

DOI: 10.5846/stxb201807301623

许爱云, 刘金龙, 米世明, 朱宁宁, 于双, 许冬梅. 宁夏荒漠草原蒙古冰草 (*Agropyron mongolicum*) 种群小尺度空间分布及其关联性. 生态学报, 2019, 39(12): - .

Xu A Y, Liu J L, Mi S M, Zhu N N, Yu S, Xu D M. Fine-scale spatial distribution pattern and association of *Agropyron mongolicum* population in desert steppe in Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): - .

## 宁夏荒漠草原蒙古冰草 (*Agropyron mongolicum*) 种群小尺度空间分布及其关联性

许爱云<sup>1</sup>, 刘金龙<sup>1</sup>, 米世明<sup>1</sup>, 朱宁宁<sup>1</sup>, 于双<sup>1</sup>, 许冬梅<sup>1,2,\*</sup>

1 宁夏大学农学院, 银川 750021

2 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021

**摘要:** 植物种群的空间分布格局及其关联性不仅反映种群的生态调控能力和环境可塑性机制, 也是其在群落中地位与生存能力的外在表现。在宁夏盐池县, 选择以蒙古冰草为优势种的荒漠草原为对象, 按丛径将蒙古冰草个体划分 I 级株丛 (0—5 cm)、II 级株丛 (5.1—10 cm)、III 级株丛 (10.1—15 cm)、IV 级株丛 (15.1—20 cm) 和 V 级株丛 (> 20 cm) 5 个株丛级, 采用点格局分析中的 O-ring 函数统计方法, 分析了蒙古冰草种群的株丛结构、各级株丛的空间分布格局及关联性。结果表明: (1) 蒙古冰草种群中 I、II 级株丛占比 (79.24%) 明显高于 IV、V 级株丛占比 (8.46%), 种群中可供更新的幼苗充足, 种群表现出良好的发展趋势。(2) 在小尺度范围内, 蒙古冰草 I、II、III 级株丛主要表现为聚集分布, 而且个体越小聚集程度越高, 随尺度的增大, 逐渐过渡到随机分布和均匀分布, IV、V 级株丛在所有尺度上均为随机分布。(3) 蒙古冰草种群 I 级株丛与 II、III 级株丛, II 级株丛与 III 级株丛在小尺度内呈显著正关联, 随研究尺度的增大趋于无关联, 其余各级株丛在 0—5 m 尺度上主要呈无关联。

**关键词:** 蒙古冰草; 株丛结构; 空间分布格局; 空间关联性

## Fine-scale spatial distribution pattern and association of *Agropyron mongolicum* population in desert steppe in Ningxia

XU Aiyun<sup>1</sup>, LIU Jinlong<sup>1</sup>, MI Shiming<sup>1</sup>, ZHU Ningning<sup>1</sup>, YU Shuang<sup>1,2,\*</sup>

1 College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 State Key Laboratory Breeding Base of Land Degradation and Ecological Restoration of Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** *Agropyron mongolicum* is the dominant species in desert steppe in Ningxia, China. With strong drought resistance, cold endurance, and wind and sand tolerance characteristics, *A. mongolicum* plays important roles in soil and water conservation, agricultural production, and ecological restoration. The spatial distribution pattern and association of plant population not only reflect the ecological regulation ability and environmental plasticity mechanism of a population, but also the external manifestation of their status and viability in the community. To clarify the spatial distribution pattern and association of *A. mongolicum* at different developmental stages, a desert steppe dominated by *A. mongolicum* in Yanchi, Ningxia was selected as the research object. The spatial coordinates and diameter of individual clusters of *A. mongolicum* were measured with a 10 m × 10 m sample plot. Five cluster degrees consisting of I degree cluster (0—5 cm), II degree cluster (5.1—10 cm), III degree cluster (10.1—15 cm), IV degree cluster (15.1—20 cm), and V degree cluster (>20 cm) were classified according to the individual cluster diameter. Based on the data from the sample plot, the spatial

**基金项目:** 国家重点研发计划重点专项 (2016YFC0500505); 宁夏高等学校一流学科建设 (草学学科) 资助项目 (NXYLXK2017A01)

**收稿日期:** 2018-07-30; **网络出版日期:** 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nxxudongmei@163.com

distribution pattern and association of *A. mongolicum* among different degree clusters were analyzed by adopting the method of point pattern analysis and O-ring function statistic. The results showed that the proportion of I and II degree clusters was significantly higher than that of IV and V degree clusters in *A. mongolicum* population, accounting for 79.24% of the total population. The population had adequate regenerative seedlings and exhibited good development trend. The I, II, and III degree clusters mainly aggregated in a small spatial scale, and the aggregation degree strengthened with the decrease in individuals. As the scale increased, the aggregation degree decreased and gradually transformed to random and uniform distribution. The IV and V degree clusters of *A. mongolicum* appeared as random distribution at all scales. The association between I and II degree clusters, I and III degree clusters, and II and III degree clusters of *A. mongolicum* showed significant positive relationship at a small scale, and tended to be unassociated with increase in scale. The remaining cluster levels showed no association at the 0—5 m scale.

