

# 农田沙漠化演变中土壤性状特征及其空间变异性分析\*

苏永中 赵哈林 崔建垣

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要** 应用经典统计分析和地统计学的方法, 研究了科尔沁沙地旱作农田 300 m × 90 m 尺度下 0~10 cm 土层土壤理化性状的沙漠化演变及其空间变异性特征。结果表明, 表层土壤的粗粒化、持水性能和孔隙分布的恶化、以及土壤养分的贫瘠化演变表征了农田沙漠化的发生和发展。在农田沙漠化演变中, 土壤性状的变异增大, 变异系数在 5.9% ~ 50.7%, 其空间分布在研究的尺度上有明显的规律性, 存在明显的空间异质性和格局。变异函数很好地反映了沙漠化演变的趋势、程度和尺度。在研究区域, 沙漠化发生发展的尺度在南北两个方向从农田边缘到农田中部约 100 m 处。土壤性状之间及其各因子的空间异质性有密切的关系。沙漠化对土壤有机碳和氮磷养分影响显著, 对 pH 影响相对较小。

**关键词** 土壤性状; 空间异质性; 半方差函数; 旱作农田; 沙漠化

中图分类号 S15 文献标识码 A

土壤特性的空间异质性(变异性)是土壤重要的属性之一, 其变异来源包括系统变异和随机变异两种。土壤特性的系统变异是由母质、气候、水文、地形、生物、时间、人类活动等的差异引起的, 而随机变异是由取样、分析等的误差引起的<sup>[1]</sup>。在不同的尺度上研究土壤特性的空间异质性, 不但对了解土壤的形成过程、结构和功能具有重要的理论意义<sup>[1,2]</sup>, 而且对了解土壤与植物的关系、植被的空间格局以及各种生态过程如物种入侵、土壤侵蚀、土地利用变化等对土壤影响的程度和尺度等也具有重要的参考价值<sup>[3,4]</sup>。因此, 近年来, 景观尺度上土壤特性的时空异质性以及与环境因子的关系研究已成为土壤学和生态学研究的热点之一。

研究表明, 地统计学是研究土壤特性空间变异特征较好的方法<sup>[5]</sup>。近年来在土壤和环境地学的研究中, 得到了广泛的应用。在小尺度上, 用地统计学方法对土壤养分的空间变异规律和分布格局的研究, 建立土壤养分分区管理模型, 为精准农业的实施提供了可行的依据<sup>[6]</sup>。GIS 和地统计学的结合, 可以得到大尺度上土壤属性特征空间变异规律及其影响因子的很好解释<sup>[7]</sup>。也有人用地统计学方法研究半干旱地区土壤养分和水分资源空间分布异质性与土地退化的关系<sup>[4]</sup>。

沙漠化是在干旱、半干旱及半湿润地区由于人类不合理经济活动与自然资源环境不相协调所产生的以风沙活动为主要标志的土地退化<sup>[8]</sup>。农田沙漠化主要表现为农田土壤的风蚀或积沙, 其实质是表层土壤细颗粒组分和营养物质的吹蚀和搬运, 或风沙在地表的覆盖和堆积, 其结果是表层土壤的粗粒化、养分的贫瘠化和土壤环境的干旱化演变而导致土地生产力的下降或丧失<sup>[9-11]</sup>。在某一特定的时间和空间尺度上, 土地沙漠化的演变是一个由渐变到突变的过程, 必然会导致尺度范围土壤特性空间异质性的增加。但以往土地沙漠化的研究一般是对不同沙化程度土地土壤性状的特征描述以及对演变过程的定性分析<sup>[9,10]</sup>, 缺乏对沙漠化演变中土壤特性空间变化和过程分析的定量化研究, 而这方面的研究对阐释沙漠化的演变过程及其机制非常重要。本文用经典统计学和地统计学的理论与方法, 定量研究处在沙漠化演变中的旱作农田土壤特性的空间变异。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 自然概况

研究区位于内蒙古通辽市奈曼旗境内, 地处我国北方半干旱农牧交错带东端的科尔沁沙地腹地。地理位置 120°19' ~ 121°35'E, 42°14' ~ 43°32'N, 海拔 340~360

\* 国家重大基础研究发展规划项目“中国北方沙漠化过程及其防治研究”(G2000048704)资助

作者简介: 苏永中(1966~), 男, 甘肃古浪人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤学和恢复生态学方面的研究

