植物营养与肥料学报 2003,9(2):151～157
Plant Nutrition and Fertilizer Science

农田土壤颗粒组成及其剖面分层的空间变异分析

高 峻，黄元仿，李保国，张世熔，张凤荣
（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，
中国农业大学资源与环境学院，北京 100094）

摘要：对 60 m×55 m 的农田尺度上 100 个取样点土壤颗粒组成及剖面层次的空间变异性的传统统计分析表明，各属性的变异系数属中等强度。半方差函数模型均为球状模型，各属性具有一定的空间相关性，并表现有一定的各向异性。在对土壤颗粒组成及剖面层次空间分布趋势分析的基础上，根据半方差函数模型，对各属性选择不同趋势和异向性的普通 Kriging 内插值比较的结果表明，考虑变量在空间分布趋势和异向性的插值结果比不考虑要好。在以上分析基础上，利用 Kriging 内插值绘制各层深度和颗粒组成的等值线图，并分析了其空间分布规律。

关键词：普通 Kriging；土壤颗粒组成；空间变异；趋势分析
中图分类号：S512　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2003)02-0151-07

Spatial variability analysis of soil particle compositions and soil profile horizon in field

GAO Jun, HUANG Yuan-fang, LI Bao-guo, ZHANG Shi-rong, ZHANG Feng-rong
(*Key laboratory of plant-soil interactions, MOE; Key laboratory of soil and water, MOA; College of Resources and Environment, China Agriculture University, Beijing 100094, China*)

Abstract: The spatial variability of soil particle compositions and soil profile horizons were analyzed in the 60 m ×55 m field. Conventional statistical analysis of 100 sampled points showed that coefficients of variation of those properties are medium. Semi-variance model analysis for those soil parameters showed that their semi-variance structures were spherical. These properties were correlated in different spatial ranges with different anisotropy. Base on Semi-variogram and the trend analysis for those soil parameters, this paper compared interpolation method of Ordinary Kriging with different trend and anisotropy. The results showed that the Kriging methods considering trend and anisotropy were better than unconsidering trend and anisotropy. Finally, Ordinary Kriging with trend and anisotropy was applied to workout the contour map of soil particle compositions and soil profile horizons of unknown points, and their spatial distribution was analyzed.

Key words: ordinary kriging; soil particle composition; spatial variability; trend analysis

土壤特性普遍存在变异性，以往常用 Fisher 统计学原理对其空间变异性的描述，不考虑测定点位的空间关系。但许多土壤性质在空间上并不完全独立，而在一定范围内存在着空间相关性[1~3]。

自 20 世纪 70 年代，Burgess 及 Webester 等人将地统计学引入土壤学后，土壤特性的空间变异性研究一直是一个国外土壤学界关注的热点[1~5]。我国从 20 世纪 80 年代中期后也开始了这方面的研究，且大多是针对表层土壤属性的研究，按照土壤剖面层次取样分析的较少[6~10]。由于受成土因素的影响，土壤性质的空间分布常呈明显的趋势特征和异向性分布。但在空间变异分析和插值方面，有关空间趋势分析及在此基础上的空间插值的研究报道极少。

收稿日期：2002-06-24
基金项目：国家重点基础研究发展规划项目(G1999011810)；863 计划(2001AA245021)；国家自然科学基金(40201023)资助。
作者简介：高峻(1974—)，男，湖北钟祥人，硕士研究生，主要从事水土资源高效利用的研究。

本文按土壤剖面分层取样，运用有趋势分析和异向性轴轴向自动搜寻功能的 ArcGIS8.1 软件的地统计学模块，对土壤剖面的层次深度和各层颗粒组成作了趋势分析，分析其空间变异结构特点，比较用不同趋势和异向性的普通 Kriging 内插值，绘成等值线图并分析空间分布。这些研究可为水土资源管理提供有益的参考，对土壤肥料科学定量化研究与精确农业的实施具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

选点北京市海淀区东北旺乡，草甸褐土，面积为 60 m×55 m，按 5 m×5 m 划分为 156 个网格点，选其中的 100 个点取样，取样点分布见图 1。2001 年 4 月 29 日用土钻将从地表到 1 m 深的土样一次性取出，按土壤剖面层次分装土样，记录各层深度。将土壤剖面层次按发生层划分为三层，第三层发生层未取完，所以本文对第三层的深度不作分析。

