鄂尔多斯草地退化过程中个体分布格局与土壤元素异质性

程晓莉¹ 安树青^{1*} 李 远¹ 卓元午¹ 管永健¹ 刘世荣²

(1 南京大学生命科学学院, 南京 210093)

(2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘 要 应用复合个体-距离法分析了鄂尔多斯草地退化过程中多种群和优势种个体分布格局, 应用统计方法分析了土壤有机碳和氮元素的异质化过程。结果表明: 在鄂尔多斯草地退化过程中, 多种群和优势种个体分布格局大多表现出不同尺度下的随机分布和聚集分布, 但多种群的个体分布格局在本氏针茅 (*Stipa bungeana*) + 油蒿 (*Artemisia ordosica*) 群落中出现均匀分布; 优势种油蒿和牛心朴子 (*Cynanchum komarovii*) 在油蒿 + 牛心朴子群落中均出现了均匀分布。土壤元素在单一优势种群落中存在不同程度的异质性, 油蒿群落中异质化程度最强; 在共优势种本氏针茅 + 油蒿群落中, 出现了土壤元素相对均质化, 油蒿 + 牛心朴子群落中, 异质化程度相对减弱。由于对土壤水分和养分的竞争, 使共优势种群落出现植物的均匀分布, 土壤元素相对均质化。土壤元素先后异质化过程首先表现为土壤有机质的异质化过程, 然后才表现为土壤氮的异质化过程。土壤元素先后异质化过程表明异质化过程首先表现为植被异质化, 植被的异质化导致土壤某些元素的异质化。

关键词 分布格局 均匀分布 土壤元素异质性 土壤水分和养分竞争 异质化过程

THE INDIVIDUAL DISTRIBUTION PATTERNS AND SOIL ELEMENTS HETEROGENEITY DURING THE DEGRADATION OF GRASSLAND IN ORDOS

CHENG Xiao-Li¹ AN Shu-Qing^{1*} LI Yuan¹ ZHUO Yuan-Wu¹ GUAN Yong-Jian¹ and LIU Shi-Rong²

(1 School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(2 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, the Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract We analyze the distribution patterns of the populations and the dominants of Ordos grassland in its degradation, using Combined Count-distance Analysis Method. 'Statistica' was used to analyze soil elements (total organic carbon, total nitrogen and dissolve nitrogen) in root-sphere and bare openings to show the process of soil element redistribution with changes of plant life-forms. The *Stipa bungeana* community, *S. bungeana* + *Artemisia ordosica* community, *A. ordosica* community, *A. ordosica* + *Cynanchum komarovii* community and *C. komarovii* community that presented successional degraded stages in desertification were chosen for the study. The results show that, during the degradation course of the grassland, most of the distribution patterns of populations are clump and random distribution at different scales, but multi-population distribution in the *S. bungeana* + *A. ordosica* community and in the *A. ordosica* + *C. komarovii* community was even with *A. ordosica* and *C. komarovii* as the dominant species. There was soil element heterogeneity at different degrees in single-dominant communities. The soil elements had the strongest heterogeneity in *A. ordosica* community. The heterogeneity in co-dominant communities was inferior to single-dominant communities. At the beginning of degradation, invasion of the *S. bungeana* grassland by the shrub *A. ordosica* does not lead to the immediate development of "islands of fertility". Competition for soil elements between *S. bungeana* and *A. ordosica* makes the *S. bungeana* + *A. ordosica* community temporarily homogeneous. Similarly, the soil elements have weaker heterogeneity in *A. ordosica* + *C. komarovii* community. The competition for soil water and soil resources leads to plant spatially homogeneous distributions and spatial homogeneity of soil elements in co-dominant communities. The heterogeneity process of the soil chemistry was characterized first by total organic carbon (TOC) heterogeneity and later by total nitrogen (TN) heterogeneity. Soil TOC is derived mainly from decomposed plant material; soil TN is provided by nitrogen-plant detritus, either plant-fixed or gas-fixed nitrogen. Thus, it is tentatively concluded from the results that the heterogeneity pro-

cess is initially characterized by plant spatial heterogeneity; then the plant spatial heterogeneity leads to the spatial heterogeneity of soil elements.