**Key Words:** *Agropyron mongolicum*; bunch structure; spatial distribution pattern; spatial association

植物种群的空间格局是指种群内个体在水平空间上的分布方式或配置特点,是种群生态学特性、种内种间关系及生物与环境等综合作用的结果<sup>[1]</sup>。植物种群的空间分布类型和空间关联性是植物种群空间格局研究的两个主要内容<sup>[2]</sup>,可以反映出植物种群的生态调控能力和环境可塑性机制,是其在群落中地位与生存能力的外在表现<sup>[3]</sup>。

植物种群间相互作用和生态过程所发生的空间区域是生态动力学的一个重要决定因素,利用空间数据检验生态理论也是生态学研究热点领域之一<sup>[4-5]</sup>。1977年Ripley<sup>[6]</sup>提出点格局分析方法,以植物个体在二维空间上的坐标为基础,极大限度的利用了植物种群空间坐标图的信息,可进行任意尺度下植物种群的空间格局分析,检验能力较强<sup>[7]</sup>。近年来点格局分析被广泛应用到乔木<sup>[8]</sup>、灌丛<sup>[9]</sup>和草本<sup>[10]</sup>植物种群的研究中,从不同尺度揭示了植物种群的生态学特性和形成过程。植物种群不同发育阶段个体的空间分布格局及其关联性可从时间和空间上揭示植物种群对生境资源的复杂利用,对认识植物群落内部结构和共存机制具有重要意义。

蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)又称沙芦草,为多年生疏丛禾草,具有较强的抗旱、抗寒、耐风沙等特性,在我国北方荒漠草原区广泛分布,是宁夏荒漠草原的优势种群之一<sup>[11]</sup>,作为当地优质牧草,有其独特的生态过程,在植被生态修复中具有重要作用<sup>[12]</sup>。分析荒漠草原蒙古冰草种群的空间格局不仅是对干旱半干旱生境中种群空间格局理论的完善与充实,同时也是认识蒙古冰草种群特征的有效途径<sup>[13]</sup>。目前关于蒙古冰草的研究主要集中在蒙古冰草基因片段的克隆与表达<sup>[14-15]</sup>、遗传多样性<sup>[16]</sup>、生理特性<sup>[17]</sup>、表型性状和生殖分配<sup>[18-19]</sup>等方面。而对于荒漠草原生态系统中蒙古冰草种群空间格局的研究鲜有报道。鉴于此,本文采用点格局分析中的O-ring函数统计方法,小尺度范围内定量分析宁夏荒漠草原蒙古冰草种群的株丛结构、空间分布格局及其关联性,深入认识其生态过程、种内种间关系及其对环境的适应机制,探讨该地区植物分布模式,为制定有效的荒漠草原生态系统保护和恢复措施提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏东部盐池县花马池镇四墩子村(107°15'40"E,37°20'12"N),地处毛乌素沙地南缘,黄土高原向鄂尔多斯台地的过渡地带(图1)。属典型的中温带大陆性季风气候,年平均温7.7℃,1月和7月平均气温分别为-8.9℃和22.5℃,年温差较大,≥0℃积温为3430.3℃;年平均降水量289.4mm,主要集中在6—8月份,年蒸发量为2135mm,年无霜期165d。土壤类型主要为灰钙土、风沙土,土壤质地为沙壤和粉沙壤。主要植物种有:蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、老瓜头(*Cynanchum komarovii*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、赖草(*Leymus secalinus*)、甘草

(*Glycyrrhiza uralensis*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等。

### 1.2 样地设置与取样

2018年7月在宁夏大学四墩子教学科研基地,在小尺度范围内选取、设置1个以蒙古冰草为优势种的10 m×10 m的典型样地。采用邻接格子法,在样地中,用1 m×1 m的样方框按从东到西,从南到北的顺序依次放置100次进行取样,以样方框一角顶点为基点(0, 0),确定每株蒙古冰草在样地内的二维坐标,并测定其基部丛径。在室内对取样记录进行处理,按照取样时样方框放置的顺序将100个1 m×1 m的图进行拼接,合并成10 m×10 m的样地图<sup>[20]</sup>。根据研究目的,参考白永飞<sup>[21]</sup>和赵成章<sup>[10]</sup>等对针茅属植物株丛大小的划分标准,结合本研究蒙古冰草基径分布范围,将蒙古冰草株丛划分为5级:Ⅰ级株丛(0—5 cm)、Ⅱ级株丛(5.1—10 cm)、Ⅲ级株丛(10.1—15 cm)、Ⅳ级株丛(15.1—20 cm)、Ⅴ级株丛(>20 cm)。其中,0—5 cm的株丛有分蘖,主要是处于营养生长的叶丛状态;5.1—15 cm的株丛分蘖增强,生长旺盛,生殖枝较多;15 cm以上的株丛,中央有“空心”出现,新生分蘖主要分布于株丛的外围。