土壤颗粒组成按美国制采用吸管法测定[11]。

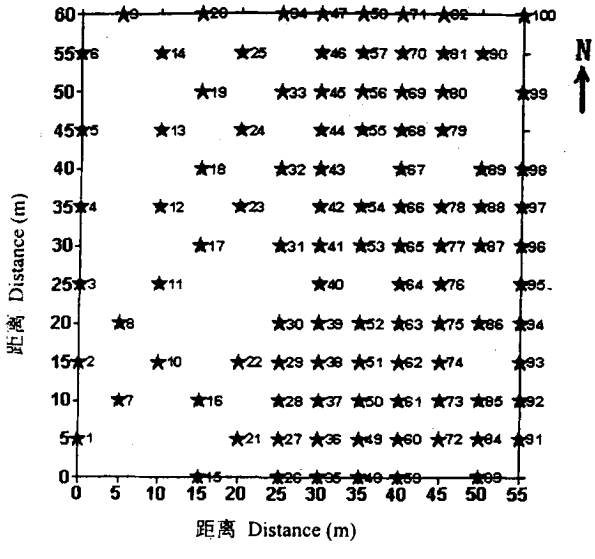

图 1 采样点分布图

Fig.1 The schema of sampling points

1.2 基本理论与数据分析

1.2.1 基本理论 传统统计学原理将研究的变量假设为纯随机变量，样本之间完全独立且服从某已知的概率分布，通过计算样本的平均值、标准差、方差、变异系数等统计参数，进行显著性检验来描述土壤特性的空间变异[12]。

地统计学方法是以区域化变量为核心，以半方差函数和 Kriging 插值为基本工具。半方差函数是描述区域化随机变量空间变异结构的一个函数，计算公式为[12]：

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

式中，$\gamma(h)$ 为区域化随机变量 $Z(x)$ 的半方差函数计算值；h 是两样本点空间分隔距离；$Z(x_i)$、$Z(x_i + h)$ 分别为区域化随机变量 $Z(x)$ 在点 x_i 和 $x_i + h$ 处的观测值；$N(h)$ 表示观测值的对数。

Kriging 插值的原理将未测定处 x_0 的估计值 $\tilde{y}(x_0)$ 假设为已知观测值的线性和[13]，即：

$$\tilde{y}(x_0) = \sum_{i=1}^{N}\lambda_i y(x_i) \quad (2)$$

λ_i 为与测点有关的加权系数。基于半方差函数，Kriging 插值可根据无偏估计和方差最小两项要求来确定。

1.2.2 数据处理 数据分析采用地统计学的方法，再用 ArcGIS8.1 软件进行有关数据的统计和图幅的处理。ArcGIS8.1是一套功能强大的地理信息系统软件，其地统计分析模块包括空间数据的浏览、半方差分析、趋势分析、成图等功能[14]。

2 结果与讨论

2.1 传统统计学特征值分析

根据田间实测样本的传统统计学分析，得到的各属性统计特征值(表 1)。结果表明：第一层和第二层深度的最大值与最小值分别相差 16.00 cm 和 35.00 cm；第一、二、三层的砂粒、粉粒、粘粒的最大值与最小值相差较大，最大值分别约为最小值的 7～30 倍，4～6 倍，10～28 倍；就均值看，第一、二、三层的土壤质地分别为壤土、壤土和砂壤土。第一层和第二层深度的变异系数分别在 0.12～0.15 之间，各层土壤颗粒组成的变异系数在 0.23～0.41 之间，均属于中等变异强度[6]。各层粉粒的偏度和峰度分别为 1.47～1.74 和 6.12～6.68，较其他属性的偏度和峰度大；其次是砂粒峰度，为 4.66～5.66，均表现为负偏，偏度为 −0.18～−1.24；各层粘粒的峰度为 3.26～6.07，第一层为正偏，第二、三层为负偏。

