

浑善达克沙地小叶锦鸡儿灌丛的空间异质性

初玉^{1, 2}, 杨慧玲³, 朱选伟¹, 董鸣^{1*}

(1. 中国科学院植物研究所 植被数量生态学重点实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要: 豆科锦鸡儿属 (*Caragana*) 植物因其可以生物固氮而在草原生态系统中具有特殊的地位。定量分析小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 灌丛在浑善达克沙地不同生境条件下的分布格局, 有助于理解植被与土壤养分循环之间的关系和合理制定退化沙地的恢复对策。采用地统计学中的半方差分析和分形分析两种方法研究了浑善达克沙地小叶锦鸡儿灌丛的空间分布格局, 分析了不同生境中小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分间的相关性。结果表明: (1) 小叶锦鸡儿灌丛在 3 种生境条件下 (滩地、固定沙丘和半固定沙丘) 的盖度、土壤有机质和全氮的空间分布符合球状模型, 空间自相关显著; (2) 土壤 pH 值在滩地和固定沙丘的空间分布符合球状模型且空间自相关显著, 但在半固定沙丘空间自相关不显著; (3) 土壤水分在 3 种生境中的空间分布都符合线性模型, 空间自相关显著。 (4) 植被的变异尺度 (变程) 小于各个土壤要素的变异尺度。植被 (小叶锦鸡儿灌丛) 的分布和形成过程决定了土壤养分的分布和形成过程。当地的小叶锦鸡儿灌丛在养分“沃岛”现象的形成中起了重要作用, 合理的利用和布局当地的小叶锦鸡儿灌丛的分布, 可以更加有效地补充草地生态系统的养分, 从而有利于加快生态系统的恢复进程。

关键词: 小叶锦鸡儿灌丛; 分形分析; 半方差分析; 空间异质性; 浑善达克沙地

文章编号: 1000-0933(2005)12-3294-07 中图分类号: Q 14, Q 948 文献标识码: A

Spatial heterogeneity of *Caragana microphylla* shrub communities in the Ordos Sandland

CHU Yu^{1, 2}, YANG Hui-Ling³, ZHU Xuan-Wei¹, DONG Ming^{1*} (1. Key Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, CHINA; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. China Agricultural University, Beijing 100094, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3294~ 3300

Abstract *Caragana* plants are among the important nitrogen-fixers in the Ordos Sandland, semiarid area in China. They can provide with useful information about the relationship between vegetation and nutrient cycling as well as with powerful measure of restoration of the degraded sand land to quantify the spatial pattern of *Caragana microphylla* shrub communities in the various habitats. The aims of this study were to investigate the spatial patterns in *C. microphylla* shrub communities and resource heterogeneity in the Ordos Sandland. Using the semivariance analysis and the fractal analysis, the spatial patterns of *C. microphylla* shrub communities in three habitats were examined. The coverage of *C. microphylla* shrub communities, total N and organic C exhibited significant spatial autocorrelation in the three habitats, fitting the spherical model while the soil water content all fitted linear model. The soil pH did not exhibit significant autocorrelation in the semi-fixed sand dune but it did significant autocorrelation in the meadow and the fixed sand dune, both fitting the spherical model. The scales of autocorrelation of *C. microphylla* shrub communities were less than that of each soil factor, suggesting that distribution and formative process of *C. microphylla* shrub communities controlled the distribution of soil nutrient. The *C. microphylla* shrub communities were the most important factor affecting the process of the “fertility islands” of the soil nutrients in the sandland. Thus, reasonably using and placing *C. microphylla* shrub communities can supply the soil nutrients for the ecosystem more

基金项目: 中国科学院知识创新重大资助项目 (KSCX1-08-02)

收稿日期: 2004-06-24; 修订日期: 2005-03-10

作者简介: 初玉 (1974~), 男, 新疆米泉人, 博士生, 主要从事恢复生态学和克隆生态学研究。E-mail: chuyu@ibcas.ac.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: dongming@ibcas.ac.cn

Foundation item: Knowledge Innovation Project of CAS (No. KSCX1-08-02)

Received date: 2004-06-24; Accepted date: 2005-03-10

Biography: CHU Yu, Ph.D., mainly engaged in restoration ecology and clonal ecology. E-mail: chuyu@ibcas.ac.cn

effectively.

