

沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小分形 维数空间变异性分析

贾晓红, 李新荣, 张景光, 张志山, 王新平, 谭会娟

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠研究试验站, 兰州 730000)

摘要:通过土壤颗粒大小分形维数对土壤质地定量分析表明,土壤颗粒大小分形维数与沙粒含量($> 0.1\text{mm}$)呈显著的线性负相关,与粘粉粒含量($< 0.05\text{mm}$)呈显著的线性正相关关系($p < 0.0001$),沙粒和粘粉粒含量每增加 1%,分形维数则降低或升高 0.022 个单位,沙粒增加导致分形维数的降低和粘粉粒增加导致分形维数升高幅度一致,所以土壤颗粒分形维数可以作为评价土地沙质荒漠化程度的定量指标之一。荒漠地带以沙冬青为优势种的沙生植被地段,地表土壤颗粒粗粒化和 50~70cm 土层土壤颗粒的细粒化,为该区域有限降水的深层渗漏提供了基质,为沙冬青的存活提供了保障,一定程度上支持了一些专家提出的概念模型,验证了粗质土壤质地支持以灌木为主的群落的假说。但从空间变异性分析来看,荒漠区沙冬青群落因地表物质的吹蚀和堆积过程频繁以及灌丛沙堆发育程度引起的分枝形态差异,导致了土壤颗粒含量空间变异尺度并未集中在冠幅范围,并不支持灌丛在沙漠生态系统对降尘等细颗粒物拦截所形成的“沃岛”作用。正是因为以沙冬青为优势种的沙生植被地段土壤颗粒组成的高度空间异质性,并且空间变异的范围并不局限于灌木冠幅范围和冠幅间的裸地,没有为其它植物种的入侵创造土壤基质条件,才使得沙冬青群落在该区稳定存在,为荒漠残遗植物种——沙冬青的迁地保护和干旱沙区植被恢复过程中合理地利用土壤资源,以避免营林失败等问题提供了理论依据。

关键词:沙冬青; 沙生植被; 土壤颗粒大小分形维数; 空间变异

文章编号:1000-0933(2006)09-2827-07 中图分类号:Q14, S152.3, S154.1 文献标识码:A

Spatial heterogeneity analysis of fractal dimension of soil particle for *Ammopiptanthus mongolicus* shrub

JIA Xiao-Hong, LI Xin-Rong, ZHANG Jing-Guang, ZHANG Zhi-Shan, WANG Xin-Ping, TAN Hui-Juan (Shapotou Desert Research and Experiment Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2827~2833.

Abstract: Based on quantitative analysis of soil texture using soil fractal dimension of particle size distribution, the distribution of soil fractal dimension is a significant negative correlation with sand content ($> 0.1\text{mm}$), and positive correlation with proportion content of silt and clay ($< 0.05\text{mm}$) ($p < 0.0001$). Increasing in sand content can result in decreasing of fractal dimension, and increasing in silt and clay can result in increasing of fractal dimension. However, the variation tendencies in soil fractal dimensions are different because of sand content or silt and clay content changes, while there is a same range on variation of fractal dimension. The fractal dimensions will be decreased or increased by 0.022 when increasing in 1% of sand content or silt and clay. So, soil fractal dimension can be considered to be one of quantitative indices for evaluating desertification. In comparison with soil layer of depth 50~70cm, the texture of surface soil (0~5cm) appears coarser. This characteristic of soil texture distribution in soil profile benefits to rainfall infiltration in deep soil and ensures available moisture for deep rooted *Ammopiptanthus*

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40471006 和 40401004);中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新资助项目(2004113)

收稿日期:2005-07-01; **修订日期:**2006-04-16

作者简介:贾晓红(1973~),女,甘肃康县人,博士生,主要从事干旱区生态学研究。E-mail: jiaxiaohonggs@163.com

Foundation item: The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40471006, 40401004), Innovation Item of Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS (No. 2004113)

