

DOI: 10.20103/j.stxb.202309051919

康如龙, 刘万龙, 许冬梅, 常怡然, 马媛. 荒漠草原蒙古冰草种群分布格局及种内关联性. 生态学报, 2024, 44(21): 9910-9923.

Kang R L, Liu W L, Xu D M, Chang Y R, Ma Y. The distribution pattern and intraspecific associations of *Agropyron mongolicum* populations in desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9910-9923.

## 荒漠草原蒙古冰草种群分布格局及种内关联性

康如龙<sup>1</sup>, 刘万龙<sup>1,3</sup>, 许冬梅<sup>1,2,\*</sup>, 常怡然<sup>1</sup>, 马媛<sup>1</sup>

1 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021

2 宁夏草业工程技术研究中心, 银川 750021

3 宁夏固原市彭阳县能源工作站, 固原 756500

**摘要:** 空间格局是植物种群受生物和非生物因素影响综合形成的结果。为了解荒漠草原蒙古冰草种群空间分布格局对外部环境变化的适应策略, 分别在宁夏盐池县大水坑镇、青山乡、花马池镇和高沙窝镇选取以蒙古冰草为优势种的群落为研究样地 (分别以 D、Q、H 和 G 样地表示), 在每个样地, 将蒙古冰草个体按丛径划分为 I 级 (0—5cm)、II 级 (5.1—10cm)、III 级 (10.1—15cm)、IV 级 (>15cm) 4 个株丛级, 并基于点格局分析探讨了蒙古冰草的株丛结构、空间分布格局及种内关联。结果表明: (1) 4 个研究样地蒙古冰草和牛枝子的重要值、生态位宽度均较大, 其间生态位重叠指数较高, 其他物种的重要值及生态位特征值在不同样地之间变异较大。(2) 蒙古冰草的株丛密度和平均丛径在不同样地之间均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。在 Q、G 和 H 样地中, 蒙古冰草以 I 级株丛为主; 在 D 样地中, 蒙古冰草以 II 级株丛占比最高, 为 43.98%, 株丛密度较小。(3) 在本研究尺度范围内, 蒙古冰草种群在 Q 和 G 样地中主要呈聚集分布, 在 D 和 H 样地中表现为聚集和随机交替分布。其中, 各样地中 I 级株丛在小尺度范围内主要呈聚集分布, II 级株丛随尺度的增大逐渐由聚集分布过渡到随机分布和均匀分布, III、IV 级株丛主要表现为随机分布。(4) 在本研究尺度范围内, 蒙古冰草 I 级株丛分别与 II、III、IV 级株丛呈负关联或无关联; II、III、IV 级各株丛级之间主要呈无关联。综上, 随荒漠草原环境条件的变化, 蒙古冰草可以通过调节种群结构、密度及整体分布格局以维持种群的更新和稳定。

**关键词:** 荒漠草原; 蒙古冰草; 种群结构; 空间分布; 点格局

## The distribution pattern and intraspecific associations of *Agropyron mongolicum* populations in desert steppe

KANG Rulong<sup>1</sup>, LIU Wanlong<sup>1,3</sup>, XU Dongmei<sup>1,2,\*</sup>, CHANG Yiran<sup>1</sup>, MA Yuan<sup>1</sup>

1 College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering and Technology Research Center, Yinchuan 750021, China

3 Energy Workstation in Pengyang County, Guyuan 756500, China

**Abstract:** The spatial pattern was the result of the integrated development of plant populations influenced by both biotic and abiotic factors. In order to comprehend the adaptation strategy of spatial distribution patterns of *Agropyron mongolicum* populations in response to external environmental changes, the study plots were selected within communities where *A. mongolicum* was the dominant species in Dashuikeng Town, Qingshan Town, Huamachi Town, and Gaoshawo Town in Yanchi County, Ningxia (represented by plots D, Q, H and G, respectively). The size of *A. mongolicum* individuals was used to categorize them into four groups: Class I (0—5cm), Class II (5.1—10cm), Class III (10.1—15cm) and Class IV (>15cm). The cluster structure, spatial distribution patterns and intraspecific correlations of *A. mongolicum* were

**基金项目:** 国家自然科学基金 (32060405); 宁夏高等学校一流学科建设 (草学学科) 项目 (NXYLXK2017A01)

**收稿日期:** 2023-09-05; **网络出版日期:** 2024-08-21

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

discussed basing on point pattern analysis. The results showed that: (1) The important values and niche widths of *A. mongolicum* and *Lespedeza potaninii* were large, with a higher niche overlap index between them, while other species showed greater variation among different plots. (2) There were significant differences in plant density and average diameter among different plots ( $P < 0.05$ ). In the Q, G and H plots, Class I plant clusters were dominant. In the D plots, the proportion of Class II plant clusters was the highest at 43.98%, with a lower plant cluster density. (3) Within the scale range of this study, the *A. mongolicum* population mainly exhibited an aggregated distribution in Q and G plots, and an alternating pattern of aggregation and randomness in D and H plots. Specifically, the Class I plant clusters were primarily clustered at small scales, the Class II clusters transitioned from clustered to random and uniform distribution with the increase of scale, and the Classes III and IV clusters were predominantly randomly distributed. (4) There was negative or no correlation between Class I and Classes II, III and IV cluster at all scales. Within the scale of this study, there was no correlation between Class II, III and IV clusters. In conclusion, with the changes of environmental conditions in desert steppe, the population renewal and stability of *A. mongolicum* can be maintained by adjusting its population structure, density and overall distribution pattern.

**Key Words:** desert steppe; *Agropyron mongolicum*; population structure; spatial distribution; point pattern

种群是构成群落的基本单位,种群空间格局是植物个体在一定区域范围内有规律的分布和配置,其分布类型及关联性可以反映植物种群的生态关系<sup>[1-2]</sup>。在特定环境条件下,植物种群的空间分布格局受物种的生物学特性、补充限制(种子传播限制、微生境限制和扩散限制)、种内种间关系、密度制约效应及环境异质性等诸多因素的影响<sup>[3]</sup>。种群空间分布格局是植物种群内部、物种之间及植物自身与环境相互作用的结果<sup>[4]</sup>,可直观描述植物群落的形成、维持与演替,也能够反映植物通过权衡种群内部资源分配对不同环境做出的适应对策<sup>[5]</sup>。研究不同发展阶段植物种群的空间分布格局及其相互关系,有助于了解植物种群的现状和发展趋势,并能深入揭示其潜在的生态过程<sup>[6]</sup>。尤其对于草本植物群落,植物个体在群落中的空间位置和生存力的尺度表现更为微观。因此,明晰草本植物小尺度空间分布格局能够更为准确地反映其种群生态结构及其对外部环境变化的生态适应策略<sup>[7]</sup>。

目前,常用的空间格局分析方法包括点格局分析、栅格分析、矢量分析、空间自相关分析(SSA)等<sup>[8]</sup>。其中,点格局分析用于描述和探讨空间数据中点之间的关系,其拟合过程最大限度地利用了点的坐标信息,检验能力强,可以解释植物的集聚、散布等现象,适用于各种尺度下植物种群分布格局及种内种间关联的研究<sup>[9]</sup>。