Key words: *Caragana microphylla* shrub community; fractal analysis; semivariance analysis; spatial heterogeneity; the Otindag Sandland

在干旱半干旱区, 由于过度放牧等原因, 草原退化, 植被常常灌丛化, 同时土壤养分常常呈现“沃岛(Fertility islands)”分布, 即以植物个体为中心, 土壤养分含量由内向外逐渐减少^[1,2]。这种分布格局是植被或植物与土壤长期相互作用的结果。同时, 植物个体甚至植物群落也会对养分异质性做出反应^[3]。在胁迫环境如干旱半干旱区, 对于种间竞争和/或者种间互助来说, 土壤异质性是其基本要素, 并最终决定植物和群落的分布格局^[4,5]。分布格局在生态学研究中的重要地位, 理论生物学家和植物生态学家都对植物以及养分的分布格局具有浓厚的兴趣。这主要是由于分布格局在理论生态学的框架性工作中所具有的中心地位^[6,7], 同时研究植物以及养分的分布格局能够有效地指导诸如土地管理和生态恢复等生态实践活动^[8-11]。

浑善达克沙地位于我国北方的干旱半干旱区。近些年来由于不合理的人类的活动, 如过牧和滥垦土地, 浑善达克沙地沙化日趋严重, 植被稀疏。为了治理日益恶化的生态环境, 人们在当地建立许多围封禁牧示范区, 对生态环境恢复起到了积极的示范和促进作用。然而, 由于围封禁牧破坏了原有的养分循环, 人们常常采取和利用一些措施来保证生态系统中的养分供应, 达到可持续利用草原生态系统的目的。豆科植物因其可以生物固氮而在草原生态系统中具有特殊的地位。合理地利用浑善达克沙地分布的豆科植物, 如锦鸡儿属(*Caragana*)植物, 羊柴(*Hedysarum laeve*)和沙打旺(*Astragalus adsurgens*)等在示范区内的合理分布对养分循环具有重要意义。

锦鸡儿属植物是浑善达克沙地的主要固沙植物^[12,13]。近年来, 常常飞播它们的种子恢复沙地的植被^[14]。本文采用地统计学中的半方差分析和分形分析两种方法研究了浑善达克沙地小叶锦鸡儿灌丛的空间分布格局及其特征, 旨在加深对沙地围封禁牧示范区内的植被分布格局与过程的理解。

1 研究方法

1.1 研究地点

研究地点位于浑善达克沙地生态环境综合治理试验示范研究围封示范区(42°53′~42°58′N, 116°01′~116°08′E)。示范区于2001年7月开始围封禁牧。根据内蒙古正蓝旗气象局提供的气象资料, 该地年平均温度1.6℃, 10年积温为2000℃, 年降水量320mm, 多西风和西北风, 平均风速4~5m/s, 全年8级大风日数60~80d, 冬、春季风强而多, 4~5月风速大, 高达12级。在研究区内, 小叶锦鸡儿灌丛主要伴生植物有羊草(*Leymus chinensis*), 冷蒿(*Artemisia frigida*), 铺地委陵菜(*Potentilla bifurca*), 糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*), 虫实(*Corispermum thelegium*), 灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)等。

1.2 取样方法

2003年8月下旬, 在示范区内的滩地, 固定沙丘和半固定沙丘3种生境中各选取一个50m×50m的小叶锦鸡儿灌丛样地, 划分成5m×5m的栅格, 得到100个栅格。为了尽可能地避免各向异性的影响, 3个样地呈东西向设置。记录栅格内的小叶锦鸡儿盖度, 同时取土壤表层0~20cm的土壤, 带回实验室分析土壤水分和养分。实验共取样300个。为保证养分数据的有效性, 取样时间在连续5d没有降雨时开始采样。

1.3 样品分析

分别用烘干法测定土壤含水量, 重铬酸钾氧化-外加加热法测定有机质, 半微量开氏法测定全氮含量^[15]。用酸度计(720A酸度计 Thermo Electron Corp.)测定土壤pH值。

