

干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征

黄元仿¹, 周志宇^{2*}, 苑小勇¹, 张红艳¹

(1. 中国农业大学, 北京 100094; 2. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 730020)

摘要: 以内蒙古阿拉善左旗为例, 研究了干旱荒漠区土壤有机质的空间变异特征。传统统计分析结果表明, 研究区内土壤有机质含量总体水平较低, 平均为 6.65g/kg; 变异系数为 1.42, 属强变异。在半方差结构分析和球状模型套合的基础上, 结合普通 Kriging 插值方法, 分析了土壤有机质的地统计特征。比较不同趋势效应和异向性的普通 Kriging 插值的误差结果表明, 宜考虑各向异性和二阶趋势效应。获得了研究区土壤有机质含量的等值线图, 并分析了其空间分布规律。

关键词: 干旱荒漠区; 土壤有机质; 空间变异; 趋势效应

Spatial variability of soil organic matter content in an arid desert area

HUANG Yuan-Fang¹, ZHOU Zhi-Yu², YUAN Xiao-Yong¹, ZHANG Hong-Yan¹ (1. China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. Lanzhou University, Gansu 730020, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2776~2781.

Abstract: Alxa Left Banner in the west of the Inner Mongolia Autonomous Region, China, is a typical arid desert area in the middle temperate zone between the northern border of China and the eastern Alxa Plateau. Due to overgrazing and human activities, soil degradation (or desertification) in the area is becoming increasingly severe due to loss of soil organic matter (SOM). Low SOM content impacts soil quality directly in this arid desert area. Understanding the spatial variation and distribution pattern of SOM content is needed for sustainable development in the region. In this study, the spatial variation of SOM content in Alxa Left Banner was determined using both traditional statistics and geostatistics to provide information for understanding desertification mechanisms and preventing soil degradation.

Based on local landforms, 103 soil samples (0~20 cm) were collected from the area within the Helan Mountain watershed, on the western border of the Wulanbuhe Desert, the northern border of the Tenggeli Desert and the southern border of the Gobi region. The SOM content was analyzed using the Walkley-Black wet combustion method. The geostatistical characteristics, spatial trend and azimuth of anisotropic axle of SOM content were analyzed using the Geostatistical Analyst, ArcGIS8.1. We created a contour map of SOM content for the study area using Kriging interpolation.

Traditional statistical analysis (descriptive statistics) showed differences in SOM content among different soil types. The coefficient of variation (CV) of SOM content was greatest in Aeolian sandy soil (CV 1.10) and smallest in Subalpine meadow soil (CV 0.08) among all soil types. For all soil samples ($n=103$), the mean, minimum, maximum, standard deviation and coefficient of variation of SOM content were 6.65g/kg, 0.13g/kg, 43.05g/kg, 9.42g/kg and 1.42, respectively. The results indicated that SOM content was very low and its distribution was highly variable in this arid desert area.

The spatial variation of SOM content in the area was anisotropic, which showed that the SOM semivariogram depended on both the distance and the direction of soil sampling. The spatial correlation distances (ranges) were large (46.6 km on the long

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000048705); 国家自然科学基金资助项目(40201023; 39730100; 90102011); 国家高技术研究发展计划资助项目(2004AA245020; 2003AA209020)

收稿日期: 200309-23; **修订日期:** 2004-05-02

作者简介: 黄元仿(1968~), 男, 湖北仙桃人, 博士, 教授, 主要从事水土资源优化利用研究。

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zyzhou@public.lz.gs.cn

Foundation item: National Key Project for Basic Research (No. G2000048705); National Natural Science Foundation of China (No. 40201023; 39730100; 90102011) and The National High Technology Research and Development Program of China (No. 2004AA245020; 2003AA209020).