Key words Distribution pattern, Even distribution, Soil element heterogeneity, Soil water and resource competition, Heterogeneity process

植物个体的空间分布格局是研究种群特征、种群间相互作用以及种群与环境关系的重要手段(张金屯, 1998)。在荒漠景观中, 植物个体的分布格局是决定生态系统特性的主要因素, 草本和木本植物的比率决定群落中个体分布格局的特征, 土壤特性与植物的分布密切相关 (Robertson *et al.*, 1988), 植物群落的组成和群落中植物个体的分布格局的改变制约着土壤组成的异质化过程 (Breshears & Barnes, 1999)。当荒漠草地退化到荒漠灌丛群落, 由于草本和灌丛的空间异质化以及聚集土壤肥力的不同, 导致土壤肥力的重新分配, 形成肥料岛 (Fertility islands), 使土地资源变得暂时异质化 (Kieft *et al.*, 1998)。反过来, 土壤性质的改变进一步制约植被生产力 (Fisher *et al.*, 1987) 和植被结构 (Breshears & Barnes, 1999), 从而导致景观构型的异质化, 形成精细的破碎的景观 (Matteucci *et al.*, 1999), 从而导致生态系统脆弱化。植物个体分布格局的改变和土壤资源改变的相互作用, 在荒漠景观中便加速了荒漠化进程。植物个体在群落中的分布有 3 种基本分布类型, 即随机分布、聚集分布和均匀分布, 且这些类型的确定与样方大小关系十分密切 (Greig-Smith, 1983; Stewart & Rose, 1990), 也就是说群落中植物个体的分布类型和空间尺度有重要关系 (王峥峰等, 1998)。空间异质性是所有植物群落的内在特征, 而土壤资源的异质化尺度和强度对群落结构和生态过程有重要作用 (Robertson *et al.*, 1993; Robertson & Gross, 1994)。本文分析草地退化过程 5 个演替阶段多种群和优势种在不同尺度的植物个体分布格局, 以及相应群落中土壤有机碳和氮的小尺度异质化过程。探讨荒漠化过程中植物分布格局的特征和相应的土壤异质化过程, 以便预测荒漠化过程中植被演化的趋势和土壤元素异质化的进程。

1 研究区域概况

实验区设在中国科学院鄂尔多斯沙地草地生态实验站, 该站位于鄂尔多斯高原南部毛乌素沙漠区东北部, 东经 109°51', 北纬 39°02'。海拔 1 355 m, 属于干旱和半干旱的过渡地带。年降水量 380 ~ 400 mm; 年平均日照时间为 3 011 h, 太阳辐射

140.7 cal·cm⁻²; 年平均温度 6.2 °C, 全年 ≥ 10 °C 积温 2 754 °C; 无霜期 137 ~ 154 d; 地形地貌比较复杂, 梁地、块状沙地与低湿滩地相间, 以沙地为主, 有流动沙丘、半固定沙丘及固定沙丘 (杨宝珍等, 1994)。

毛乌素沙地的植被大致划分为三大类群: 分布于梁地的草原与灌丛植被, 半固定、固定沙丘与沙地的沙生灌丛以及滩地的草甸、盐生与沼泽植被。有戈壁针茅 (*Stipa gobica*)、沙生针茅 (*S. glareosa*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*) 以及超旱生灌木和半灌木组成的荒漠草原群落; 本氏针茅 (*Stipa bungeana*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza dahurica*) 等组成的典型草原群落, 柠条 (*Caragana* spp.)、沙柳 (*Salix cheliophila*)、羊柴 (*Hedysarum mongolicum*)、油蒿 (*Artemisia ordosica*) 和白沙蒿 (*Artemisia sphaerocephala*) 等为建群种组成的沙地植被。半灌木油蒿是沙生植物群落中分布最广泛的优势种; 滩地植被优势种有寸草苔 (*Carex stenophylla*)、马蔺 (*Iris ensata*)、芨芨草 (*Achnatherum splendens*) 和碱蓬 (*Suaeda corniculata*) 等 (张新时, 1994)。

