定值的大小;左后投影面上的浅色线表示东—西向的全局性的趋势效应变化情况,右后投影面上深色线表示的是南—北向全局性的趋势效应变化情况。

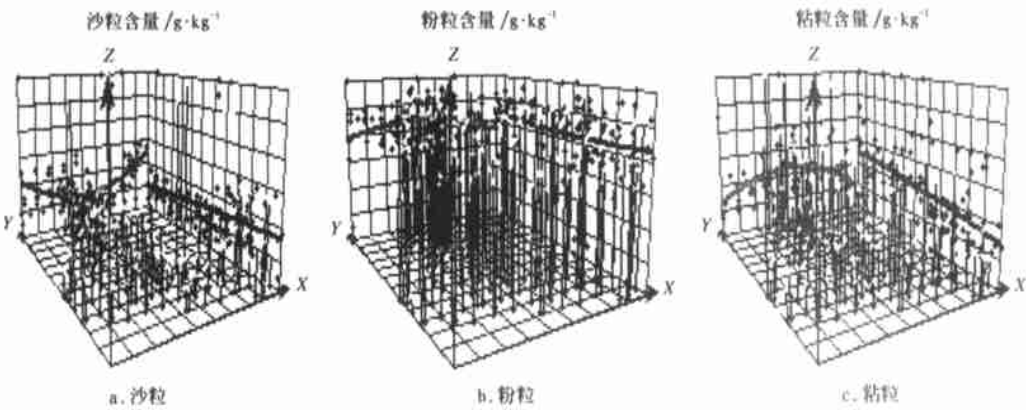


图2 区域土壤颗粒含量的趋势分析

Fig 2 Trend analysis of soil particle contents in the region

从图2可知,土壤砂粒含量总体上从北到南呈明显线性增加趋势,而从东至西趋势效应呈“U”型变化,因此它同时具有1阶趋势效应和2阶趋势效应。粘粒在东西方向和南北方向的趋势仍分别为2阶趋势和1阶趋势。但粉粒在东西方向呈2阶趋势,南北方向接近于0阶趋势。

2.3 异向性分析

下面仅以砂粒含量为例观察异向性对变异函数建模和预测结果的影响(表2和图3)。根据前面趋势分析

结果,利用ArcGIS8.1的地统计学组件具有的异向性长轴自动搜寻功能,可分别找出趋势参数为0阶、1阶和2阶条件下(即表2中的 $m_1$ 、 $m_2$ 和 $m_3$ )长轴的方位角 $356^\circ$ 、 $356^\circ$ 和 $345^\circ$ 。从变异函数的建模结果看,三者长轴方向的变程变化不大,但短轴方向变程的差异则较明显。在这三种趋势参数下,短轴变程分别为17.83 km、16.12 km和21.16 km。它们与各向同性( $m_4$ )的变异函数建模结果比较,后者的变程明显短于前三者,仅13.04 km。

表2 土壤砂粒含量的变异函数模型

Table 2 Semivariance models of soil sand particle content

| 方法      | 变异函数模型 | 趋势阶数 | 变程/km |       | 长轴方位角/ $^\circ$ | C      | $C_0$  | $C_0/(C_0+C)$ |
|---------|--------|------|-------|-------|-----------------|--------|--------|---------------|
|         |        |      | 长轴    | 短轴    |                 |        |        |               |
| $m_1$   | 球状     | 0    | 38.07 | 17.83 | 356             | 8450.1 | 6696.1 | 0.44          |
| $m_2$   | 球状     | 1阶   | 38.08 | 16.12 | 356             | 7250.7 | 6897.2 | 0.49          |
| $m_3$   | 球状     | 2阶   | 38.19 | 21.16 | 345             | 4451.0 | 7489.5 | 0.63          |
| $m_4^*$ | 球状     | 1阶   | 13.04 |       |                 | 6471.7 | 6531.5 | 0.50          |