### 1.3 点格局分析

点格局分析由Ripley<sup>[6]</sup>提出,以分析连续尺度上种群格局的特征,是目前植物生态学领域研究种群空间格局广泛应用的方法之一<sup>[1]</sup>。其中,O-ring函数是基于Ripley's K函数变形得到的一种多尺度统计方法,是利用点间的距离,计算任一点为圆心、 $r$ 为半径、指定宽度圆环区域内的点的数据,从而进行空间点格局分析<sup>[4]</sup>,该方法克服了 $K(r)$ 函数随尺度累计效应的不足,使得种群格局的分析结果更准确,对探讨种群格局形成的生态过程具有重要意义<sup>[9,22]</sup>。O-ring函数统计包括分析单一目标空间分布格局的单变量O-ring统计和分析两个变量间空间关联性的双变量O-ring统计。双变量O-ring函数的公式为:

$$O_{12}^w(r) = \frac{\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} Point_2(R_{1,i}^w(r))}{\sum_{i=1}^{n_1} Area(R_{1,i}^w(r))} \quad (1)$$

$$Point_2(R_{1,i}^w(r)) = \sum_x \sum_y S(x,y) P_2(x,y) I_i^w(x_i, y_i, x, y) \quad (2)$$

$$Area(R_{1,i}^w(r)) = Z^2 \sum_x \sum_y S(x,y) I_i^w(x_i, y_i, x, y) \quad (3)$$

$$I_i^w(x_i, y_i, x, y) = \begin{cases} 1, & \text{当 } t - w/2 \leq \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \\ & \leq t + w/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $n_1$ 为双变量统计中对象1的数目; $R_{1,i}^w(r)$ 是格局1中第*i*点为圆心、 $r$ 为半径、 $w$ 为宽度的圆环; $Point_2(R_{1,i}^w(r))$ 为计算区域 $R_{1,i}^w(r)$ 内格局2的点数目; $Area(R_{1,i}^w(r))$ 为区域 $R_{1,i}^w(r)$ 的面积; $I(x_i, y_i)$ 是格局1中第*i*点的坐标, $S(x, y)$ 为二分类变量,若 $I(x_i, y_i)$ 在研究区域 $R_{1,r}^w(r)$ 内,则 $S(x, y) = 1$ ,否则 $S(x, y) = 0$ ; $P_2(x, y)$ 为分布在单元格内对象2的点的数目; $I_i^w(x_i, y_i, x, y)$ 是随格局1中第*i*点为中心、 $r$ 为半径的因变量; $Z^2$ 为单元格的面积。

单变量统计中O-ring函数的 $O(r)$ 估计值是通过设定格局1等于格局2来计算。本文根据蒙古冰草种

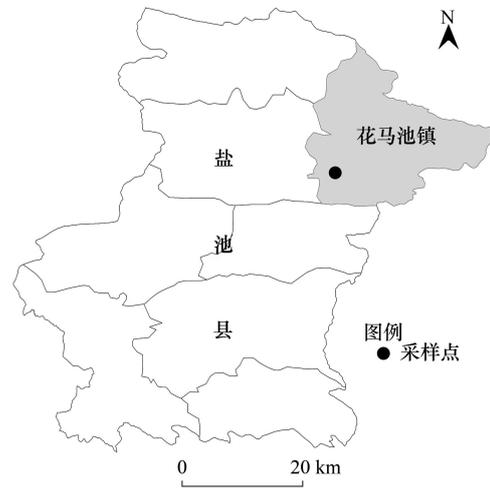


图1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the research area

群的空间分布图,在单变量  $O(r)$  函数分析中,采用 CSR(完全空间随机过程模型)。单变量 O-ring 函数分析中,若  $O(r)$  值落在上下包迹线的区间以上或以下时,表明蒙古冰草个体在该尺度上分别符合聚集分布和均匀分布;若  $O(r)$  值落在上、下包迹线之间,说明在该尺度上为随机分布。在双变量  $O(r)$  函数分析中,采用前提条件零假设,固定某一株丛级植株的位置,让另一株丛级植株的空间位置随机变化,分析不同株丛级间的空间关联性。若  $O(r)$  值落在上包迹线上方时,表明两株丛级在该尺度上为正关联;若  $O(r)$  值落在下包迹线下方时,表明在该尺度上两株丛级为负关联;若  $O(r)$  值落在上、下包迹线之间,说明在该尺度上两株丛级无关联<sup>[22-24]</sup>。

#### 1.4 数据处理

采用 Programita(2014 版)软件进行空间二维坐标的分析,Origin 8.0 进行绘图,根据样方的大小,采用的空间尺度为 0—5 m;利用 Monte-Carlo 随机模拟 99 次,拟合检验上、下包迹线,即置信区间为 99%<sup>[22]</sup>。其他数据处理采用 Excel 2013 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 荒漠草原小尺度范围内蒙古冰草种群的株丛结构

蒙古冰草种群的株丛结构如图 2 所示,在整个样地中蒙古冰草植株共计 1040 株,其中: I 级有 360 株, II 级有 464 株, III 级有 128 株, IV 级有 67 株, V 级有 21 株。在 I 级和 II 级株丛范围内,蒙古冰草个体数随株丛的增大而增多;大于 II 级株丛的个体数随株丛的增大逐渐减少。其中, II 级株丛的个体数最多,占个体总数的 44.62%, V 级株丛的个体数最少,占个体总数的 2.02%。由个体的空间分布可知(图 3),蒙古冰草种群中 I、II 级株丛个体占比(79.24%)明显高于 IV、V 级株丛个体占比(8.46%),表明种群结构较好,可更新的幼苗充足。