Received date: 2003-09-23; **Accepted date:** 2004-05-02

Biography: HUANG Yuan-Fang, Ph. D., Professor, mainly engaged in efficient use of soil and water resources.

axle and 30.0 km on the short axle). The nugget variance (27.4) indicated a large disconnection of the semivariogram value from the origin, and the sill (68.5) showed a large semivariogram value for distance beyond the ranges. The integrative comparison of the prediction errors from the trend effects of 0, 1, and 2 order indicated that the 2-order trend effect was preferable.

The Kriging spatial interpolation showed that SOM decreased gradually from the south to the north and also from the southeast to the northwest in the area. The lowest level band of SOM content was in the middle part between the Wulanbuhe Desert and the Tenggeli Desert, running from the northeast to the southwest. In addition, soils at the edge of the two deserts contained very low SOM content. The spatial distribution of SOM content was related to variation in topography, soil type and vegetation cover in the study area.

Key words: arid desert area; soil organic matter; spatial variability; trend effect

文章编号:1000-0933(2004)12-2776-06 中图分类号:S158 文献标识码:A

土壤有机质(SOM)是土壤的重要组成成分,是表征土壤质量的重要因子。尤其在干旱荒漠化地区,土壤有机质含量直接影响该地区土壤质量的高低,并对荒漠化地区的生态演化有直接的影响。揭示土壤有机质的空间变异规律和掌握其分布状况是实现土壤可持续利用和区域可持续发展的前提。

国内外已有一些用地统计方法研究土壤有机质空间变异的报道:Mishra 等在农田尺度上研究了红壤地区土壤有机质和 pH 值的空间变异^[1];Kuzel 等研究了一公顷区域内镉浓度、pH 值和土壤有机质的空间变异^[2];王学锋、杨玉玲、张淑娟、王军等也在农田尺度上探讨了土壤有机质的空间变异性^[3~6];高峻等在研究农田土壤颗粒组成及其剖面分层的空间变异时考虑了各向异性和趋势效应,更全面、更精确地研究了土壤性质的空间变异问题^[7]。以上研究均是在农田尺度上的研究,张世熔等在区域尺度上研究了黄淮海冲积平原区河北省曲阳县土壤有机质的时空变异特征^[8]。综上所述,在区域尺度上,考虑各向异性和趋势效应,用地统计方法研究干旱荒漠区土壤有机质空间变异在国内外还鲜见报道。

阿拉善高原是我国的干旱荒漠区之一。本文拟以内蒙古阿拉善左旗为例,采用地统计学方法,并且考虑各向异性及趋势效应,研究干旱荒漠区土壤有机质含量的空间变异特征,为进一步研究荒漠化形成机制与防治,实现区域可持续发展提供参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

阿拉善左旗地处我国北部边疆,位于内蒙古自治区西部阿拉善高平原东侧,东经 103°21'~106°51',北纬 37°24'~41°52',海拔 800~1700m。全旗南北长 495km,东西宽 214km,总面积 8.04 万 km²。该区地处欧亚大陆腹地,远离海洋,东有贺兰山,北接蒙古高原,形成封闭的内陆高原,为典型的中温带干旱区。气候特点为空气干燥,雨雪稀少,日照充足,蒸发量大,风大沙多,骤寒骤热。年均降水量 100~200mm,年均蒸发量 3000mm,年均温 8.3℃,无霜期 120~180d,日照时数长达 3316h。经济以畜牧业为主。可利用天然草地面积 500 万 hm²,占全旗总面积的 62.8%,属典型荒漠草地类型。该区地形极不规则,南高北低,有戈壁、沙漠、湖盆、低山丘陵和起伏滩地等多种类型,著名的腾格里和乌兰布和沙漠横贯境内。该区土壤受地貌及生物气候条件与人为活动的影响,具有明显的地带性和非地带性特征。由东南向西北,分布有棕钙土、灰漠土、灰棕漠土三大类,局部分布草甸土、山地灰褐土、山地灰钙土。主要植被以旱生、超旱生灌木、半灌木及耐旱草本植物组成。由于天然草地长期超载放牧和它的各种人为破坏,已有 90% 以上的草地退化,直接威胁该区农牧业的可持续发展^[9]。

