

内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性

白永飞¹, 许志信², 李德新²

(1. 中国科学院植物研究所植被数量生态学开放研究实验室, 北京 100093; 2. 内蒙古农业大学 呼和浩特 010018)

摘要:用地统计学的方法, 研究比较了内蒙古高原 4 类地带性针茅草原群落, 贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)群落、大针茅(*S. grandis*)群落、克氏针茅(*S. krylovii*)群落和小针茅(*S. klemenzii*)群落 0~20cm 土壤水分和碳、氮的小尺度空间异质性特征, 结果表明: 4 类群落土壤水分、有机碳和全氮均表现出显著的小尺度空间结构特征, 自相关尺度为 1.91m~10.81m, 结构性方差占样本方差的 35.31%~99.74%。从贝加尔针茅群落到小针茅群落空间自相关的尺度逐渐增大, 纹理有逐渐变粗的趋势。土壤水分、碳和氮的小尺度空间格局共同作用于群落的生态学过程, 即土壤水分格局→植物种群格局(基本斑块的大小)→土壤碳空间格局→土壤氮空间格局。同时, 由于生态学过程的反馈作用, 土壤氮空间格局→种群格局→土壤水分格局。土壤属性空间自相关尺度的改变可能是导致群落演替的驱动力, 草原退化可能与土壤异质性尺度的改变相关。

关键词: 针茅草原; 土壤水分、碳、氮; 空间异质性; 半方差分析; 空间自相关

On the Small Scale Spatial Heterogeneity of Soil Moisture, Carbon and Nitrogen in *Stipa* Communities of the Inner Mongolia Plateau

BAI Yong-Fei¹, XU Zhi-Xin², LI De-Xin² (1. Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, CAS, Beijing 100093, China; 2. Inner Mongolia Agriculture University, Huhhot 010018, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1215~1223.

Abstract: Grassland Vegetation in Inner Mongolia Plateau is the main part of the central Eurasian Steppe region. The gradient distribution of precipitation and temperature is the main factor that affects the zonal distribution of grassland vegetation in the Plateau. Grassland vegetation in the plateau can be divided into three sub-vegetation zones: meadow steppe, typical steppe, and desert steppe. They are distributed successively from the east to the west with the increase in temperature and decrease in precipitation. Among them, Form. *Stipa baicalensis* in the meadow steppe, Form. *Stipa grandis* and Form. *Stipa krylovii* in the typical steppe, and Form. *Stipa klemenzii* in the desert steppe are representative communities of *Stipa* steppe in the plateau. In this paper, we designed the present study to address the general need for basic information about soil resource heterogeneity and to address the specific need for information about heterogeneity in grassland ecosystems in the Inner Mongolia plateau.

Our study sites were located at Ewenke Qi, Xiwu Qi, Abaga Qi and Damao Qi respectively, the typical areas of *Stipa steppe* in the Inner Mongolia Plateau. They are dominated by four *Stipa* species, i. e. *S. baicalensis*, *S. grandis*, *S. krylovii*, and *S. klemenzii* respectively. We established an 8m×12 m plot in each of the 4 sites. In each case, we attempted to sample a level and apparently topographically uniform field site to avoid anisotropic effects. In each plot, a sampling grid of 40 points was established at two spatial scales. First, the plot was divided into 24 cells, each 2m×2m in size, and a sampling point was

基金项目: 国家重大基础研究资助项目(G2000018607); 中国科学院知识创新工程重大项目资助项目(KSCX1-08)

收稿日期: 2000-09-20 日期: 2002-01-25

作者简介: 白永飞(1966~), 男, 内蒙古正蓝旗人, 博士, 副研究员。主要从事草原生态学研究。

located randomly in each cell. One additional point was cast randomly to locate a $2\text{m} \times 2\text{m}$ subplot in the 8×12 plot. It was divided into 16 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ cells. Each sample was a 4.5cm diameter soil core taken from 0 to 20 cm depth. Soils were sampled over a 20d period in the mid August. This corresponds with the approximate time of peak aboveground standing crop in each site.

We use geostatistics to describe the spatial variation in soil moisture, carbon and nitrogen in different *Stipa* communities by calculation of semi-variogram, which shows the average variance found in comparisons of samples taken at increasing distance interval. Spherical model was used to fit the form of semi-variogram. The results showed that within-site variability of three soil properties (soil water, organic carbon and total nitrogen) were highly spatially dependent for all experiment sites. The distance of spatial autocorrelation in soils properties increased across four *Stipa* communities from *S. baicalensis*, *S. grandis*, *S. krylovii*, to *S. klemenzii*. This suggests a trend that the distance of spatial autocorrelation in soils becomes longer, while the grain becomes coarser across the *Stipa* communities from *S. baicalensis*, *S. grandis*, *S. krylovii*, to *S. klemenzii*. Geostatistics indicate that 35.31%~99.71% of the variation in soil water in the four *Stipa* communities is found within distances from 2.96~10.81m; 63.33%~98.73% of variation in soil organic carbon is found within distances from 1.91~4.12m; and 76.67%~99.74% of variation in soil total nitrogen is found within distances from 2.91~6.20m in the four communities. The small-scale spatial variation in soil properties may affect patterns and processes of grassland ecosystems, i.e. soil moisture pattern $\rightarrow$ vegetation patch $\rightarrow$ soil carbon pattern $\rightarrow$ soil nitrogen pattern. As a result of feedback from ecological processes soil nitrogen pattern may affect the dynamics of vegetation patch and soil moisture pattern. Changes in spatial pattern of soil properties can be a major force for community succession and a useful index for grasslands degradation under the effects of human activities, especially overgrazing.