收稿日期: 2002-08-24; 收到修改稿日期: 2003-03-20

m。属大陆性半干旱气候, 年均气温  $6.4^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年积温  $3151.2^{\circ}\text{C}$ , 无霜期 151 d。年均降水量 364.6 mm, 年均蒸发量 1972.8 mm, 年平均风速  $3.5\text{ m s}^{-1}$ , 大风日数 20~60 d。地势相对平缓, 第四纪以来堆积了深厚的冲积、湖积和细沙夹粘土层, 经过风的吹扬形成坨甸相间的风沙地貌, 农田大多位于沙质草甸或坨间缓坡地, 沙质属性决定了它易遭受风蚀, 尤其在地表裸露、干旱多风的春季, 风蚀更为强烈; 土壤类型主要为沙质栗钙土和风沙土<sup>[9]</sup>。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 研究样地描述

研究样地为中国科学院内蒙古奈曼沙漠化研究站附近的一块处在沙漠化演变中的旱作农田, 地势稍有起伏(坡度  $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ ), 面积约  $6\text{ hm}^2$ (南北长约 400 m, 东西宽约 150 m), 农田南北边缘为沙丘草场, 西缘为铁路防护林, 东边为灌溉农田, 为该区域典型的农业用地, 已开垦 20 年(开垦前为均一的沙质草场), 主要种植豆类、荞麦和糜谷等杂粮, 水分较好的年份种植小麦和玉米。粗放经营, 不施农肥, 不施或在雨水较好的情况下追施少量化肥。由于实行保护性耕作(秋季收获时免耕, 根茬留田, 春季播种时耕作), 风蚀程度较轻。近几年来, 受人口的压和经济利益的驱使, 农田逐步向农田边缘平缓的沙丘草场扩展; 1998 年农田边缘的沙质草地开垦后, 活化的沙物质在风力作用下发生平铺式运移, 使正常农田发生沙化, 已逐渐向农田中心蔓延。

### 1.2.2 土壤取样和分析

2001 年 4 月, 设置  $100\text{ m}\times 300\text{ m}$  的样方, 按南北方向 30 m 间隔, 东西方向 15 m 间隔布设取样网点 60 个(图 1), 在每个取样点中心 3 m 半径范围内取 0~10 cm 混合样, 用于化学分析。从取样时地表特征观察, 农田沙漠化存在明显的梯度变化, 即农田边缘已明显沙化, 农田中部无明显沙化迹象。

土壤容重测定用环刀法; 有机质用重铬酸钾氧化-外加法; 全氮用凯氏法(意大利产 DK6, UDK140 分析仪); 全磷用高氯酸-硫酸消化-钼锑抗比色法(日产 UV-1601 分光光度计); 水解氮用碱解扩散法; 速效磷用  $0.5\text{ mol L}^{-1}$  碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法<sup>[12]</sup>。土壤 pH 和电导率(EC) 分别用 1:1 水土比悬液和 1:5 土水比浸提液, 用德产 Multiline F/SET-3 分析仪直接测定。另将南北样带的 6 个样混合后, 用吸管法进行粒级分析, 并在每条样带取 3 个原状土样在室内测定持水性能和孔隙分布<sup>[13]</sup>。

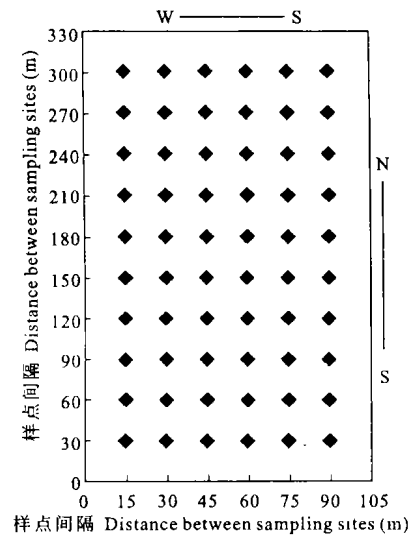


图 1 旱作农田土壤取样位置 (0~10 cm)

Fig. 1 Sampling location of soil in rainfed field (0~10 cm)

### 1.2.3 数据分析

首先对南北方向不同样带土壤性状值进行平均值的比较, 直观分析土壤性状的沙漠化演变趋势。对 60 个点的土壤性状值用传统统计学方法进行基本统计特征的计算, 并进行单样本的频数分析和各性状之间的相关分析。不符合正态分布的因子进行对数转化, 计算各因子的变异函数(Semivariogram), 计算公式为:

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

$$i = 1 - N$$

式中  $N(h)$  是距离等于  $h$  时的点对数,  $Z(x_i)$  是样点  $Z$  在位置  $x_i$  的实测值,  $Z(x_i + h)$  是与  $x_i$  距离  $h$  处样点的值。

对计算出的各土壤性状的变异函数, 绘出曲线图, 并建立变异函数的理论模型。通过模型中的块金值(Nugget,  $C_0$ )、基台值(Sill,  $C + C_0$ )、变程(Range,  $a$ )、拱高( $C$ )与基台值之比( $C/C + C_0$ )等参数定量地分析各因子的空间变化规律<sup>[5]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 农田沙漠化演变中土壤理化性状退化的表征

农田沙漠化的演变, 其实质是表层土壤向粗粒化和单粒化的演变过程<sup>[9-11]</sup>。表 1 可以反映出, 旱作农田不同的空间位置表层土壤的粒级分布有明显的梯度变化。农田中部粘粒( $< 0.002\text{ mm}$ )、粉粒( $0.05\sim 0.002\text{ mm}$ )和极细沙( $0.10\sim 0.05\text{ mm}$ )含量

明显高于农田边缘。伴随着土壤的粗粒化,必然引起土体的风散和结构的破坏,使得土壤容重增加,孔隙度降低,持水性能下降等一系列物理性状的恶化。土壤孔隙及其组成和分布,客观地反映着土壤颗粒组合垒结的状况<sup>[14]</sup>,已严重沙化的农田边缘土壤总孔隙度较农田中部土壤降低 3%~6%,而非毛管孔隙度和通气孔隙度增加了 2%~4%和 8%~10%,说明严重风蚀农田土壤主要是由单一的粗颗粒垒结而成而增加了通透性;粗粒化也使土壤胶结能力下降,持水性能恶化。因此农田的沙漠化演变意味着

土壤对水、肥、气、热等诸肥力因素的容蓄、保持和释供能力的恶化和丧失。有机 C、全 N 和全 P 的空间分布表明,从农田中部到农田边缘土壤向贫瘠化演变。

旱作农田的沙漠化演变,既有系统本身的自然属性决定的内在原因,如极不稳定的沙质土壤基质和坨甸交错的风沙地貌及其脆弱的生态环境,更重要的是人为的外部干扰体系的驱动,如对周边沙质草地的滥垦,使得活化的沙物质在风力作用下向农田发生平铺式运移。

表 1 旱作农田沙漠化演变中土壤理化性状的空间分布

Table 1 Spatial distribution of soil physicochemical properties in rainfed farmland in the desertification process

取样位置 <sup>1)</sup> Sampling location (m)	粒级分布 Particle size distribution (%)					持水性能 Water-holding capacity (%)		
	1~ 0.25 mm	0.25~ 0.1 mm	0.1~ 0.05 mm	0.05~ 0.002 mm	< 0.002 mm	自然含水 量 <sup>2)①</sup>	田间持 水量 <sup>②</sup>	毛管持水 量 <sup>③</sup>
30	18.2	41.4	29.8	7.1	3.5	4.9	13.7	20.4
60	20.1	49.0	21.5	6.9	2.5	5.3	12.2	18.4
90	8.7	33.0	42.1	11.2	5.0	8.8	21.4	25.3
120	6.2	31.1	40.4	16.3	6.0	10.0	27.1	29.5
150	5.8	33.9	33.1	19.1	8.1	9.8	28.8	31.8
180	2.2	36.8	37.2	14.6	9.2	8.8	26.5	29.3
210	7.1	39.4	38.5	12.0	3.0	7.0	22.2	24.2
240	7.0	34.1	37.5	17.4	4.0	6.7	20.1	23.1
270	16.5	61.2	15.2	4.6	2.5	5.8	17.2	20.5
300	16.7	70.3	6.9	4.1	2.0	5.5	12.1	18.3

取样位置 <sup>1)</sup> Sampling location (m)	孔隙分布 Porosity distribution (%)				有机碳 Organic C (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (g kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus (g kg <sup>-1</sup> )
	总孔隙度 <sup>④</sup>	毛管孔隙度 <sup>⑤</sup>	非毛管孔隙度 <sup>⑥</sup>	通气孔隙度 <sup>⑦</sup>			
30	40.5	32.3	8.2	18.9	1.30	0.149	0.092
60	38.5	30.0	8.5	18.5	1.68	0.149	0.110
90	43.1	37.7	5.4	11.3	4.61	0.395	0.220
120	46.7	40.9	5.8	8.7	4.69	0.375	0.191
150	48.4	42.6	5.9	9.9	4.95	0.482	0.197
180	45.5	41.1	4.0	7.0	4.91	0.479	0.217
210	41.9	36.3	5.6	14.8	2.65	0.290	0.157
240	41.2	35.5	6.5	10.2	2.47	0.236	0.137
270	39.3	32.6	6.6	11.8	1.97	0.163	0.108
300	38.5	29.8	8.7	18.8	1.76	0.140	0.074

