

浑善达克沙地无芒雀麦 (*Bromus inermis*) 空间分布格局

杨慧玲^{1 2 3}, 曹志平³, 朱选伟⁴, 董 鸣², 叶永忠¹, 黄振英^{2,*}

(1. 河南农业大学生命科学学院, 郑州 450002; 2. 中国科学院植物研究所植被与环境变化重点实验室, 北京 100093;
3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 4. 河南科技学院生命科技学院, 新乡 453003)

摘要 通过西北-东南和东北-西南方向两条宽 5m × 长 3 km 的样带和一块 4m × 4m 的样方调查, 研究了浑善达克沙地无芒雀麦、植被、土壤水分及土壤盐分的空间变异特点及其相互关系。结果表明, 样带内植被盖度、无芒雀麦盖度、土壤水分和土壤盐分的空间变化格局相似, 然而, 在不同的空间方向上, 它们具有不同的空间变化, 样方内无芒雀麦地上部生物量、分株数和土壤盐分具有相似的空间变化格局, 但却不同于植被地上部总生物量和土壤水分的空间变化格局。相关分析表明, 样带内植被盖度、无芒雀麦盖度与土壤水分和土壤盐分之间均具有显著的正相关关系。土壤水分和土壤盐分也具有显著的正相关。样方内无芒雀麦地上部生物量、分株数及植被地上部总生物量与土壤水分均具有显著的正相关关系, 但与土壤盐分没有显著的相关关系。无芒雀麦地上部生物量、分株数和植被地上部总生物量三者之间, 以及土壤水分和土壤盐分之间也均具有显著的正相关关系。研究结果表明了植被与土壤之间的相互关系依赖于空间尺度。

关键词 浑善达克沙地, 无芒雀麦, 土壤水分, 土壤盐分, 空间分布格局

文章编号: 1000-0933 (2007) 07-2765-09 中图分类号: Q14, Q948 文献标识码: A

Spatial pattern of *Bromus inermis* (poaceae) in Otindag Sandland, China

YANG Hui-Ling^{1 2 3}, CAO Zhi-Ping³, ZHU Xuan-Wei⁴, DONG Ming², YE Yong-Zhong¹, HUANG Zhen-Ying^{2,*}

1 College of Life Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China
2 Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China
3 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China
4 Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (7) 2765 ~ 2773.

Abstract : *Bromus inermis* Leyss. is a dominant perennial grass in Othidag Sandland. Spatial patterns of *B. inermis* plants, soil water content, soil salinity and their interaction were analyzed at different scales. At a large scale, *B. inermis* cover, soil water content and soil salinity were monitored along two 5 m × 3 km transects. Transect I was perpendicular to II, and each transect had 600 plots. For a transect, spatial patterns were similar among *B. inermis* cover, soil water content and soil salinity. However, these patterns differed between the two transects. *Bromus inermis* cover, soil water content and soil salinity were significantly positively correlated ($P < 0.05$). At a small scale, similar things were monitored in the *B.*

基金项目: 国家重大基础研究发展规划资助项目 (2007CB106800); 中国科学院西部行动计划资助项目 (KZCX2-XB2-01); 国家自然科学基金面上资助项目 (30570281, 30330130); 国家科技基础条件平台建设子资助项目 (2005DKA21006)

收稿日期: 2006-08-05; 修订日期: 2007-03-05

作者简介: 杨慧玲 (1977 ~), 女, 河南人, 博士, 主要从事恢复生态学研究. E-mail: huilingyang@sohu.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenying@ibcas.ac.cn

致谢: 衷心感谢美国 Kentucky 大学的 Carol Baskin 和 Jerry Baskin 教授对英文摘要的润色.

Foundation item : The project was financially supported by the National Basic Research Program of P. R. China (No. 2007CB106800), CAS action-plan for West Development (No. KZCX2-XB2-01), National Natural Science Foundation of China (No. 30570281 and 30330130) and the Program of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2005DKA21006)

Received date 2006-08-05 ; **Accepted date** 2007-03-05

Biography : YANG Hui-Ling, Ph. D., mainly engaged in restoration ecology. E-mail: huilingyang@sohu.com

inermis community , using a 4 m × 4 m sampling site , which consisted of 400 plots , each 20 cm × 20 cm. Spatial patterns among aboveground biomass , number of ramets and soil salinity were similar , but they differed from the spatial pattern of soil water content. There were significant positive correlations between number of ramets and aboveground biomass of *B. inermis* ($P < 0.01$) and between soil water content and soil salinity ($P < 0.05$). Moreover , number of ramets and aboveground biomass of *B. inermis* were significantly positively correlated with soil water content ($P < 0.05$) , but not with soil salinity. These results demonstrate a spatial relationship between vegetation characteristics and soil properties.