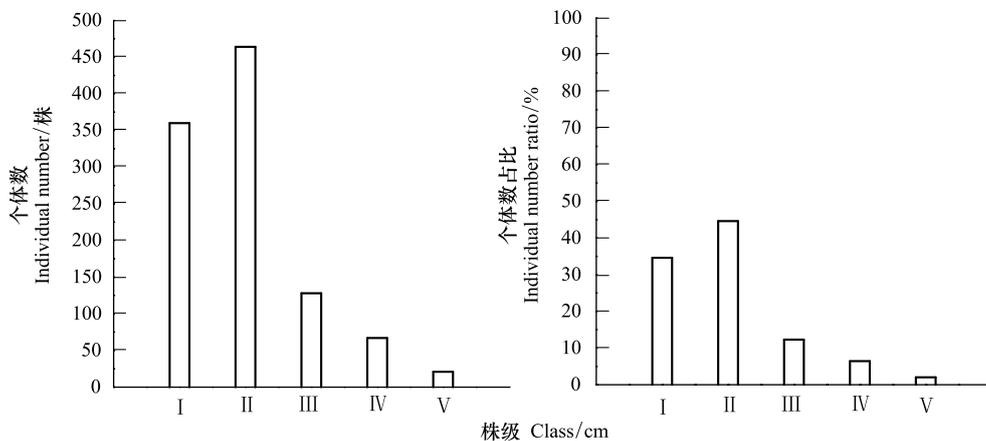


图 2 蒙古冰草种群的株丛结构

Fig.2 The bunch size structure of *Agropyron mongolicum* population

I: 0—5 cm 株丛, Class 0—5 cm; II: 5.1—10 cm 株丛, Class 5.1—10 cm; III: 10.1—15 cm 株丛, Class 10.1—15 cm; IV: 15.1—20 cm 株丛, Class 15.1—20 cm; V: >20 cm 株丛, Class >20 cm

### 2.2 蒙古冰草种群不同株丛级的空间分布格局

蒙古冰草种群不同株丛级的空间分布格局见图 4,可以看出, I 级株丛在 0—0.9 m 小尺度范围内呈聚集分布,而且尺度越小聚集强度越显著,在 >0.9 m 尺度上呈随机分布; II 级株丛在 0—2.5 m 尺度范围内呈显著聚集分布,在 2.5—3.6 m 尺度范围内呈随机分布,在 3.6—3.8 m 尺度范围内呈均匀分布,在 >3.8 m 尺度上又呈随机分布; III 级株丛在整个研究尺度上表现出 3 种空间分布类型:首先由 0—3.5 m 尺度上的聚集分布过渡到 3.5—4.7 m 尺度上的随机分布,最后到 4.7—5 m 尺度上的均匀分布; IV 级株丛和 V 级株丛在整个研究尺度

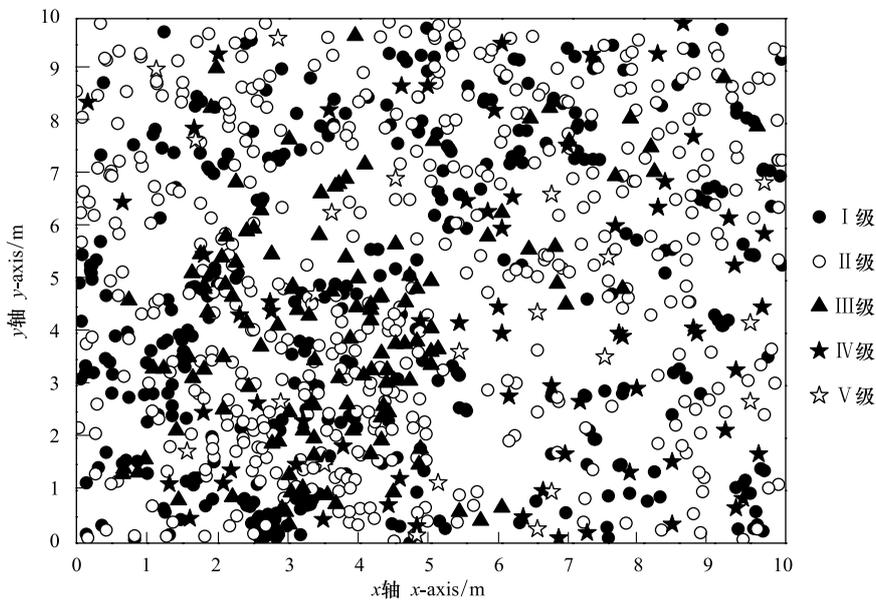


图3 蒙古冰草个体分布点图

Fig.3 Point diagram of individual distribution for *Agropyron mongolicum*

范围内均表现为随机分布。由此可见,蒙古冰草种群的分布格局与植株的丛径、空间尺度密切相关, I、II、III级株丛在小尺度范围内主要表现为聚集分布,且个体越小聚集程度越高,随着尺度的增大,聚集程度减弱,逐渐过渡到随机分布和均匀分布,IV、V级株丛在所有尺度上均以随机分布为主。