1.4 数据分析

1.4.1 半方差分析 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, 半方差可用下式来估计:

$$\Lambda(r) = S_s^2 / S^2(r) + 1 \quad (1)$$

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 $C_0 + C$ (C : 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^[16-19]。

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^[18-20]:

$$Z(x) = (Z(x) - m) / s \quad (2)$$

1.4.2 分形分析 将半方差图取双对数坐标就得到双对数半方差图, 变量的分维 D 可用下面的公式来估计^[21]:

$$D = 2 - m/2 \quad (3)$$

式中, m 为双对数半方差图的斜率, 可通过对数据点的直线拟合来得到。分维是衡量一个变量的空间依赖性程度的指数^[7], 也反映了变量的小尺度变异和大尺度变异的相对重要性, D 值大, 说明小尺度上的变异显著; D 值小, 说明大尺度上的变异显著^[21]。

半方差分析采用 GS+ (Version 5.3.2; Gamma Delta, Plainwell, Michigan) 完成。

2 结果

2.1 不同生境中小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分的基本统计量

浑善达克沙地小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分的基本统计量结果见表 1。表 1 显示, 不同生境内的小叶锦鸡儿灌丛具有不同的土壤养分和水分。滩地的土壤水分、有机质和全氮含量最高, 半固定沙丘的土壤水分、有机质和全氮含量最低。

表 1 浑善达克沙地不同生境中小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分的基本统计量

生境 Habits	基本统计量 Basic statistics	盖度 Coverage (%)	土壤含水量 SWC (%)	有机质含量 C _{organic} (%)	全氮含量 N _{total} (%)	pH
滩地 Meadow	平均值 Mean	10	2.45	2.86	0.25	7.75
	标准偏差 SD	6.5	0.76	0.68	0.11	0.22
	变异系数 CV	65	31.02	23.78	44.00	2.83
	取样个数 N	100	100	100	100	100
固定沙丘 Fixed sand dune	平均值 Mean	12	2.25	1.26	0.18	7.65
	标准偏差 SD	8.6	0.65	0.46	0.05	0.25
	变异系数 CV	71.67	28.89	36.51	27.78	3.27
	取样个数 N	100	100	100	100	100
半固定沙丘 Semi-fixed sand dune	平均值 Mean	8	1.50	1.78	0.15	7.56
	标准偏差 SD	10.5	0.55	1.22	0.04	0.28
	变异系数 CV	131.25	36.67	68.54	26.67	3.70
	取样个数 N	100	100	100	100	100

2.2 不同生境中小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分间的相关性分析

从表 2 可以看出, 在不同的生境中, 各性状间具有相似的相关关系。植被盖度与土壤水分、土壤有机质和全氮含量三者之间正相关, 与土壤 pH 值负相关; 土壤水分与土壤有机质、全氮含量和土壤 pH 值三者之间正相关; 土壤有机质与土壤全氮和土壤 pH 值二者之间正相关; 土壤全氮和土壤 pH 值之间存在正相关关系。

表 2 浑善达克沙地不同生境中小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分间的相关性分析

Table 2 Analysis of the Pearson correlations between vegetation, soil water content and soil nutrient in *C. microphylla* shrub at various habits in the Otindag Sandland

生境 Habits	相关系数 r	盖度 Coverage	土壤水分 Soil moisture	有机质含量 C _{organic}	全氮含量 N _{total}	pH
滩地 Meadow	盖度 Coverage					
	土壤水分 Soil moisture	0.66*				
	有机质含量 C _{organic}	0.71**	0.41**			
	全氮含量 N _{total}	0.82**	0.56**	0.72**		
	pH	-0.45**	0.33**	0.16*	0.46**	
固定沙丘 Fixed sand dune	盖度 Coverage					
	土壤水分 Soil moisture	0.70*				
	有机质含量 C _{organic}	0.75**	0.44**			
	全氮含量 N _{total}	0.86**	0.61**	0.66**		
	pH	-0.32**	0.28**	0.12*	0.36**	
半固定沙丘 Semi-fixed sand dune	盖度 Coverage					
	土壤水分 Soil moisture	0.76*				
	有机质含量 C _{organic}	0.78**	0.48**			
	全氮含量 N _{total}	0.92**	0.72**	0.54**		
	pH	-0.36**	0.22**	0.19*	0.39**	