2.2 半方差函数的结构分析

根据分隔距离 (h) 和计算的土壤各属性半方差 $\gamma(h)$，进行模型套合和修正参数，得到各土壤属性的半方差函数套合结构模型参数(表 2)。

表中 a 表示变程(长轴、短轴分别表示半方差在该轴方向上达到基台值的样本间距)；方位角表示变量的变异方向；各向异性比为长轴与短轴的比；表示在长轴方向上距离为 h 的两点间的平均变异程度与在短轴方向上距离为 $k \cdot h$ 的两点间的平均变异程度相同；C_0 表示纯块金方差；$C_1 + C_0$ 表示基台值；$C_0/(C_1 + C_0)$ 可表示空间变异性程度(随机部分引

起的空间变异性占系统总变异的比例),如果该比值较高,说明由随机部分引起的空间变异性程度较大;相反,则由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大;如果该比值接近1,则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异。从结构性因素看,$C_0/(C_1+C_0)$的比值可表示系统变量的空间相关性程度,比值小于0.25,说明变量具有强烈的空间相关性;比值为0.25~0.75,变量具有中等的空间相关性;大于0.75,变量空间相关性很弱[15]。

表1　观测量的统计特征值

Tab. 1　Statistical characteristics of observational variables

土层 Soil layers	观测量 Observation	最小值 Min.	最大值 Max.	均值 Mean	标准差 S.D.	变异系数 C.V.	偏度 S_k	峰度 K_u
第一层	深度 Depth(cm)	24.00	40.00	29.62	3.64	0.12	0.70	2.96
1st layer	砂粒 Sand(%)	2.33	70.40	47.33	14.05	0.30	-1.24	5.21
	粉粒 Silt(%)	18.49	69.04	39.39	14.04	0.36	1.74	6.68
	粘粒 Clay(%)	1.02	28.61	12.02	4.04	0.34	0.74	6.07
第二层	深度 Depth(cm)	27.00	62.00	44.96	6.85	0.15	0.06	3.15
2nd layer	砂粒 Sand(%)	11.73	82.02	51.31	11.75	0.23	-0.92	4.66
	粉粒 Silt(%)	12.86	79.76	35.36	11.22	0.32	1.47	6.54
	粘粒 Clay(%)	2.24	21.95	13.33	3.61	0.27	-0.14	3.26
第三层	砂粒 Sand(%)	9.97	80.63	55.30	13.21	0.24	-0.18	5.66
3rd layer	粉粒 Silt(%)	11.79	76.34	30.67	12.69	0.41	1.55	6.12
	粘粒 Clay(%)	1.09	23.56	14.03	3.88	0.28	-0.33	3.98

从表2可知,土壤各属性的半方差套合结构模型均为球状模型,且有一定的各向异性。第二层的颗粒组成和第三层粉粒在长轴方向的变程为24.1~26.8 m,其余各属性在长轴方向的变程为59.3 m;除第一层砂粒和粉粒的短轴变程分别为47.0 m和42.7 m外,其余的均在10 m左右。第一层的砂粒、粉粒和第二层的各颗粒及第三层的粉粒各向异性比在1.26~2.9之间,较小;其他的各向异性比为6.52,较大。第一层深度的长轴方位角为338°,其他属性的长轴方位角在7~91°之间,而且总的看来,第一层各属性的方位角较第二层、第三层的大。这可能是由于所研究的区域处于山前冲积平原,不同时期的冲积方向和沉积作用不同所致。

表2　观测量半方差函数模型类型及其参数值

Tab. 2　The semi-variogram type of observational variables and their parameters

土层 Soil layers	观测量 Observation	模型类型 Model type	各向异性 Anisotropy	变程 a Rangea(m) 长轴 Long axis	短轴 Short axis	各向异性比 (k) Anisotropic rate	长轴方位角 (°) Direction of long axis	C_0	C_0+C_1	$C_0/(C_0+C_1)$
第一层	深度 Depth(cm)			59.3	9.1	6.52	338	9.75	12.66	0.77
1st layer	砂粒 Sand(%)			59.3	47.0	1.26	73	175.29	198.11	0.88
	粉粒 Silt(%)			59.3	42.7	1.39	91	172.52	200.36	0.86
	粘粒 Clay(%)			59.3	9.1	6.52	70	15.06	16.33	0.92
第二层	深度 Depth(cm)	球状	有	59.3	9.1	6.52	20	45.33	46.48	0.98
2nd layer	砂粒 Sand(%)	Spheroid	Has	24.1	9.5	2.54	8	53.30	145.50	0.37
	粉粒 Silt(%)			24.9	8.6	2.90	7	81.01	131.67	0.62
	粘粒 Clay(%)			26.8	13.6	1.97	34	8.19	12.43	0.66
第三层	砂粒 Sand(%)			59.3	11.0	5.39	12	96.57	156.36	0.62
3rd layer	粉粒 Silt(%)			25.8	9.7	2.66	8	81.42	150.61	0.54
	粘粒 Clay(%)			59.3	9.1	6.52	13	13.94	15.17	0.92