Received date: 2005-07-01; **Accepted date:** 2006-04-16

Biography: JIA Xiao-Hong, Ph.D. candidate, mainly engaged in ecology in the arid areas. E-mail: jiaxiaohonggs@163.com

mongolicus and accompanying shrub species. The soil texture distribution in profile partly supported conceptual model by some researchers described, and tested the hypothesis that the coarse-texture soil supports the dominance of shrub species in comparison with herbaceous species. However, spatial heterogeneity analyzed showed that spatial heterogeneous scale of soil particle content beyond the confine of canopy and inter-space of shrubs due to strong wind erosion occurred on soil surface, and the morphological differences in ramification and height of plants result from developing degree of sand mound by shrubs in the psammic vegetation. Furthermore, our results do not supported the hypothesis on 'fertile island' of shrub since shrub roles for fertile island formation were weakened by frequent wind erosion in desert ecosystem. This soil habitat of *Ammopiptanthus mongolicus* community prevent other both woody species and herbaceous from invasion and plays a significant role in maintain community stability. These results can be contributed to knowledge to understand the conversation mechanism of unique Tethys sea relic floristic species.

Key words: *Ammopiptanthus mongolicus*; psammic-vegetation; fractal dimension of soil particle; spatial heterogeneity

有研究认为干旱、半干旱地区的灌木和草本植物种在群落中的优势度与土壤质地相关。大多数土壤类型支持的植物群落以草本为主,只有粗质土壤质地支持以灌木为主的群落^[1]。土壤质地作为土壤的属性之一,影响着土壤水分和养分在土壤中的迁移、分布和利用效率,继而对植被的组成和结构产生重要的影响^[2]。用单个参数替代土壤粒度组成来量化地表征土壤质地特性使得描述变得更简单。土壤分形维数不仅能够表征土壤粒径的大小组成,而且能反映质地均一程度特性^[3]。许多研究表明土壤质地越细,土壤颗粒大小的分形维数越高^[4]。以往的研究都集中在土壤颗粒大小分形维数表征土壤质地差异方面的研究^[3~5,6],将颗粒大小分形维数作为参数进行土壤质地空间分布差异研究却未见报道。本文以草原化荒漠区特有的古老荒漠残遗植物种——沙冬青沙生植被地段为研究对象,以定量地表征土壤粒径大小的分形维数为手段,分析了其在空间上的变异,以验证沙漠生态系统中影响土壤水分、生物活性、养分有效性和空间分布的土壤质地空间上的变异,以及空间上的相关性是否集中在冠幅尺度,形成“沃岛”效应从而加剧了影响植被分布格局的土壤资源的空间异质性的变异程度,有助于了解荒漠地带沙生植被区土壤性状的变异和空间分布格局,对于干旱沙区植被恢复和生态环境整治,特别是对研究我国阿拉善荒漠特有植物种——沙冬青的群落稳定性、合理利用资源和保护资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处腾格里沙漠东南缘的低山残丘覆沙地,覆沙较均匀,覆沙厚约 30cm 左右,以下为粘土质,质地坚硬并有石膏结核,属于荒漠地带的沙生植被区。采样点位于阿拉善左旗的闫地拉图境内,气温为 10.0℃左右,低温极值在 -25.1℃左右,高温极值约 38.1℃,全年日照时数在 2778~2980 h,年降水量在 150~180.2mm,年潜在蒸发量在 2800~3000mm,年均风速约为 2.9m s⁻¹,年均沙暴天数在 55~64d。该区主风向为西北风,次风向为东北风及东风,风力以西北风为最强。该沙生植被区主要植物种由灌木沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*)、霸王 (*Zygophyllum xanthoxylon*)、油蒿 (*Artemisia ordosica*) 组成,零星分布有牛心朴子 (*Pycnostelma lateriflorum*)、沙葱 (*Allium mongolicum* Rg.) 和权枝雅葱 (*Scorzonera divaricata*),群落盖度约为 20%。地下水位在 4m 左右^[7]。因为土壤基质的原因,沙冬青的垂直根系不甚发达,而向水平方向发展,主体根系主要集中于 0~30cm 土层^[8]。

1.2 土壤采样与分析

土壤颗粒组成含量的异质性采样是在相对平坦的沙冬青沙生植被区,随机选择一块 10m × 10m 的样地,采用邻接格子法 (Contiguous grid quadrats) 布设 100 个取样点,其横向与纵向间隔均为 1m,每一取样点的土样分别为 3 个 0~5cm 和 50~70cm 土层的分层混合样。土壤颗粒组成分析用振筛法和吸管法测定^[9]。