2 研究方法

2.1 荒漠化过程的确定

杨宝珍等 (1994) 研究了沙地建群种油蒿的演替过程, 认为油蒿在流动沙丘旺盛生长, 随着沙丘的固定到具有结皮的沙丘, 油蒿的生长能力降低, 大量油蒿枯死, 油蒿将被其它物种所代替。如被本氏针茅所代替, 则有可能发展成本氏针茅草原, 向植被恢复的方向发展; 反之, 若被牛心朴子 (*Cynanchum komarovii*) 所侵占, 属于逆向演替, 向荒漠化方向发展 (杨宝珍等, 1994)。王庆锁等 (1997) 报道了油蒿群落顺向演替趋势为流动沙丘 → 流动沙地油蒿群落 → 固定沙地油蒿群落 → 具结皮的固定沙地油蒿 + 本氏针茅群落 → 本氏针茅群落。本氏针茅群落是典型草原群落, 由于开垦、人为破坏与过度利用, 本氏针茅群落退化, 将被油蒿群落代替, 油蒿是半荒漠和荒漠的建群种, 其生境是固定沙丘和流动沙丘, 流动沙丘的出现导致沙漠化加速。荒漠化过程另一发展趋势是本氏针茅群落 → 油蒿群落 → 牛心朴子群落。牛心朴子是荒漠化过程中最后阶段的指示种, 是荒漠草原沙化标志之一。基于此, 我们选择 5 个不同植被

演替阶段的群落: 本氏针茅群落、本氏针茅 + 油蒿群落、油蒿群落、油蒿 + 牛心朴子群落和牛心朴子群落, 作为当地荒漠化过程的系列群落加以研究。

2.2 植物个体分布格局野外调查

在本氏针茅群落、本氏针茅 + 油蒿群落、油蒿群落、油蒿 + 牛心朴子群落和牛心朴子群落等 5 个群落, 分别设置 5 个固定样地, 对该 5 个群落中植物个体的分布格局进行调查。调查样方面积均为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, 以 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 为单位把样方分成 64 个网格, 记录样方内所有个体的水平坐标、种名、株高、基幅和冠幅等, 参照数据记录把每个个体的位置按比例绘于坐标图上。

2.3 土壤元素异质性野外取样

在 5 个固定样方的每个样地中, 定义植株冠幅垂直投影边缘 10 cm 以外且直径大于 10 cm 没有植物生长的地段为空白地。用直径为 5 cm 的取土器取土, 取土深 20 cm。在每个样方中, 随机取 10 个优势种根系下的土壤, 同时去除土样中的残根; 在空白地, 分别在距植物根系不等距离的空白地随机取土 20 个, 空白地中心点离植物根系距离为 20 ~ 80 cm。

2.4 植物个体分布格局数据分析

王峥峰等(1998)比较了多种测定种群分布格局的方法后认为复合个体-距离方法(Combined count-distance analysis)比较好(Sewart & Rose, 1990; 王峥峰等, 1998; 张金屯, 1998), 传统的分布格局分析方法只能分析一种尺度下的格局, 而这种复合个体-距离分析方法以种群空间分布的坐标点图为基础, 能够分析不同尺度下个体的分布格局, 所描述的结果更符合实际。

复合个体-距离分析法考虑了种群中个体与其它个体之间的距离。函数 $\rho K(r)$ 定义为从种群中随机抽取的个体落在以定点为圆心、 r 为半径的圆内的期望值, 其中 ρ 为种群密度。如果种群是随机分布, 则 $K(r) = \pi r^2$ 。对实际种群考虑样地外个体效应后得:

$$\hat{K}(r) = n^{-2} |A| \sum_i \sum_j W_{ij}^{-1} I_r(u_{ij}) (i \neq j) \quad (1)$$

当个体 i 和 j 的距离 $u \leq r$ 时, $I_r(u)$ 为 1, 否则为 0, W_{ij} 是以 i 为圆心、 u_{ij} 为半径的圆在样地中的比例, A 为样地面积。 $\hat{K}(r)$ 和随机分布 $K(r)$ 相比可用 $\hat{L}(r)$ 表示:

$$\hat{L}(r) = r - \sqrt{\hat{K}(r)/\pi}$$

当 $\hat{L} = 0$ 时, 表示随机分布; 当 $\hat{L}(r) > 0$ 时为均匀分布; 当 $\hat{L}(r) < 0$ 时为聚集分布。 $\hat{L}(r)$ 的 95% 置信区间采用 Monte Carlo 方法求得。当种群表现为聚集分

布时, 把偏离随机置信区间的最大值作为最大聚集强度指标, 而聚集规模为以该聚集强度为半径的圆(张金屯, 1998; Breshears & Barnes, 1999)。