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

2.3 不同生境中小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分分布的半方差分析

表 3 和图 1 显示 3 种生境条件下(滩地、固定沙丘和半固定沙丘)的小叶锦鸡儿灌丛盖度、土壤有机质和全氮的空间分布符合球状模型, 具有空间自相关显著; 土壤 pH 值在滩地和固定沙丘的空间分布符合球状模型且空间自相关显著, 但在半固定沙丘空间自相关不显著; 土壤水分在 3 种生境中的空间分布都符合线性模型, 空间自相关显著。灌丛盖度空间分布的变程(A₀)从滩地、固定沙丘到半固定沙丘逐渐增大, 而土壤有机质和全氮空间分布的变程则逐渐变小且都大于相应生境中的灌丛盖度空间分布的变程。土壤有机质空间分布的变程小于相应生境中的土壤全氮空间分布的变程。除了土壤水分在滩地和固定沙丘的块金方差/阈值之比值大于 0.5 以外, 其余的块金方差/阈值之比值都较小(< 0.50)。

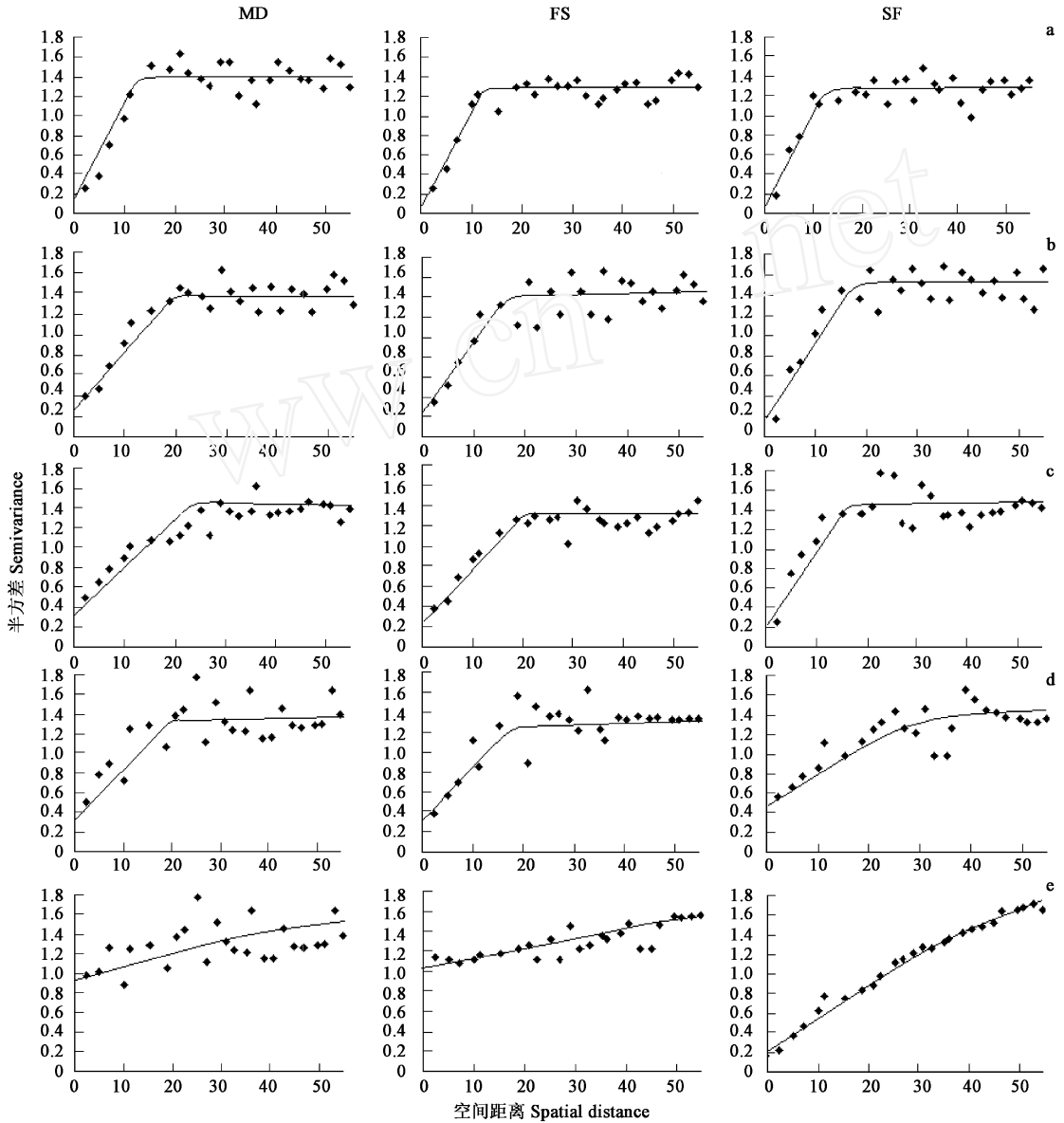


图 1 浑善达克沙地小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分分布的半方差图

Fig 1 Semivariograms of vegetation, soil water content and soil nutrient in *C. microphylla* shrub at various habits in the Ordos Sandland
生境类型 Habits: MD 滩地 Meadow; FS 固定沙丘 Fixed sand dune; SF 半固定沙丘 Semi-fixed sand dune; a 盖度 Coverage; b 有机质 C_{organic}; c 全氮 N_{total}; d 土壤 pH 值 pH; e 水分 Soil moisture

2.4 不同生境中小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分分布的分形分析

表 4 是浑善达克沙地不同生境中小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分的空间分布的分形分析结果。结果显示, 锦鸡儿的灌丛盖度、土壤有机质、土壤全氮、土壤水分和土壤 pH 值的分维数都较大(大于 1.8)。其中, 又以土壤有机质和土壤全氮的分

维数相对较高, 土壤水分和土壤 pH 值的分维数相对较小。

表 3 浑善达克沙地小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分布的半方差参数