1.3 颗粒大小分形维数模型

分形的特点是由颗粒大小分形维数 (又称分维数或分维) 来描述。具有自相似结构的多孔介质土壤由大于某一粒径 d_i ($d_i > d_{i+1}$, $i = 1, 2, \dots$) 的土粒构成的体积 $V(\delta > d_i)$ 可由公式表示^[3,10]:

$$V(\delta > di) = A[1 - (di/k)^{3-D}] \quad (1)$$

式中, δ 为尺码, A 、 k 是描述形状、尺度的常数, D 为颗粒大小分布的颗粒大小分形维数。

通常粒径分析资料是由一定粒径间隔的粒径重量分布表示的。以 $\overline{di}$ 表示两筛分粒径 di 与 $di+1$ 间的粒径平均值, 忽略各粒径间土粒比重 ρ 的差异, 即 $\rho_i = \rho (i=1, 2, \dots)$, 则:

$$W(\delta > \overline{di}) = V(\delta > \overline{di}) \rho = \rho A[1 - (\overline{di}/k)^{3-D}] \quad (2)$$

式中, $W(\delta > \overline{di})$ 为大于 di 的累积土粒重量。以 W_0 为土壤各粒径颗粒重量之和。由定义有 $\lim_{di \rightarrow 0} \overline{di} = 0$, 则由 (2) 式得:

$$W_0 = \lim_{di \rightarrow 0} W(\delta > \overline{di}) = \rho A \quad (3)$$

$$\text{由 (2), (3) 式导出 } W(\delta > \overline{di})/W_0 = 1 - (\overline{di}/k)^{3-D} \quad (4)$$

设 $\overline{d}_{\max}$ 为最大粒径土粒的平均直径, $W(\delta > \overline{d}_{\max}) = 0$, 代入 (4) 式有 $k = \overline{d}_{\max}$ 。由此得出土壤颗粒的重量分布与平均粒径的分形关系式:

$$W(\delta > \overline{di})/W_0 = 1 - (\overline{di}/\overline{d}_{\max})^{3-D} \quad (5)$$

$$\text{或 } (\overline{di}/\overline{d}_{\max})^{3-D} = W(\delta < \overline{di})/W_0 \quad (6)$$

式中, $W(\delta < di)$ 为粒径小于 di 的颗粒累积重量。土壤的颗粒大小分形维数 D 可通过对式 (5) 或式 (6) 取对数后, 再用回归方法求出。

1.4 土壤颗粒大小分形维数空间变异分析

变异函数作为地统计学的基本工具, 用于估计变异函数的公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (7)$$

式中, $N(h)$ 是距离等于 h 时的点对数, $Z(x_i)$ 是在位置 x_i 处的数值, $Z(x_i + h)$ 是在距离 $x_i + h$ 处的数值。

变异函数曲线种类的确定从两方面考虑, 一是根据专业知识从理论上推断或依以往经验来确定, 另一种是以散点图确定曲线的大致类型或初步类型, 与实验变异函数拟合程度的高低主要由决定系数 R^2 反映。

1.5 数据处理

利用 Original 6.0 计算土壤颗粒大小分形维数, 并分析分形维数与各粒级颗粒含量的相关性。土壤的颗粒大小分形维数 D 可通过对式 5 或 6 取对数后, 再用回归方法求出。土壤颗粒大小分形维数和各粒径含量的空间变异数据由地统计学软件 GS+ (Version 5, Gamma Design Software, Michigan, USA) 完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤颗粒大小分形维数和颗粒组成分布的统计特征