### 2.3 蒙古冰草种群不同株丛级之间的空间关联性

图5显示了蒙古冰草种群不同株丛级之间的关联性随尺度的变化效应。I级株丛与II级株丛在0—2.5 m尺度范围内呈显著正关联,在>2.5 m尺度上无关联;I级株丛与III级株丛在0—0.4 m和2.9—3.1 m尺度范围内表现为正关联,在其他尺度上表现为无关联;I级株丛与IV级株丛在0—0.1 m尺度范围内呈负关联,在>0.1 m尺度上无关联;I级株丛与V级株丛在0—0.2 m和0.5—0.7 m尺度范围内呈负关联,在其他尺度范围内无关联;II级株丛与III级株丛在0—3.6 m尺度范围内呈显著正关联,在>3.6 m尺度上无关联;II级株丛与IV级株丛在0—0.2 m尺度范围内表现为显著负关联,在其他尺度上无关联;II级株丛与V级株丛除了在1.1—1.2 m尺度范围内表现为正关联外,在其他尺度范围内均表现为无关联;III级株丛与IV级株丛、III级株丛与V级株丛在所研究的尺度范围内均表现为无关联性;IV级株丛与V级株丛仅在1.6—1.7 m尺度范围内为正关联,其他尺度均无关联性。在研究尺度内,蒙古冰草不同株丛级之间的关联性主要表现为:I级株丛与II、III级株丛,II级株丛与III级株丛在较小尺度范围内呈显著正关联,随研究尺度的增大趋于无关联,而I级株丛与IV、V级株丛,II级株丛与IV、V级株丛,III级株丛与IV、V级株丛,IV级株丛与V级株丛之间呈无关联或显著负关联。

### 3 讨论与结论

植物种群的结构不仅反映种群内部不同阶段个体的发育状态、种群数量动态与发展趋势,也可以揭示植物种群对环境变化的响应和生境条件对种群更新的影响<sup>[20-21,25]</sup>。在10 m×10 m尺度范围内,蒙古冰草种群中I、II级株丛占比(79.24%)明显高于IV、V级株丛占比(8.46%),表明该种群中可供更新的幼苗充足,种群发展趋势良好,一方面可能是由于风力作用将蒙古冰草种子与植株剥离,形成种子雨,为有性生殖带来了种源<sup>[26-27]</sup>;另一方面是由于7月份,正逢降雨季节,土壤水分条件相对较好,幼苗的存活率较高<sup>[22]</sup>。

种群空间分布格局与种群的发育过程有着密切的关系,不同发育阶段的个体往往表现出不同的空间分布格局<sup>[9]</sup>。本研究中,蒙古冰草I、II、III级株丛在较小尺度范围内主要表现为聚集分布,且个体越小聚集程度

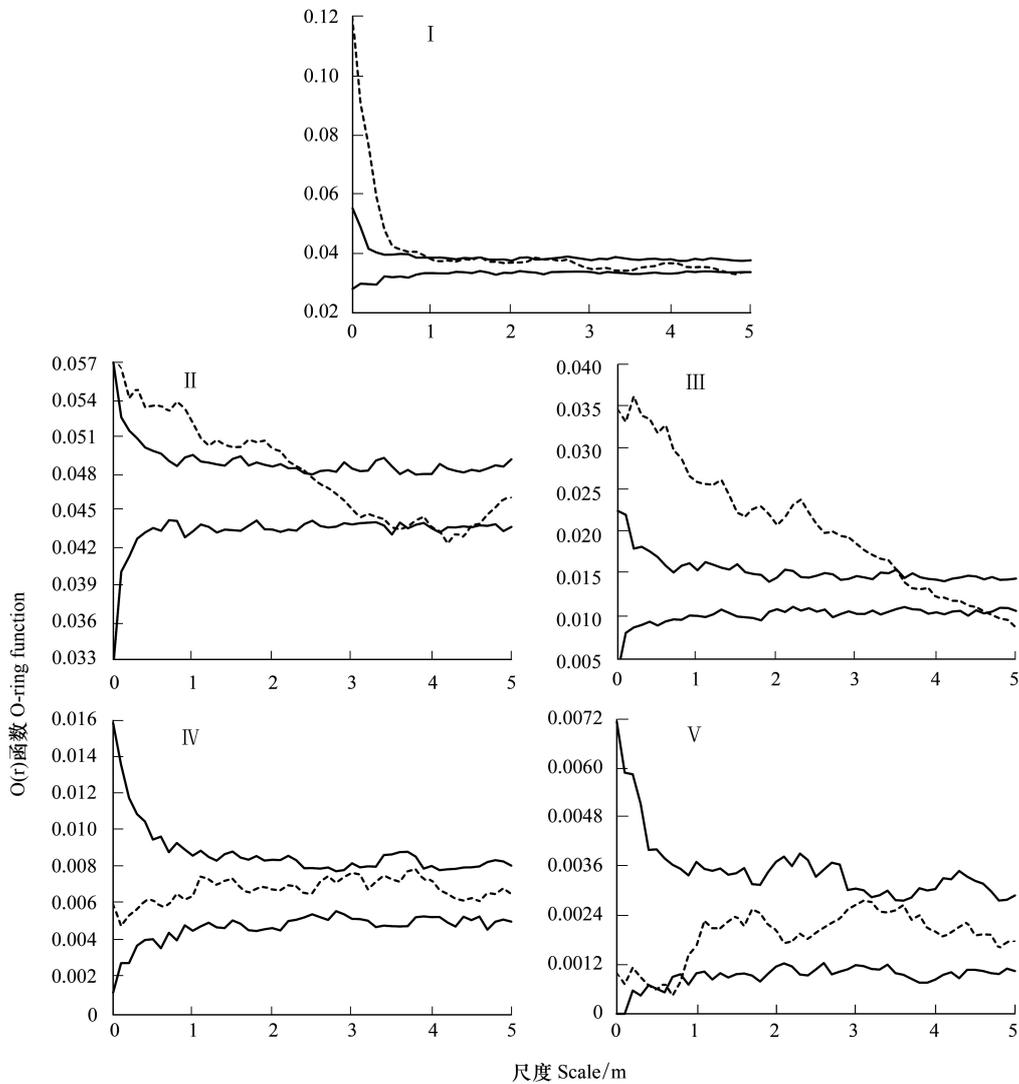


图4 蒙古冰草种群不同株丛级的点格局分析

Fig.4 Point pattern analysis for different cluster classes of *Agropyron mongolicum* population