Key Words : *Bromus inermis* ; Otindag Sandland ; soil salinity ; soil-vegetation patterns ; soil water content ; spatial patterns

空间分布格局是植物种群的重要特征之一 ,是种群个体在水平空间上的分布方式。它由种群的生物学特性、种群关系以及环境条件综合作用决定。植物种群空间分布格局是种群与环境(生物环境和非生物环境)长期适应和选择的结果^[1~4]。因此种群空间分布格局通常反映了一定环境因子对个体行为、生存和生长的影响^[5,6]。空间分布格局是植物种群研究中的重要内容 ,也是实验生态学和野外生态学研究的基础^[7]。

在陆地景观中 ,植被是生态系统最主要的组成部分 ,不同的植被类型往往就指示着不同的生态系统类型^[8]。植物与植被在沙地生态系统中的作用显得尤为重要 ,这是由于沙地生态系统固有的脆弱性 ,即一旦植被遭到了破坏 ,系统的平衡失调 ,风的吹蚀与搬运作用就会形成流沙 ,荒漠化过程迅即发生。因而 ,沙地具有荒漠化的巨大潜在威胁 ,植被是其控制因素^[9]。浑善达克沙地是我国北方荒漠化较为严重的地区之一 ,无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss. FL. Hal.)是浑善达克沙地的主要优势克隆植物 ,它不但能够防风固沙 ,同时又是一种重要优良饲草^[10]。本文通过样带和样方调查 ,对浑善达克沙地无芒雀麦群落、土壤水分和盐分的空间变异特点及其相互关系进行了研究 ,旨在加深人们对半干旱性气候的浑善达克沙地植被与环境间相互关系的认识 ,对退化生态系统的恢复具有一定的理论指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

本研究在中国科学院植物研究所浑善达克沙地生态研究站(42°53'~42°58'N , 116°01'~116°08'E ,海拔1317m)进行。研究站位于内蒙古正蓝旗浑善达克沙地腹地 ,该地属于半干旱区 ,年平均温度1.8℃ ,极端最低温度-40℃ ,≥10℃年积温为2000℃ ,年降雨量367.1mm ,最高和最低月平均气温分别出现在7月份和1月份 ,年最高和最低月平均降雨量也分别出现在7月份和1月份(内蒙古正蓝旗气象资料)。浑善达克沙地的地带性土壤以栗钙土为主 ,其次为棕钙土 ,非地带性土壤主要为风沙土。植被以草原植被为主 ,木本植物主要有沙地榆(*Ulmus pumila*)、黄柳(*Salix gordejewii*)、柠条(*Caragana microphylla*)、羊柴(*Hedysarum laeve*)、叉分蓼(*Polygonum divaricatum*)、褐沙蒿(*Artemisia intramongolica*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等 ;草本植物主要有猪毛菜(*Salso lacollina*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、寸草苔(*Carex duriuscula*)、沙竹(*Psammochloa villosa*)、苔草(*Carex*)、羊草(*Leymus chinensis*)、沙米(*Agriophylluns squarrosus*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)等。

1.2 取样方法

2004年9月初 ,在当地沿西北-东南方向(当地冬春季节盛行风风向 ,样线I)和东北-西南方向(垂直于当地盛行风风向 ,样线II)各设置一条3 km 样线 ,接着沿样线设置5m × 5m 连续样方 ,共调查1200个样方 ,通过目测记录每个样方内植被的总盖度及无芒雀麦的百分盖度。同时采用土钻取土 ,每个样方内取0~20 cm 土样3个 ,并将其充分混合 ,取适量土样进行室内分析 ,测定土壤水分和盐分。烘干称重法测定土壤含水量^[11]。土壤水溶性总盐量用水土比为5:1的浸提液 ,残渣烘干——质量法测定^[11]。

在浑善达克沙地 ,无芒雀麦主要在低湿滩地形成群落。在示范区内选择一个典型无芒雀麦群落样地 ,在样地内再选取较为典型的一个4m × 4m 的样方。样方再划分成20cm × 20cm 大小的栅格。记录样方内无芒雀麦的分株数 ,然后分别收获栅格内无芒雀麦的地上部及其他植被的地上部 ,带回实验室烘干称重。同时

每个栅格取 0 ~ 20 cm 的土样一个 ,共取样 400 个 ,带回实验室分析土壤水分和盐分。

1.3 数据分析

1.3.1 半方差分析

用半方差分析方法分析植被总盖度、无芒雀麦盖度、土壤水分及土壤盐分的空间变化格局。半方差分析是研究尺度依赖性和空间变异的有效方法 ,近年来在生态学中得到了越来越多的应用^[12]。半方差的计算比较简单 ,对于具有 n 个观测值的空间序列 ($Z(x)$) ,半方差定义为增量 $[Z(x_1) - Z(x_2)]$ 方差的一半 ,对于距离 h 的点 ,半方差可以用下列式子来估计 :

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

以半方差 $\gamma(h)$ 为纵坐标 ,空间距离 h 为横坐标作图 ,便得到半方差图 (semivariogram) ,半方差图显示了变量随空间尺度的变异特点。半方差图的结构可用 3 个主要的参数来描述 ,即块金方差 (Nugget) C_0 、阈值 (Sill) 和变程 (Range) A_0 。块金方差是半方差图在纵轴上的截距 ,即当空间距离为 0 时的半方差 ,通常是一个非零值 ;阈值是半方差随空间距离的增加而不再增加 ,达到水平时的值 ,等于 $C_0 + C$,其中 C 是结构方差 ;变程是半方差达到阈值时的空间距离 ,在此空间尺度内的样点具有空间依赖性。实际上 ,块金方差源于小于取样间隔的空间尺度上的变异和随机误差。块金方差与阈值之比反映了随机变异在整个空间变异中的作用大小^[13~16]。