从 $C_0/(C_0+C_1)$ 值来看，第二层的各颗粒组成及第三层的砂粒、粉粒 $C_0/(C_0+C_1)$ 值在 0.37～0.66 之间，具有中等强度的空间相关性；其余属性的 $C_0/(C_0+C_1)$ 值在 0.77～0.98 之间，具有较弱的空间相关性，空间自相关部分引起的空间变异性程度较小。

2.3 趋势分析

图 2 是部分土壤属性的趋势分布图，图中 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；左后投影面上的深色线表示东西向的全局性的趋势效应变化，右后投影面上的深色线表示的是南北向全局性的趋势效应变化。一般把趋势效应分成 0（没有趋势效应）、常量（区域化变量沿一定方向呈常量增加或减少）、一阶（区域化变量沿一定方向呈直线变化）、二阶或多阶（区域化变量沿一定方向呈多项式变化）。

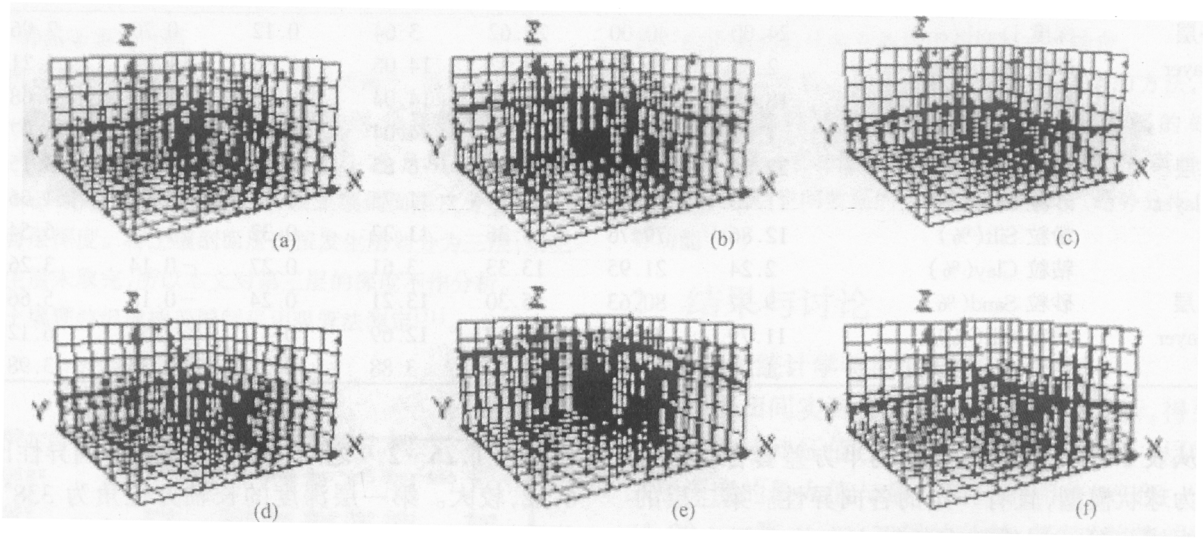

图 2 部分观测量的趋势分析

（a,b,c,d,e,f 分别为第一、二层深度、第一、二层粉粒含量、第三层砂粒、粉粒含量趋势）

Fig.2 Trend analysis for partial observational variables

(a,b,c,d,e and f is the map of trend of the depth of the first layer, depth of the second layer, the silt content in the first layer, the silt content in the second layer, the sand content and the silt content in the third layer, respectively)