Key words: Inner Mongolia Plateau; *Stipa* communities; soil moisture; carbon and nitrogen; small-scale heterogeneity; semi-variance analysis; spatial autocorrelation

文章编号:1000-0933(2002)08-1215-09 中图分类号:S812 文献标识码:A

近年来,生态学研究中的异质性(heterogeneity)问题受到生态学家的广泛关注,生境的异质性,尤其是土壤要素的空间分布格局成为异质性研究的一个重要领域,国外学者已有大量研究报道^[1~18]。如, Schlesinger 等研究表明,在干旱和半干旱草原土壤中,各种过程特别是长期过度放牧引起的空间异质性是导致这些群落被荒漠灌木侵入的主要因素。侵入的灌木进一步在其灌丛下聚集养分,从而导致了土壤中“肥力岛”(islands of fertility)的发育,促进了这些灌木在群落中的定居,加速了被荒漠灌木入侵草地的荒漠化^[19]。他们认为,当今全球范围内的灌丛荒漠和干旱草原生态系统均具有这种特征^[20,21]。Hook 等研究发现,半干旱草原土壤氮素具有小尺度格局,草原群落灌丛化可能与土壤异质性尺度的变化有关,而不是与群落最初的异质性发展有关^[22]。

内蒙古高原的草原植被是我国连片分布最大的草原区,也是欧亚大陆草原区亚洲中部草原亚区的重要组成部分。以针茅属植物(*Stipa* spp.)为建群种所组成的地带性群落,是欧亚大陆草原区最典型的地带性植物群落,是内蒙古高原地带性草原植被的主体。受气候和土壤条件的地带性分异的影响,内蒙古高原的针茅草原具有明显的地带性分布特征,前人对此做过大量的研究工作^[23]。在较小的空间尺度上,由于受微地形、放牧干扰和生物地球化学循环等作用的影响,在各类针茅草原群落内部又具有小尺度土壤养分分布、土壤水分分配以及植物斑块分布格局的空间异质性,这种小尺度的空间异质性可能是维持较大尺度的群落生物多样性、初级生产力和稳定性的重要因素,小尺度的土壤养分和土壤水分空间分布格局的改变可能是导致草原群落向不同方向演替的主要驱动力。目前这方面尚未引起国内研究者的足够重视。

鉴于以上认识,本文用地统计学的方法分析比较了内蒙古高原 4 类地带性针茅草原群落土壤碳、氮和

水分的小尺度空间异质性特征,目的在于为进一步研究异质性与生态学过程的关系,揭示草原生态系统对人类干扰和全球气候变化的响应机制提供依据。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 试验地设置与自然概况

分别选择贝加尔针茅草原、大针茅草原、克氏针茅草原和小针茅草原代表性群落的典型地段,设置观测样地。为保证各样地在利用强度上的相对一致性,4类群落的观测样地均选择在利用较轻的冷季放牧场,各样地的自然概况见表1,植物种类组成如下:

贝加尔针茅群落样地内记载的高等植物共64种。其中,多年生杂类草48种,多年生禾草和苔草10种,1、2年生草类4种,灌木和小半灌木各1种。主要植物有:贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、羊草(*Leymus chinensis*)、羊茅(*Festuca ovina*)、线叶菊(*Filifolium sibiricum*)、麻花头(*Serratula centauroides*)和脚苔草(*Carex pediformis*)等。

大针茅群落样地内记载的高等植物共43种。其中,多年生杂类草32种,多年生禾草和苔草8种,半灌木和小半灌木各1种,1年生草类1种。主要植物有:大针茅(*Stipa grandis*)、羊草、知母(*Anemarrhena asphodeloides*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、并头黄芩(*Scutellaria scordifolia*)、洽草(*Koeleria cristata*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)和寸草苔(*Carex duriuscula*)等。

克氏针茅群落样地内记载的高等植物共38种。其中,多年生杂类草19种,多年生禾草和苔草7种,1、2年生草类8种,灌木2种,半灌木和小半灌木各1种。主要植物有:克氏针茅(*Stipa krylovii*)、冷蒿、糙隐子草、冰草(*Agropyron cristatum*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、柔毛蒿(*Artemisia pubescens*)等。