为了便于比较 ,在进行半方差分析前 ,将原始数据标准化 ,即用平均值 m 和标准差。将原始数据 $Z(x)$ 转换为 $Z(x)'$,转换公式如下^[14,16,17] :

$$Z(x)' = (Z(x) - m) / s \tag{2}$$

半方差分析是用 GS + (Version 5.3.2 ; Gamma Delta , Plainwell , Michigan) 完成的。

1.3.2 相关分析

用 Spearman 秩相关系数来分析不同尺度条件下的植被盖度、无芒雀麦盖度、土壤水分及土壤盐分等之间的相互关系。Spearman 秩相关系数是相关分析中应用最为广泛的非参数方法 ,Spearman 秩相关系数 r_s 及其显著性检验的统计量 t 的计算公式为^[8] :

$$t = r_s \sqrt{(n - 2) / (1.0 - r_s^2)} \tag{3}$$

$$r_s = 1.0 - 6 \sum d^2 / (n^3 - n) \tag{4}$$

式中 d 为两组变量对应的秩的差 , n 为两组变量的对应的观测值数目。

2 结果

2.1 样带和样方内植被与土壤特征

样带调查区域包含多种生境类型 ,如裸露沙丘 ,固定半固定沙丘和丘间低地等 ,调查结果表明 ,样带内植被平均盖度较低 ,土壤平均含水量也低 ,无芒雀麦群落样方调查结果表明 ,土壤含水量和土壤盐分较高。不同取样条件下普遍较高的变异系数说明不同空间尺度的植被与土壤特征都具有较大的变异性 (表 1)。

2.2 样带内植被与土壤特征的空间变化格局

图 1 为标准化后的无芒雀麦盖度、植被盖度、土壤水分和土壤盐分在不同方向样带上的半方差图。从图中可以看出 ,无芒雀麦盖度、植被盖度与土壤水分和盐分含量的空间变化格局相似 ,这 4 种指标的半方差图中都有一个明显的连续上升的区间 ,在此区间内 ,半方差随空间尺度的增大而增加 ,到达一定的尺度 (变程) 后 ,半方差图变得平缓。同时 ,在不同的空间方向上 ,这 4 种指标各自的空间分布格局不同 ,这说明它们的分布都具有各向异性 ,即在不同方向上具有不同的空间变化。

对无芒雀麦盖度、植被盖度、土壤水分和土壤盐分半方差进行球状模型拟合所得的参数显示 ,样线 I (西北-东南方向 ,当地冬春季节盛行风风向) 中土壤水分的块金方差最低 ,样线 II (东北-西南方向 ,垂直于当地盛行风风向) 中块金方差最低的是土壤盐分 ,植被盖度的块金方差最高 (表 2)。对于反应样点空间依赖性的参数变程 ,样线 I 中的各个指标的空间依赖度要低于样线 II。样线 I 中除土壤盐分外 ,植被盖度、无芒雀麦盖度、

表 1 浑善达克沙地无芒雀麦、植被及土壤特征的基本统计量

Table 1 Basic statistics of characteristics of <i>B. inermis</i> and vegetation , as well as soil properties in Otindag Sandland						
项目 Item		指标 Index	平均值 Mean	标准偏差 SD	变异系数 CV	取样个数 <i>N</i>
样带 Transect	I	无芒雀麦盖度 <i>B. inermis</i> cover (%))	10	1.5	158.45	600
		植被盖度 Vegetation cover (%))	29	3.2	165.23	600
		土壤水分 Soil water content (%))	2.5	4.2	128.11	600
		土壤盐分 Soil salinity (%))	0.06	0.04	78.01	600
	II	无芒雀麦盖度 <i>B. inermis</i> cover (%))	12	2.3	89.36	600
		植被盖度 Vegetation cover (%))	33	2.5	137.07	600
		土壤水分 Soil water content (%))	2.3	3.9	68.17	600
		土壤盐分 Soil salinity (%))	0.05	0.06	114.66	600
	样方 Sampling site	无芒雀麦地上部生物量 (g/格) Aboveground biomass of <i>B. inermis</i>	1.48	2.35	123.26	400
		无芒雀麦分株数 (个/格) Number of ramets of <i>B. inermis</i>	0.45	0.34	87.50	400
		植被地上部总生物量 (g/格) Total aboveground biomass of vegetation	3.45	3.33	183.07	400
		土壤水分 (%)) Soil water content	16.44	4.26	34.22	400
土壤盐分 (%)) Soil salinity		0.11	0.08	67.87	400	

表 2 浑善达克沙地无芒雀麦、植被及土壤特征的半方差球状模型参数

Table 2 Parameters of spherical semivariogram model describing characteristics of *B. inermis* and vegetation , as well as soil properties in Otindag Sandland