根据当地的地貌特点,以贺兰山分水岭、乌兰布和沙漠西缘、腾格里沙漠北缘和北部戈壁区南缘所包围的地域为本文的具体分析区域。

1.2 土壤样品的采集与化学分析

采样时间是 2002 年 7~10 月。共设置了 103 个取样点,图 1 是样点分布图。采集 0~20cm 表层土样,每个样品取 3 点混合,带回室内分析。土壤有机质含量用重铬酸钾容量法测定^[10]。

1.3 地统计学基本理论

Fisher 传统统计学理论将研究的变量假设为纯随机变量,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^[12~14]。地统计学方法以半方差函数和 Kriging 插值为基本工具,可以对既具有随机性又具有结构性的各种变量在空间上的分布进行研究。

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,公式见式(1)^[11]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] \quad (1)$$

式中, $\gamma(h)$ 是间距为 h 的半方差, 该值随 h 的增加而增加。
Kriging 插值方法将未测定处 x_0 的估计值 $Z'(x_0)$ 假设为已知观测值的线性和, 见式 (2) [15]:

$$Z'(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$$

(2)

式中, 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。

1.4 数据处理

数据分析采用 Fisher 传统统计学和地统计学方法。用 Arcgis8.1 软件进行半方差分析、趋势分析以及结合普通 Kriging 插值方法获得土壤有机质含量等值线图等 [16]。

2 结果与分析

2.1 Fisher 统计特征

根据 Fisher 理论对实测样本数据进行传统统计分析, 得到不同土类有机质含量的统计特征值 (表 1)。结果表明: 研究区不同土类有机质含量的变异程度相差较大, 变异系数最大的为风沙土, 达到 1.10, 最小的是亚高山草甸土, 仅为 0.08。按全国第二次土壤普查技术规程标准 [17] 及各土类有机质含量的平均值, 亚高山草甸土属于有机质含量较高的 II 级, 是本文研究区内有机质含量最多的土类; 灰褐土和盐土属于有机质含量中下等的 IV 级; 石质土属于缺有机质的 V 级; 其余土类均属于极缺有机质的 VI 级。

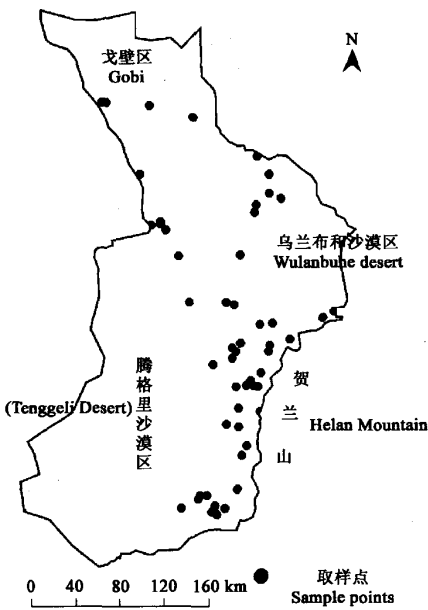


图 1 土壤样点分布图
Fig. 1 Distribution map of sample points

表 1 不同土类土壤有机质含量统计特征值

Table 1 Statistical characteristics of SOM content of different soil groups						
土类 Soil group	样点数 Sample Num.	最小值 (g/kg) Min.	最大值 (g/kg) Max.	均值 (g/kg) Mean	标准差 S. D.	变异系数 C. V
亚高山草甸土 Subalpine meadow soil	7	33.12	43.05	37.22	3.11	0.08
灰褐土 Grey cinnamon soil	7	6.23	19.23	16.13	4.13	0.26
盐土 Solonchak	5	3.22	19.41	10.72	5.49	0.51
石质土 Lithosol	2	0.42	13.52	6.97	6.55	0.94
棕钙土 Brown calcic soil	40	0.26	9.76	3.63	2.12	0.58
粗骨土 Skeletal soil	5	2.03	6.03	3.55	1.43	0.40
灰棕漠土 Grey-brown desert soil	6	1.64	6.52	3.42	1.54	0.45
灰漠土 Grey desert soil	13	0.81	3.73	2.41	0.82	0.34
风沙土 Aeolian sandy soil	18	0.13	8.02	1.62	1.78	1.10
全部样本 All soil sample	103	0.13	43.05	6.65	9.42	1.42