小针茅群落样地内记载的高等植物共28种。其中,多年生杂类草17种,1、2年生草类6种,多年生禾草和苔草2种,灌木1种,半灌木和小半灌木各1种。主要植物有:小针茅(*Stipa klemenzii*)、碱韭(*Allium polyrhizum*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)、阿氏旋花(*Convolvulus ammannii*)和葩齿蒿(*Neopallasia pectinata*)等。

表1 观测样地基本情况

Table 1 Environmental conditions of the field sites				
项目 Items	贝加尔针茅群落 <i>S. baicalensis</i>	大针茅群落 <i>S. grandis</i>	克氏针茅群落 <i>S. krylovii</i>	小针茅群落 <i>S. klemenzii</i>
行政区域 Location	鄂温克旗 Ewenke Qi	西乌旗 Xiwu Qi	阿巴嘎旗 Abaga Qi	达茂旗 Damao Qi
经度 Longitude	119°47'48"E	117°37'5"E	114°52'0"E	110°36'32"E
纬度 Latitude	48°52'30"N	44°33'0"N	44°00'5"N	42°05'40"N
海拔高度 Elevation (m)	743	1 150	1 139	1 050
土壤类型 Soil type	暗栗钙土 Chestnut soil	暗栗钙土 Chestnut soil	栗钙土 Chestnut soil	棕钙土 Brown soil
年平均气温 Average annual temperature (℃)	-1.9±0.8	1.1±0.5	1.0±0.6	4.7±0.7
年降水量 Average annual precipitation(mm)	330.0±63.0	329.7±62.1	242.0±41.0	174.8±38.5

1.2 取样方法

在各样地内选择微地形条件一致且地势平坦的部位,用12×8m²网格样方,内含2×2m²网格24个。在12×8m²样方内再随机设置一个2×2m²样方,内含0.5×0.5m²网格16个。先对每个网格编号,然后用直径4cm土钻在每个网格内随机钻3个孔,取得0~20cm混合分析土样(500g)和0~10cm,10~20cm,20~30cm的土壤含水量样品。室内用电子天平(0.01g)称量土壤含水量样品的湿重、烘干重(105℃)和铝盒重。分析土样风干后保存。

1.3 实验室分析数据

在实验室先对风干后的样品进行研磨过筛(1mm),用K₂Cr₂O₇容量法测定土壤有机碳含量,用凯氏

(Kjeldahl)法测定土壤全氮含量。

1.4 半方差分析模型

对测定的样品数据,用半方差分析(semivariance analysis)方法计算其空间异质性特征,半方差函数的计算公式为:

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

式中, $\gamma(h)$ 是半方差函数, h 为两样本间的分离距离, $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h)$ 分别随机变量 z 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的取值, $N(h)$ 为在分离距离为 h 时的样本对总数。

对所有可能的距离间隔计算半方差后,就可绘制半方差函数图(semi-variogram)。半方差函数图的理论解释为:当土壤属性呈随机分布时(图 1,a),半方差图表现为纯块金方差图;当土壤属性在变程内存在空间自相关,在变程以外独立于样本点的间隔距离时,半方差函数可用球状模型(spherical model)描述(图 1,b);当土壤属性在取样尺度内不存在局部格局,而可能受更大尺度的格局控制时,半方差函数表现为线性模型(图 1,c)。 $C/(C+C_0)$ 为结构性方差占样本方差的比例,它反映了随机变量的结构性(空间依赖性)特点。在本项研究中,半方差函数的计算采用了球状模型:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + (b - C_0)[1.5(h/A_0) - 0.5(h/A_0)^3] & 0 < h \leq A_0 \\ \gamma(h) &= b & h > A_0 \\ \gamma(0) &= 0 \end{aligned}$$

式中, $\gamma(h)$ 是半方差, C_0 是块金常数, b 是基台值, A_0 是变程。

2 结果与分析

2.1 土壤水分的空间结构特征

群落内土壤水分的小尺度空间分布特征通常是造成植被空间异质性的主要原因之一。受当地降水及其分配状况的影响,群落在某一时期土壤水分含量通常难以用于间隔距离较大的群落间的比较(表 2),但其土壤水分分布的结构特征却能为我们分析群落间这种特征的差异,以及与之相关的生态学过程提供有用的信息。半方差分析结果表明,在分辨率水平为 0.5m~7m 的范围内,贝加尔针茅群落和大针茅群落 0~20cm 土壤水分的分布均具有显著的空间依赖性。贝加尔针茅群落在间隔距离小于 2.96m 的范围内,样本点间存在空间自相关,其结构性方差占据了 99.71% 的样本方差。大针茅群落的空间自相关尺度为 3.45m,在此间隔距离范围内样本点间存在空间自相关,结构性方差占样本方差的 51.12%。克氏针茅群落和小针茅群落在 0.5~7m 的范围内不反映格局的尺度,而可能受更大尺度的空间格局所控制。大针茅群落、克氏针茅群落和小针茅群落均具有较高的块金常数值,其方差分别占样本方差的 48.88%、64.69% 和 26.79%,说明这 3 类群落中可能存在更小尺度(如株丛尺度)的土壤水分空间格局(表 3、图 2)。