项目 Item		指标 Index	块金方差 Nugget C_0	阈值 Sill $C_0 + C$	变程 Range A_0	块金方差 / 阈值 Nugget/sill $C_0 / C_0 + C$	R^2	
样带 Transect	I	无芒雀麦盖度 <i>B. inermis</i> cover	0.44	1.36	935	0.32	0.885 *	
		植被盖度 Vegetation cover	0.55	1.62	830	0.34	0.936 *	
		土壤水分 Soil water content	0.23	1.12	790	0.21	0.933 *	
		土壤盐分 Soil salinity	0.36	1.15	1315	0.31	0.788 *	
	II	无芒雀麦盖度 <i>B. inermis</i> cover	0.12	1.47	1890	0.06	0.876 *	
		植被盖度 Vegetation cover	0.68	1.50	1340	0.45	0.789 *	
		土壤水分 Soil water content	0.39	1.54	1715	0.25	0.643 *	
		土壤盐分 Soil salinity	0.10	1.64	2688	0.06	0.556 *	
		样方 Sampling site	无芒雀麦地上部生物量 Aboveground biomass of <i>B. inermis</i>	0.42	1.75	1.22	0.24	0.964 *
			无芒雀麦分株数 Number of ramets of <i>B. inermis</i>	0.87	1.56	0.76	0.56	0.911 *
植被地上部总生物量 Total aboveground biomass of vegetation	0.11		1.51	3.14	0.07	0.885 *		
土壤水分 Soil water content	0.97		1.37	2.5	0.71	0.779 *		
	土壤盐分 Soil salinity	0.58	1.38	1.3	0.42	0.613 *		

* *P* < 0.05

土壤水分的变程都在 1000 m 以下 ,而样线 II 中这 4 种指标的变程都高于 1000 m ,尤其是土壤盐分的变程甚至高达 2688 m。作为反映随机变异在整个空间变异中作用大小的参数块金方差与阈值之比 ,这 4 种指标的这一参数都不超过 50%。