将所有采样点汇总分析, 最小值为 0.13g/kg, 最大值 43.05g/kg, 平均值 6.65g/kg, 标准差 9.42g/kg, 变异系数 1.42。这表明, 研究区土壤有机质含量总体水平较低, 且变异较大, 属于强变异 [18]。这主要是因为阿拉善左旗地处干旱荒漠区, 植被稀少, 当地的气候条件不利于土壤有机质的累积, 致使该区土壤有机质含量总体水平很低; 而且旗内地貌复杂, 相互交错和穿插分布着多种隐域性土壤及其相应的植被, 导致有机质含量变异较大。

2.2 趋势分析

由于受成土因素的影响, 区域土壤性质的空间分布常呈明显的趋势特征和异向性分布。但因过去常用的地统计软件都无趋势分析和异向性轴轴向自动搜寻功能, 土壤性质数据在变异函数和 Kriging 插值建模的参数分析上均存在困难, 其空间分布规律不能很好地得到体现。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, 可以方便地获得土壤性质异向性分布特征参数, 以及趋势效应特征。一般把趋势效应分为 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 是研究区土壤有机质含量的趋势分析示意图。图中, X 轴表示正东方向, Y 轴表示正北方向, Z 轴表示各样点测定值的大小; 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。图 2 表明,研究区土壤有机质含量呈一定程度的二阶趋势。

在均考虑各向异性的情况下,对分别选择无趋势、一阶趋势和二阶趋势效应参数,结合普通 Kriging 插值方法所造成的插值误差进行了比较,见表 2。比较可按以下标准综合进行:①平均误差(ME)的绝对值最接近于 0;②标准化平均误差(MSE)最接近于 0;③平均标准误差(ASE)与均方根误差(RMSE)最接近;④标准化均方根误差(RMSSE)最接近于 1。由表 2 可知,虽然无趋势和一阶趋势方法的 ME 和 MSE 较小,但 RMSSE 离 1 相差太多;二阶趋势方法 RMSSE 十分接近于 1,另外 ASE 和 RMSE 的接近程度也是三者中最小的。综合考虑以上分析,在进行普通 Kriging 插值时,趋势参数宜选取二阶。

表 2 不同趋势阶数插值误差的比较

Table 2 The comparisons of semi-variogram parameters with different trend

趋势效应 Trend effect	变程 a(m) Range (km)		预测误差 Prediction error				
	长轴 Long axle	短轴 Short axle	ME	RMSE	ASE	MSE	RMSSE
无 Non	77.0	70.9	0.02	5.84	7.58	0.013	0.759
一阶 1-order	59.3	38.2	-0.05	5.81	8.09	-0.020	0.795
二阶 2-order	46.6	30.0	-0.06	5.90	7.38	-0.024	1.015

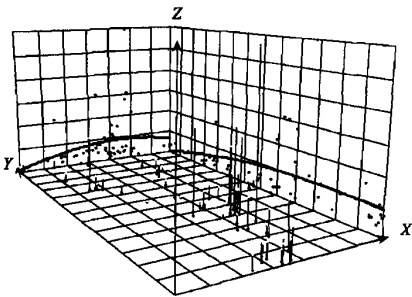


图 2 土壤有机质含量趋势分析
Fig. 2 Trend analysis of SOM contents

2.3 半方差模型分析

根据分隔距离 h 和计算出的半方差 $\gamma(h)$,采用球状模型进行拟合,且考虑各向异性和二阶趋势效应,得到研究区土壤有机质含量半方差函数模型,其参数见表 3。