1) 取样点由南向北的距离 Distance from south to north (m); 2) 自然含水量为小雨后 12 h 时测定 Natural water content was measured at 12 hours after rainfall. ① Natural soil moisture; ② Field water-holding; ③ Capillary water-holding; ④ Total porosity; ⑤ Capillary porosity; ⑥ Non-capillary porosity; ⑦ Aerate porosity

## 2.2 农田沙漠化演变中土壤性状变异性分析

**2.2.1 土壤性状的基本统计特征** 表 2 是处在沙漠化演变过程中的旱作农田 0~10 cm 土层土壤容重、有机碳、N、P 养分、pH 值和电导率的基本统计特征。对统计平均数, 标准差表示的是绝对变异, 变异系数反映的是相对变异。从表 2 反映出, 在所研究的尺度上, 除土壤容重和 pH 外, 其余各性状的变异系数都比较大, 变动的范围在 32.2% (电导率)~50.7% (有机碳)。说明沙漠化演变过程中土壤性状值在不同的空间位置的差异在增大, 也可定性地说明,

沙漠化过程是土壤性状逐渐恶化的过程<sup>[9]</sup>。土壤有机碳和全氮有最高的变异系数, 说明沙漠化对土壤有机碳和全氮的影响最大; 容重的变异系数最小, 主要是沙地本身有较高的容重, 向沙漠化的演变中, 即使最终变为流沙, 其容重的变化也有限; 土壤 pH 相对较小的变异系数, 一方面是沙地本身有较高的 pH 值, 另一方面表明沙漠化对 pH 的影响相对较小。从平均值与中数的差值, 偏态系数和峰值系数分析, 各性状值符合近似的正态分布。

表 2 农田沙漠化演变中土壤性状的统计特征

Table 2 Statistical parameters of soil properties(0~10 cm) in rainfed farmland in the desertification process

因子 Factor	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	中数 Medium	最大值 Maximum	最小值 Minimum	偏态系数 Skewness	峰值系数 Kurtosis	分布形态 <sup>1)</sup> Distribution type
容重 Bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	1.51	0.0887	5.9	1.52	1.67	1.34	-0.22	-1.07	N
有机碳 Organic C ( $\text{g kg}^{-1}$ )	3.09	1.567	50.7	2.79	5.67	0.75	0.40	-1.05	LN
全 N Total N ( $\text{g kg}^{-1}$ )	0.288	0.143	49.7	0.277	0.66	0.11	0.55	-0.6	LN
全 P Total P ( $\text{g kg}^{-1}$ )	0.153	0.0576	37.6	0.155	0.31	0.07	0.27	-0.73	LN
有效 N Available N ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	34.4	12.95	37.6	33.3	65.1	11.0	0.27	-1.11	LN
有效 P Available P ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	3.1	1.075	35.0	3.2	5.0	1.0	-0.12	-1.11	LN
pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	7.92	0.108	13.6	7.93	8.13	7.51	-0.74	2.33	LN
电导率 EC <sup>2)</sup> ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	76	24.5	32.2	68	130	36	0.38	-0.94	LN

1) N: 正态分布 Normal distribution; LN: 对数正态分布 Logarithmic normal distribution. 2) EC: Electrical conductivity

**2.2.2 土壤性状空间变异特征分析** (1) 土壤性状的变异函数 变异函数  $\gamma(h)$  是地统计学所特有的, 是区域化变量在分隔距离上各样本变异的量度, 因此, 可作为空间分析的工具。图 2 是各土壤性状在各向同性条件下的变异函数变化, 它表示各性状空间自相关特点。表 3 是变异函数的理论模型和有关参数。结果表明, 农田沙漠化演变过程中土壤各性状在研究区域尺度上存在高度的异质性。从图 2 分析, 土壤 pH 的空间变异随着空间距离的增加而增大, 从较小的块金值 ( $C_0$ ) 增加到一个相对稳定且较大的基台值 ( $C + C_0$ ); 但其余 7 个土壤性状因子的空间变异却是随着空间距离的增加, 在出现了一个相对稳定的基台值后, 出现下降, 并随空间距离的增加, 空间变异逐渐减小, 呈近似对称的抛物线形状。