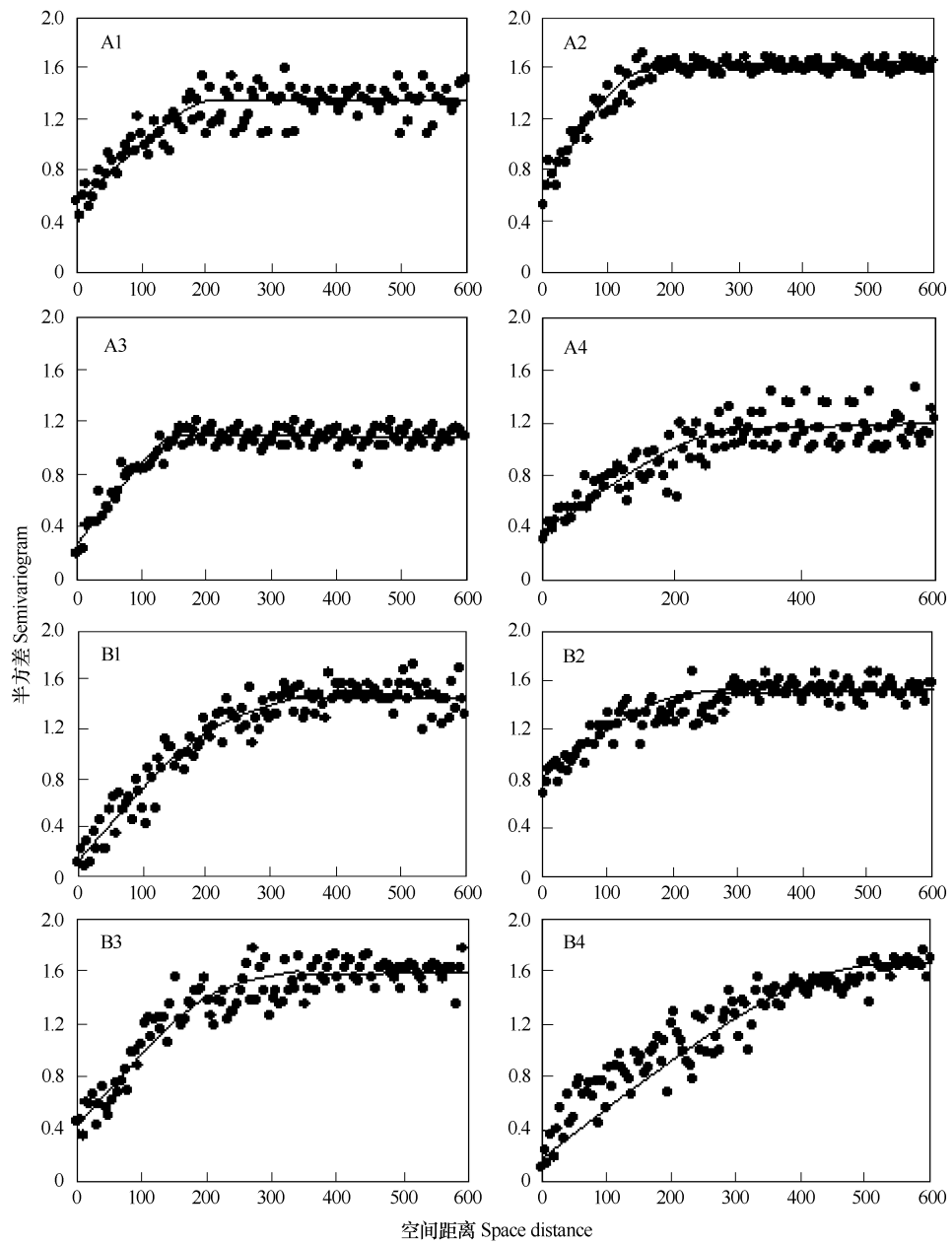


图1 浑善达克沙地样带内无芒雀麦盖度、植被盖度、土壤水分和土壤盐分的半方差图

Fig. 1 Semivariograms of vegetation cover, *B. inermis* cover, soil water content and salinity along transects in Otindag Sandland
A 样带 I, B 样带 II; 1: 无芒雀麦盖度, 2: 植被盖度, 3: 土壤水分, 4: 土壤盐分 A: Transect I, B: Transect II; 1: *B. inermis* cover, 2: Vegetation cover, 3: Soil water content, 4: Soil salinity

2.3 样方内植被与土壤特征的空间变化格局

样方内土壤水分和盐分的空间变化格局与样带内有明显不同(表2;图1,图2)。样方内,不同于植被地上部总生物量和土壤水分的空间变化格局,无芒雀麦地上部生物量、分株数和土壤盐分半方差图中都有一个明显的连续上升的区间,在此区间内,半方差随空间尺度的增大而增加,到达一定的尺度(变程)后,半方差图变得平缓,它们具有相似的空间格局(图2)。从表2还可看出,无芒雀麦分株数和土壤水分的块金方差与阈值之比参数均超过了50%,土壤盐分为42%,植被地上部总生物量的块金方差与阈值之比参数最低,仅为7%。

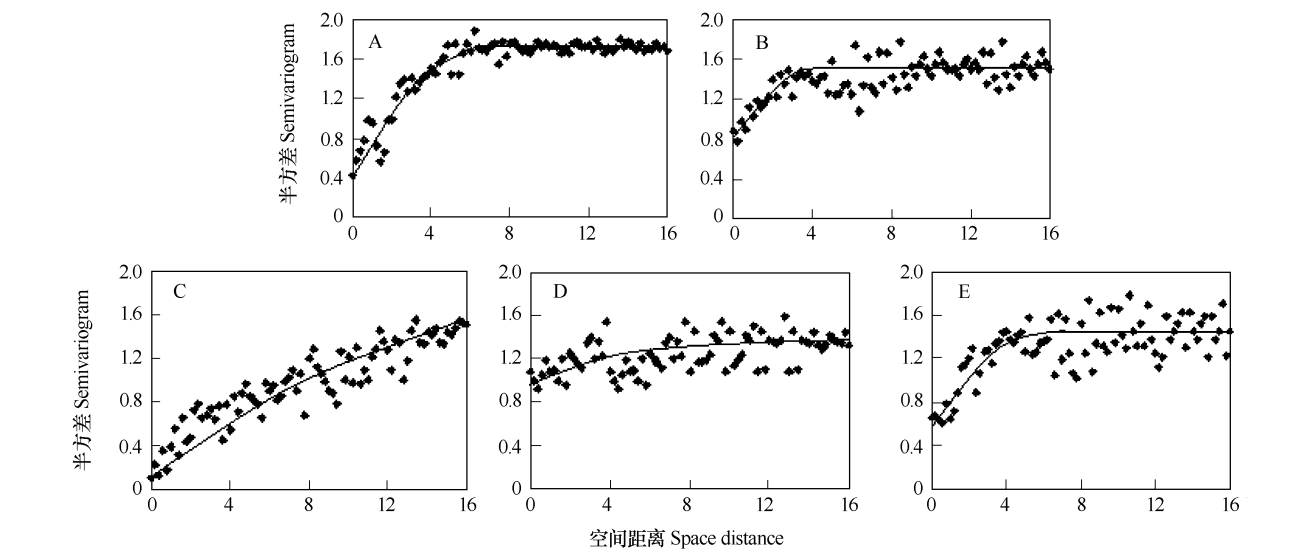


图2 浑善达克沙地样方内无芒雀麦地上部生物量、分株数和植被地上部总生物量以及土壤水分、盐分的半方差图

Fig. 2 Semivariograms of aboveground biomass of *B. inermis* , number of ramets of *B. inermis* , total aboveground biomass of vegetation , soil water content and salinity on the sampling site in Otindag Sandland.

A 无芒雀麦地上部生物量 ;B 无芒雀麦分株数 ;C 植被地上部总生物量 ;D 土壤水分 ;E 土壤盐分 A : Aboveground biomass of *B. inermis* ; B : Number of ramets of *B. inermis* ; C : Total aboveground biomass of vegetation ; D : Soil water content ; E : Soil salinity

2.4 样带和样方内植被与土壤特征的相关分析

无芒雀麦及植被特征与土壤特征的 Spearman 秩相关分析结果见表3。在样带内 ,植被盖度与土壤水分之间存在着极为显著的正相关 ,与无芒雀麦盖度、土壤盐分之间也存在显著的正相关关系。无芒雀麦盖度、土壤含水量和土壤盐分三者之间相互存在显著的正相关关系。

表3 浑善达克沙地无芒雀麦、植被及土壤特征间的 Spearman 秩相关系数 (双尾 t 检验概率)