2.5 土壤元素异质化室内实验和数据分析

土壤总有机碳(TOC)用重铬酸钾-外加热法测定; 全氮(TN)用半微量凯氏法测定; 可溶性氮(DN)用碱解-蒸馏法测定。样品测定工作由中国科学院南京土壤所土壤与环境分析测试中心完成。 t 检验分析不同群落中优势种根系下的土壤元素含量和空白地的含量, 以及不同优势种根系下的土壤元素的差异, 所有的土壤元素实验数据用统计软件 Statistica 和 Excel 完成。

3 结果与分析

3.1 多种群个体分布格局

本氏针茅群落多种群的个体分布格局在 0 ~ 0.7 m 和 0.8 ~ 2.0 m 尺度范围内呈随机分布, 在 0.7 ~ 0.8 m 内呈聚集分布。本氏针茅 + 油蒿群落: 在 0 ~ 0.3 m 呈聚集分布, 0.3 ~ 1.2 m 和 1.3 ~ 2.0 m 呈随机分布, 1.2 ~ 1.3 m 呈均匀分布。油蒿群落: 在 0 ~ 0.6 m 呈聚集分布, 在 0.6 ~ 2.0 m 呈随机分布。油蒿 + 牛心朴子群落: 在 0 ~ 1.1 m 呈聚集分布, 1.1 ~ 2.0 m 呈随机分布。牛心朴子群落: 在 0 ~ 0.7 m 呈聚集分布, 在 0.7 ~ 2.0 m 呈随机分布(图 1)。从本氏针茅群落退化到本氏针茅 + 油蒿群落, 小尺度的聚集分布代替了中尺度的聚集分布, 并出现了中尺度的均匀分布, 当退化到油蒿群落, 中尺度的均匀分布也消失了。从油蒿群落退化到牛心朴子群落过程中, 均呈小尺度的聚集分布, 大尺度的均匀分布, 但分布的尺度不同。

3.2 优势种的分布格局

本氏针茅在本氏针茅群落中的分布格局表现为在 0 ~ 1.1 m 尺度范围内呈聚集分布, 在 1.1 ~ 2.0 m 呈随机分布(表 1)。在本氏针茅 + 油蒿群落中表现为 0 ~ 0.9 m 和 1.7 ~ 2.0 m 呈随机分布, 0.9 ~ 1.7 m 呈均匀分布。在油蒿群落中为随机分布。在退化过程中, 小尺度下聚集分布消失了, 出现中等尺度的均匀分布; 最后均匀分布也消失了。油蒿的分布格局在本氏针茅 + 油蒿群落, 油蒿群落和牛心朴子群落中均呈随机分布, 在油蒿 + 牛心朴子群落中 0 ~ 0.3 m 尺度内为聚集分布, 0.3 ~ 1.4 m 尺度内为随机分布, 1.4 ~ 2.0 m 尺度内为均匀分布。在退化过程中油蒿的分布格局变化相对稳定, 但在复合优势种油蒿 + 牛心朴子群落, 从原来的随机分布分化为

图1 鄂尔多斯草地退化过程中种群复合个体-距离分析

Fig.1 Combined count-distance analysis for populations in Ordos grassland during its desertification

--- 95% 置信区间(上限和下限) Confidence envelop for Poisson expectation (high limit and low limit) ——— 观察值 Observed distribution

I. 本氏针茅群落 *Stipa bungeana* community II. 本氏针茅群落 + 油蒿群落 *S. bungeana* + *A. ordosica* community III. 油蒿群落 *A. ordosica* community IV. 油蒿群落 + 牛心朴子群落 *A. ordosica* + *Cynanchum komarovii* community V. 牛心朴子群落 *C. komarovii* community

小尺度的聚集分布,中尺度的随机分布和大尺度的均匀分布。牛心朴子在油蒿 + 牛心朴子群落中表现为0~0.8 m和1.2~2.0 m尺度内呈随机分布,0.8~1.2 m尺度内呈均匀分布,在牛心朴子群落0~0.3 m和0.9~2.0 m尺度内呈随机分布,0.3~0.9 m尺度内呈聚集分布。当发展到牛心朴子群落时,均匀分布消失后出现聚集分布。