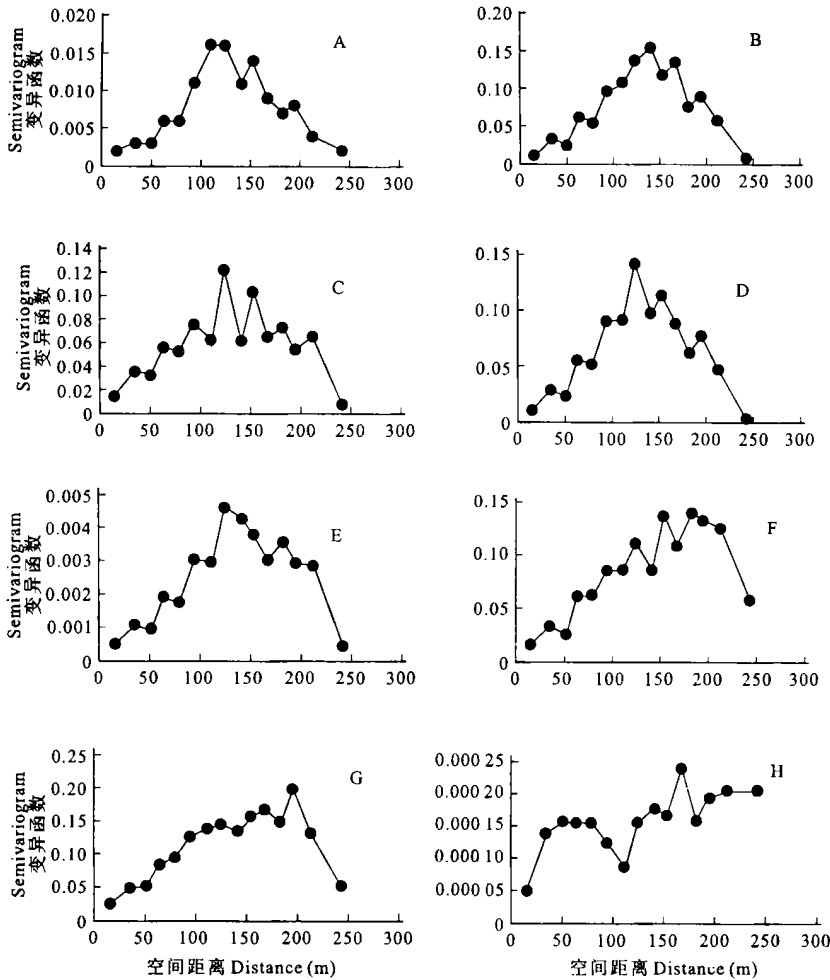
土壤性状的变异函数很好地符合了农田沙漠化的演变趋势: 1) 在研究的区域, 农田边缘沙漠化程度明显高于农田中部 (这是科尔沁沙地坳间分布的地貌单元农田沙漠化演变的一般趋势), 变异函数正好与之相对应。2) 从半方差图分析, 变异函数在出现了上下波动的基本稳定的值后, 随空间距离的增大, 出现明显的下降, 说明样方间的差异在下降

之前和之后的尺度上空间相关规律发生显著的变化, 下降点是土壤性状异质性规律的转折点, 因此可以认为是土壤性状格局发生变化的尺度<sup>[15]</sup>。从表 3 和图 2 反映出, 各土壤性状的变程 ( $a$ ) 大约出现在 100 m (94~130 m) 处, 而半变异函数开始下降时在约 200 m 处, 因此, 可以推断农田边缘 0~100 m 和相反方向 300~200 m 的地段是沙漠化发生发展的尺度范围。3) 变异函数只有在最大间隔的 1/2 内才有意义<sup>[15]</sup>, 出现这种对称的抛物线图形, 在实际应用中, 是否可以对变异函数进行分段分析? 在本项研究中发现, 在距离 0~200 m 和 200~300 m 段的 2 个尺度, 空间相关性最强, 异质性最高, 这固然是由有规律的系统变异所造成的, 但正好说明, 该尺度环境因素 (或干扰) 对土壤作用是最主要的<sup>[7]</sup>, 这对揭示沙漠化的演变规律具有重要意义。

从空间异质性的组成分析, 块金值表示随机部分的空间异质性, 拱高则表示系统变异的空间异质性, 拱高与基台值之比反映自相关部分的空间异质性占总空间异质性的程度<sup>[5]</sup>。从表 3 反映出, 土壤容重、有机碳、氮磷养分和电导率, 其拱高与基台值之比接近于 1, 说明空间异质性几乎完全由系统变