2.2 土壤碳的空间结构特征

内蒙古高原针茅草原土壤有机碳素含量与水分梯度一致,从贝加尔针茅群落、大针茅群落、克氏针茅群落到小针茅群落土壤有机碳含量显著降低。4 类群落 0~20cm 土壤有机碳含量分别为 17.704 g·kg⁻¹、13.268 g·kg⁻¹、7.295 g·kg⁻¹ 和 4.677 g·kg⁻¹,贝加尔针茅群落的土壤有机碳含量为小针茅群落有机碳含量的 3.8 倍(表 4)。

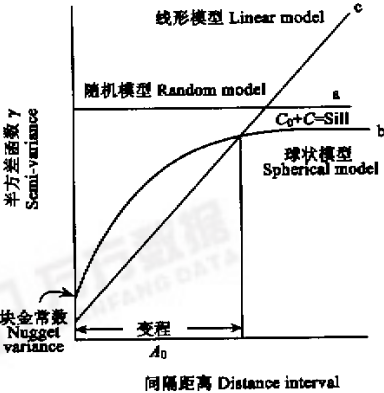


图 1 半方差函数模型(引自 Schlesinger 等,1996)
Fig. 1 Theoretical interpretation of semi-variograms
(Compiled from Schlesinger *et al.* 1996)

表 2 各群落 0~20cm 土壤水分特征

Table 2 Soil moisture(0~20cm) characteristics across the study sites

群落类型 Community type	均值 Mean	标准差 SD	变异系 数 CV	极差 Range	
	(%)		(%)	最小值 Min.	最大值 Max.
贝加尔针茅群落 ^①	4.92	0.56	11.42	3.70	6.10
大针茅群落 ^②	18.32	0.98	5.34	15.94	19.96
克氏针茅群落 ^③	6.90	0.54	7.87	5.75	8.04
小针茅群落 ^④	3.30	0.35	10.59	2.46	4.02

① *S. baicalensis*; ② *S. grandis*; ③ *S. krylovii*; ④ *S. klemenzii*

表 3 土壤水分空间分布的球状模型半方差统计参数

Table 3 Spherical model geostatistics of semi-variograms expressing the distribution of soil moisture in the study sites

群落类型 Community type	C_0	$C/(C+C_0)$	A_0	$C+C_0$	R^2
加尔针茅群落 ^①	0.0010	0.9971	2.96	0.3390	0.527
大针茅群落 ^②	0.4820	0.5112	3.45	0.9860	0.215
克氏针茅群落 ^③	0.2164	0.3531	>6.99	0.3345	0.219
小针茅群落 ^④	0.0516	0.7321	10.81	0.1926	0.387

① *S. baicalensis*; ② *S. grandis*; ③ *S. krylovii*; ④ *S. klemenzii*

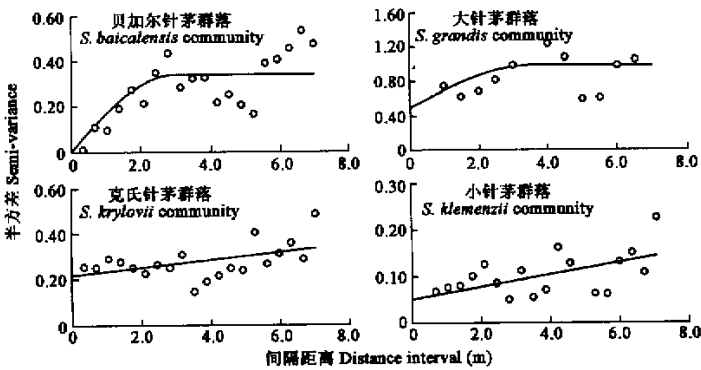


图 2 各群落土壤水分空间分布半方差图

Fig. 2 Semi-variograms of soil moisture across the study sites

从半方差分析结果可以看出,4类群落 0~20cm 土壤有机碳含量均存在显著的空间结构特征,结构性方差占样本方差的 52.17%~98.73%,从贝加尔针茅群落、大针茅群落、克氏针茅群落到小针茅群落空间自相关尺度逐渐增大,分别为 1.91 m、2.56 m、3.54 m、和 4.12 m。贝加尔针茅群落、大针茅群落和克氏针茅群落有较高的块金常数,分别占样本方差的 22.39%、47.83%和 36.67%,表明这 3 类群落的土壤碳素可能存在更小尺度(<50cm)的空间格局(表 5、图 3)。