从图 2 中可以看出，第一层深度在东西和南北方向上均表现为抛物线型趋势，但在东西方向上中间低，两边高；南北方向上中间高，两边低。第二层深度在东西方向呈常量趋势、在南北方向上呈抛物线型趋势（中间低，两边高）。第一、二层粉粒含量在南北方向上变化相似，都是中间低，两边高，呈抛物线型分布；而在东西方向上，第一层中间高，两边低，呈抛物线型分布；第二层西边低，东边高，呈线型分布。第三层砂粒在东西方向和南北方向上呈线型变化，西高东低，北高南低；粉粒在东西、南北方向上均呈线型变化，西低东高，北低南高。

2.4 不同趋势和异向性的普通 Kriging 内插值

分别选择一阶趋势各向同性、常量趋势各向同性和一阶趋势各向异性，用普通 Kriging 内插法对土壤剖面层次深度和颗粒组成进行分析，并绘制等值图。表 3 为第三层砂粒的三种半方差模型参数值；表 4 是第三层砂粒含量的部分实测值与根据三种插值的结果。图 3 为根据三种插值绘的等值图。

从表 3 中可知，选择一阶同性、常量同性内插变程未变，均为 59.3 m，而选择一阶各向同性内插后，变程比前两种方法减少了 46.2 m；块金方差 C_0 和基台值大小均发生了变化，前者顺序分别为：一阶异性＜一阶同性＜常量同性；后者顺序分别是：一阶同性＜一阶异性＜常量同性。

平均误差（ME）和标准化平均误差（MSE）最小的是一阶趋势效应和各向同性的内插方法；标准化均方根误差（RMSSE）最小、均方根误差（RMSE）与平均标准误差（ASE）最接近的也是一阶趋势效应和各向同性的内插方法。综合比较各种误差的大小看，一阶趋势效应和各向同性的内插方法要比其它两种方法好。

表3　不同趋势和异向性半方差函数参数值的比较

Tab. 3　The comparisons of semi-variogram parameters with different trend and anisotropy

方法[1)] Method	变程 α(m) Range α(m)	C_0	C_0+C_1	$C_0/(C_0+C_1)$	预测误差[2)] Predicted error				
					ME	RMSE	ASE	MS	RMSSE
1-Ani.	59.3(长轴 long axis)	96.57	156.36	0.62	0.045	10.210	11.410	0.003	0.902
0-Iso.	59.3	142.91	190.02	0.75	0.086	11.470	12.710	0.006	0.904
1-Iso.	13.1	108.70	152.68	0.71	-0.011	10.890	12.420	-0.002	0.886

1)1-Ani.为一阶趋势和各向异性(One trend and anisotropy);0-Iso.为常量趋势和各向同性(Constant trend and isotropy);1-Iso.为一阶趋势和各向同性(One trend and isotropy)。

2)ME为平均误差(Mean Error);RMSE为均方根误差(Root Mean Square Error);ASE为平均标准误差(Average Standard Error);MSE为标准化平均误差(Mean Standardized Error);RMSSE为标准化均方根误差(Root Mean Square Standardized Error)。

将实测数据与插值结果比较(表4)可知,三种方法的插值结果在某些区域有不同。常量趋势效应和各向同性的插值结果比实测结果偏大(如样点2、3、13、14);一阶趋势和各向同性的内插结果在有些区域偏大(如样点34);而实测值均在一阶趋势效应和各向异性的插值范围内。

表4　第三层砂粒含量的不同插值结果与实测值的比较

Tab. 4　The comparisons between different interpolations and measured data of the sand content in the third layer

样点号 Sampling No.	实测值 Measured	0-Iso.	1-Ani.	1-Iso.
2	51.25	56-61	43-56	43-56
3	52.49	56-61	43-56	43-56
13	45.96	61-63	43-56	43-56
14	54.78	61-63	56-61	43-56
33	80.63	63-68	68-81	68-81
34	66.32	63-68	63-81	68-81