运用回归分析法, 由 (5) 式计算出 0~5 cm 和 50~70 cm 共计 200 个土壤的颗粒大小分形维数, 回归分析所得相关系数均在 0.90 以上, 线性相关极显著 ($p < 0.01$)。土壤作为一种具有分形特征的分散多孔介质, 土壤颗粒大小分形维数反映土壤结构几何形体的参数^[3]。由表 1 可知, 该灌丛沙地 0~5cm 土壤质地比 50~70cm 粗。土壤的颗粒大小分形维数 0~5cm 在 1.62~1.89 之间, 而 50~70cm 的在 1.87~2.63 间。在分形维数上表现为沙粒含量越高, 颗粒大小分形维数越低。这个结果与其他研究结果表明土壤质地由粗到细变化, 颗粒大小分形维数由小到大的结论相一致^[3~5]。沙冬青生长地段土壤剖面颗粒分形维数的变化, 反映了该沙地表层土壤质地比 50~70cm 土壤质地较粗, 表层土壤较粗的土壤质地组成有利于有限降水的深层渗漏, 而灌木根系所能到达的深度较细的质地则有利于将下渗水分有效地拦截并储存, 保障了深根系灌木的存活。一定的植物种生长于适宜的土壤上, 土壤与植物间的关系是二者长期生存适应的结果, 以沙冬青为优势植物种的沙生植被地段土壤质地剖面分布的结果大大地支持了 Sala 等提出的灌木的优势地位是由粗质土壤调控的概念模型^[1], 另外因为该生境雨后覆沙地风沙土对水分的渗透与封存作用提高了沙冬青地上部分生长量^[11], 从另一个方面验证了深根性植物种与表土沙粒含量间正相关关系, 揭示了沙冬青在该区长期存在的机理, 为该残遗植物种的迁地保护提供了理论依据。

沙冬青灌丛沙地的 0~5 和 50~70cm 土壤颗粒大小分形维数变异系数均较小,土壤颗粒分布含量的变异系数均为粘粉粒 > 极细沙 > 沙粒。说明干旱沙生植被区强劲的风力作用下,土壤粘粉粒含量变化较大,有部分细沙因为风力作用也因为吹蚀在空间上存在一定的含量差异,沙粒由于风力搬运能力的差异,在空间上的变异不如粘粉粒和极细沙。

地质统计学研究非正态分布的数据可能导致比例效应,将导致变异函数的波动大,从而影响分析结果的可靠性^[12]。因此,利用 SPSS 软件,采用单样本柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫(One-sample Kolmogorov-Smirnov (KS))对 0~5 和 50~70cm 土壤的颗粒分布颗粒大小分形维数和各粒径含量检验表明,土壤的颗粒大小分形维数和部分颗粒含量不符合正态分布(表 1),通过转换后,分析表明均符合正态分布,满足平稳假设,可进行地统计分析。

表 1 0~5cm 和 50~70cm 土壤颗粒组成分布和颗粒大小分形维数统计特征

深度 Depth (cm)	土壤性状 Soil property	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 Std	变异系数 Cv	偏度 Skew	峭度 Kurtosis	分布类型 Distribute	转换 Transform mode
0~5	颗粒大小分形维数 Fractal dimension	1.62	1.89	1.73	0.04	0.02	-0.08	2.56	非正态 Nonnormal	幂 Power
	沙粒 Sand > 0.1	69.32	92.29	86.45	3.10	0.04	-2.20	9.86	正态 Normal	—
	极细沙 Fine sand 0.1~0.05	5.92	20.37	9.94	2.10	0.21	1.79	6.48	正态 Normal	—
	粘粉粒 Silt + clay < 0.05	1.62	10.31	3.61	1.10	0.30	2.44	14.09	非正态 Nonnormal	平方根 Square root
	颗粒大小分形维数 Fractal dimension	1.87	2.63	2.25	0.17	0.07	-0.69	-0.43	非正态 Nonnormal	幂 Power
50~70	沙粒 Sand > 0.1	42.58	83.69	64.80	8.43	0.13	0.58	-0.13	非正态 Nonnormal	对数 Logarithm
	极细沙 Fine sand 0.1~0.05	6.98	18.05	11.76	2.00	0.17	0.76	0.53	正态 Nonnormal	—
	粘粉粒 Silt + clay < 0.05	6.20	47.64	23.44	9.11	0.39	-0.33	-0.58	非正态 Nonnormal	幂 Power
	颗粒大小分形维数 Fractal dimension	1.62	1.89	1.73	0.04	0.02	-0.08	2.56	非正态 Nonnormal	幂 Power