\* 为各向同性; C 为部分基台值(Partial sill);  $C_0$  为块金值。

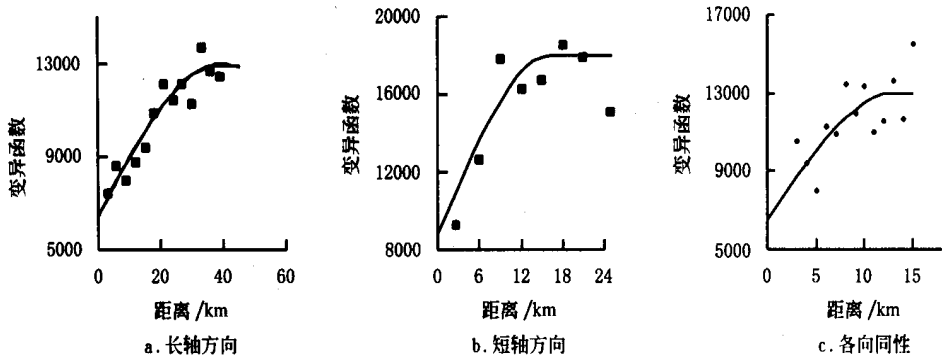


图3 去除1阶趋势后砂粒含量不同方向的变异函数结构图

Fig 3 Directional variogram of sand particle content after removing trend with one order

2 4 等值线图分析

各种建模方法的精度可从预测误差大小和对区域总体趋势及局部趋势的综合反应效果两个方面进行分析, 等值线图既能反映误差的大小, 又能体现某一方法对区域整体趋势或局部状况的反映。图 4 和图 5 则是土

壤砂粒在不同趋势参数或不同异向性参数条件下建模的等值线图。它们的变异函数拟合均为球状模型, 内插方法也均为普通克里格法。其中图 4 为趋势效应参数分别为 0 阶、1 阶和 2 阶时砂粒含量的等值线图, 图 5 则是各向同性时的内插等值线图。

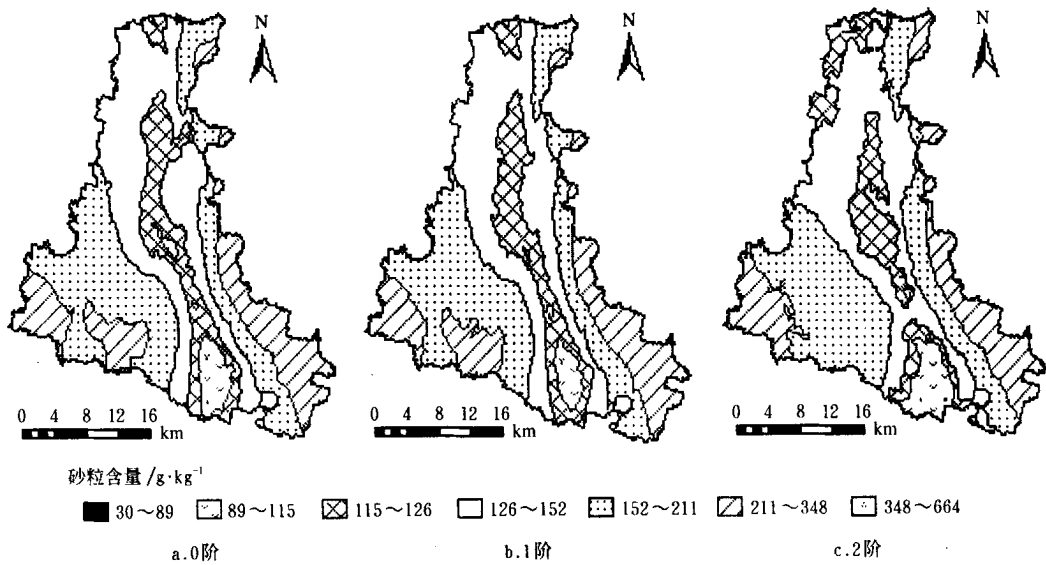


图 4 土壤砂粒含量采用不同趋势参数的分析结果/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Fig 4 Analyzed results with different trend parameters for sand particle content