蒙古冰草(*Agropyron mongolicum* Keng.)又名沙芦草,是禾本科冰草属多年生草本植物,主要分布在我国内蒙古、山西西北部、陕西北部、甘肃、宁夏、新疆等省区<sup>[10]</sup>。蒙古冰草具有抗旱、耐寒、耐盐碱、耐风沙等优良特性,对荒漠草原生态系统结构、功能维持和退化草地生态系统修复等具有重要作用。目前,针对蒙古冰草的研究主要包括克隆基因的表达<sup>[11]</sup>、基因功能鉴定<sup>[12]</sup>和新品种培育<sup>[13]</sup>等方面,有关其小尺度空间分布格局<sup>[14-15]</sup>、干旱胁迫下生理特性<sup>[16-17]</sup>、不同生境群落或利用方式下表型性状<sup>[18]</sup>、生态化学计量及资源分配等方面也有一些报道<sup>[19-20]</sup>。然而,对于蒙古冰草种群如何调节其种群结构、空间分布格局及种内种间关系以适应荒漠草原环境的变化仍不清楚。鉴于此,本文提出以下科学问题:(1)随环境条件的变化,蒙古冰草种群在群落中的地位及种群结构如何变化?(2)随环境条件的变化,蒙古冰草种群的空间分布格局及其种内关联性如何变化?在此基础上,以分布于宁夏盐池县4个不同乡镇的蒙古冰草群落为对象,采用点格局方法研究蒙古冰草种群的空间分布格局及其关联性,探讨随环境条件变化蒙古冰草种群的发展现状及趋势,以为蒙古冰草的保护和利用提供理论依据,对退化荒漠草原生态系统的恢复具有重要意义。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区盐池县,自然条件严酷,长年干旱少雨,年均气温 7.7℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温 2949℃,

年日照时数 2867.9h,自北向南年平均降水量 250—350mm,无霜期 162d。草原类型包括典型草原和荒漠草原,荒漠草原区大地貌为缓坡丘陵,土壤类型以灰钙土、淡灰钙土为主,其次是风沙土和黑垆土,土壤质地主要是沙壤和粉砂壤。主要植物种有:蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、华北白前(*Vincetoxicum mongolicum*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)、赖草(*Leymus secalinus*)等。

## 1.2 样地设置

基于盐池县自南向北气候由半干旱向干旱过渡、地形由黄土丘陵向鄂尔多斯缓坡丘陵过渡的特点,尤其是考虑到降水的空间变异,分别在大水坑镇、青山乡、花马池镇及高沙窝镇选取地势平坦、以蒙古冰草为优势种的群落为研究样地(分别以 D、Q、H 和 G 样地表示),在每个样地,随机设置 3 个 50m×50m 的样区,用于植被调查和土壤取样。

表 1 不同样地基本情况

Table 1 The basic situation of different sample plots

指标 Index	样地 Plots			
	D	Q	H	G
经度 Longitude	106°58'3.82"	107°1'28.32"	107°16'48.32"	107°0'6.02"
纬度 Latitude	37°24'54.43"	37°30'49.62"	37°45'42.07"	37°55'47.46"
年平均降水量 Average annual precipitation/mm	340.6	266.0	304.7	231.7
土壤含水量 Soil moisture content/%	8.29±0.37a	6.08±0.29bc	7.07±0.40b	5.96±0.31c
土壤全碳 Soil total carbon/(g/kg)	10.88±0.36a	7.29±0.36b	9.85±1.07a	7.29±0.30b
土壤全氮 Soil total nitrogen/(g/kg)	0.30±0.01ab	0.24±0.001b	0.34±0.04a	0.28±0.02ab
土壤全磷 Soil total phosphorus/(g/kg)	0.36±0.01ab	0.30±0.01b	0.44±0.05a	0.35±0.02ab
植被盖度 Vegetation coverage/%	83.80±2.62a	73.69±2.33ab	71.85±5.32ab	63.47±2.48b
草群高度 Plant height/cm	18.43±1.10a	13.81±0.61bc	15.55±0.64b	11.84±0.78c
群落密度 Community density/(株/m <sup>2</sup> )	36.83±2.88b	69.8±5.91a	87.47±5.16a	70.86±4.87a
地上生物量 Aboveground biomass/(g/m <sup>2</sup> )	141.57±9.20a	69.12±3.46b	70.13±4.21b	34.97±3.50c

同行不同小写字母表示不同样地之间差异显著( $P<0.05$ );D、Q、H、G 分别表示不同样地

## 1.3 植被调查

### 1.3.1 基于群落特征分析的植被调查

分别在每个 50m×50m 样区的四角和中心设置 5 个 1m×1m 的样方以调查群落植物物种组成、各物种的高度、盖度、频度、密度和地上生物量。其中,高度以自然高度计测,盖度采用针刺法测定,频度采用样圆法测定,密度以 1m<sup>2</sup>样方内植物的个体数计测,地上生物量以 1m<sup>2</sup>样方内各物种的风干重计测<sup>[14]</sup>。

### 1.3.2 基于点格局分析的植被调查

在每个 50m×50m 的样区内设置 1 个 10m×10m 的样方,以样方的一角顶点为基点(0,0),采用邻接格子法将 1m×1m 的样方框依次放置,测定样方内每株蒙古冰草个体的基部丛径,并进行其二维坐标的确定和记录。参照以往对针茅属植物<sup>[21-22]</sup>及蒙古冰草的分级标准,结合本研究结果,将蒙古冰草株丛划分为 4 级<sup>[15]</sup>: I 级(0—5cm)、II 级(5.1—10cm)、III 级(10.1—15cm)、IV 级(>15cm)。

## 1.4 土壤样品采集与测定

群落植被调查的同时,在每个 1m×1m 的样方采用多点混合法采集 0—20cm 土壤样品,置于自封袋中带回实验室,风干后去除植物根系等杂质,分别过 0.149mm 和 2mm 筛,用于土壤养分的测定;同时用铝盒采集土壤样品以测定土壤水分。

土壤水分含量采用烘干法测定;土壤全碳含量采用 Rapid CS TOC 分析仪测定;土壤全氮含量采用 KjelFlex K-360 全自动凯氏定氮仪测定;土壤全磷含量采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定<sup>[23]</sup>。

## 1.5 数据统计与分析

### 1.5.1 物种重要值及生态位宽度和重叠指数的计算

#### (1) 物种重要值的计算

$$\text{重要值}(P_i) = \frac{\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对频度} + \text{相对地上生物量}}{5}$$

#### (2) 生态位宽度的计测

采用 levins 指数计测各物种的生态位宽度,计算公式为:

$$B_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2}$$

式中,  $B_i$  为物种  $i$  的生态位宽度,  $i$  代表第  $i$  个物种,  $r$  代表资源状态数,  $j$  代表第  $j$  个资源状态;  $P_{ij} = n_{ij} / N_i$ , 它代表物种  $i$  在第  $j$  个资源状态下的重要值占该物种在所有资源状态下重要值之和的比例;  $n_{ij}$  代表物种  $i$  在第  $j$  个资源状态下的重要值,  $N_i$  代表其在所有资源状态下的重要值之和<sup>[24]</sup>。

#### (3) 生态位重叠的计测

采用 Pianka 指数计测物种间的生态位重叠,计算公式为:

$$Q_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^r P_{ij} P_{kj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \sum_{j=1}^r P_{kj}^2}}$$

式中,  $Q_{ik}$  代表物种  $i$  与物种  $k$  之间的生态位重叠指数, 值域为  $[0, 1]$ ;  $i$  和  $k$  分别代表两个不同的物种,  $r$  代表资源状态数,  $j$  代表第  $j$  个资源状态;  $P_{ij}$  和  $P_{kj}$  分别代表  $i, k$  两个物种在  $j$  资源状态下的重要值<sup>[25]</sup>。