Table 3 Geostatistics for semi-variograms expressing the distribution of vegetation, soil water content and soil nutrient in *C. microphylla* shrub at various habits in the Otindag Sandland

项目 Items	生境 Habits	块金方差 C_0	阈值 $C_0 + C$	变程 A_0	块金方差/阈值 $C_0 / C_0 + C$	R^2
盖度 Coverage	滩地 Meadow	0.192	1.411	11.982	0.136	0.745*
	固定沙丘 Fixed sand dune	0.088	1.224	12.126	0.072	0.768**
	半固定沙丘 Semi-fixed sand dune	0.076	1.236	14.520	0.061	0.812**
有机质 $C_{organic}$	有机质含量 滩地 Meadow	0.266	1.375	19.982	0.193	0.748**
	固定沙丘 Fixed sand dune	0.236	1.389	18.867	0.170	0.653**
土壤全氮 N_{total}	半固定沙丘 Semi-fixed sand dune	0.211	1.432	18.769	0.147	0.726**
	滩地 Meadow	0.326	1.411	23.868	0.231	0.568*
pH	固定沙丘 Fixed sand dune	0.225	1.338	22.361	0.168	0.661*
	半固定沙丘 Semi-fixed sand dune	0.213	1.408	18.226	0.151	0.638**
	滩地 Meadow	0.346	1.326	20.008	0.261	0.556*
土壤水分 Soil moisture	固定沙丘 Fixed sand dune	0.312	1.228	18.996	0.254	0.448*
	半固定沙丘 Semi-fixed sand dune	0.425	1.446	50.000	0.294	0.009
	滩地 Meadow	0.945	1.512	51.000	0.625	0.566*
土壤水分	固定沙丘 Fixed sand dune	1.019	1.432	68.000	0.712	0.742**
	半固定沙丘 Semi-fixed sand dune	0.208	1.762	132.000	0.118	0.864**

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

表 4 浑善达克沙地不同生境中小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分的空间分布的分形分析

Table 4 Fractal analysis of vegetation, soil moisture and soil nutrient in *C. microphylla* shrub at various habits in the Otindag Sandland