$O(r)$  为圆环函数;.....为  $O(r)$  实测值;—为上下包迹线(99%)

越高,随着尺度增大,聚集程度减弱,聚集分布逐渐趋向于随机和均匀分布,IV、V级株丛在所有尺度上均以随机分布为主。通常,I、II、III级株丛个体较小,对水分等资源的竞争相对微弱,抵御风沙危害的能力有限,而研究区地处毛乌素沙地南缘,土质疏松,风蚀作用强烈,降水少且变率大,土壤干旱贫瘠,为了提高存活机会,它们彼此相互合作,相互庇护,进而表现为聚集分布的特征<sup>[2,9]</sup>。而随着尺度增大,其对土壤水分的需求也随之增加,为了争夺资源,种内与种间的竞争也开始加剧,同时蒙古冰草个体独立抵御风沙危害的能力明显提高,导致它们对相互庇护作用的依赖性降低,种群发生自疏与它疏,从而形成I、II、III级株丛由聚集分布逐渐过渡到随机分布和均匀分布<sup>[22,28]</sup>。IV、V级株丛之间受密度制约效应的影响<sup>[29]</sup>,导致个体死亡,种群密度下降,使得其在0—5m的尺度上主要表现为随机分布,这与宋于洋和杨洪晓等人对沙地植物种群的研究结果一致<sup>[9,30]</sup>。

种内联结用来表示同一物种不同发育阶段在空间分布上的相互关联性,是对一定时期内植物种群组成个体之间相互关系的静态描述<sup>[7]</sup>,是植物种群生存、扩散的一种策略<sup>[3]</sup>。同一种群不同个体之间空间正关联体现了个体之间相互依赖的互利关系,空间负关联体现了个体之间相互竞争的生态关系,空间无关联则意味着