3.3 土壤有机碳和土壤元素氮的异质化

由表2可知,土壤有机碳(TOC)在本氏针茅群落、油蒿群落、油蒿 + 牛心朴子群落和牛心朴子群落中,植物根系下含量和空白地含量差异显著($p < 0.05$, $p < 0.001$)。在油蒿群落中,油蒿根系下的TOC的含量为0.557%,显著高于空白地0.392%(图2a)。在油蒿 + 牛心朴子群落中,灌丛(油蒿)根系的含量和草本(牛心朴子)根系下的含量差异显著 $p < 0.05$ (表2),油蒿根系下的TOC的含量为0.419%,牛心朴子根系下为0.356%(图2a)。在本氏针茅 + 油蒿群落中,本氏针茅根系下TOC的含量和空白地的含量,以及本氏针茅根系下和油蒿根系下的含量无显著性差异,只有油蒿根系下的含量和空白地的含量差异显著(表2)。

全氮(TN)在本氏针茅群落、油蒿群落、油蒿 + 牛心朴子群落和牛心朴子群落中,植物根系下的含量和空白地的含量,以及灌丛(油蒿)根系的含量和草本(牛心朴子)根系下的含量差异显著($p < 0.05$, $p < 0.001$)(表2)。在油蒿群落和油蒿 + 牛心朴子群落中差异极显著,其中油蒿群落中,油蒿根系下TN的含量为0.057%,空白地0.042%;在油蒿 + 牛心朴子群落,油蒿根系下的TN的含量最高为0.046%,牛心朴子根系下为0.037%,空白地为0.024%(图2b)。在本氏针茅 + 油蒿群落中,TN没有差异,呈均质分布。可溶性氮(DN)在本氏针茅群落、油蒿群落和牛心朴子群落中,植物根系下的含量和空白地的含量差异显著(表2)。在本氏针茅群落,本氏针茅根系下DN的含量为 $68.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,空白地 $50.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在油蒿群落中,油蒿根系下DN的含量为 $60.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,空白地 $42.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在牛心朴子群落中,牛心朴子根系下DN的含量为 $32.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,空白地 $18.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图2c)。在本氏针茅 + 油蒿群落中,DN均质分布。在油蒿 + 牛心朴子群落中,只有牛心朴子根系下含量和空白地差异显著。在单优势种群落中(本氏针茅、油蒿群落和牛心朴子群落)土壤存在着不同程度的异质化。本氏针茅 + 油蒿群落中异质化过程不明显,油蒿 +

表 1 鄂尔多斯草地退化过程中优势种分布格局的变化
Table 1 The changes of distribution patterns of the dominant species of Ordos grassland during its desertification

	I	II	III	IV	V
本氏针茅 <i>Stipa bungeana</i>	0~1.1 m: 聚集分布 Clump 1.1~2.0 m: 随机分布 Random	0~0.9 m: 随机分布 Random 0.9~1.7 m: 均匀分布 Even 1.7~2.0 m: 随机分布 Random			
油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>		0~2.0 m: 随机分布 Random	0~2.0 m: 随机分布 Random	0~0.3 m: 聚集分布 Clump 0.3~1.4 m: 随机分布 Random 1.4~2.0 m: 均匀分布 Even	0~2.0 m: 随机分布 Random
牛心朴子 <i>Cynanchum komarovii</i>				0~0.8 m: 随机分布 Random 0.8~1.2 m: 均匀分布 Even 1.2~2.0 m: 随机分布 Random	0~0.3 m: 随机分布 Random 0.3~0.9 m: 聚集分布 Clump 0.9~2.0 m: 随机分布 Random

I、II、III、IV、V: 同图 1 See Fig. 1

表 2 退化阶段根系下的土壤含量与空白地以及不同植物根系下土壤含量的差异检验
Table 2 The contrast element between root-spheres and openings and element between different root-spheres in degraded communities

群落演替阶段 Community stage	取样区 Sample areas	总有机碳 Total organic carbon (TOC)	全氮 Total nitrogen (TN)	可溶性氮 Available nitrogen (DN)
I	S and O	$p = 0.005 < 0.01$	$p = 0.026 < 0.05$	$p = 0.031 < 0.05$
	S and O	$p = 0.147$	$p = 0.563$	$p = 0.131$
II	A and O	$p = 0.003 < 0.01$	$p = 0.153$	$p = 0.811$
	S and A	$p = 0.061$	$p = 0.325$	$p = 0.399$
III	A and O	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p = 0.031 < 0.05$
	A and O	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p = 0.083$
IV	C and O	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p = 0.044 < 0.05$
	A and C	$p = 0.016 < 0.05$	$p < 0.001$	$p = 0.992$
V	C and O	$0.048 < 0.05$	$p = 0.022 < 0.05$	$p = 0.008 < 0.01$