生境 Habits	盖度 Coverage	有机质含量 $C_{organic}$	全氮含量 N_{total}	pH	土壤水分 Soil moisture
滩地 Meadow	1.88	1.94	1.93	1.85	1.86
固定沙丘 Fixed sand dune	1.92	1.95	1.96	1.84	1.89
半固定沙丘 Semi-fixed sand dune	1.93	1.95	1.92	1.88	1.91

3 讨论

在许多沙地生态系统中, 沙基质中的养分含量都非常低^[19, 22-24]。Buckley 在澳大利亚沙丘植物的养分需求的研究中指出, 沙丘表层松散的植被以及 *T. rodia basedowii* 的丰富都和土壤中的氮素贫乏有关。然而, 其他植物如 *T. rodia* 却在这一区域生长良好^[23]。在同一研究区域的沙丘侧翼, 氮素含量丰富, 从而植被盖度高。Buckley 等指出, 在中国的腾格里沙地的氮素含量甚至比澳大利亚中部沙丘的氮素含量更低, 从而, 植被盖度也更低。我们的结果同样显示, 即使是在豆科植物分布较多的小叶锦鸡儿灌丛, 尤其是固定沙丘和半固定沙丘的小叶锦鸡儿灌丛, 土壤养分也比较低。这很可能和沙质土壤保肥能力较差有关。

结果表明, 植被盖度与土壤水分、土壤有机质和全氮含量三者之间正相关。这说明在沙地灌丛化的过程中, 土壤养分与植被盖度是相互作用的。这是因为, 小叶锦鸡儿的生物固氮作用以及凋落物能够有效地增加土壤氮素和有机质含量, 从而在小叶锦鸡儿分布的地方, 养分含量较高, 反之, 土壤养分较高的区域有利于小叶锦鸡儿幼苗定居成活, 从而增加植被盖度。

研究中, 小叶锦鸡儿灌丛在 3 种生境条件下(滩地、固定沙丘和半固定沙丘)的盖度、土壤有机质和全氮的空间分布符合球状模型, 具有空间自相关显著; 土壤 pH 值在滩地和固定沙丘的空间分布符合球状模型且空间自相关显著, 但在半固定沙丘空间自相关不显著; 土壤水分在 3 种生境中的空间分布都符合线性模型, 空间自相关显著。这一结果与以前的研究结果基本一致^[19, 26, 27]。

结果表明, 植被的变异尺度(变程)小于各个土壤要素的变异尺度。这可能意味着植被(小叶锦鸡儿灌丛)的分布和形成过程决定了土壤养分的分布和形成过程^[16]。这是因为, 正如前边所述, 由于豆科植物的生物固氮作用, 使得小叶锦鸡儿灌丛成为氮素的主要来源, 再加上植物的凋落物的因素都使得灌丛成为养分布的中心。同时, 又由于在浑善达克沙地, 风是常见现象。而植物灌丛能够有效地降低风速, 在灌丛周围形成风沙沉积, 同时也造成土壤养分的移动。所有这些现象都可能是退化草地养分分布出现“沃岛”现象的原因。同时, 这也在一定程度上表明豆科植物在浑善达克沙地退化草地的养分循环中的重要作用。

干旱半干旱区域的养分分布的“沃岛”现象^[28]、植物间抑制物质在土壤中的释放^[29]以及表层土壤的与生物的交互^[30]等常常是发生在小尺度上的。同时, 很多研究者认为, 在干旱半干旱区的植物空间分布格局受小尺度上的资源变异的影响^[31-33]。然

而,在干旱半干旱区,有关土壤养分分布格局的研究很少在小尺度上进行^[33-35]。在研究中,除了土壤水分在滩地和固定沙丘的块金方差/阈值之比大于 0.5 以外,其余的块金方差/阈值之比都较小(< 0.50)。这表明取样尺度能够较准确地反映当地的土壤小尺度养分分布格局。