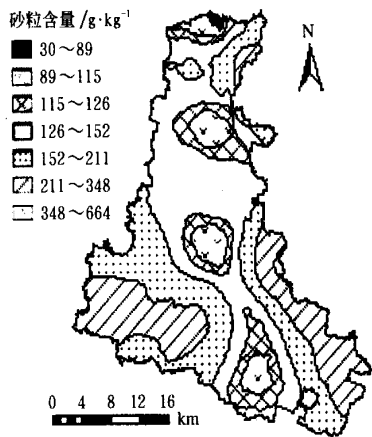


图 5 土壤砂粒含量各向同性的内插结果  
Fig 5 Interpolation results of soil sand particle content with isotropy

表 3 预测误差比较

Table 3 Comparison of prediction error

| 方法             | 内插法* | ME       | RMSE  | ASE   | MSE      | RM SSE |
|----------------|------|----------|-------|-------|----------|--------|
| m <sub>1</sub> | OK   | - 0.0286 | 108.0 | 92.06 | 0.0012   | 1.149  |
| m <sub>2</sub> | OK   | 0.0351   | 108.5 | 93.10 | 0.0018   | 1.143  |
| m <sub>3</sub> | OK   | - 0.1865 | 107.2 | 93.15 | - 0.0019 | 1.136  |
| m <sub>4</sub> | OK   | - 0.9703 | 105.2 | 94.64 | - 0.0060 | 1.085  |

\* : OK 为普通克里格法 (Ordinary Kriging)。

从表 3 预测误差的分析可知, 图 5 各向同性时的平均误差和标准化平均误差均明显高于图 4 考虑了趋势效应和异向性时的内插误差, 并且对区域总体趋势的反映也较其它 3 种方法差。因此, 在地统计学应用于大尺度区域研究中, 将区域看作各向同性和忽略趋势效应的

处理方法可能难于反映土壤性质的区域特征。

如果仅从表 3 中的误差大小分析, 标准化平均误差  $MSE$  和平均误差  $ME$  最小的是无趋势效应 (0 阶) 的内插方法; 但标准化均方根误差  $RM SSE$  最小和均方根误差  $RMSE$  与平均标准误差  $ASE$  最接近的是采用 2 阶趋势效应的内插方法; 综合比较各种误差的大小看, 2 阶趋势效应的内插方法要比其余两种要好。不过, 如果从土壤调查的角度看, 2 阶趋势效应的内插方法突出了研究区域内面积较大级别的分佈趋势, 而对分佈面积较小级别的局部趋势有可能被忽视, 即对局部现象信息的反映较差。例如, 位于县境西南部安寨镇西南有两个邻近样点砂粒含量介于  $210.8 \sim 347.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  级 (图 4 中用斜线表示), 无趋势效应和 1 阶趋势效应的内插结果都有相应的斑块表示这一局部现象, 但 2 阶趋势效应的内插结果却没有。因此, 内插时趋势参数的选取还应与研究目的协调, 在多种误差都较接近的情况下, 还应考虑内插对某些局部现象的反映。在上述例子中, 综合各种误差大小和反映区域与局部趋势的结果两方面看, 1 阶趋势的内插结果最好。

3 结 论

1) 区域土壤性质常因各种成土因素的影响呈现出明显趋势效应和异向性, 在变异函数建模和克里格内插分析时均应考虑其影响程度, 并进行相应的分析处理, 才能较好地反映土壤性质的区域特征。

2) ArcGIS 的地统计学组件具有快速的趋势分析功能和异向性长轴方向的自动搜索功能。它在变异函数建模前, 根据趋势分析结果, 去掉趋势后再建模; 在克里

格内插时,自动把趋势复合进去。同时,该组件在异向性分析过程中,自动搜索最佳的长轴方向,能较好地反映土壤性质的异向性,是目前同类软件中功能最为完善的一种地统计学分析工具,特别适用于区域土壤性质的空间变异特征分析。