### 1.5.2 点格局分析

种群空间分布格局采用 Ripley's O-ring 函数估计, 该法包括单变量统计和双变量统计, 是以任一点为圆心、 $r$  为半径、指定宽度圆环内点与点之间的距离进行点格局分析。其中双变量 O-ring 函数的公式为<sup>[26]</sup>:

$$O_1^w(r) = \frac{\frac{1}{n_1} \sum_{n=1}^{n_i} \text{Point}_2(R_{1,i}^w(r))}{\sum_{i=1}^{n_i} \text{Area}(R_{1,i}^w(r))}$$

$$\text{Point}_2(R_{1,i}^w(r)) = \sum_x \sum_y s(x, y) p_2(x, y) I_i^w(x_i, y_i, x, y)$$

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

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

式中,  $n_1$  为对象 1 点的数目;  $R_{1,i}^w(r)$  是对象 1 以点  $i$  为圆心、 $r$  为半径、宽度为  $w$  的圆环;  $\text{Point}_2(R_{1,i}^w(r))$  为  $R_{1,i}^w(r)$  区域范围内对象 2 的点数;  $\text{Area}(R_{1,i}^w(r))$  为  $(R_{1,i}^w(r))$  区域的面积;  $I(x_i, y_i)$  为对象 1 第  $i$  点的坐标,  $S(x, y)$  为二分类变量, 若  $I(x_i, y_i)$  在区域  $R_{1,i}^w(r)$  内, 则  $S(x, y)$  为 1, 否则为 0;  $Z^2$  为单元格面积,  $I_i^w(x_i, y_i, x, y)$  是随对象 1 第  $i$  点为中心、 $r$  为半径的因变量。

单变量  $O(r)$  函数分析中<sup>[15]</sup>,  $O(r)$  值是基于对象 1 等于对象 2 的假设进行计算,  $O(r)$  值分布于上包迹线上方, 表示种群个体呈聚集分布; 分布于下包迹线下方, 表示种群个体呈均匀分布; 介于上下包迹线之间, 则表示种群个体呈随机分布。双变量  $O(r)$  函数分析中,  $O(r)$  值分布于上包迹线上方为正关联; 分布于下包迹线下方为负关联; 介于上下包迹线之间为无关联。

### 1.5.3 其他数据处理

采用 Excel 2013 软件进行基础数据处理, SPSS 26.0 软件进行单因素方差 (One-Way ANOVA) 分析,

Duncan 法进行多重比较, Origin 8.0 软件绘图; 采用 Programita 2014 软件进行蒙古冰草个体的空间坐标分析, 并基于样方大小在 0—5m 尺度范围利用 Monte-Carlo 随机模拟 199 次, 拟合检验上下包迹线(置信区间为 99%)<sup>[15]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 不同研究样地植物群落特征

#### 2.1.1 植物群落物种组成

不同研究样地植物群落物种组成及其重要值见表 2。可以看出, 在 D 样地共出现 16 种植物, 主要包括蒙古冰草、牛枝子和短花针茅等; Q 和 H 样地中均出现 13 种植物, 主要有蒙古冰草、牛枝子、猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*) 等, 但其优势地位有所不同; 在 G 样地也鉴定出 13 种植物, 除蒙古冰草外, 牛枝子、猪毛蒿和刺沙蓬 (*Salsola tragus*) 的重要值较高, 分别为 0.14、0.08 和 0.08。

表 2 不同样地植物群落物种组成及其重要值

Table 2 Species composition and their importance values of plant communities in different plots

物种 Species	科名 Family name	生活型 Life form	样地 Plots			
			D	Q	H	G
蒙古冰草 <i>Agropyron mongolicum</i>	禾本科	多年生草本	0.50	0.54	0.39	0.49
短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	禾本科	多年生草本	0.13	0.01	0.05	0.01
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	禾本科	多年生草本	0.01	0.05	—	0.01
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	禾本科	多年生草本	0.01	—	0.01	—
牛枝子 <i>Lespedeza potaninii</i>	豆科	半灌木	0.15	0.14	0.16	0.14
砂珍棘豆 <i>Oxytropis racemosa</i>	豆科	多年生草本	0.01	0.02	0.03	0.04
草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>	豆科	多年生草本	0.04	0.01	0.03	—
甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	豆科	多年生草本	—	—	—	0.04
猫头刺 <i>Oxytropis aciphylla</i>	豆科	多年生草本	0.01	—	—	—
披针叶野决明 <i>Thermopsis lanceolata</i>	豆科	多年生草本	0.01	—	—	—
米口袋 <i>Gueldenstaedtia verna</i>	豆科	多年生草本	0.01	—	—	—
阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	菊科	多年生草本	0.02	0.02	0.05	0.02
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	菊科	多年生草本	0.01	0.12	0.14	0.08
拐轴鸦葱 <i>Lipschitzia divaricata</i>	菊科	多年生草本	0.03	0.02	0.01	—
中华苦苣菜 <i>Ixeris chinensis</i>	菊科	多年生草本	—	0.01	0.01	—
砂蓝刺头 <i>Echinops gmelinii</i>	菊科	一年生草本	—	—	0.01	0.02
远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	远志科	多年生草本	0.02	0.01	0.07	0.02
乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i>	大戟科	多年生草本	0.03	0.04	0.04	0.01
瘤果虫实 <i>Corispermum hyssopifolium</i>	苋科	一年生草本	—	—	—	0.04
刺沙蓬 <i>Salsola tragus</i>	苋科	一年生草本	—	—	—	0.08
田瓊花 <i>Convolvulus arvensis</i>	旋花科	多年生草本	—	0.01	—	—

#### 2.1.2 植物群落主要物种的生态位宽度及其与蒙古冰草的生态位重叠

由表 3, 不同样地植物群落物种的生态位宽度均以蒙古冰草最大, 变化范围为 4.87—4.93; 此外, 作为蒙古冰草主要伴生种的牛枝子生态位宽度在各样地中均达 3.70 以上, 同属盐池县荒漠草原的泛化种。其他如短花针茅、猪毛蒿、远志、刺沙蓬等物种在不同样地的优势地位及生态宽度差异明显。

在 D、Q、H 和 G 样地中, 主要物种中与蒙古冰草生态位重叠指数  $\geq 0.80$  的物种分别有 2 种、2 种、0 种和 3 种,  $\leq 0.60$  的物种分别有 6 种、4 种、8 种和 6 种。其中, 牛枝子与蒙古冰草的生态位重叠指数在各样地中均较高, 除 H 样地为 0.70 外, 其他样地变化范围为 0.83—0.94。

表 3 不同样地蒙古冰草与主要物种的生态位宽度及重叠指数

Table 3 Niche width and overlap index of *Agropyron mongolicum* and major species of plant communities in different plots