2.2 土壤颗粒组成与颗粒大小分形维数间关系

相关性分析表明,土壤颗粒大小分形维数与沙粒含量(>0.1mm)呈显著的负相关关系 $r = -0.979$ ($p < 0.0001$),而与粘粉粒含量(<0.05mm)呈强正相关关系 $r = 0.983$ ($p < 0.0001$),与极细沙含量(0.1~0.05mm)相关性较弱 $r = 0.287$ 。由沙冬青所组成的荒漠区常绿灌木群落,地表往往具薄层覆沙^[7],加之干旱区较强的风力作用,使得土壤风蚀和堆积过程较为复杂,导致了土壤颗粒大小分形维数与沙粒含量间呈强线性负相关($p < 0.0001$),而与粘粉粒含量间呈强线性正相关($p < 0.0001$),与极细沙无明显的规律。说明在以风蚀为主的沙生植被区,土壤细颗粒物质的损失,损失的是易蚀或可蚀部分,具体来说主要是能随气流飘扬出区域外的悬移质的粉尘(<0.05mm)^[13]。沙生植被区地表粘粉粒的搬用、沉积过程以及沙粒的运移过程极大地影响土壤颗粒大小分形维数,沙粒含量每增加 1%,颗粒大小分形维数 D 降低 0.022;粘粉粒含量每增加 1%, D 增加 0.023(图 1)。因此,分形维数与土壤颗粒组成的这种关系,可以很好地反映土壤颗粒物质的损失状况。鉴于分形维数既是土壤有机质状况的反映^[5,6],又是土壤颗粒物质损失状况的表征,所以土壤颗粒分形维数可以作为评价(衡量)土地沙质荒漠化程度的定量指标之一。

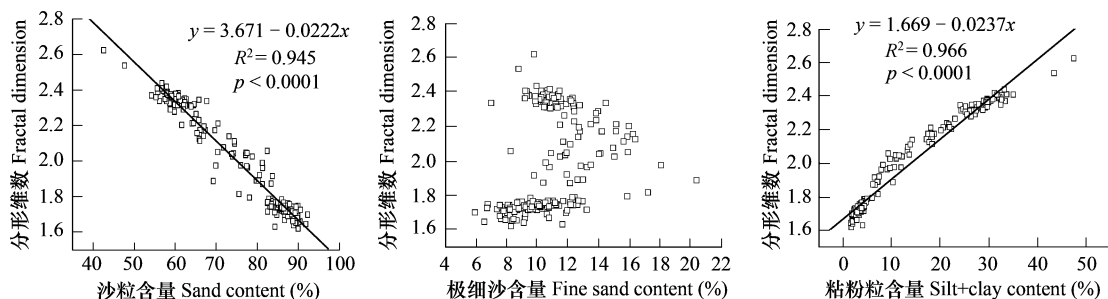


图 1 土壤颗粒各粒径含量与分形维数间关系

Fig. 1 The relationship between content of soil particle size fractions and soil fractal features

2.3 土壤颗粒大小分形维数和不同粒径沙粒含量的空间结构分析

沙冬青所组成的常绿灌木群落地表往往具薄层覆沙,多数属于固定半固定状态^[7],这种特点决定了地表及其下土壤的成土过程,会长期遭受风蚀和堆积。伴随着风蚀过程,沙粒和粘粉粒含量发生了变异。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。土壤因子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 ,nugget)增加到一个相对稳定且较大的基台值($C_0 + C$, sill)。基台值是测定因子的最大变异,当变异函数达到基台值时的空间距离称为变程,即相关距离(a ,correlation length)。变程是测定因子最大变异的空间距离,在变程之内,空间自相关存在,在变程之外,空间自相关消失。因此,变程的大小表示空间异质性的尺度。结果表明,沙冬青植被区 0~5cm 和 50~70cm 土壤颗粒大小分形维数和各粒径含量在研究区域上均存在高度的空间异质性。所测定的土壤因子变异函数模型除了 50~70cm 土层的极细沙含量为指数模型外(有效变程是变程的 3 倍),其余均可用球状模型描述(有效变程为变程的 1 倍)(表 2)。

表 2 土壤颗粒各粒径含量和分形维数的空间变异函数模型及其相关参数
Table 2 Semivariogram model and parameters for soil particle size fractions and fractal features