异引起,土壤性状要素的空间分布在研究的尺度上有明显的规律性,存在明显的空间自相关和格局<sup>[14]</sup>。在研究的样地,长期以来基本无肥料的投入,管理水平一致,因此这种明显的变异规律性和格

局显然是由农田沙漠化的演变所致。土壤 pH,系统部分变异占总空间异质性的 67.4%,部分变异是由土壤自身的特性和随机因素引起,表明沙漠化对土壤 pH 的影响相对较小。



A. 容重, B. 有机碳, C. 全氮, D. 全磷, E. 有效氮, F. 有效磷, G. 电导率, H. pH

A. Bulk density, B. Organic C, C. Total N, D. Total P, E. Available N, F. Available P, G. Electrical conductivity, H. pH

图2 土壤性状变异函数曲线

Fig. 2 Semivariogram of soil properties

表3 土壤性状的变异函数理论模型及有关参数

Table 3 Semivariogram and parameters of soil properties

因子 Factor	模型 Model <sup>1)</sup>	$C_0$	$C_0 + C$	$C / (C_0 + C)$	$a$	RSS	$R^2$
容重 Bulk density	LS	$1 \times 10^{-6}$	$1.42 \times 10^{-3}$	0.999	94	$1.72 \times 10^{-4}$	0.367
有机碳 Organic C	LS	$1 \times 10^{-4}$	0.097 2	0.999	111.1	0.016 8	0.436
全 N Total N	LS	$1 \times 10^{-4}$	0.080 2	0.999	102	0.013 6	0.390
全 P Total P	LS	$1 \times 10^{-5}$	$3.22 \times 10^{-3}$	1	118.7	$1.29 \times 10^{-5}$	0.505
有效 N Available N	LS	0.005	0.069	0.928	94	$8.24 \times 10^{-3}$	0.331
有效 P Available P	LS	0.007 1	0.116 2	0.939	153.4	$6.05 \times 10^{-3}$	0.746
pH	E	$7.38 \times 10^{-6}$	$2.27 \times 10^{-4}$	0.674	139.7	$1.46 \times 10^{-8}$	0.522
电导率 EC	LS	0.004 4	0.142	0.969	114.7	0.0123	0.658

1) LS 为带基台值的线性模型 LS refers to linear to sill; E 为指数模型 E refers to exponential model

(2) 土壤性状变异的各向异性 土壤性状的空间变异通常是有方向性的<sup>[5]</sup>, 也就是说, 不同的方向上, 由于微地形、环境因子等的作用会影响到土壤性状在不同的方向上呈现不同的变化规律。由于本项研究的地块在东西和南北方向上的尺度不同, 不能用各项异性比来表征变异函数的各向异性, 但在

研究的尺度范围内变异函数的特征表明, 东西方向的变异函数波动范围小, 近似同质; 而南北方向上的变异表明有显著的空间异质性(图 3)。这与研究的地块周边的环境以及风向是一致的, 农田发生沙漠化演变的过程主要是从南北两个方向向农田中心蔓延。

(3) 土壤性状及其变异函数之间的相关性

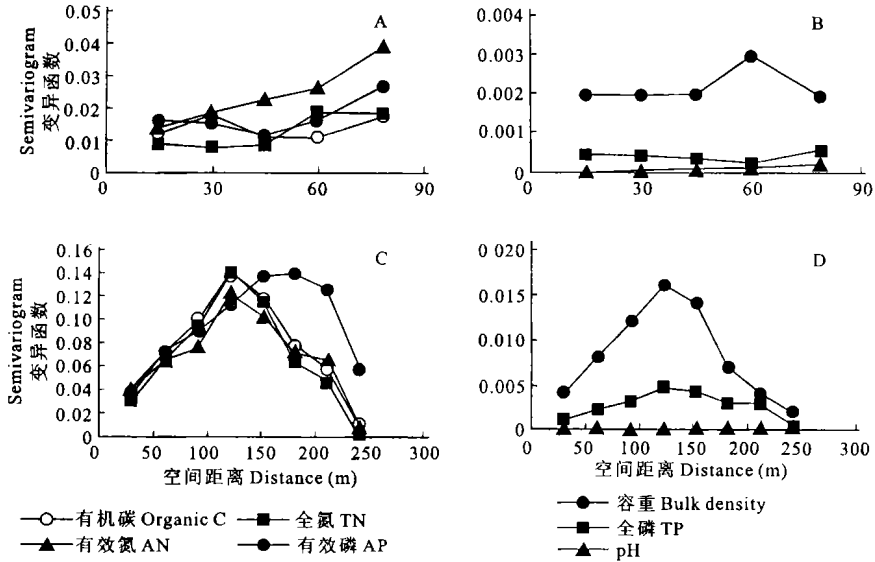


图 3 变异函数的各向异性(A, B. 在 E0 方向上的变异函数; C, D. 在 N90 方向上的变异函数)