物种 Species	生态位宽度 Niche width				生态位重叠 Niche overlap index			
	D	Q	H	G	D	Q	H	G
蒙古冰草 <i>Agropyron mongolicum</i>	4.87	4.88	4.89	4.93	1.00	1.00	1.00	1.00
牛枝子 <i>Lespedeza potaninii</i>	4.63	4.19	4.23	3.70	0.94	0.88	0.70	0.83
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	0.94	3.75	3.13	4.00	0.27	0.80	0.43	0.89
短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	4.16	0.66	1.61	0.33	0.84	0.21	0.32	0.10
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	0.33	2.56	—	0.67	0.13	0.66	—	0.22
刺沙蓬 <i>Salsola tragus</i>	—	—	—	3.91	—	—	—	0.84
远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	1.18	1.29	3.78	2.25	0.38	0.42	0.57	0.52
甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	—	—	—	2.33	—	—	—	0.69
瘤果虫实 <i>Corispermum hyssopifolium</i>	—	—	—	2.03	—	—	—	0.57
拐轴鹌葱 <i>Lipschitzia divaricata</i>	1.72	1.12	0.64	—	0.52	0.40	0.24	—
乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i>	2.10	3.04	2.89	0.33	0.53	0.73	0.37	0.52
砂珍棘豆 <i>Oxytropis racemosa</i>	0.33	2.12	2.68	2.42	0.17	0.60	0.51	0.69
阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	2.68	2.12	3.12	1.31	0.68	0.67	0.55	0.47
草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>	2.52	0.33	1.22	—	0.69	0.11	0.27	—

## 2.2 不同样地蒙古冰草种群的株丛结构

### 2.2.1 蒙古冰草种群密度和平均株丛径

如图 1 所示,不同样地之间蒙古冰草的种群密度存在显著差异( $P<0.05$ )。其中,在 Q 样地中蒙古冰草的种群密度最大,为 25 株/ $m^2$ ,D 样地中蒙古冰草的种群密度最小,为 10 株/ $m^2$ ,H 和 G 样地中蒙古冰草的种群密度分别为 16 株/ $m^2$ 和 23 株/ $m^2$ 。

不同样地蒙古冰草的平均丛径表现为  $D>H>G>Q$ ,分别为 7.45cm、5.71cm、5.21cm 和 4.12cm,各样地之间差异显著( $P<0.05$ )。

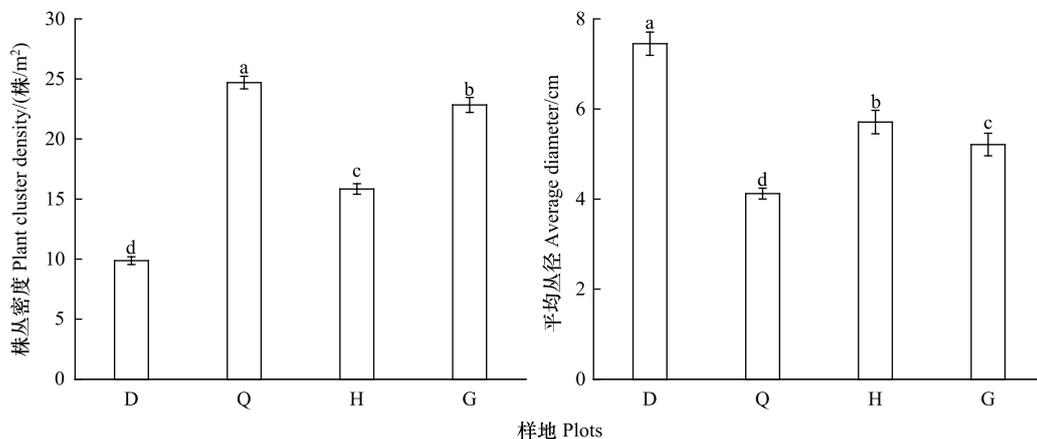


图 1 不同样地蒙古冰草种群密度和平均株丛径

Fig.1 Plant cluster density and average diameter of *Agropyron mongolicum* population in different plots

不同小写字母表示不同样地间差异显著( $P<0.05$ );D、Q、H、G 分别表示不同样地

### 2.2.2 蒙古冰草种群各级株丛数及其占比

图 2 显示了不同样地蒙古冰草种群各级株丛数及其所占比例。在 D 样地中,蒙古冰草株丛总数为 1039 株,其中, I、II 级株丛共计 817 株,IV 级株丛仅 44 株;Q 样地中蒙古冰草株丛总数为 2538 株,以 I 级株丛为主,达 1905 株,IV 级株丛较少,仅 9 株;H 样地中共有蒙古冰草 1679 株,其中 I 级株丛 963 株,II 级、III 级和 IV 级株丛共计 716 株;G 样地中有蒙古冰草 2369 株,其中 I、II 级株丛共 2176 株,III、IV 级株丛共 193 株。

从各级株丛所占比例看,蒙古冰草 I 级株丛占比以 Q 样地最高,为 75.8%,显著高于其他样地,D 样地最低,为 37.03%,显著低于其他样地( $P<0.05$ ); II 级、III 级和 IV 级株丛占比均以 D 样地最高,分别为 43.98%、18.28%和 4.70%,显著高于 Q、H 和 G 样地,Q 样地 II 级、III 级和 IV 株丛占比分别为 22.26%、2.71%和 0.39%,显著低于 D、H 样地( $P<0.05$ )。

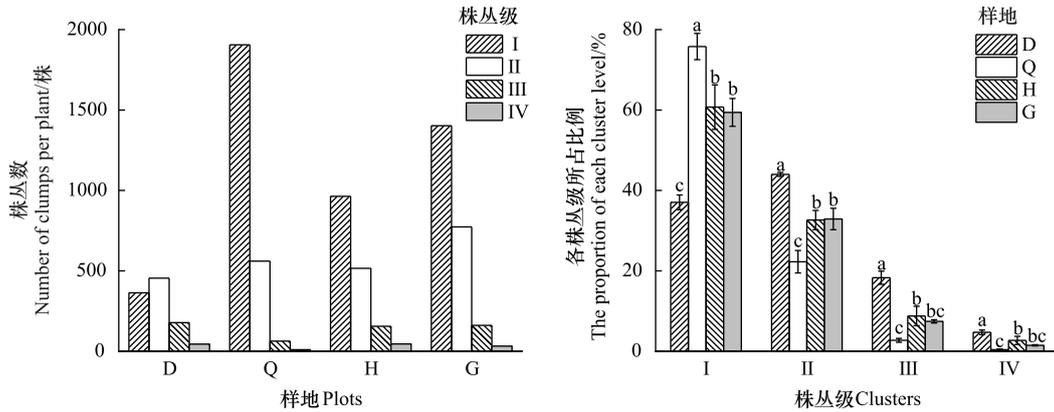


图 2 不同样地蒙古冰草种群各级株丛数及其所占比例

Fig.2 Number of plant clusters and their proportion of *Agropyron mongolicum* population in different plots

不同小写字母表示同一株丛级不同样地之间差异显著( $P<0.05$ ); I、II、III、IV 分别表示 0—5cm、5.1—10cm、10.1—15cm、>15cm 株丛