深度 Depth(cm)		模型 Model	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	变程(m) Effective range	$C/C_0 + C$	决定系数 R^2	RSS
0~5	分形维数 Fractal dimension	Spherical	0.0032	0.0521	30.99	0.939	0.870	4.688×10^{-5}
	沙粒 Sand	Spherical	2.26	24.51	24.33	0.908	0.855	17.6
	极细沙 Fine sand	spherical	1.56	9.129	21.19	0.829	0.876	2.22
	粘粉粒 Silt + clay	Spherical	0.0072	0.2574	30.2	0.972	0.873	1.262×10^{-3}
50~70	分形维数 Fractal dimension	Spherical	380000	3870000	22.30	0.902	0.984	4.828×10^{10}
	沙粒 Sand	Spherical	0.0044	0.418	23.11	0.895	0.979	6.958×10^{-6}
	极细沙 Fine sand	Exponential	3.104	6.209	14.59(43.77)	0.5	0.641	0.711
	粘粉粒 Silt + clay	Spherical	22300	220700	25.92	0.899	0.988	8.745×10^7

* 表中括弧内数据为指数模型的有效变程(有效变程 = 相关距离 $\times 3$) Data in bracket is the effective range of exponential model (effective range = $a \times 3$)

球状模型(spherical model,式(8))和指数模型(exponential model,式(9))适合土壤各粒径含量和颗粒分形维数实际变异函数值。球状模型的变程等于相关距离 a ;而指数模型并不表现出有限变程,但实践中变程值近似用 $3a$ 表示。

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right] \quad h \leq a$$

(8)

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad h \geq a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right)$$

(9)

结果表明(表 2)各粒径含量和颗粒分形维数有效变程,0~5cm 土层为 21.19~30.99m,50~70cm 为 22.3~43.77m 左右。通过变异函数分析,可以清楚地看出各因子在空间上变异的尺度,沙冬青沙生植被土壤颗粒大小分形维数(表征土壤质地)和各粒径含量空间变异尺度,并不是局限于单个灌木冠幅覆盖的范围(沙冬青、霸王和油蒿的平均丛径分别为 93cm、80cm 和 50cm^[7])和冠幅间的裸地,并且表层土壤(0~5cm)各粒径含量和颗粒分形维数的空间变异尺度均分别大于 50~70cm 的,这与地表粗粒化的驱动因子长期作用相关。

Li 等认为,空间异质性主要由两部分组成:即随机部分和自相关部分^[14]。块金值表示随机部分的空间异质性,拱高($C = C_0 + C - C_0$)则表示自相关部分的空间异质性。块金值与基台值之比($C_0/C_0 + C$)反映随机部分的空间异质性占总空间异质性的程度,拱高与基台值之比($C/C_0 + C$)反映自相关部分的空间异质性占总空间异质性的程度。从表 2 可以看出,除了 50~70cm 土层中极细沙含量的自相关部分的空间异质性所占比例为 50 %外,其余各因子自相关部分空间异质性在总空间异质性中所占比例均超过 80 %。自相关部分的空间异质性在 0~5cm 土层中最大为 97.2 % (粘粉粒含量),最小为 82.9 % (极细沙含量);50~70cm 土层中最大为 90.2 % (颗粒大小分形维数),最小为 50 % (极细沙含量)。各因子比较而言,0~5cm 各颗粒组成和分形维

数的自相关部分的空间异质性均大于 50~70cm,但两层土壤中自相关部分空间异质性所占比例大小顺序均为粘粉粒 > 沙粒 > 极细沙。这样的结果表明,沙生植被区土壤各颗粒组成含量空间差异主要是由成土母质(风成沙)、气候等非人为的区域因素(空间自相关部分)导致的粘粉粒和沙粒含量差异造成。在长期的吹蚀和堆积过程中,该区主风向(西北风)和次风向(东北风及东风)以及风力强度以西北风为最强^[15]的影响下,沙生植被区土壤 0~70cm 土层表现出相同的空间自相关的变异性。