作为衡量一个变量的空间依赖性程度的指数^[7],分维能够反映变量在小尺度和大尺度上变异的相对重要性。其大小可以用来说明是小尺度上的变异还是大尺度上的变异控制景观格局^[21]。在本文中,各个变量的分维都较大,这说明更小的尺度上生态学过程在各个变量要素的空间格局的形成中起控制作用。需要指出的是由于空间异质性的尺度变化特征,仅仅一个分维值往往不能给复杂的斑块结构一个全面的描述,所以需要根据其变化特点进行分段分析,得到几个不同尺度范围内的分维,能够反映空间异质性的等级斑块结构,可以对不同尺度上的空间异质性进行比较,比单一的分维值更能反映空间异质性的变化全貌。

示范区围封转移以后,养分循环发生了改变。研究结果表明,豆科植物在养分“沃岛”现象的形成中起了重要作用,是沙地植物氮素的重要来源。合理的利用和布局豆科植物的分布,可以更加有效地补充草地生态系统的养分,从而有利于加快生态系统的恢复进程。

4 小结

土壤养分呈现“沃岛”分布是干旱半干旱区生态系统的常见现象。浑善达克沙地是我国北方干旱半干旱区的主要沙地之一。近年来的围封转移改变了当地生态系统的养分循环。研究发现小叶锦鸡儿灌丛在 3 种生境条件下(滩地、固定沙丘和半固定沙丘)的盖度、土壤有机质和全氮的空间分布符合球状模型,具有空间自相关显著;土壤 pH 值在滩地和固定沙丘的空间分布符合球状模型且空间自相关显著,但在半固定沙丘空间自相关不显著;土壤水分在 3 种生境中的空间分布都符合线性模型,空间自相关显著。植被的变异尺度(变程)小于各个土壤要素的变异尺度。植被(锦鸡儿灌丛)的分布和形成过程决定了土壤养分的分布和形成过程。当地的豆科植物在养分“沃岛”现象的形成中起了重要作用,合理的利用和布局当地的豆科植物,可以更加有效地补充草地生态系统的养分,从而有利于加快生态系统的恢复进程。

References

- [1] Crawford C S, Gosz J R. Desert ecosystems: their resources in space and time. *Environmental Conservation*, 1982, **9**: 181~ 195
- [2] Garner W, Steinberger Y A. Proposed mechanism for the formation of 'fertile islands' in the desert ecosystem. *J. Arid Envir.*, 1989, **16**: 257~ 262
- [3] Jackson R B, Manwaring J H, Caldwell M M. Rapid physiological adjustment of roots to localized soil enrichment. *Nature*, 1990, **344**: 58~ 60
- [4] Fowler N. The role of competition in plant communities in arid and semiarid regions. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 1986, **17**: 89~ 110
- [5] Chapin F S III, Walker L R, Fastie C L, et al. Mechanisms of primary succession following deglaciation at Glacier Bay, Alaska. *Ecol. Monog.*, 1994, **64**: 149~ 175
- [6] Legendre P, Fortin M J. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio*, 1989, **80**: 107~ 138
- [7] Palmer M W. Fractal geometry: a tool for describing spatial pattern of plant communities. *Vegetatio*, 1988, **75**: 91~ 102
- [8] Boeken B, Shachak M. Desert plant communities in human made patches-implications for management. *Ecological Application*, 1994, **4**: 702~ 716
- [9] Ludwig J A, Tongway D J. Spatial organization of landscape and its function in semi-arid woodlands, Australia. *Landscape Ecology*, 1995, **10**: 51~ 63
- [10] Rescia A J, Schmitz M F, Martin de Agar P, et al. A fragmented landscape in northern Spain analyzed at different spatial scales: Implications for management. *J. Veg. Sci.*, 1997, **8**: 343~ 352
- [11] Brosofske K D, Chen J, Crow T R, et al. Vegetation responses to landscape structure at multiple scales across a Northern Wisconsin, USA, Pine Barrens landscape. *Plant Ecology*, 1999, **143**: 203~ 218
- [12] Li B. A pilot study on the vegetation and its utilization in desert area of Academy of Science. *Researches on the Combating Desertification*. Vol 4. Beijing: Science Press, 1962. 130~ 145
- [13] Li B, Zhou W F, Li W S. The survey on the Kubuqi Desert of Inner Mongolia. Team of the Combating Desertification of the Chinese Academy of Science. *Researches on the Combating Desertification*. Vol 4. Beijing: Science Press, 1962. 136~ 143
- [14] Zou S Y. Some comments and suggestions for current research works on *Hedysarum laeve*. *Inner Mongolia Grassland*, 1985, (2): 25~ 28
- [15] Liu G S ed. *Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles*. Beijing: Standards Press of China, 1996. **9**, 32, 33
- [16] Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, **9**: 651~ 657.