表 3 中, a 表示变程(长轴、短轴变程分别表示半方差在该轴方向上达到基台值的样本间距)。各向异性比 k 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, $C_0 + C_1$ 表示基台值。 $C_0 / (C_0 + C_1)$ 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;比值在 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^[19]。

表 3 半方差函数模型类型及其参数值

Table 3 The semi-variogram model of SOM contents and its parameters

模型 Model	趋势阶数 Trend effect	变程 Range (km)		各向异性比 k Anisotropic ratio	块金 C_0 Nugget	基台 $C_0 + C_1$ Sill	$C_0 / (C_0 + C_1)$
		长轴 Long axle	短轴 Short axle				
球状 Spheroid	二阶 2-order	46.6	30.0	1.55	27.4	68.5	0.40

由表 3 可知,研究区土壤有机质含量空间变异具有各向异性特征,长、短轴变程分别为 46.6km 和 30.0km。 $C_0 / (C_0 + C_1)$ 值表明,由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大,研究区土壤有机质含量具有中等的空间相关性。

2.4 等值线图分析

基于取样点实测数据,在半方差结构分析和球状模型套合的基础上,结合普通 Kriging 插值方法,考虑各向异性,选取二阶趋势参数,获得了土壤有机质含量的等值线图(图 3),从中可以明显看出研究区有机质含量空间分布状况。

总体上,由南到北(沿贺兰山走向)、东南到西北,土壤有机质含量逐渐降低;在中部达到最小,这里是乌兰布和沙漠和腾格里沙漠的条带状结合地带,呈东北—西南方向分布;然后有机质含量又有所增加。另外,两大沙漠边缘有机质含量也达到最小。该区土壤有机质含量的空间分布符合土壤有机质含量水平基本随热量条件的增加而降低,随湿润度的增加而增高的规律;与当地地貌特点,以及土壤和植被的地带性分布表现出很好的一致性^[9]。

阿拉善左旗东南部是贺兰山区,是有机质含量较高的地区。该地区降雨量相对较大,大于 250mm,分布有有机质含量较高的亚高山草甸土和灰褐土,植被以森林和灌木为主,覆盖度高,海拔高,热量低,有利于有机质的积累,含量在 12g/kg 以上^[9]。

在贺兰山山前冲积扇地区,以及再向西到腾格里沙漠边缘、向北到乌兰布和沙漠南缘的广大地区,广泛分布有淡棕钙土且

有隐域性的盐土、粗骨土壤嵌在其中,随着海拔的降低,降雨量的逐渐减少,植被覆盖度逐渐降低,以灌木、半灌木为主,导致土壤有机质含量也逐渐降低。在两大沙漠的结合地带主要是有机质含量极低的风沙土。两大沙漠结合地带向西北一直到北部戈壁区南缘是雅布赖-莎尔扎石质低山丘陵区,海拔有所升高,广泛分布灰漠土和灰棕漠土,降雨量有所回升,致使该地区有机质含量又有所增加^[9]。图 4 是 Kriging 插值计算后获得的南-北方向和东南-西北方向的土壤有机质含量变化趋势图,从中可更直观的看出以上所分析的土壤有机质含量的变化趋势。

3 结论

本文应用地统计学方法,且考虑趋势效应及异向性,以阿拉善左旗为例,初步研究了干旱荒漠区土壤有机质含量的空间变异特征。主要结论如下:

(1)传统统计分析结果表明,研究区土壤有机质含量总体水平较低,平均为 6.65g/kg;变异系数为 1.42,属强变异。这反映了干旱荒漠区土壤有机质含量总体水平较低以及分布高度不均的特点。

(2)在半方差结构分析和球状模型套合的基础上,结合普通 Kriging 插值方法,分析了土壤有机质的地统计特征。研究区有机质含量空间变异具有各向异性特征,由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大,土壤有机质含量具有中等的空间相关性。对无趋势、一阶趋势和二阶趋势效应所造成的预测误差的综合比较表明,趋势效应参数宜选取二阶。