2.3 不同样地蒙古冰草种群空间格局

2.3.1 蒙古冰草种群整体分布格局

如图 3、图 4 所示,在 D 样地中,蒙古冰草株丛在<0.1m 尺度范围内呈均匀分布,在 0.4—2.3m 尺度范围内

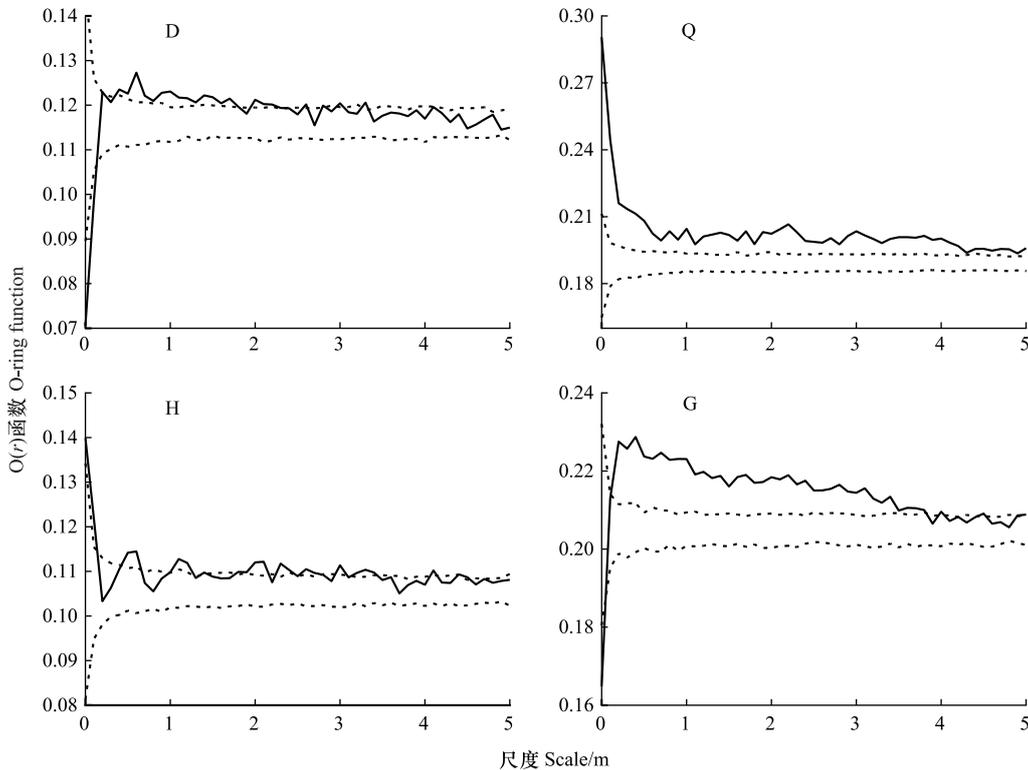


图 3 不同样地蒙古冰草种群的点格局分析

Fig.3 Analysis of point pattern of *Agropyron mongolicum* population in different plots

O(r) 为圆环函数,实线为实测值,虚线为上下包迹线(99%)

主要表现为聚集分布,在其他尺度上主要呈随机分布;在整个研究尺度范围内,蒙古冰草在 Q 样地中均呈聚集分布,在 H 样地中则表现为聚集和随机交替分布;G 样地在 0.1—3.8m 尺度范围内蒙古冰草株丛呈聚集分布,其他尺度范围内呈随机分布。

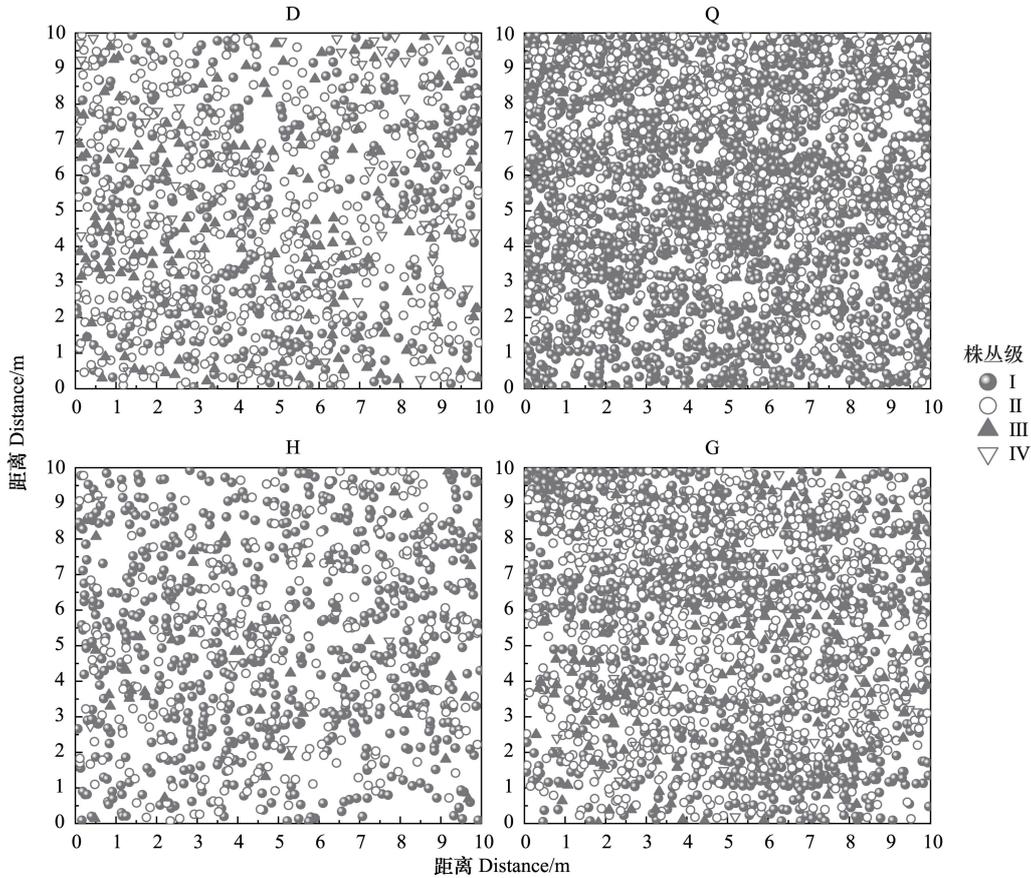


图 4 不同样地蒙古冰草种群分布的散点图

Fig.4 Scatter diagram of *Agropyron mongolicum* population distribution in different plots

2.3.2 蒙古冰草种群各级株丛的空间分布格局

由图 5 可以看出,在 D 样地中,蒙古冰草 I 级株丛由 0—0.6m 尺度范围内的聚集分布过渡到 >0.6m 尺度上的随机分布; II、III 级株丛在 0—5.0m 尺度范围内均呈随机分布; IV 级株丛在 0—5.0m 尺度上呈现出 3 种空间分布类型,从 0.2—1.3m 尺度范围内的聚集分布过渡到 1.3—3.3m 尺度范围内的随机分布,在 3.3—4.8m 尺度范围内则表现为均匀分布。

在 Q 样地中,蒙古冰草 I 级株丛在 0—5.0m 尺度范围内均呈聚集分布; II 级株丛在 0.2—1.3m 尺度范围内呈聚集分布,其他尺度表现为随机分布; III 级株丛在 0—1.5m 和 2.1—2.8m 尺度上分别呈聚集和均匀分布,其他尺度上呈现出随机分布; IV 级株丛在 0—2.5m 和 2.7—5.0m 尺度范围内分别表现为聚集和均匀分布。

在 H 样地中,蒙古冰草 I 级株丛在 0—2.9m 尺度范围内呈聚集分布, >2.9m 尺度上表现为随机分布; II 级、III 级和 IV 级株丛在 0—5.0m 尺度范围内均呈随机分布。

在 G 样地中,蒙古冰草 I 级株丛在 0—2.4m 和 >2.4m 尺度上分别呈聚集和随机分布; II 级株丛在 0.2—1.8m 尺度范围内呈聚集分布,其他尺度上表现为随机分布; III 级和 IV 级株丛在 0—5.0m 尺度范围内均呈随机分布。