Fig. 3 Anisotropy of semivariogram (A, B. semivariogram in E0 direction; C, D. semivariogram in N90 direction)

析 土壤性状之间的相关分析表明(表4), 土壤容重与有机碳、氮磷养分、电导率呈显著负相关; 有机碳与氮磷养分、电导率之间呈显著正相关, 而 pH 与其它各因子之间无相关关系。在空间自相关范围之内, 分析各变异函数之间的关系, 可以加深对各因

子之间相互作用的了解。表 4 反映的是各土壤性状变异函数之间的相关系数, 与土壤性状之间的相关系数有相同趋势(变异函数之间的相关均为正值), 但相关系数值更大。说明用变异函数之间的相关关系可以更好地表征各因子之间的相互作用。

表 4 土壤性状值之间和各性状变异函数之间的相关分析<sup>1)</sup>

Table 4 Pearson coefficients between soil properties and between their semi-variograms

项 目 Item	容重 Bulk density	有机碳 Organic C	全氮 Total N	全磷 Total P	有效氮 Available N	速效磷 Available P	pH	电导率 EC
容重 Bulk density	1	0.867**	0.941**	0.826**	0.821**	0.560*	0.483	0.686**
有机碳 Organic C	-0.778**	1	0.937**	0.922**	0.789**	0.650**	0.258	0.801**
全氮 Total N	-0.856**	0.854**	1	0.926**	0.923**	0.670**	0.229	0.783**
全磷 Total P	-0.783**	0.821**	0.856**	1	0.896**	0.808**	0.159	0.843**
有效氮 Available N	-0.657**	0.717**	0.764**	0.748**	1	0.723**	0.074	0.717**
速效磷 Available P	-0.737**	0.777**	0.784**	0.833**	0.565**	1	0.134	0.920**
pH	-0.042	-0.013	-0.155	-0.101	-0.417**	0.001	1	0.259
电导率 EC	-0.637**	0.697**	0.728**	0.724**	0.536**	0.703**	0.087	1

1) \*, \*\* 分别为 5% 和 1% 的显著水平, \*\* is significant level at 5% and 1%, respectively

### 3 结论

1) 农田的沙漠化演变,其实质是土壤的粗粒化和养分的贫瘠化,可以用土壤理化性状的退化进行表征。在农田沙漠化演变过程中,土壤性状的空间变异增大,这从研究的尺度范围内土壤有机碳、氮磷养分和电导率的变异系数可以得到印证。沙漠化演变的最终结果将是随着土壤的完全沙化,土壤性状的异质性降低,趋向于均一化。

2) 各土壤性状的变异函数分析能够表征农田沙漠化发生发展的程度和空间尺度。在研究的地域范围,沙漠化发生的尺度在南北两个方向到农田中部约 100 m 处。土壤有机碳、氮磷养分、电导率在空间分布上有明显的规律性,存在明显的空间自相关和格局,空间异质性的变异来源几乎完全由沙漠化引起。沙漠化导致土壤理化性状的严重恶化,但 pH 受沙漠化的影响程度相对较小。