结合土壤各粒径含量空间变异的尺度和引起变异因素分析,说明以沙冬青为优势种的覆沙沙生植被带土壤颗粒组成含量的变异主要是由自相关部分引起的,其中自相关部分的空间异质性所占比例高达 85 %以上(除 50~70cm 的极细沙为 50 %),空间变异尺度在 21.19~43.77m,大于灌木的平均冠幅,并未反映灌木的局部效应。尽管覆沙地风沙土对雨后水分的渗透与封存作用提高了沙冬青地上部分生长量^[11],但沙冬青生长地生境裸露的地表和沙粒的频繁活动,使得降尘等细粒物质无法截存或并未在冠幅下聚集,从而未形成灌木的“沃岛”效应。这与大多数研究认为沙漠生态系统灌木拦截降尘、降低雨滴溅蚀等从而导致冠幅下细粒物质的增多相矛盾^[16~20],这可能与地表物质的稳定性程度有关,另外也可能与该生境上沙冬青优势种和其伴生灌木种的生长寿命较短不存在“沃岛”效应有关系^[21],当然也可能因沙冬青形成灌丛沙堆发育程度不同而导致的萌蘖生长分枝较为稀疏以及株体较高^[22]相关。而荒漠地带的沙生植物——沙冬青能在该区稳定存在,正是因为其未能形成类于干旱、半干旱沙区灌木种的“沃岛”效应使灌木冠幅下土壤颗粒组成变细,就为其它植物种的入侵设置了障碍。但恰恰就是该沙生植被地段沙冬青群落土壤资源并未形成灌木的“沃岛”效应,未导致影响该植物种存活生境如影响养分、水分吸收和分布的土壤质地剖面变化,也就为维持深根性沙冬青灌木存活创造了条件,才解释了该植物种在该区长期稳定存在的原因,即高度异质的土壤基质为沙冬青的稳定存在创造了有利的条件。

3 结论

通过土壤颗粒大小分形维数对土壤质地定量分析表明,土壤颗粒大小分形维数与沙粒含量(>0.1mm)呈显著的线性负相关,与粘粉粒含量(<0.05mm)呈显著的线性正相关关系($p < 0.0001$),沙粒和粘粉粒含量每增加 1 %,分形维数则降低或升高 0.022 个单位,沙粒增加导致分形维数的降低和粘粉粒增加导致分形维数升高幅度一致,所以土壤颗粒分形维数可以作为评价土地沙质荒漠化程度的定量指标之一。荒漠地带以沙冬青为优势种的沙生植被地段,地表土壤颗粒粗粒化和 50~70cm 土层土壤颗粒的细粒化,为该区有限降水的深层渗漏提供了基质,为沙冬青及其伴生灌木种的存活提供了保障,一定程度上支持了一些专家提出的概念模型,验证了粗质土壤质地支持以灌木为主的群落的假说。但从空间变异性分析来看,荒漠区沙冬青群落因地表物质的吹蚀和堆积过程频繁以及灌丛沙堆发育程度引起的分枝形态差异,导致土壤颗粒含量空间变异尺度并未集中在冠幅范围,并不支持灌丛在沙漠生态系统对降尘等细粒物质拦截所形成的“沃岛”作用。正是因为以沙冬青为优势种的沙生植被地段土壤基质高度空间异质性,并且空间变异的范围并不局限于灌木冠幅范围和冠幅间的裸地,没有为其它植物种的入侵创造土壤基质条件,才使得沙冬青群落在该区稳定存在,为荒漠残遗植物种——沙冬青的迁地保护和干旱沙区植被恢复过程中合理地利用土壤资源,以避免营林失败等问题提供了理论依据。

References:

- [1] Sala O E, Lauenroth W K, Golluscio R A. Plant functional types in temperate semi-arid regions. 217~233. In: Smith, T. M., Shugart, H. H. & Woodward, F. I. (eds), *Plantfunctional types*. Cambridge:Cambridge University Press, 1997.
- [2] Stark J M. Causes of soil nutrient heterogeneity at different scales, in: Caldwell M. M., Pearcy R. W. eds., *Exploitation of environmental Heterogeneity by plants. Eco-physiological processes above- and belowground*, San Diego, California:Academic Press, 1994. 255~284.
- [3] Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal feature of soil on expression by weight distribution of particle size. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20):1896~1899.
- [4] Li D C, Zhang T L. Fractal Features of Particle Size Distribution of Soils in China. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(4):263~265.