2.3.3 蒙古冰草种群不同株丛级之间的空间关联性

由图 6,在 D 样地中,蒙古冰草仅表现为 I 级株丛与 II 级株丛在 0—0.1m 尺度、I 级株丛与 III 级株丛在

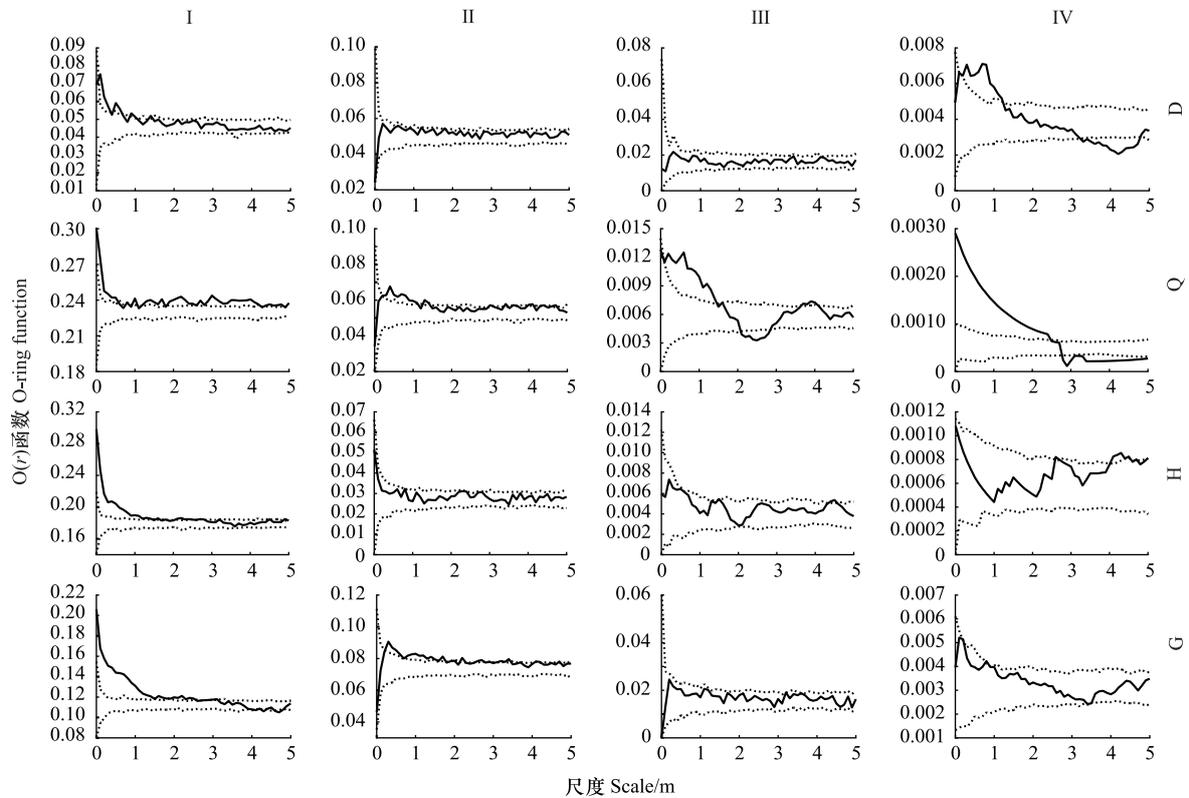


图 5 不同样地蒙古冰草不同株丛级个体的点格局分析

Fig.5 Point pattern analysis of *Agropyron mongolicum* individuals with different cluster levels in different plots

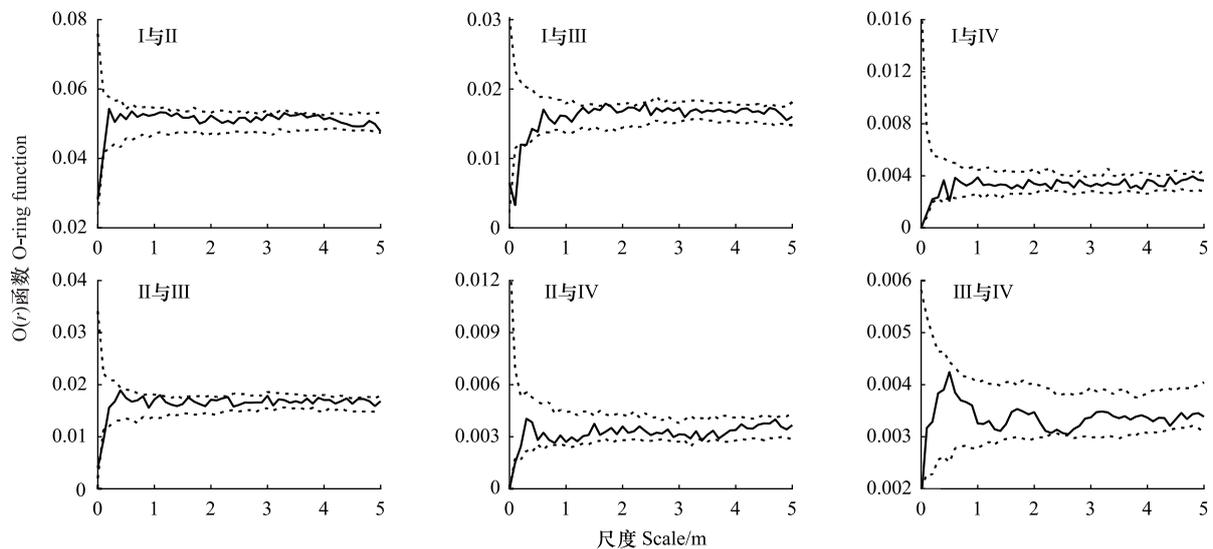


图 6 D 样地蒙古冰草不同株丛级个体间的空间关联性

Fig.6 Spatial correlation of *Agropyron mongolicum* individuals among different cluster levels in plot D

0—0.3m 尺度、II 级株丛与 III 级株丛在 0—0.15m 尺度范围内呈负关联,总体上各株丛级间主要呈无关联。

Q 样地蒙古冰草各株丛级之间的关联性如图 7 所示。可以看出, I 级株丛与 II 级株丛、I 级株丛与 III 级株丛在 0—0.2m, I 级株丛与 IV 级株丛在 0.1—0.15m、1.0—1.1m 尺度范围内呈负关联,其他尺度范围内表现为无关联; II 级株丛与 III 级株丛在 0.2—0.35m、0.6—0.8m、0.95—1.1m, II 级株丛与 IV 级株丛在 3.6—3.8m、

4.4—5.0m, III级株丛与IV级株丛在0—1.7m 尺度范围内呈正关联,其他尺度范围内表现为无关联。总体看,Q 样地中蒙古冰草 I、II 级株丛之间在一定尺度范围内表现为负关联,随尺度的增大表现为无关联; III、IV 株丛之间在小尺度范围内表现为正关联,随尺度的增大表现为无关联。