表 4 各群落 0~20cm 土壤有机碳含量及分布特征

Table 4 Soil organic carbon (0~20cm) characteristics across the study sites

群落类型 Community type	均值 Mean	标准差 SD	变异系 数 CV	极差 Range	
	(g·kg ⁻¹)		(%)	最小值 Min.	最大值 Max.
贝加尔针茅群落 ^①	17.704	1.443	8.149	15.230	21.230
大针茅群落 ^②	13.268	1.369	10.318	10.500	16.800
克氏针茅群落 ^③	7.295	1.069	14.657	4.730	10.590
小针茅群落 ^④	4.677	0.994	21.242	3.560	6.830

① *S. baicalensis*; ② *S. grandis*; ③ *S. krylovii*; ④ *S. klemenzii*

表 5 土壤有机碳空间分布的球状模型半方差统计参数

Table 5 Spherical model geostatistics of semi-variograms expressing the distribution of soil organic carbon in the study sites

群落类型 Community type	C_0	$C/(C+C_0)$	A_0	$C+C_0$	R^2
加尔针茅群落 ^①	0.0015	0.7761	1.91	0.0067	0.266
大针茅群落 ^②	0.0055	0.5217	2.56	0.0115	0.388
克氏针茅群落 ^③	0.0077	0.6333	3.54	0.0210	0.216
小针茅群落 ^④	0.0007	0.9873	4.12	0.0552	0.821

① *S. baicalensis*; ② *S. grandis*; ③ *S. krylovii*; ④ *S. klemenzii*

注:建模前对原始数据进行了对数正态分布转换[$z'=\ln(z)$]。
Calculated following lognormal transformation [$z'=\ln(z)$] of original values

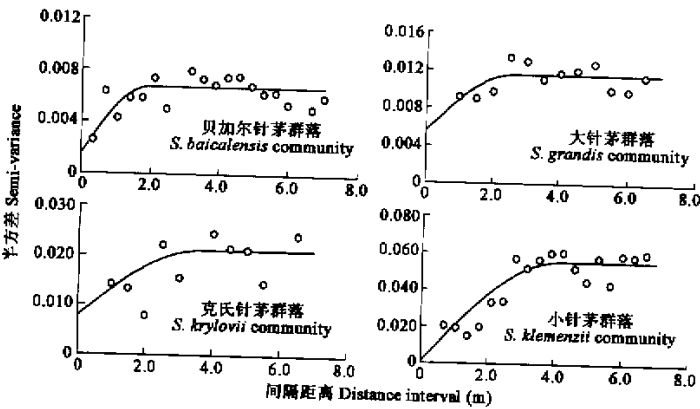


图3 各群落土壤有机碳空间分布半方差图

Fig. 3 Semi-variograms for soil organic carbon across the study sites

2.3 土壤氮的空间结构特征

土壤全氮在内蒙古高原针茅草原的分布趋势与土壤碳的分布趋势基本一致,从东北向西南逐渐递减。4类群落中贝加尔针茅群落的土壤全氮含量最高,为 $1.998\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。大针茅群落和克氏针茅群落次之,分别为 $1.841\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.293\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。小针茅群落的土壤全氮含量最低,仅 $0.806\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表6)。

表7的结果表明,4类群落0~20cm土壤全氮含量均具有显著的空间依赖性,结构性方差占样本方差的76.67%~99.74%,从贝加尔针茅群落到小针茅群落变程(A_0)逐渐增大,贝加尔针茅群落为2.91m,而小针茅群落为6.2m。克氏针茅和小针茅群落还存在<50cm的空间格局,其方差分别为样本方差的23.33%和19.35%(图4)。

表6 各群落0~20cm土壤全氮含量及分布特征
Table 6 Soil total nitrogen (0~20cm) characteristics across the study sites

群落类型 Community type	均值 Mean ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差 SD	变异系数 CV (%)	极差 Range	
				最小值 Min.	最大值 Max.
贝加尔针茅群落 ^①	1.998	0.309	15.488	1.110	2.670
大针茅群落 ^②	1.841	0.502	27.253	1.120	3.940
克氏针茅群落 ^③	1.293	0.335	25.949	0.760	2.290
小针茅群落 ^④	0.806	0.176	21.832	0.480	1.440

①*S. baicalensis*;②*S. grandis*;③*S. krylovii*;
④*S. klemenzii*

表7 土壤氮空间分布的的球状模型半方差统计参数
Table 7 Spherical model geostatistics of semi-variograms expressing the distribution of soil total nitrogen in the study sites

群落类型 Community type	C_0	$C/(C+C_0)$	A_0	$C+C_0$	R^2
贝加尔针茅群落 ^①	0.0009	0.9167	2.91	0.0108	0.506
大针茅群落 ^②	0.0001	0.9974	4.40	0.0389	0.784
克氏针茅群落 ^③	0.0056	0.7667	4.90	0.0240	0.418
小针茅群落 ^④	0.0024	0.8065	6.20	0.0124	0.502