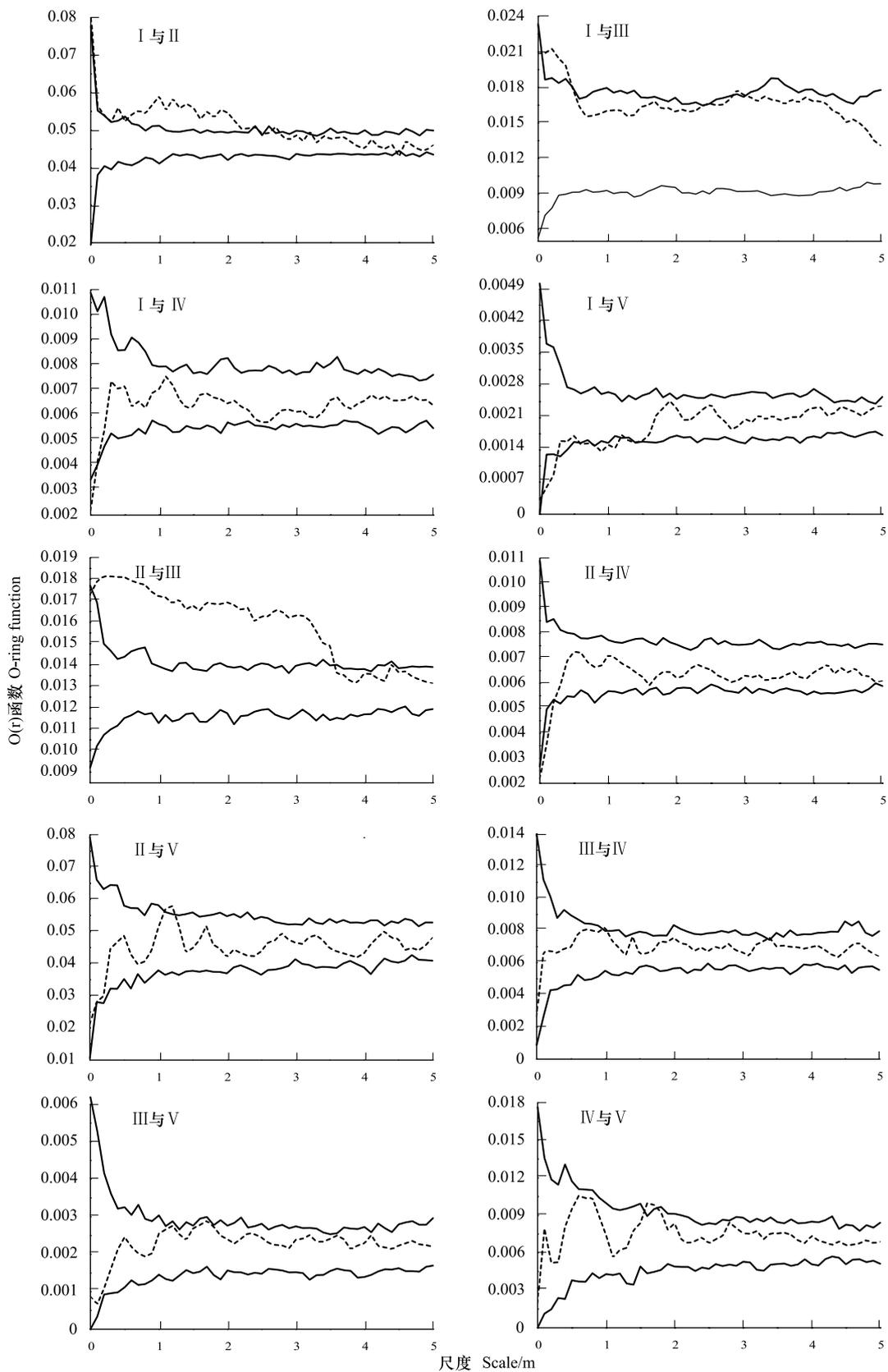


图5 蒙古冰草种群不同株丛级之间的关联性分析

Fig.5 Spatial association analysis between *Agropyron mongolicum* population of different cluster classes

种内没有明确的生态关系<sup>[3,9]</sup>。研究表明,不同株丛级之间形体大小差异越小,其间的正关联关系就越强,反之,形体大小差异越大,正关联关系越弱,甚至表现为无关联或负关联<sup>[9]</sup>。在所研究尺度范围内,蒙古冰草 I 级、II 级与 III 级株丛为了适应较为严酷的自然生境,在较小尺度范围内呈现抱团现象,表现为显著的空间正关联,即两两之间存在相互依赖的生态关系;而 I 级株丛与 IV、V 级株丛, II 级株丛与 IV、V 级株丛, III 级株丛与 IV、V 级株丛及 IV 级株丛与 V 级株丛之间,由于个体形体差异增大,种内出现竞争非对称现象,竞争作用对弱小竞争者愈加不利<sup>[2,31]</sup>,两两之间表现为无关联或显著的负关联。无性生殖是蒙古冰草种群适应荒漠草原干旱条件而形成的生态对策<sup>[32]</sup>。在外部环境比较恶劣的条件下,分布于蒙古冰草株丛外围分蘖节上的根茎尽可能伸长,产生大量无性分株,最大限度的扩展种群领地,而这些新生的无性分株势必会引起邻近株丛间竞争的生态关系<sup>[10,33-34]</sup>;随着株丛的增大和老化,蒙古冰草无性生殖能力降低,株丛被枯叶鞘分割成若干个克隆片段,在干旱的生境条件下,克隆片段不断死亡,最终导致整个株丛的死亡,加速种群自疏的过程,使其间没有明显的关联性<sup>[21]</sup>。