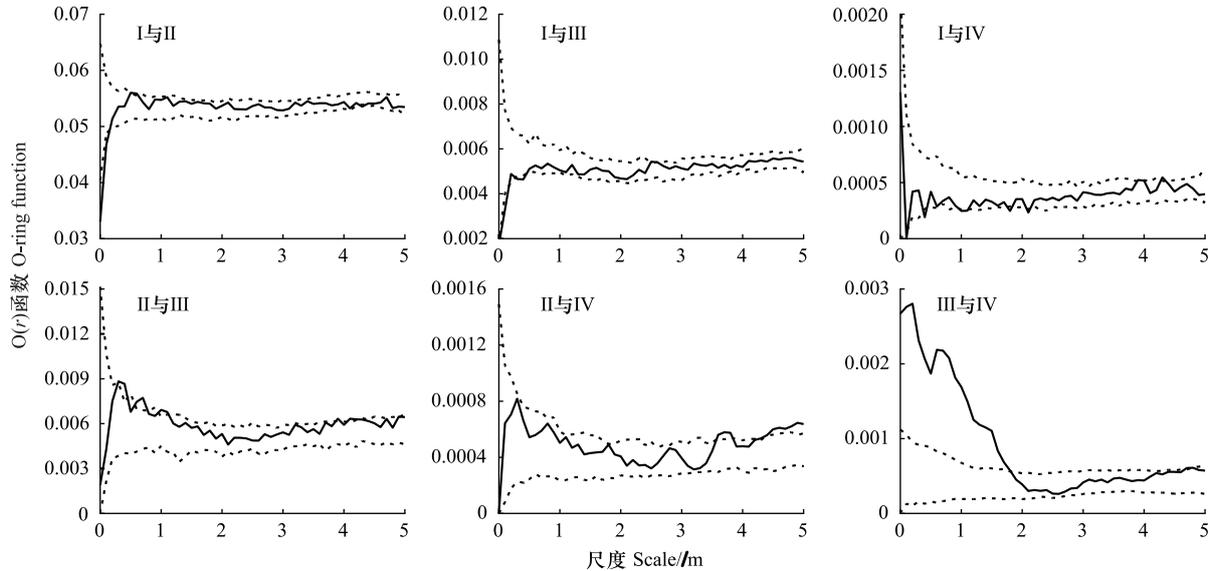


图7 Q 样地蒙古冰草不同株丛级个体间的空间关联性

Fig.7 Spatial correlation of *Agropyron mongolicum* individuals among different cluster levels in plot Q

如图 8 所示,H 样地中,蒙古冰草各株丛级之间主要表现为无关联;仅在极小尺度范围内 I 级株丛与 III 级株丛、I 级株丛与IV级株丛之间表现为负关联, III 级株丛与IV级株丛在 0.5—1.3m 尺度范围内呈正关联、4.0—5.0m 尺度范围内呈负关联。

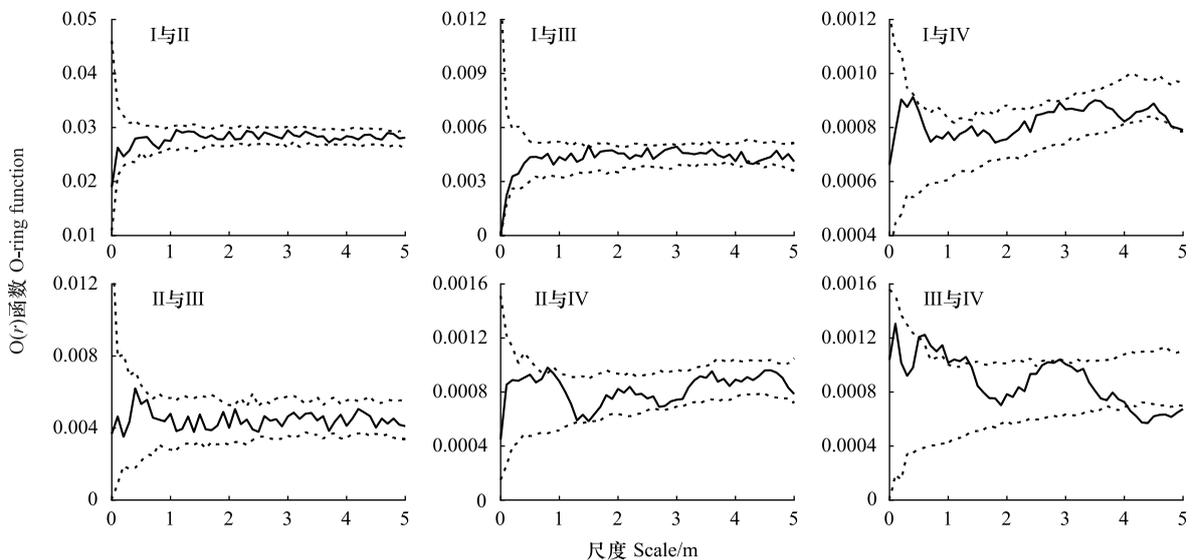


图8 H 样地蒙古冰草不同株丛级个体间的空间关联性

Fig.8 Spatial correlation of *Agropyron mongolicum* individuals among different cluster levels in plot H

在 G 样地中,蒙古冰草 I 级株丛与 II 级、III 级和IV级株丛之间均在一定尺度范围呈现负关联或正关联,随着研究尺度的增大表现为无关联; II 级株丛与 III 级株丛、II 级株丛与IV级株丛之间在整个研究尺度范围内

表现为无关联;Ⅲ级株丛与Ⅳ级株丛在 1.2—1.5m 尺度范围内呈正关联,其他尺度范围内呈无关联。

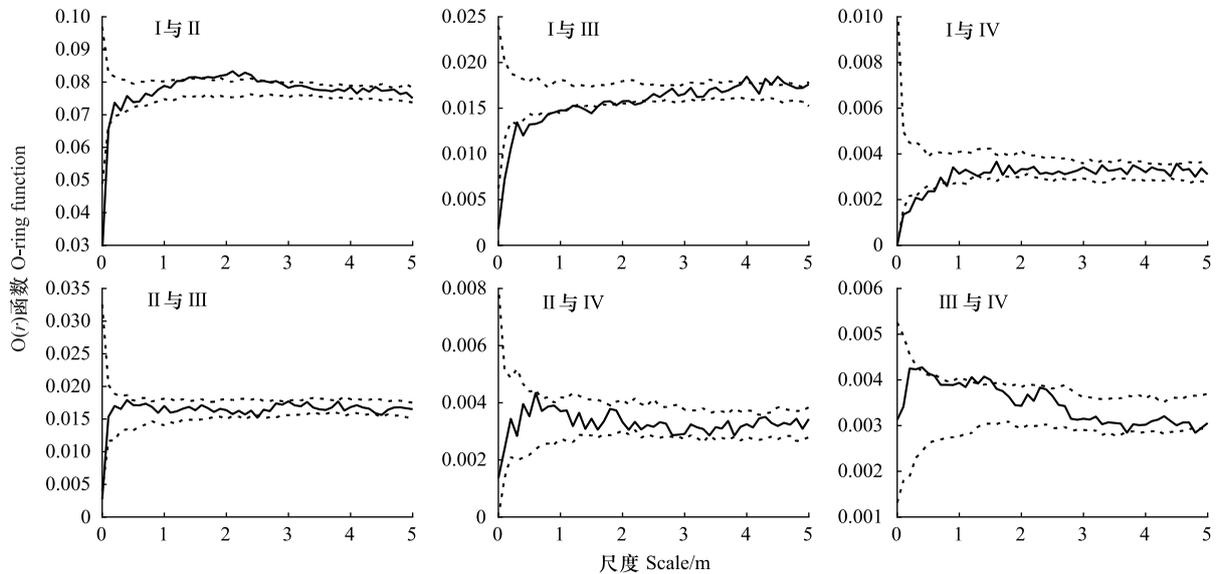


图9 G样地蒙古冰草不同株丛级个体间的空间关联性

Fig.9 Spatial correlation of *Agropyron mongolicum* individuals among different cluster levels in plot G