①*S. baicalensis*;②*S. grandis*;③*S. krylovii*;
④*S. klemenzii*; * 建模前对原始数据进行了对数正态分布转换[$z'=\ln(z+1)$]. Calculated following lognormal transformation[$z'=\ln(z+1)$] of original values

3 讨论

空间上的结构性和等级特征是生态学系统的一个重要属性。可以说,没有空间上的结构性就没有生态学系统的功能。地统计学方法是定量地研究上述问题的一个有力工具,它可以同时回答3个空间异质性研究中的基本问题:1)具有重要生物学意义的变量的变化范围;2)空间因素占总变异的比例;3)特定的空间格局所对应的尺度。在此基础上,可以进一步分析空间格局与生态学过程的关系。内蒙古高原4类地带性针茅草原群落中,从贝加尔针茅群落、大针茅群落、克氏针茅群落到小针茅群落土壤水分状况逐渐变差,土壤有机碳和全氮含量显著降低。这与4类群落物种多样性、生产力及其稳定性所反映的趋势是完全一致的^[24,25]。同类研究也表明,土壤有机碳含量对草原群落的物种丰富度、植物功能群组成和初级生产力具有

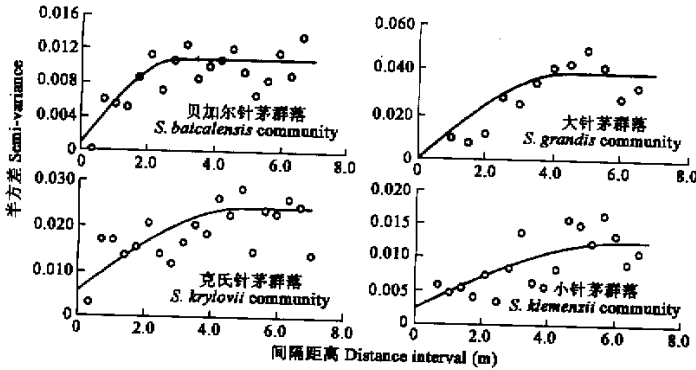


图 4 各群落土壤全氮空间分布半方差图

Fig. 4 Semi-variograms for soil total nitrogen across the study sites

很好的预测能力^[26]。

从贝加尔针茅群落到小针茅群落土壤水分空间自相关尺度逐渐增大,这表明 4 类群落土壤水分的小尺度空间异质性逐渐降低,纹理逐渐变粗(图 2)。土壤水分空间结构特征主要受土壤性状的影响。李绍良研究表明,土体厚度愈大,贮水量也愈多,土壤抗旱能力就越强。此外,当钙积层出现的部位高而又紧实时,也会恶化土壤水分性状,造成一个干燥的生境^[27]。Heather 等认为,由于土体厚度不同以及凸凹的地表形态而形成的不同尺度的土壤斑块,可能是草原土壤普遍具有的特征^[28]。4 类针茅草原群落中,不同生活型及生态类群的植物通常分布在不同的生境部位上,与土体厚度和钙积层相关联的小尺度土壤水分梯度可能是土壤异质性的主要来源,也是影响植物分布与群落物种多样性的重要因素。尽管土壤水分的结构特征与植物种群的格局规模不一定是完全对应的,但它们所反映的变化趋势是一致的。因为植物种群的分布格局除受土壤水分空间格局的影响外,还与土壤养分的分布及植物本身的生物学特性有关。因此,可以推断土壤水分的小尺度空间分布格局,不仅决定了群落或种群基本斑块的大小,而且对植物个体、种群及群落水平的生态学过程也有着重要的影响。如,种子及幼苗的形成、克隆植物的觅食行为及其形态学可塑性、Meta-种群的动态、群落生物多样性和初级生产力等。

4 类群落土壤有机碳和全氮含量的小尺度空间结构特征与土壤水分空间格局所反映的趋势是一致的,从贝加尔针茅群落到小针茅群落变程(A_0)逐渐增大,为 1.9~6.2m。在取样尺度范围内,4 类群落土壤有机碳的空间自相关尺度均小于土壤水分的空间自相关尺度,而土壤全氮的空间自相关尺度则介于土壤水分和有机碳空间自相关尺度之间。Palmer 发现,美国 North Carolina 森林土壤中大部分元素的空间自相关尺度小于 5m^[29]。Lechowicz 和 Bell 发现,加拿大 Quebec 南部森林土壤中 pH、K、NO₃ 的空间自相关尺度小于 2m^[30]。Schlesinger 等研究发现,覆盖较均匀的草地土壤的空间自相关距离要大于森林和灌丛,毛格兰马草(*Bouteloua eriopoda*)草地土壤氮素在小于 20cm 和 20~700cm 两个尺度上均具有空间结构特征^[31]。Robertson 研究表明,弃耕地土壤中 NH₄ 和 NO₃ 的自相关距离达 20m^[11],而农田土壤物理属性和化学属性的空间自相关尺度为 5~60m^[15]。同国外同类研究的结果相比,内蒙古高原 4 类地带性针茅草原群落土壤水分、全碳和全氮的空间自相关尺度大于森林,小于弃耕地和农田,而与北美草地的研究结果相近。同时, Schlessinger 等的研究结果还表明,草原生态系统土壤属性的空间分布是小尺度的,而荒漠灌丛则表现出粗纹理的分布特点^[31]。