图3表明,选择常量趋势和各向同性的普通kriging插值(a)对第三层南北向带状砂粒含量的反映较差,含量为43%~56%的分布明显被夸大。该法内插误差ME、MSE和RMSSE明显比其他内插方法大。考虑一阶趋势和各向同性的插值(c)虽比常量趋势和各向同性的插值精度更大,但所研究的第三层砂粒含量在研究区域内分布的方向性不如选择一阶趋势和各向异性(b)的结果好。所以,综合三种方法对实测数据的反映和误差大小分析,最好选择一阶趋势和各向异性的插值结果。

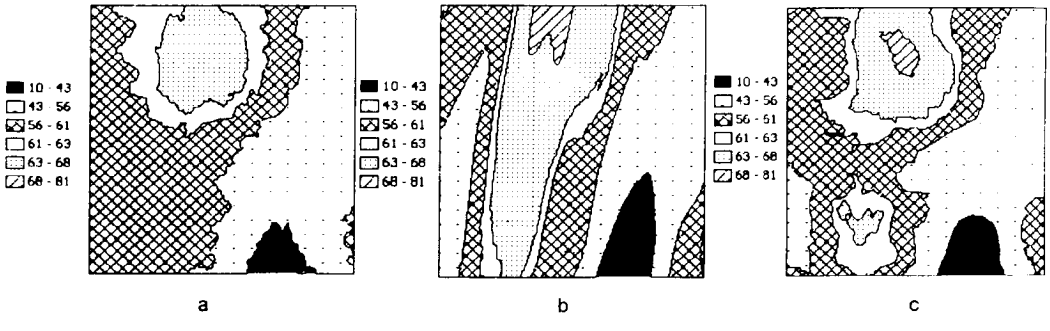

图3　第三层砂粒含量不同内插方法的等值线图

(a、b、c分别为0-Iso.,1-Ani.和1-Iso.的插值结果等值线图)

Fig. 3　Contour maps of different interpolations for the sand content in the thirdlayer

(a,b and c is the contour map by the 0-Iso.,1-Ani. and 1-Iso.,respectively)

2.5　等值线图分析

在以上的分析基础上,选择一阶趋势效应和考虑土壤剖面各层深度和颗粒组成异向性,根据半方差函数结构模型,用普通Kriging内插法对观测农田的剖面深度和颗粒组成进行了估值,将估值结果绘制成等值线图。

从根据 Kriging 插值绘制的部分土壤属性等值线图(图 4),可明显看出有关属性在该区域上的变化。第一层深度(图 4a)主要在 27～29 cm 和 29～32 cm,等值线呈北西-南东方向分布;第二层深度(图 4b)主要在 42～47 cm 和 47～51 cm,呈北东-南西方向分布。地块东北部第一层粉粒含量(图 4c)主要在 37%～41%和 41%～54%,在田块西部该层土壤粉粒含量较低,为 31%～35%,地块南部的粉粒含量较高,为 41%～54%;第二层粉粒含量等值线(图 4d)呈北南方向分布,含量为 25%～31%的主要带状分布在中部和西南部,含量在 31%～33%的主要分布在西部,含量为 33%～38%和 38%～51%的主要分布在地块东部。