Table 3 Spearman 's rank correlation coefficients (probabilities of two-tailed t test) of characteristics of *B. inermis* and vegetation , as well as soil properties in the Otindag Sandlang

		BC	VC	SWC	SS
样带 Transect	BC		0.655 *	0.129 *	0.355 *
	VC			0.442 **	0.067 *
	SWC				0.115 *
样方 Sampling site	BRN	BOB	VOB	SWC	SS
	BRN	0.415 **	0.029 **	0.355 *	0.069
	BOB		0.609 **	0.027 *	0.232
	VOB			0.067 *	0.047
	SWC				0.229 *

BC : 无芒雀麦盖度 ;VC : 植被盖度 ;SWC : 土壤水分 ;SS : 土壤盐分 ;BRN : 无芒雀麦分株数 ;BOB : 无芒雀麦地上部生物量 ;VOB : 植被地上部总生物量 ;* $P < 0.05$;* * $P < 0.01$ BC : *B. inermis* cover ;VC : vegetation cover ;SWC : soil water content ;SS : soil salinity ;BRN : number of ramets of *B. inermis* ;BOB : aboveground biomass of *B. inermis* ;VOB : total aboveground biomass of vegetation

在样方内 ,无芒雀麦分株数、地上部生物量和植被地上部总生物量与土壤水分存在显著的正相关关系 ,但与土壤盐分没有显著的相关关系。无芒雀麦分株数、地上部生物量和植被地上部总生物量三者之间存在极其显著的正相关关系。土壤水分与土壤盐分之间也为显著的正相关关系。

3 讨论

植被与土壤是陆地景观中最为突出的两个组成部分 ,两者的分布格局及其相互关系是生态学研究的重要

内容。植被与土壤的分布格局和特征表现在许多不同方面,探讨它们之间的相互关系,对于认识景观生态学格局与过程具有重要的意义。土壤的空间异质性对植物种群和群落的结构及动态等具有重要影响^[18];同时,植物的生长对土壤异质性的形成也具有重要作用,这种植物对环境的改造作用在干旱半干旱地区的景观发育中起关键作用^[19]。

在干旱半干旱区生态系统中,土壤水分是植物产量(生物量)的重要限制因素^[20~23],同时土壤水分在决定各个植物种的分布格局中也起了重要作用^[24~26]。De Jong 和 Klinkhamer^[22,23]对 *Crisium vulgare* 和 *Cynoglossum officinale* 的研究表明,由于土壤水分的时空变化,幼苗存活率不仅在时间上而且在空间分布上存在差异。我们的调查也发现,在浑善达克沙地,样带内的土壤水分较低,植被和无芒雀麦盖度也较低。这是因为样带内包括多种生境类型,如流动沙丘、半流动沙丘等,高的地势及大的蒸发量使得土壤水分较低,植被生长状况也较差。浑善达克沙地植被的分布除了受土壤水分的影响以外,土壤盐分也是影响植被分布的重要因素^[27]。样带调查区域内植被盖度、无芒雀麦盖度、土壤水分和土壤盐分的空间变化格局相似的结果也证实了这一点。但是,这4种指标的空间变化格局在不同空间方向上却不相同,这可能是因为风对浑善达克沙地的沙丘分布起了重要因素,当地强劲的西风和西北风塑造了沙丘的分布格局,造成了水分及养分分布的异质性,这对各景观要素分布格局的形成起了极为重要的作用,最终导致无芒雀麦盖度、植被盖度、土壤水分和土壤盐分空间分布的各向异性。

无芒雀麦在浑善达克沙地的分布具有明显的生境限制,其主要分布在低湿滩地。由于当地冬春季强劲的风力作用,地表常常被风力侵蚀,形成大小不等的风蚀坑。无芒雀麦不但种子萌发和幼苗生长对沙丘具有较强的适应性^[28],而且还经常通过克隆生长从低湿滩地向邻近的风蚀坑扩展,从而在当地退化的生态系统恢复过程中起重要作用。与其他克隆植物一样,无芒雀麦能够通过在不同养分斑块内生长的分株实现资源共享,从而利用异质性分布的养分资源^[29,30]。这种资源利用方式使克隆植物能够在许多生态系统中成功定居并成为优势物种^[31~33]。克隆分株间的间隔子的长度决定了克隆植物不同分株间的资源共享主要发生在较小的尺度上^[29,30,34,35],因此,较小尺度(样方)内无芒雀麦分布格局主要受克隆分株间资源共享能力的影响。较小尺度(样方)内植被和无芒雀麦的分布与土壤盐分没有显著的相关关系可能就是由于在无芒雀麦群落中,克隆植物是优势植物,克隆植物通过分株间的资源共享和风险分摊,克服了盐分胁迫的影响。

植被与土壤之间是一种相互依赖和制约的关系,同时,两者之间的相互关系随时空尺度而变化。本研究表明,在较大尺度(样带)内,植被以及无芒雀麦的分布与土壤水分和盐分存在显著的正相关关系,而在较小尺度(样方)内植被以及无芒雀麦的分布与土壤盐分不存在相关关系。这表明土壤水分和盐分对植被以及无芒雀麦分布的影响要受到尺度的限制。在不同的尺度条件下,不同的生态学过程控制着植被和土壤的空间分布格局。在较大尺度(样带)内,风可能是影响植被和土壤空间分布的重要因素,而在较小尺度(样方)内,无芒雀麦的克隆特性可能控制着植被和土壤的空间分布格局。