3) 河北省曲周县土壤砂粒空间变异内插结果表明,将区域视为各向同性和忽略趋势效应处理的误差较大,难于反映土壤砂粒的区域特征;在各向异性的条件下,选取二阶趋势参数的各种误差相对较小,但对区域局部颗粒含量的反映不如一阶趋势参数。综合各种误差大小和反映区域与局部趋势的效果看,一阶趋势的内插结果最好。

#### [参 考 文 献]

- [1] 金继运,白由路 精准农业与土壤养分管理[M]. 北京: 中国大地出版社,2001,20- 84
- [2] Nyamangara J, Mugwira L M, Mpofu S E. Soil fertility status in the communal areas of Zimbabwe in relation to sustainable crop production[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2000, 16(2): 15- 29
- [3] Ettema C H, Coleman D C, Vellidis G, et al. Spatiotemporal distributions of bacterivorous nematodes and soil resources in a restored riparian[J]. Wetland Ecology, 1998, 79(8): 2721- 2734
- [4] 郭旭东,傅伯杰,马克明,等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报,2000, 11(4): 557- 563
- [5] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社,1999,65- 78
- [6] Canarache A, Horn R, Colibas I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania[J]. Soil & Tillage Research, 2000, 56(3/4): 185- 196
- [7] Oliver M A, Frogbrook Z L, Ellis R H, et al. Exploring the spatial variation in wheat quality using geostatistics[J]. Aspects of Applied Biology, 2001(64): 207- 208
- [8] Roose E, Barthes B. Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa: a contribution from Francophone research[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, 61(1/2): 159- 170
- [9] Shamasakar F C, Shankar Shamasakar, Zhang Ren-Duo, et al. Micro-spatial variability of soil nitrate following nitrogen fertilization and drip irrigation[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1999, 116(3- 4): 605- 619
- [10] Wingle W L, Poeter E P, McKenna S A, et al. Geostatistics, uncertainty analysis and visualization software applied to groundwaterflow and contaminant transport modeling[J]. Computers and Geosciences, 1999, 25(4): 365- 376
- [11] ESRI Using ArcGIS geostatistical analyst[M]. Redlands: ESRI Press, 2001, 50- 87.
- [12] Burrough P A, Rachael A M. Principles of geographical information systems[M]. Oxford: Oxford University press, 1998, 108- 120

## Trend effect and an isotropy of soil particle composition in alluvial regions

Zhang Shirong, Huang Yuanfang, Li Baoguo

(Department of Soil and Water Science, China Agricultural University; Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education; Key Laboratory of Soil and Water, Ministry of Agriculture, Beijing 100094, China)

**Abstract** Based on the investigation data of 124 sampling points in Quzhou county (the typical alluvial region of the North China Plain), spatial variation characteristics of soil particle composition were studied by the geostatistical component of ArcGIS (a kind of geographic information system tool). The results indicated that the trends of both sand and clay particle contents were second order in the east-west direction, and first order in the north-south direction. The trends of silt particle contents in the east-west direction and the north-south direction were second order and zero order, respectively. The anisotropy semivariance models of sand particle content showed that the ranges in the short axis direction were 17.83 km, 16.12 km and 21.16 km with zero order, the first order and second order trend effect, respectively. While the ranges in the long axis direction were approximate equal with all trend effects. The anisotropy semivariance models had longer ranges than the isotropy model with the first trend effects. It indicated that Kriging interpolation method considering anisotropy together with the first order trend effect was the best, by comparing the contour maps of soil sand particle content and the interpolation error of methods with different trend effects and anisotropy parameters.

**Key words:** soil particle composition; semivariance; kriging interpolation; trend effect; anisotropy