4 类群落土壤全碳和全氮空间自相关分析结果中较高的块金常数揭示出,贝加尔针茅群落、大针茅群落和克氏针茅群落的土壤全碳,以及克氏针茅和小针茅群落的土壤全氮可能存在更小尺度(小于 50cm)的分布格局。Schlessinger 等认为,这种格局可能与多年生丛生禾草株丛水平的养分循环有关^[31]。Hook 等^[22]、Kelly 和 Burke^[32]对北美半干旱草地土壤有机质小尺度空间异质性的研究表明,在植物个体尺度上,土壤

表层的养分差异相当大,植物下部土壤全 C、全 N 和有机 C 相对较丰富。凋落物的补充与分解使植物个体(或死亡个体)下形成了“养分斑”,它们一般只能维持几个月,具有时间动态。这种个体尺度上的微生境异质质对生态系统过程也具有重要影响,如植物的养分供应潜力、对微生物群落支持能力以及先前被占据的微生境的幼苗补充等。

上述结果表明,尽管各群落内土壤水分、土壤全碳和全氮的空间自相关尺度不是完全一致的,但三者之间具有密切的内在联系,它们可能共同作用于群落的生态学过程,即土壤水分格局→植物种群格局(基本斑块的大小)→土壤碳空间格局→土壤氮空间格局。同时,由于生态学过程的反馈作用,土壤氮空间格局→种群格局→土壤水分格局。国外的一些研究结果表明,群落土壤属性空间自相关尺度的改变可能是导致群落演替的驱动力,草原退化可能与土壤异质性尺度的改变有关。如, Jaramillo 和 Detling 研究表明,家畜的选择性采食、尿斑沉积和牧压间的相互作用,增进了草地的结构性异质性和功能异质性^[33,34]。放牧引起植物格局的快速变化,而土壤格局则相对稳定^[35]。在内蒙古高原,由于长期的过度放牧,锦鸡儿属(*Caragana*)植物在退化草原群落中大量繁殖,并在其株丛下积累细纱和肥沃的表土,改变了土壤水分和养分的分布格局,导致了土壤“肥力岛”的形成和发展,从而引起草原群落的大面积灌丛化,并进一步向荒漠化的方向发展。这种演替轨迹与 Schlesinger 等的研究结论完全相同。因此,内蒙古高原地带性针茅草原群落土壤属性分布特征的变化与比较,可作为定量指标,来研究和描述草地群落在气候变化和人类活动影响下的演替过程与轨迹。

参考文献

- [1] Snaydon R. W. Micro-distribution of *Trifolium repens* L. and its relation to soil factors. *Journal of Ecology*, 1962, **50**(1): 133~143.
- [2] Worldendorp J W. The relation between the nitrogen metabolism of *plantago* species and characteristics of the environment. In: Lee J. A., McNeill S., Rorison I. H. eds. *Nitrogen as an ecological factor*. Oxford: Blackwell, 1983. 137~166.
- [3] Jackson R B and Caldwell M M. The scale of nutrient heterogeneity around individual plants and its quantification with geostatistics. *Ecology*, 1993, **74**(2):612~614.
- [4] Tilman D and Wedin D A. Species effects on nitrogen cycling: a test with perennial grasses. *Oecologia*, 1990, **84**(4):433~441.
- [5] Bai Y F(白永飞), Xu Z X(许志信), Li D X(李德新). Ecological heterogeneity: definition and progress. In: Li C S(李承森) ed. *Advances in plant sciences* (in Chinese). Beijing: China Higher Education Press and Springer-Verlag, 1999. 113~125.
- [6] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Adv. Soil Sci.*, 1985, **3**:1~70.
- [7] Webster R. and Oliver M A. *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*. 1990. New York: Oxford University Press.
- [8] Trangmar B B, Yost R S and Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, 1985, **38**:45~94.
- [9] Bennett L T, Adams M A. Indices for characterizing spatial variability of soil nitrogen semi-arid grasslands of Northwestern Australia. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, **31**(5):735~746.
- [10] Röver M, Kaiser E A. Spatial heterogeneity within the plough layer: low and moderate variability of soil properties. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, **31**(2):175~187.
- [11] Robertson G P. Geostatistics in ecology: Interpolating with known variance. *Ecology*, 1987, **68**(3):744~748.
- [12] Robertson G P, Huston M A, Evans F C, et al. Spatial variability in a successional plant community: Patterns of nitrogen availability. *Ecology*, 1988, **69**(5):1517~1524.
- [13] Robertson G P, Crum G R, and Ellis B G. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance. *Ecologia*, 1993, **96**(4):451~456.
- [14] Robertson G P and Freckman D W. The spatial distribution of nematode trophic groups across a cultivated