无芒雀麦是浑善达克沙地植物群落中占优势的多年生根茎禾草。通过研究无芒雀麦的空间分布格局,了解影响其分布的土壤生态因子,为进一步研究无芒雀麦对浑善达克沙地环境的生态适应性奠定了基础。了解当地植物对沙地环境的适应方式,有助于治理当地的沙漠化,加快其生态环境的恢复。

References :

[1] Zhong Z C. Study on ecological adaptative mechanism of plant population. Beijing : Science Press , 2000.

[2] Cai F , Song Y C. A Study on the structure and dynamics of *Schima superba* population on Wuyi Mountain. Acta Phytocologica Sinica , 1997 , 21 (2) : 138 — 148.

[3] Greig-Smith P. Quantitative plant ecology (3rd edn). Oxford : Blackwell , 1983. 68 — 97.

[4] Hou X Y , Han J X. Simulation analysis of spatial patterns of main species in the Korean- pine broadleaved forest in Changbai Mountain. Acta Phytocologica Sinica , 1997 , 21 (3) : 242 — 249.

[5] Li H T. Introduction to studies of the pattern of plant population. Chinese Bulletin of Botany , 1995 , 12 (2) : 19 — 26.

- [6] Wang B S , Li M G , Peng S L. Phytogeography. Guangzhou : Guangdong Higher Education Press , 1995.
- [7] Zhong Z C , Liu Y. Several questions on advance of plant population ecology. In : Ecological Society of China. Ecology and comprehensive , coordinated , sustainable development. Beijing : Ecological Society of China , 2004. 55 — 56.
- [8] Kent M , Coker P. Vegetation Description and Analysis. New York : John Wiley & Sons , 1992.
- [9] Zhang X S. Principles and optimal models for development of Maowusu Sandy grassland. Acta Phytocologica Sinica , 1994 , 18 (1) : 1 — 16.
- [10] Ma L Q , chief editor. Flora of Inner Mongolia (2nd edn). Huhhot : People's Press of Inner Mongolia , 1994. Vol 5 , 104.
- [11] Lin D Y , chief editor. Instruct in Agrologic experiment. Beijing : China Forestry Publishing House , 2004.
- [12] Ge J P , Guo H Y , Zhong L N. Geostatistics in ecology I . basic theory and methods. Journal of Northeast Forestry University , 1995 , 23 (2) : 88 — 94.
- [13] Lin H B , Wang Z Q , Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification. Chinese Journal of Applied Ecology , 1998 , 9 (6) : 651 — 657.
- [14] Chen Y F , Yu F H , Dong M. Spatial heterogeneity of the psammophytic half-shrub community in Mu Us Sandland. Acta Ecologica Sinica , 2000 , 20 (4) : 568 — 572.
- [15] Chen Y F , Dong M. Spatial pattern and correlation of vegetation characteristics and soil properties in the Mu Us sandy desert. Acta Phytocologica Sinica , 2001 , 25 (3) : 265 — 269.
- [16] Liu J , Zhu X W , Yu F H , et al. Spatial heterogeneity of *Ulmus pumila* open forest ecosystem in Otindag sandy land. Environmental Science , 2003 , 24 (4) : 29 — 34.
- [17] Xu K X. Numerical taxonomy. Beijing : Science Press , 1994. 63 — 78.
- [18] Fowler N L. Microsite requirements for germination and establishment of three grass species. American Midland Naturalist , 1986 , 115 : 131 — 145.
- [19] The Geography Department of Peking University , Natural Resources Commission , CAS , Lanzhou Institute of Desert Research , CAS , Lanzhou Institute of Glaciogeology and Cryopedology , CAS. The natural condition and utilizing in Mu Us area. Beijing : Science Press , 1983.
- [20] Hsiao T C. Plant responses to water stress. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology , 1973 , 24 : 519 — 570.
- [21] Schulze E D. Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology , 1986 , 37 : 247 — 274.
- [22] de Jong T J , Klinkhamer P G L. Population ecology of the biennial *Crisium vulgare* and *Cynoglossum officinale* in a coastal sand-dune area. Journal of Ecology , 1988 , 76 : 366 — 382.
- [23] de Jong T J , Klinkhamer P G L. Seedling establishment of the biennials *Crisium vulgare* and *Cynoglossum officinale* in a sand-dune area : the importance of water for differential survival and growth. Journal of Ecology , 1988 , 76 : 393 — 402.
- [24] Lamont B B , Enright N J , Bergl S M. Coexistence and competitive exclusion of *Banksia hookeriana* in the presence of congeneric seedlings along a topographic gradient. Oikos , 1989 , 56 : 39 — 42.
- [25] Gutterman Y. Seed Germination in Desert Plants. Berlin : Springer-Verlag , 1993. 20 — 21.
- [26] Mustart P J , Cowling R M. Effects of soil and seed characteristics on seed germination and their possible roles in determining field emergence patterns of four Agulhas Plain (South Africa) Proteaceae. Canadian Journal of Botany , 1993 , 71 : 1363 — 1368.
- [27] Liu H J , Guo K. Classification and ordination analysis of plant communities in Inter-dune lowland in Hunshandak Sandy Land. Acta Ecologica Sinica , 2003 , 23 (10) : 2163 — 2169.
- [28] Yang H L , Zhu X W , Dong M , Huang Z Y , Cao G P. Responses of caryopses germination , seedling emergence and development to sand water content in *Agropyron cristatum* and *Bromus inermis* , two grasses in Otindag sandy land , China. Journal of Integrative Plant Biology , 2005 , 47 (12) : 1450 — 1458.
- [29] Dong M. Plant clonal growth in heterogeneous habitats : risk-spreading. Acta Phytocologica Sinica , 1996 , 20 (6) : 543 — 548.
- [30] Dong M. Clonal growth in plants in relation to resource heterogeneity : foraging behavior. Acta Botanica Sinica , 1996 , 38 (10) : 828 — 835.
- [31] Callaghan T V , Carlsson B A , Jünsdöttir I S , et al. Clonal plants and environmental change : introduction to the proceedings and summary. Oikos , 1992 , 63 : 341 — 347.
- [32] Prach K , Pyšek P. Clonal plants-what is their role in succession ? Folia Geobotanica et Phytotaxonomica , 1994 , 29 : 307 — 320.
- [33] Klimeš L , Klimešová J , Hendriks R , et al. Clonal plant architecture : a comparative analysis of form and function. In : de Kroon H , van Groenendaal J , eds. The Ecology and Evolution of Clonal Plants. Leiden : Backbuys Publishers , 1997.
- [34] Headley D C , Callaghan T V , Lee J A. Phosphate and nitrate movement in the clonal plants *Lycopodium annotinum* L. and *Diphasiastrum complanatum* (L.) Holub. New Phytologist , 1988 , 110 : 497 — 502.
- [35] Carlsson B A , Jónsdóttir B M , Svensson B M , et al. Aspects of clonality in the arctic : a comparison between *Lycopodium annotinum* and *Carex bigelowii*. In : Van Groenendaal J , de Kroon H , eds. Clonal Growth in Plants : Regulation and Function. The Hague : SPB Academic