I、II、III、IV、V: 同图 1 See Fig. 1

$p < 0.05, 0.01, 0.001$: 差异显著性水平 Level of significant difference S. 本氏针茅根区 *Stipa bungeana* root-sphere A. 油蒿根区 *Artemisia ordosica* root-sphere C. 牛心朴子根区 *Cynanchum komarovii* root-sphere O. 空白地 Openings area

牛心朴子群落的异质化程度弱于单优势种群落。

t 检验发现在本氏针茅群落中,本氏针茅根系下的 TOC、TN 和 DN 的含量与空白地的含量差异显著。在本氏针茅 + 油蒿群落中,只有油蒿根系下 TOC 的含量和空白地的含量有显著差异,而 TN 和 DN 在本氏针茅根系下、油蒿根系下和空白地的含量均没有显著差异,说明 TOC 首先表现为异质化过程。在油蒿群落中,油蒿根系下的 TOC、TN 和 DN 的含量与空白地的含量差异极显著。在油蒿 + 牛心朴子群落中,油蒿根系下的 TOC 和 DN 与空白地的含量差异极显著,牛心朴子根系下的 TOC、TN 和 DN 的含量与空白地的含量差异显著,油蒿根系下的 TOC 和 TN 的含量与牛心朴子根系下的含量差异显著。在牛心朴子群落中,牛心朴子根系下的 TOC、TN 和 DN 的含量与空白地的含量差异显著(表 2)。以上

结果表明:土壤元素异质化过程首先表现为 TOC 的异质化,然后为 N 的异质化。土壤 TOC 主要来源于枯死植物的分解,土壤氮来源于固氮植物的固氮、生物固氮和大气中的氮。因此可以初步推断异质化过程首先表现为植物的异质化过程,植物的异质化过程导致土壤某些元素的异质化过程。

4 结论和讨论

植物个体分布格局的形成是其生物学特性和环境综合作用的结果,在均一的生境或者植物对环境具有高度忍耐力时导致植物的随机分布,均一的生境趋于斑块化导致植物的聚集分布,植物对生境强需求的激烈竞争导致植物的均匀分布(Rebertus *et al.*, 1989)。Couteron 和 Kokou (1997)认为荒漠植被在多数情况下为随机分布,不排除局部地段的聚集

图2 退化群落根区下土壤元素含量与空白地的差异

Fig. 2 Difference of elements between root-spheres and openings in the degraded communities

TOC: 总有机碳 Total organic carbon TN: 全氮 Total nitrogen DN: 可溶性氮 Dissolved nitrogen

I、II、III、IV、V: 同图1 See Fig. 1

分布,但均匀分布极少出现。鄂尔多斯草地退化过程中,植物个体的分布格局大多表现出不同尺度下的随机分布和聚集分布,植物个体的分布格局在本氏针茅+油蒿群落中出现均匀分布;优势种油蒿和牛心朴子在油蒿+牛心朴子群落中均出现了均匀分布。很多研究表明当草地经过荒漠化过程退化到灌丛,土壤资源重新分配形成“肥料岛”,空间异质化程度增强 (Garner & Steinberger, 1989; Schlesinger *et al.*, 1990; 1996; Kieft *et al.*, 1998)。但是我们的研究表明在退化的开始,从本氏针茅群落退化到本氏针茅+油蒿群落,半灌丛油蒿的入侵,并没有立即使异质化程度增强形成“肥料岛”,而是由本氏针茅群落土壤资源一定程度的异质化到本氏针茅+油蒿群落土壤资源变为相对的均质化。当荒漠草地经过长期的荒漠化过程退化到荒漠灌丛,由于草本和灌丛聚集土壤元素的能力不同,土壤资源出现暂时的异