植物种群的空间分布格局与空间关联性具有很强的尺度依赖性,不同的空间尺度上,种群的空间分布格局与关联性表现出显著的差异,在小尺度范围内造成这种差异的主要原因是种群自身的生物学特性、种内种间关系等因素作用的结果<sup>[30]</sup>;而在大尺度上,则可能由物种分布的环境条件、生境的异质性和斑块性所决定<sup>[7,35-36]</sup>。由此可见,空间尺度在研究植物种群个体空间分布格局与关联性方面起到了重要的作用,选择合适的空间尺度,能够更加全面地探索植物种群生态格局的过程及变化特征。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 刘小恺, 刘茂松, 黄峥, 徐驰, 张明娟, 王汉杰. 宁夏沙湖 4 种干旱区群落中主要植物种间关系的格局分析. 植物生态学报, 2009, 33 (2): 320-330.
- [ 2 ] 赵成章, 高福元, 盛亚萍, 董小刚, 周伟. 狼毒种群小尺度空间分布格局及空间关联性研究. 干旱区地理, 2011, 34(3): 492-498.
- [ 3 ] 党晶晶, 赵成章, 任珩, 杨泉, 查高德. 高寒草地狼毒与阴山扁扁豆种群的空间格局. 生态学杂志, 2013, 32(2): 292-298.
- [ 4 ] Wiegand T, Moloney K A. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos*, 2004, 104(2): 209-229.
- [ 5 ] Perry G L W, Miller B P, Enright N J. A comparison of methods for the statistical analysis of spatial point patterns in plant ecology. *Plant Ecology*, 2006, 187(1): 59-82.
- [ 6 ] Ripley B D. Modeling spatial patterns. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1977, 39: 172-192.
- [ 7 ] 樊登星, 余新晓. 北京山区栓皮栎林优势种群点格局分析. 生态学报, 2016, 36(2): 318-325.
- [ 8 ] 李国春, 宋华东, 李琦, 卜书海. 太白山巴山冷杉林主要树种与开花秦岭南竹的空间点格局分析. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3487-3493.
- [ 9 ] 宋于洋, 李园园, 张文辉. 梭梭种群不同发育阶段的空间格局与关联性分析. 生态学报, 2010, 30(16): 4317-4327.
- [ 10 ] 赵成章, 任珩, 盛亚萍, 高福元, 石福习. 不同高寒退化草地阿尔泰针茅种群的小尺度点格局. 生态学报, 2011, 31(21): 6388-6395.
- [ 11 ] 郭本兆. 中国植物志-第九卷, 第三分册. 北京: 科学出版社, 1987: 119.
- [ 12 ] 刘文清, 王国贤. 沙化草地旱作条件下混播人工草地的试验研究. 中国草地学报, 2003, 25(2): 69-71.
- [ 13 ] 高福元, 石福习. 基于不同零模型的三江平原沼泽湿地主要物种小尺度点格局分析. 生态学报, 2015, 35(7): 2029-2037.
- [ 14 ] 云锦凤, 赵彦, 石凤敏, 王俊杰. 蒙古冰草肌动蛋白基因片段的克隆与组织表达分析. 草业学报, 2011, 20(2): 170-176.
- [ 15 ] 赵彦, 陈雪英, 石凤敏, 云锦凤, 王俊杰. 蒙古冰草 *MuDREB3* 基因的克隆及表达分析. 草地学报, 2015, 23(2): 377-382.
- [ 16 ] 李晓全, 高有汉, 刘扬, 索培芬, 韩冰. 我国北方 9 份旱生—沙生植物蒙古冰草遗传多样性研究. 草业学报, 2016, 25(3): 77-85.
- [ 17 ] Ma Y H, Yu X X, Yu Z, Sun F C, Li X D, Li X L. RNA - Seq of *Agropyron mongolicum* Keng in response to drought stress. *Grassland Science*, 2018, 64(1): 3-15.
- [ 18 ] 解新明, 云锦凤, 卢小良, 李秉滔. 蒙古冰草表型数量性状的变异与生境间的相关性. 生态学杂志, 2003, 22(4): 31-36.
- [ 19 ] 赵盼盼, 邵文山, 靳长青, 宋立肖, 龚诗佩, 李国旗. 围封对荒漠草原沙芦草种群构件生物量分配特性的影响. 生态环境学报, 2017, 26 (12): 2024-2029.
- [ 20 ] 高福元, 赵成章, 卓马兰草. 高寒退化草地不同海拔梯度狼毒种群分布格局及空间关联性. 生态学报, 2014, 34(3): 605-612.
- [ 21 ] 白永飞, 许志信, 李德新, 赵钢. 内蒙古高原四种针茅种群年龄与株丛结构的研究. 植物学报, 1999, 41(10): 1125-1131.
- [ 22 ] 付贵全, 徐先英, 徐梦莎, 赵鹏, 张莹花, 刘江, 郭挺, 乔宇. 民勤绿洲边缘两种生境红砂种群空间格局及关联性分析. 干旱区地理,

- 2016, 39(1): 112-121.
- [23] 董灵波, 刘兆刚, 张博, 袁野, 孙云霞. 基于 Ripley  $L$  和 O-ring 函数的森林景观空间分布格局及其关联性. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3429-3436.
- [24] Stoyan D, Penttinen A. Recent applications of point process methods in forestry statistics. *Statistical Science*, 2000, 15(1): 61-78.
- [25] Li W, Zhang G F. Population structure and spatial pattern of the endemic and endangered subtropical tree *Parrotia subaequalis* (Hamamelidaceae). *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2015, 212: 10-18.
- [26] Bohrer G, Katul G G, Nathan R, Walko R L, Avissar R. Effects of canopy heterogeneity, seed abscission and inertia on wind-driven dispersal kernels of tree seeds. *Journal of Ecology*, 2008, 96(4): 569-580.
- [27] 王立群, 杨静, 石凤翎. 多年生禾本科牧草种子脱落机制及适宜采收期的研究. 中国草地, 1996, (3): 7-16.
- [28] Hao H M, Huang Z, Lu R, Jia C, Liu Y, Liu B R, Wu G L. Patches structure succession based on spatial point pattern features in semi-arid ecosystems of the water-wind erosion crisscross region. *Global Ecology and Conservation*, 2017, 12: 158-165.
- [29] Gray L, He F L. Spatial point-pattern analysis for detecting density-dependent competition in a boreal chronosequence of Alberta. *Forest Ecology and Management*, 2009, 259(1): 98-106.
- [30] 杨洪晓, 张金屯, 吴波, 李晓松, 张友炎. 毛乌素沙地油蒿种群点格局分析. 植物生态学报, 2006, 30(4): 563-570.
- [31] Welden C W, Slauson W L, Ward R T. Competition and abiotic stress among trees and shrubs in Northwest Colorado. *Ecology*, 1988, 69(5): 1566-1577.
- [32] 殷国梅, 陈世璜. 冰草属植物无性繁殖特性的研究. 内蒙古草业, 2003, 15(2): 1-2.
- [33] Shackleton C. Nearest-neighbour analysis and the prevalence of woody plant competition in South African savannas. *Plant Ecology*, 2002, 158(1): 65-76.
- [34] Schleicher J, Wiegand K, Ward D. Changes of woody plant interaction and spatial distribution between rocky and sandy soil areas in a semi-arid savanna, South Africa. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(3): 270-278.
- [35] Turner M G, O'Neill R V, Gardner R H, Milne B T. Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1989, 3(3/4): 153-162.
- [36] 杨华, 李艳丽, 沈林, 亢新刚. 长白山云冷杉针阔混交林主要树种空间分布及其关联性. 生态学报, 2014, 34(16): 4698-4706.