Publisher , 1990.

参考文献：

[1] 钟章成. 植物种群生态学适应机理研究. 北京 :科学出版社 2000.

[2] 蔡飞 ,宋永昌. 武夷山木荷种群结构和动态的研究. 植物生态学报 ,1997 ,21 (2) :138 ~ 148.

[4] 侯向阳 ,韩进轩. 长白山红松林主要树种空间格局的模拟分析. 植物生态学报 ,1997 ,21 (3) :242 ~ 249.

[5] 李海涛. 植物种群分布格局研究概况. 植物学通报 ,1995 ,12 (2) :19 ~ 26.

[6] 王伯荪 ,李鸣光 ,彭少麟. 植物种群学. 广州 :广东高教出版社 ,1995.

[7] 钟章成 ,刘芸. 植物种群生态学研究进展中的几个问题. 见 :中国生态学会 ,生态学与全面、协调、可持续发展. 北京 :中国生态学会 2004. 55 ~ 56.

[9] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式. 植物生态学报 ,1994 ,18 (1) :1 ~ 16.

[10] 马毓泉主编. 内蒙古植物志 (第 2 版). 呼和浩特 :内蒙古人民出版社 ,1994. 第 5 卷 ,104.

[11] 林大仪主编. 土壤学实验指导. 北京 :中国林业出版社 2004.

[12] 葛剑平 ,郭海燕 ,仲莉娜. 地统计学在生态学中的应用 (I)基本理论与方法. 东北林业大学学报 ,1995 ,23 (2) :88 ~ 94.

[13] 李哈尔滨 ,王政权 ,王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. 应用生态学报 ,1998 ,9 (6) :651 ~ 657.

[14] 陈玉福 ,于飞海 ,董 鸣. 毛乌素沙地沙生半灌木群落的空间异质性. 生态学报 2000 ,20 (4) :568 ~ 572.

[15] 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.

[16] 刘建 ,朱选伟 ,于飞海 ,等. 浑善达克沙地榆树树林生态系统的空间异质性. 环境科学 2003 ,24 (4) :29 ~ 34.

[17] 徐克学. 数量分类学. 北京 :科学出版社 ,1994. 63 ~ 78.

[19] 北京大学地理系 ,中国科学院自然资源综合考察委员会 ,兰州沙漠研究所 ,兰州冰川冻土研究所. 毛乌素沙区自然条件及其改良利用. 北 京 :科学出版社 ,1983.

[27] 刘海江 ,郭柯. 浑善达克沙地丘间低地植物群落的分类与排序. 生态学报 2003 ,23 (10) :2163 ~ 2169.

[29] 董鸣. 异质性生境中的植物克隆生长 :风险分摊. 植物生态学报 ,1996 ,20 (6) :543 ~ 548.

[30] 董鸣. 资源异质性环境中的植物克隆生长 :觅食行为. 植物学报 ,1996 ,38 (10) :828 ~ 835.