3) 除 pH 外,土壤性状之间及其各因子的空间异质性之间有密切的关系,用变异函数的相关分析能更好地表征各因子之间的相互作用。

### 参考文献

- [ 1 ] 王政权,王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究. 生态学报, 2000, 20( 6 ): 945~ 950. Wang Z Q, Wang Q C. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 945~ 950
- [ 2 ] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, *et al.* Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs*, 1991, 62: 277~ 314
- [ 3 ] 陈玉福,董鸣. 毛乌素沙地景观的植被与土壤特征空间格局及其相关分析. 植物生态学报, 2001, 25(3): 265~ 269. Chen Y F, Dong M. Spatial pattern and correlation of vegetation characteristics and soil properties in the MuUS Sandy Desert ( In Chinese ). *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(3): 265~ 269
- [ 4 ] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, *et al.* On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, 77(2): 364~ 374
- [ 5 ] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999. Wang Z Q. *Geo-statistics and Its Application in Ecology* ( In Chinese ). Beijing: Science Press, 1999
- [ 6 ] 自由路,金继运,杨俐苹,等. 基于 GIS 的土壤养分分区管理模型研究. 中国农业科学, 2000, 33(6): 46~ 50. Bai Y L, Jin J Y, Yang L P, *et al.* Research on the subarea management model of soil nutrients by GIS ( In Chinese ). *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6): 46~ 50
- [ 7 ] 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——以河北省遵化市为例. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557~ 563. Gou X D, Fu B J, Ma K M, *et al.* Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS —A case study in Zongha city of Hebei Province ( In Chinese ). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11( 4 ): 557~ 563
- [ 8 ] 王涛. Land use and sandy desertification in north China. 中国沙漠, 2000, 20( 1 ): 103~ 108. Wang T. Land use and sandy desertification in north China. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(1): 103~ 108
- [ 9 ] 赵哈林,黄学文,何宗颖. 科尔沁地区农田沙漠化演变的研究. 土壤学报, 1996, 33( 3 ): 242~ 248. Zhao H L, Huang X W, He Z Y. Study on desertification of farmland soil in the Horqin region, Inner Mongolian ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33( 3 ): 242~ 248
- [ 10 ] 肖洪浪,赵雪,赵文智. 河北坝缘筒育干润均腐土耕种过程中的退化研究. 土壤学报, 1998, 35( 1 ): 129~ 134. Xiao H L, Zhao X, Zhao W Z. Study on Hapli-Ustic Isohumisol degradation under farming in Hebei, China ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35( 1 ): 129~ 134
- [ 11 ] 刘良梧,周健民,刘多森,等. 半干旱农牧交错带栗钙土的发生与演变. 土壤学报, 2000, 37( 2 ): 174~ 181. Liu L W, Zhou J M, Liu D S, *et al.* Genesis and evolution of Chestnut soils in the alternative belt of semiarid agriculture and animal husbandry ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(2): 174~ 181
- [ 12 ] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 7~ 59. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. ed. *Physical and Chemical Analysis Methods of Soils* ( In Chinese ). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. 7~ 59
- [ 13 ] 严昶升主编. 土壤肥力研究方法. 北京: 农业出版社, 1988. Yan C S. ed. *Soil Fertility Research Method* ( In Chinese ). Beijing: Agricultural Press, 1988
- [ 14 ] 陈恩凤编著. 土壤肥力物质基础及其调控. 北京: 科学出版社, 1990. Chen E F. ed. *Substance Basis and Its Regulation of Soil Fertility* ( In Chinese ). Beijing: Science Press, 1990
- [ 15 ] 祖元刚,马克明,张喜军. 植被空间异质性的分形分析方法. 生态学报, 1997, 17(3): 333~ 337. Zu Y G, Ma K M, Zhang X J. A fractal method for analyzing spatial heterogeneity of vegetation ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(3): 333~ 337

## SPATIAL HETEROGENEITY OF SOIL PROPERTIES IN THE DESERTIFICATION PROCESS OF RAINFED FARMLAND IN HORQIN SANDY LAND

Su Yongzhong Zhao Halin Cui Jianyuan

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** This study was carried out to examine the changes of soil physical and chemical properties and their spatial heterogeneity on the rainfed farmland of Horqin Sandy Land in the desertification process using methods of classical statistics and geostatistics. Sixty soil samples of 0~10 cm layer were taken on the 300 m × 90 m scale. The data were analyzed geostatistically to determine the degree and nature of spatial heterogeneity. The results showed that soil particle size distribution developed towards being coarse, soil water holding capacity and porosity distribution deteriorated, and soil organic C and N, P nutrients depleted in the desertification process. The variability of soil parameters increased and the coefficient of variation ranged from 5.9% (bulk density) to 50.7% (organic carbon). Geostatistical analysis revealed that there are clearly regular changes in the pattern of distribution and high degree of spatial variability in soil properties in the desertification of the farmland. Semivariograms and its model well reflected the degree and spatial scale of the development of desertification. In the studied area, the strip of land, where desertification developed inside the edges of the farmland along the longitudinal direction was about 100 m wide. There were close relationships between soil properties and between semivariograms of soil properties, except for pH. Desertification had very significant effect on soil organic carbon and nutrients, whereas, its effect on soil pH was relatively small.

**Key words** Soil properties; Spatial heterogeneity; Semivariogram; Rainfed farmland; Desertification process