(3)获得了研究区土壤有机质含量的等值线图,并分析了其空间分布规律。总体上,由南到北、东南到西北,有机质含量逐渐降低;在中部达到最小,这里是乌兰布和沙漠和腾格里沙漠的条带状结合地带,呈东北-西南方向分布;然后有机质含量又有所增加。另外,两大沙漠边缘有机质含量也达到最小。土壤有机质含量的空间分布与当地地貌特点,以及土壤和植被的地带性分布表现出很好的一致性。

(4)本文仅结合普通 Kriging 插值方法研究了干旱荒漠区土

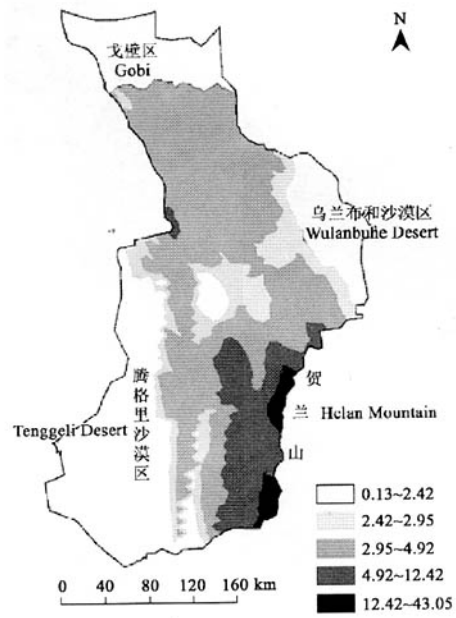
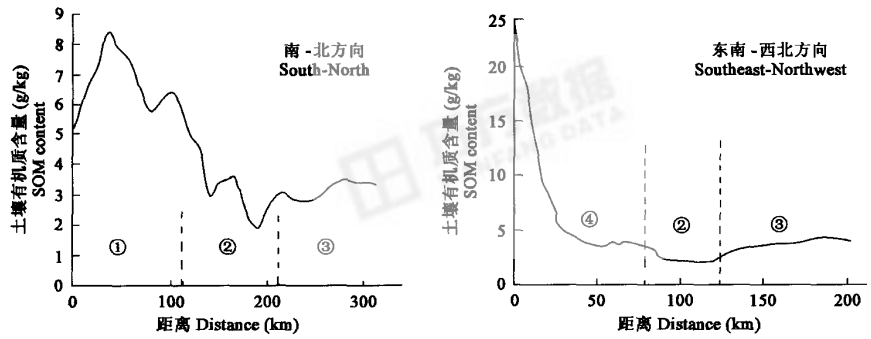


图 3 土壤有机质含量等值线图
Fig. 3 Contour map of SOM contents



① 山前冲击扇地区 Alluvial fan area ② 沙漠结合带 The middle part between Wulanbuhe Desert and Tenggeli Desert ③ 低山丘陵区 Low hill area ④ 贺兰山及山前冲积扇地区 Helan Mountain and alluvial fan area

图 4 南-北及东南-西北方向土壤有机质含量变化趋势

Fig. 4 Changes of SOM content along south-north and southeast-northwest directions

壤有机质含量的空间变异特征,有关综合多个土壤质量指标以及运用其它插值方法如协同 Kriging 等研究干旱荒漠区土壤质量的空间变异特征还有待于进一步开展。

References:

- [1] Mishra T K, Banerjee S K. Spatial variability of soil pH and organic matter under *Shorea robusta* in lateritic region. *Indian Journal of Forestry*, 1995, **18**(2): 144~152.
- [2] Kuzel S, Nydl V, Kolar L, *et al.* Spatial variability of cadmium, pH, organic matter in soil and its dependence on sampling scales. *Water Air and Soil Pollution*, 1994, **78**(1~2): 51~59.
- [3] Wang X F, Zhang H. The spatial variability of soil organic matter. *Soil*, 1995, (2): 85~89.
- [4] Yang Y L, Tian C Y, Sheng J D, *et al.* Spatial variability of soil organic matter, total nitrogen, phosphorus and potassium in cotton field. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, **20**(3): 26~30.
- [5] Zhang S J, He Y, Fang H. Spatial variability of soil properties in the field based on GPS and GIS. *Transactions of the CSAE*, 2003, **19**(2): 39~44.
- [6] Wang J, Fu B J, Qiu Y, *et al.* Spatial Heterogeneity of Soil Nutrients in a Small Catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(8): 1173~1178.
- [7] Gao J, Huang Y F, Li B G, *et al.* Spatial variability analysis of soil particle compositions and soil profile horizon in field. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, **9**(2): 151~157.
- [8] Zhang S R, Huang Y F, Li B G, *et al.* The Temporal and Spatial Variability of Soil Organic Matter Contents in the Alluvial Region of Huang-Huai-Hai Plain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(12): 2041~2047.
- [9] The editing committee of agriculture and animal husbandry planning in Alxa League. *Agriculture and animal husbandry planning in Alxa League*. Hohhot: Inner Mongolian People's Press, 1992.
- [10] Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soil physical and chemical analysis*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983. 132~136.
- [11] Hou J R, Yi Z N, Li W M, *et al.* *Practical geostatistics*. Beijing: Geology Press, 1998.
- [12] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties I. The semi-variogram and punctual Kriging. *J. Soil Sci.*, 1980, (31): 315~331.
- [13] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties II. Block Kriging. *J. Soil Sci.*, 1980, (31): 333~341.
- [14] Webster R. Quantitative Spatial analysis of soil in the field. *Advance in Soil Science*, 1985, (3): 1~70.
- [15] Wang Z Q. *Geostatistics and its applications in ecology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [16] ESRI. *Using ArcGIS geostatistical analyst*, 2001. 50~139.
- [17] The office of national general soil survey. *Temporary technical principle of the second national general soil survey*. Beijing: Agricultural Press, 1979.
- [18] Lei Z D, Yang S X. The primary study of spatial variability of soil properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985, (9): 10~21.
- [19] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central low a soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, (58): 1501~1511.

参考文献:

- [3] 王学锋, 张衡. 土壤有机质的空间变异性. *土壤*, 1995, (2): 85~89.
- [4] 杨玉玲, 田长彦, 盛建东, 等. 灌淤土壤有机质、全量氮磷钾空间变异性初探. *干旱区农业研究*, 2002, **20**(3): 26~30.
- [5] 张淑娟, 何勇, 方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究. *农业工程学报*, 2003, **19**(2): 39~44.
- [6] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性. *生态学报*, 2002, **22**(8): 1173~1178.
- [7] 高峻, 黄元仿, 李保国. 农田土壤颗粒组成及其剖面分层的空间变异分析. *植物营养与肥料学报*, 2003, **9**(2): 151~157.
- [8] 张世熔, 黄元仿, 李保国, 等. 黄淮海冲积平原区土壤有机质时空变异特征. *生态学报*, 2002, **22**(12): 2041~2047.
- [9] 《阿拉善盟农牧业区划》编辑委员会. *阿拉善盟农牧业区划*. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1992.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤物理化学分析*. 上海: 上海科学技术出版社, 1983. 132~136.
- [11] 侯景儒, 伊镇南, 李维明, 等. *实用地质统计学*. 北京: 地质出版社, 1998.
- [15] 王政权. *地统计学及在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [17] 全国土壤普查办公室. *全国第二次土壤普查暂行技术规程*. 北京: 农业出版社, 1979.
- [18] 雷志栋, 杨诗秀. 土壤特性的空间变异性初步研究. *水利学报*, 1985, (9): 10~21.