质化 (Schlesinger *et al.*, 1996; 1999; Kieft *et al.*, 1998)。在油蒿群落中,土壤元素异质化程度最强,油蒿根系下的土壤元素的含量显著高于空白地的含量。在油蒿+牛心朴子群落中,土壤异质化程度相对减弱。干旱区植物由于对土壤水分和养分强烈的竞争导致植物群落内个体的均匀分布 (Greig-Smith, 1983; 孙书存等, 1997),在共优势种本氏针茅+油蒿和油蒿+牛心朴子群落中,由于本氏针茅和油蒿对土壤水分和养分竞争,以及油蒿和牛心朴子对土壤水分和养分竞争,在本氏针茅+油蒿群落中个体出现了均匀分布,在油蒿+牛心朴子群落中出现了优势种油蒿和牛心朴子的均匀分布。植物个体的均匀分布导致了土壤元素在本氏针茅+油蒿中出现了均质化,而油蒿+牛心朴子群落中土壤异质化程度相对减弱。同时我们发现土壤元素异质化的过程首先表现为土壤有机碳的异质化过程,土壤有机碳主要来源于枯死植物的分解。进一步说明异质化过程首先表现为植物的异质化,植物的异质化导致土壤某些元素的异质化 (Gollins & Wein, 1998)。鄂尔多斯草地植物退化过程中,在共优势种群落中出现了植物的均匀分布和土壤元素的相对均质化,进一步说明在草地退化过程中存在本氏针茅、油蒿和牛心朴子对土壤水分的竞争过程。郑海雷等(1992)曾报道油蒿具有变水植物的特点,牛心朴子具有恒水植物的特点,在相同立地条件下,牛心朴子水分利用效率显著高于油蒿;牛心朴子只受轻微水分胁迫或不受水分胁迫,而油蒿则始终处于水分胁迫之下,牛心朴子在竞争中占有相对的优势。程晓莉等(2001)曾报道本氏针茅、油蒿和牛心朴子的冠根比分别为0.48、0.88和0.50,油蒿的冠根比显著高于本氏针茅和牛心朴子。在施水量157.5~630.0 mm之间,油蒿的蒸腾量为50.80~163.36 mm,蒸腾量高于施水量 (肖春旺等, 2001)。说明油蒿地上部分蒸发和耗水量都远大于本氏针茅和牛心朴子。鄂尔多斯沙地的沙优势覆盖和水分特点决定了灌丛油蒿为该地区的优势生活型 (李新荣, 1997),但油蒿群落由于其自身的高蒸发量和高耗水量特点 (程晓莉等, 2001),高密度的油蒿群落便又进入退化阶段,在没有人干扰的情况下,则向本氏针茅群落演变。如有人为干扰,或退化为沙地,或被牛心朴子所取代,从中度荒漠化向重度荒漠化发展。

参 考 文 献

Breshears, D. D. & F. J. Barnes. 1999. Interrelationships between plant functional types and soil moisture heterogeneity for