- [17] 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**: 568~ 572
- [18] 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
- [19] 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
- [20] Xu K X. *Numerical taxonomy*. Beijing: Science Press, 1994. 63~ 78
- [21] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil I. Application of fractal concepts to nested levels of soil variation *J. Soil Sci*, 1983, **34**: 577~ 597.
- [22] Ranwell D S. *Ecology of salt marshes and sand dunes* London: Chapman and Hall, 1972
- [23] Buckley R C. Soil nitrogen requirements of tropical sandridge plants *Biotropica*, 1983, **15**: 77~ 78
- [24] Buckley R C, Chen W, Liu Y, et al. Characteristics of the Tengger dunefield north central China and comparison with the central Australian dunefields *J. Arid Envir*, 1986, **10**: 97~ 102
- [25] Liu H J, Guo K. Classification and ordination analysis of plant communities in interdune low land in Hunshandak Sandy Land *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(10): 2163~ 2169
- [26] Jackson R B, Caldwell M M. Geostatistical patterns of soil heterogeneity around individual perennial plants *Journal of Ecology*, 1993a, **81**: 683~ 692
- [27] Jackson R B, Caldwell M M. The scale of nutrient heterogeneity around individual plants and its quantification with geostatistics *Ecology*, 1993b, **74**: 612~ 614
- [28] Garca Moya E, McKell C M. Contribution of shrubs to the nitrogen economy of a desert wash plant community. *Ecology*, 1970, **51**, 81 ~ 88
- [29] Rice E L. Allelopathy. Col XI Ser: *Physiological Ecology*. Orlando: Academic Press, 1984. 422
- [30] Johansen J R. Cryptogamic crusts of semiarid and arid lands of North America *J. Phycol*, 1993, **29**: 140~ 147.
- [31] Gutierez J R, Meserve P L, Contreras L, et al. Spatial distribution of soil nutrients and ephemeral plants underneath and outside the canopy of *Porlieria chilensis* shrubs (Zygophyllaceae) in arid coastal Chile *Oecologia*, 1993, **95**: 347~ 352
- [32] Puignaire F I, Haase P, Puigdefabregas J. Facilitation between higher plant species in a semiarid environment *Ecology*, 1996, **77**: 1420 ~ 1426
- [33] Daiyuan P, Bouchard A, Legendre P, et al. Influence of edaphic factors on the spatial structure of inland halophytic communities: a case study in China *J. Veg. Sci*, 1998, **9**: 797~ 804
- [34] Hook P B, Burke I C, Lauenroth W K. Heterogeneity of soil and plant N and C associated with individual plants and openings in North America short-grass steppe *Plant Soil*, 1991, **138**: 247~ 256
- [35] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems *Ecology*, 1996, **77**: 364 ~ 374

参考文献:

- [12] 李博. 中国西北和内蒙古沙漠地区的植被及其改造利用的初步意见. 见: 中国科学院治沙队. 治沙研究(第四号), 北京: 科学出版社, 1962. 130~ 145.
- [13] 李博, 周万福, 李文生. 内蒙古库布齐沙漠考察. 见: 中国科学院治沙队. 治沙研究(第三号), 北京: 科学出版社, 1962. 136~ 143.
- [14] 邹受益. 羊柴研究工作的评价与建议. 内蒙古草原, 1985, **2**: 25~ 28.
- [15] 刘光菘主编. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996. **9**, 32, 33.
- [16] 李海滨, 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**: 651~ 657.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 徐克学. 数量分类学. 北京: 科学出版社, 1994. 63~ 78.
- [25] 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.