- ecosystem. *Ecology*, 1995, **76**(5):1425~1432.
- [15] Robertson G P, Klingensmith K M, Klug M G, *et al.* Soil resources microbial activity and primary production across an agricultural ecosystem. *Ecological Applications*, 1997, **7**(1):158~170.
- [16] Bruckner A, Kandeler E and Kampichler C. Plot scale spatial patterns of soil water content, pH, substrate-induced respiration and N mineralization in a temperate coniferous forest. *Geoderma*, 1999, **93**(3~4): 207~223.
- [17] Korsaeht A, Molstad L and Bakken L R. Modelling the competition for nitrogen between plants and microflora as a function of soil heterogeneity. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**(2):215~226.
- [18] Morris S J. Spatial distribution of fungal bacteria biomass in southern Ohio hardwood forest soils; fine scale variability and microscale patterns. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, **31**(10):1375~1386.
- [19] Schlesinger, W H, Reynolds J F, Cunningham G L, *et al.* Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, **247**(4946):1043~1048.
- [20] Crawford C S and Gosz J R. Desert ecosystems: their resource in space and time. *Environmental Conservation*, 1982, **9**(3):181~195.
- [21] Noy-Mier I. Desert ecosystem structure and function. In: Evenari M *et al.* ed. *Hot desert and arid shrublands*. Amsterdam: Elsevier Science, the Netherlands, 1985. 93~103.
- [22] Hook P B, Burke I C, and Lanenroth W R. Heterogeneity in soil N and C associated with individual plants and openings in North American shortgrass steppe. *Plant and Soil*, 1991, **138**(2):247~256.
- [23] Wu Z Y(吴征镒). *The Vegetation of China*(in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 505~564.
- [24] Bai Y F(白永飞), Xu Z X(许志信), Li D X(李德新). Study on α diversity of four *Stipa* communities in Inner Mongolia plateau. *Chinese Biodiversity*(in Chinese)(生物多样性), 2000, **8**(4):351~358.
- [25] Bai Y F(白永飞), Li L H(李凌浩), Huang J H(黄建辉), *et al.* The influence of plant diversity and functional composition on ecosystem stability of four *Stipa* communities in Inner Mongolia plateau. *Acta Botanica Sinica*, 2001, **43**(3):280~287.
- [26] Bai Y F(白永飞), Li L H(李凌浩), Wang Q B(王其兵), *et al.* Changes in plant species diversity and productivity along gradients of precipitation and elevation in the Xilin River basin, Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*(in Chinese)(植物生态学报), 2000, **24**(6):641~647.
- [27] Li S L(李绍良). The growth of plants at grassland and the water condition in the chestnut soil. In: Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences(中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站) ed. *Research on Grassland Ecosystem*(in Chinese)(草原生态系统研究). Beijing: Science Press. 1988. **2**:10~19.
- [28] Heather R L, Hungate B A, Chapin III F S, *et al.* Soil heterogeneity and plant competition in an annual grassland. *Ecology*, 1997, **78**(7): 2076~2090.
- [29] Palmer M W. Spatial scale and patterns of species-environment relationships in hardwood forest of the North Carolina piedmont. *Coenoses*, 1990, **5**: 79~87.
- [30] Lechowicz M J and Caldwell M M. The ecology and genetics of fitness in forest plants. II. Microspatial heterogeneity of the edaphic environment. *Journal of Ecology*, 1991, **79**(5): 687~696.
- [31] 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.
- [32] Kelly R B and Burke I C. Heterogeneity of soil organic matter following death of individual plants in shortgrass steppe. *Ecology*, 1997, **78**(4):1256~1261.
- [33] Jaramillo V J and Detling J K. Small-scale heterogeneity in a semi-arid North American grassland. I. Tillering, N uptake and retranslocation in simulated urine patches. *Journal of Applied Ecology*, 1992, **29**(1):1~8.
- [34] Jaramillo V J and Detling J K. Small-scale heterogeneity in a semi-arid North American grassland. II. Cattle grazing of simulated urine patches. *Journal of Applied Ecology*, 1992, **29**(1): 9~13.
- [35] Gibson D J. The relationship of sheep grazing and soil heterogeneity to plant spatial pattern in dune grassland. *Journal of Ecology*, 1988, **76**(1):233~252.