- semiarid landscapes within the grassland/forest continuum: a unified conceptual model. *Landscape Ecology*, **14**: 465 ~ 478.
- Cheng, X. L. (程晓莉), S. Q. An (安树青), X. L. Chen (陈兴龙), G. Q. Li (李国旗) & S. R. Liu (刘世荣). 2001. The correlation between the desertification of grassland and the change of vegetation biomass in Erdusi. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), **37**(2): 13 ~ 20. (in Chinese with English abstract)
- Couteron, P. & K. Kokou. 1997. Woody vegetation spatial patterns in a semi-arid savanna of Burkina Faso, West Africa. *Plant Ecology*, **132**: 211 ~ 227.
- Fisher, F. M., J. C. Zak, G. L. Cunningham & W. G. Whitford. 1987. Water and nitrogen effects on growth and allocation patterns of creosotebush in the northern Chihuahua Desert. *Journal of Range Management*, **47**: 387 ~ 391.
- Garner, W. & Y. Steinberger. 1989. A proposed mechanism for the formation of "Fertile Island" in the desert ecosystem. *Journal of Arid Environments*, **16**: 257 ~ 262.
- Gollins, B. & G. Wein. 1998. Soil heterogeneity effects on canopy structure and composition during early succession. *Plant Ecology*, **138**: 217 ~ 230.
- Greig-Smith, P. 1983. *Quantitative plant ecology*. 3rd ed. London: Blackwell Scientific Publications.
- Kieft, T. L., C. S. White, S. R. Loftin, R. Aguilar, J. A. Craig & D. A. Skaar. 1998. Temporal dynamics in soil carbon and nitrogen resources at a grassland-shrubland ecotone. *Ecology*, **79**: 671 ~ 683.
- Li, X. R. (李新荣). 1997. Land desertification and biodiversity protection in Mu Us sandy land. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), **17**: 58 ~ 62. (in Chinese with English abstract)
- Matteucci, S. D., A. Colma & L. Pla. 1999. Plant biodiversity in the arid lands of Falcon (Venezuela). *Interciencia*, **24**: 1 ~ 300.
- Rebertus, A. J., G. B. Williamson & E. B. Moser. 1989. Fire-induced change in *Quercus laevis* spatial pattern in Florida sandhills. *Journal of Ecology*, **77**: 638 ~ 650.
- Robertson, G. P., M. A. Huston, F. C. Evans & J. M. Tiedje. 1988. Spatial variability in a successional plant community: patterns of nitrogen availability. *Ecology*, **69**: 1517 ~ 1524.
- Robertson, G. P., J. R. Crum & B. G. Ellis. 1993. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance. *Oecologia*, **96**: 451 ~ 456.
- Robertson, G. P. & K. L. Gross. 1994. Assessing the heterogeneity of belowground resources: quantifying scale. In: Caldwell, M. M. & R. W. Pearcy eds. *Exploitation of environmental heterogeneity by plants*. New York: Academic Press. 237 ~ 253.
- Schlesinger, W. H., J. F. Reynolds, G. L. Cunningham, L. F. Huenneke, W. M. Jarrell, R. A. Virginia & W. G. Whitford. 1990. Biological feedbacks in global desertification. *Science*, **47**: 1043 ~ 1048.
- Schlesinger, W. H., J. A. Raikes, A. E. Hartley & A. F. Cross. 1996. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystem. *Ecology*, **77**: 364 ~ 374.
- Schlesinger, W. H., A. D. Aberhams, A. J. Parsons & J. Wainwright. 1999. Nutrient losses in runoff from grassland and shrubland habitats in Southern New Mexico. I. Rainfall simulation experiments. *Biogeochemistry*, **45**: 21 ~ 34.
- Stewart, G. H. & A. B. Rose. 1990. The significance of life history strategies in the developmental history of mixed beech (*Nothofagus*) forests, New Zealand. *Vegetatio*, **87**: 101 ~ 114.
- Sun, S. C. (孙书存) & Z. G. Liu (刘照光). 1997. Study on the patterns of *Convolvulus tragacuthoides* population in the upper reaches of the Minjiang river. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology* (应用与环境生物学报), **3**: 193 ~ 198. (in Chinese with English abstract)
- Wang, Q. S. (王庆锁), X. J. Dong (董学军), X. D. Chen (陈旭东) & B. Z. Yang (杨宝珍). 1997. Study on some features of *Artemisia ordosica* community at the different successional stages. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **21**: 531 ~ 538. (in Chinese with English abstract)
- Wang, Z. F. (王峥嵘), S. Q. An (安树青), X. L. Zhu (朱学雷), D. G. Campell & X. B. Yang (杨小波). 1998. Distribution pattern of tree population in tropical forest and comparison of its study methods. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **9**: 575 ~ 580. (in Chinese with English abstract)
- Xiao, C. W. (肖春旺) & G. S. Zhou (周广胜). 2001. Study on the water balance in three dominant plants with simulated precipitation change in Maowusu sandland. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **43**: 82 ~ 88. (in Chinese with English abstract)
- Yang, B. Z. (杨宝珍), X. J. Dong (董学军), Q. Gao (高琼), Z. M. Liu (刘志茂) & Alatangbao (阿拉腾宝). 1994. A study on the transpiration and water-deficit regime of the *Artemisia ordosica* community. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **18**: 161 ~ 170. (in Chinese with English abstract)
- Zhang, X. S. (张新时). 1994. Principles and optimal models for development of Maowusu sandy grassland. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **18**: 1 ~ 18. (in Chinese with English abstract)
- Zhang, J. T. (张金屯). 1998. Analysis of spatial point for plant species. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **22**: 344 ~ 349. (in Chinese with English abstract)
- Zheng, H. L. (郑海雷) & Z. C. Huang (黄子琛). 1992. Physiological ecology study on *Artemisia ordosica* and *Cynanchum komarovii* in the Maowusu sandland. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学学报), **16**: 197 ~ 207. (in Chinese with English abstract)