- [5] Su Y Z, Zhao H L. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1) :71~75.
- [6] Zhao W Z, Liu Z M, Cheng G D. Fractal dimension of soil particle for sand desertification. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5) :877~881.
- [7] Compositive review procession of Ning Xia and Inner Mongolia, Inner Mongolia vegetation. Beijing: Scientific Press, 1985. 694~698.
- [8] Liu J Q, Qiu M X, Yang K, *et al.* Studies on the plant community of *Ammopiptanthus Mongolicus*. *Journal of Desert Research*, 1995, 15(2) : 109~115.
- [9] Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. *Physical and Chemical Analysis Methods of Soils*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Press, 1978. 7~59.
- [10] Turcotte D L. Fractal fragmentation. *J. Geography. Res.*, 1986, 91(12) :1921~1926.
- [11] Wang Y D, He Q F, Wang X D, *et al.* The survey of the growth, renew, and the discussion of utilization prospect on the native *Ammopiptanthus mongolicus* shrub. *Science and Technology of Agriculture and Forestry in Ningxia*, 2004, 3:28~31.
- [12] Journel A G, Huijbregts C J. *Mining geo-statistics*. London: Academic Press, 1978.
- [13] Zhu Z D, Chen G T, *et al.* Sandy desertification in China. Beijing: Scientific Press, 1994. 157~179.
- [14] Li H, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*, 1995, 73:280~284.
- [15] Li J G. Climatic characteristics in Shapotou area. In: Shapotou Desert Research and experiment station, CAS, eds. *Research of Shifting sand control in the Shapotou region of Tengger Desert 2*. Yingchuan: Ningxia People's Publishing House, 1991. 417~424.
- [16] Garner W, Steinberger Y. A proposed mechanism for the formation of "Fertile Island" in the desert ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 1989, 16: 257~262.
- [17] Elkins N Z, Sabol G V, Ward T J, Withford W G. The influence of termites on the hydrological characteristics of a Chihuahuan desert ecosystem. *Oecologia*, 1986, 68: 521~528.
- [18] Coppinger K D, Reiners W A, Burke I C, Olson R K. Net erosion on a sagebrush steppe landscape as determined by cesium-137 distribution. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55: 254~258.
- [19] Li X R. Influence of variation of soil spatial heterogeneity on vegetation restoration. *Science in China (Ser. D). Earth Sciences*, 2005, 35(4) :361~370.
- [20] William H. Schlesinger. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, 77(2) : 364~374.
- [21] Hirobe M, Ohte N, Karasawa N, *et al.* Plant species effect on the spatial patterns of soil properties in the Mu us Desert ecosystem, Inner Mongolia, China. *Plant Soil*, 2001. 234:195~205.
- [22] Yu Q S, Wang J H, Li C L, *et al.* A preliminary study on the distribution patterns and characteristics of *Ammopiptanthus mongolicus* populations in different desert environment. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29 (4) : 591~598.

参考文献:

- [3] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. *科学通报*, 1993, 38(20) :1896~1899.
- [4] 李德成, 张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究. *土壤与环境*, 2000, 9(4) :263~265.
- [5] 苏永中, 赵哈林. 尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征. *生态学报*, 2004, 24(1) :71~75.
- [6] 赵文智, 刘志明, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征. *土壤学报*, 2002, 39(5) :877~881.
- [7] 中国科学院内蒙古宁夏综合考查队. *内蒙古植被*. 北京: 科学出版社, 1985. 694~698.
- [8] 刘家琼, 丘明新, 杨堃, 等. 沙冬青植物群落研究. *中国沙漠*, 1995, 15(2) :109~115.
- [9] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤理化分析*. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 7~59.
- [11] 王有德, 何全发, 王兴东, 等. 天然沙冬青生长、更新状况调研及利用前景探讨. *宁夏农林科技*, 2004, 3:28~31.
- [13] 朱震达, 陈广庭, 等. *中国土地沙质荒漠化*. 北京: 科学出版社, 1994. 157~179.
- [15] 李金贵. 沙坡头地区气候特征. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究 2, 银川: 宁夏人民出版社, 1991. 417~424.
- [19] 李新荣. 干旱沙区土壤空间异质性变化对植被恢复的影响. *中国科学 D 辑*, 2005, 35(4) :361~370.
- [22] 尉秋实, 王继和, 李昌龙, 等. 不同生境条件下沙冬青种群分布格局与特征的初步研究. *植物生态学报*, 2005, 29(4) :591~598.