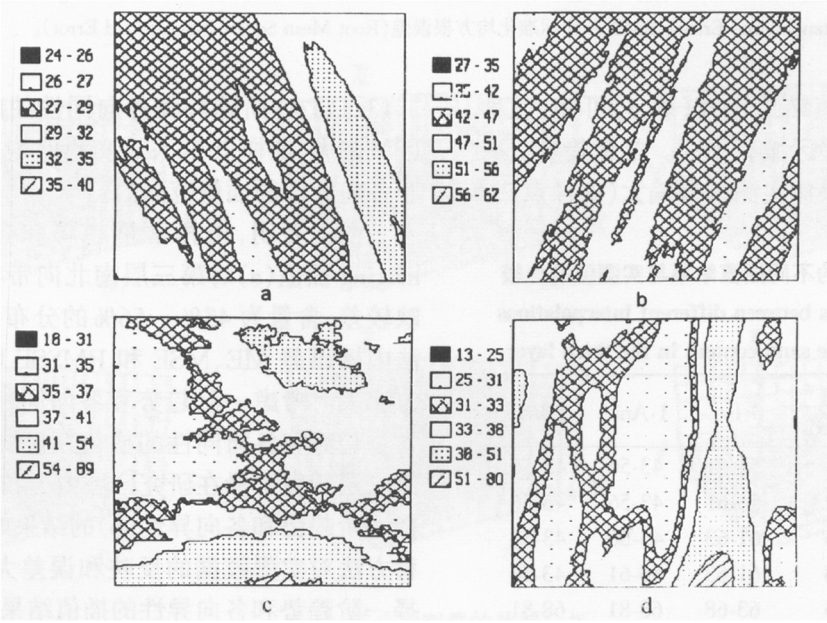

图 4 部分观测量普通 Kriging 插值等值线图

(a, b, c, d 分别为第一层深度、第二层深度、第一层粉粒、第二层粉粒的等值线图)

Fig. 4 The contour maps of some observational variables by Ordinary Kriging

(a, b, c and d is the contour map of the depth of the first layer, the depth of the second layer, the silt content in the first layer and in the second layer, respectively)

3 结论

应用地统计学方法和 ArcGIS 软件分析了 60 m ×55 m 农田尺度上的土壤颗粒组成及剖面层次的空间变异规律,对用不同趋势和异向性的普通 Kriging 内插值进行了比较,绘成等值线图并分析空间分布。

研究区域的土壤剖面层次厚度和颗粒组成的半方差函数结构模型均为球状模型,并有一定的各向异质性,反映出它们在农田尺度范围内具有较好的空间结构性。第一层的砂粒、粉粒和第二层的各颗粒组成以及第三层的粉粒各向异性比较小,在 1.26～2.9 之间,其他各属性的各向异性比较大,为 6.52。除第一层深度的长轴方位角为 338°外,其他属性的长轴方位角在 7～91°之间。趋势分析表明,它们在空间上大多呈抛物线型和线型分布。几种内插方法比较结果表明,考虑变量在空间分布趋势和异向性的插值结果较不考虑的插值结果要好。

分析结果还表明,在研究土壤性质的空间变异性时,应考虑其空间趋势分析和异向性才能正确反映土壤性质的空间分布,从而为区域水土资源规划或精确农业服务。另外,本文仅对考虑属性趋势分布和异质性的普通 Kriging 内插法进行了比较,有关不同的 Kriging 插值方法的比较以及不同变量的协同 Kriging 插值有待于进一步研究。

参考文献:

[1] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. Ⅰ. The semi-variogram and punctual Kriging [J]. J. Soil Sci., 1980, 31: 315-331.

[2] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. Ⅱ. Block Kriging [J]. J. Soil Sci., 1980, 31: 333-341.

[3] Webster R. Quantitative Spatial analysis of soil in the filed [J]. Advance in Soil Science, 1985, 3: 1-70.

[4] Yost R S, Uehara G, Fox R L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. Ⅰ. Semivariogram [J]. Soil Sci. Am. J., 1982, 46: 1028-1032.

[5] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties [J]. Advanced Agronomy, 1985, 38: 44-94.

[6] 雷志栋, 杨诗秀. 土壤特性的空间变异性初步研究 [J]. 水利学报, 1985, (9): 10-21.

[7] 杨诗秀, 雷志栋. 田间土壤含水率的空间结构及取样数目确定 [J]. 地理学报, 1993, 48(5): 447-456.

[8] 梁春祥, 姚贤良. 华中丘陵红壤物理性质空间变异性的研究 [J]. 土壤学报, 1993, 30 (1): 69-77.

[9] 张建辉, 何毓蓉, 唐时嘉. 四川丘陵区土壤湿度的空间变异分析 [J]. 土壤通报, 1996, 27 (2): 61-62.

[10] 李子忠, 龚元石. 农田土壤水分和电导率空间变异性及确定其采样数的方法 [J]. 中国农业大学学报, 2000, 5 (6): 59-66.

[11] 华孟, 王坚. 土壤物理学 [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993.

[12] 侯景儒, 伊镇南, 李维明, 等. 实用地质统计学 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.

[13] 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.

[14] ESRI. Using ArcGIS geostatistical analyst [M], 2001. 50-139.

[15] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, Parkin T B, Karlen D L, Turco R F, Konopka A E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 1501-1511.