### 3 讨论

植物群落是区域环境条件可视景观的反映,能够指示植物种内种间关系及抵御环境压力的能力<sup>[27]</sup>。本研究中,不同样地植物群落物种组成及其重要值发生变化,这主要是由于自南向北随降水和土壤质地、养分等的改变,草地生态过程及植物种内种间关系发生变化,进而导致群落演替方向改变<sup>[28]</sup>,特别是在降水及土壤含水量最低的G样地,一年生植物及一些更为耐旱、耐风沙的物种所占比重增加,表现出与环境因子变化相吻合的演替轨迹<sup>[29]</sup>。

生态位宽度不仅可以衡量物种对环境资源的利用能力和分布状况,而且能够反映物种在群落中的地位及演替趋势<sup>[30]</sup>。生态位宽度越大,对环境的适应能力越强,且在群落中往往处于优势地位。不同样地植物群落中蒙古冰草和牛枝子种群的生态位宽度较高,表明这2种植物在进化过程中能够较好地应对环境变化,缓解环境波动对其产生的不利影响,并通过相对资源利用及分配,促进种群及群落生物多样性的维持<sup>[31]</sup>,在各样地出现的频度均较高,是该区域的泛化种。短花针茅、猪毛蒿等物种在不同样地的生态位宽度差异较大,体现出这些物种能够调整自身生态学特性以适应特化的环境条件,不同物种资源利用的差异和环境适应性影响了生态位分化程度<sup>[32]</sup>,与董雪等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。

生态位重叠反映了物种间的资源利用程度与空间分配之间的关系,一定程度上能够体现物种间对资源利用的竞争关系<sup>[32]</sup>。通常认为,当生态位重叠值 $\geq 0.50$ 时,物种间存在资源利用的相似性。而Wang等<sup>[34]</sup>研究认为,当生态位重叠值 $\geq 0.80$ 时,物种之间资源利用更加相似,加剧了种间竞争,生态位重叠值 $\leq 0.60$ 时,物种之间资源利用的相似性降低。蒙古冰草与主要物种环境资源利用的相似程度由高到低依次为G、Q、D、H样地,表明G、Q样地物种间的竞争强度高于D、H样地。然而,也有研究表明<sup>[35]</sup>生态位重叠不一定导致种间竞争,也可能存在资源互补或者互利的关系,种对之间可能对资源存在互补性的需求,促使种间共享群落资源,而资源匮乏或者对同一资源的利用程度差异较大时,这种互惠关系才可能转为完全竞争状态,因此生态位重叠只是种间利用性竞争的必要条件之一。不同样地蒙古冰草与生态位宽度较大的牛枝子之间生态位重叠指数均较高,其间对资源需求及空间占有具有相似性,但由于其分属疏丛型禾草和豆科半灌木,其间可能在生

长发育过程中既相互促进又相互竞争,能够共同抵御荒漠草原严酷的环境条件<sup>[36]</sup>。

种群结构不仅可以反映植物个体的发育状态、种群数量动态与发展趋势,同时也揭示了环境因素对其产生的影响<sup>[37-38]</sup>。盐池县荒漠草原蒙古冰草种群在不同样地均以 I、II 级株丛的数量和比例较高,表明各样地中蒙古冰草可供更新的幼苗数量较为充足,种群处于发展阶段<sup>[14-15]</sup>。这一方面可能是由于蒙古冰草较强的抗旱、耐风蚀等优良特性使得其在气候较为适宜的条件下能够产生大量的种子,并通过风力等途径传播,有利于地上种子雨扩散,保证了土壤种子库充足的种源<sup>[39]</sup>;另一方面,蒙古冰草在长期适应干旱环境的过程中形成种子休眠机制,延长萌发周期来抵御不良环境对其产生的影响,提高总体的种子萌发和幼苗存活率,进而保障其种群的繁衍和更新<sup>[40]</sup>。不同样地之间蒙古冰草的株丛密度、株丛结构均存在差异,这是由于外部环境条件的改变使得草地生态系统的养分循环、植物群落结构、种内种间关系及物种生态位等发生变化<sup>[41]</sup>,作为种子扩散的后续过程,影响种子萌发和幼苗存活,并改变蒙古冰草植株的分蘖及生物量分配格局等,进而对其种群结构产生影响<sup>[42]</sup>。

植物个体在不同发育阶段所呈现出的空间分布格局能够反映种群的发展过程<sup>[43]</sup>。Q 和 G 样地蒙古冰草种群在整个研究尺度范围内主要呈聚集分布,在 D 和 H 样地主要表现为聚集和随机交替分布。这可能是由于 Q、G 样地降水量较低,土壤水分、养分等资源更为匮乏,加之蒙古冰草与主要物种的生态位重叠值较高,群落可能处于演替阶段,资源竞争激烈,蒙古冰草个体倾向于形成集群的分布模式,并利用集体优势共同抵御外部压力,使物种对资源利用达到相对平衡状态<sup>[44]</sup>。种群的不同类型影响其个体分布,对于增长型和稳定型种群,幼龄个体在小尺度范围内主要呈聚集分布,中老年个体则表现为随机分布;对于衰退型种群,老龄个体在一定尺度上均匀分布加大<sup>[45]</sup>。不同样地蒙古冰草种群 I、II 级株丛在小尺度范围内呈聚集分布,随尺度的增大,逐渐转变为随机分布,III、IV 级株丛主要呈随机分布。这可能是由于荒漠草原自然环境严酷,土壤干旱贫瘠,风蚀作用强烈,个体较小的植株对环境资源的争夺能力较弱<sup>[15]</sup>,抵御干旱、风沙等危害的能力有限<sup>[46]</sup>,因此更倾向于相互集合、彼此合作,呈聚集分布的空间分布格局以增强对环境资源的获取及种间竞争能力,从而保障种群的更新和维持<sup>[47]</sup>。随植物生长发育,较大植株个体抵御环境胁迫的能力增强,对土壤水分、养分等资源的需求增加,降低了其相互之间的依赖性,加剧了植物的种内竞争,进而导致种群自疏<sup>[15]</sup>,株丛由聚集分布过渡到随机或均匀分布<sup>[48-50]</sup>。在小尺度范围内,由于种子扩散限制使得大部分蒙古冰草种子落在母株周围,虽然密度制约效应会导致部分萌发植株死亡,但同时蒙古冰草植株对周围小环境的改造及其庇护作用有助于新生个体存活,使得大部分新生个体仍会聚集在母株周围形成集群分布<sup>[51]</sup>。此外,荒漠草原较高的环境空间异质性形成的微生境斑块格局,也是小尺度范围内蒙古冰草种群呈聚集分布的主要原因。随尺度的增大,土壤水分、养分等呈现空间不连续性和随机性,当种群密度达到环境最大容纳量时,由于密度制约效应产生的自疏或他疏作用促进了种群集群斑块的分化<sup>[52]</sup>,改变了蒙古冰草种群个体之间的生态关系,降低了聚集生活的生态需求,蒙古冰草个体逐渐由聚集分布转变为随机分布。

种内联结是植物种群维持和发展的一种应对策略,可以揭示种群内部不同发育阶段植物个体间空间分布的相互关联性<sup>[53]</sup>。在干旱、贫瘠的环境中,植物个体可能会通过根系的连接形成地下生态系统,利用彼此的生长优势相互扶持,增强植物获取和吸收水分、养分的能力,并且这种联结状态能够减缓土壤侵蚀、稳定土壤结构<sup>[54-55]</sup>。本研究中,不同尺度范围内蒙古冰草种群的 I 级株丛与 II、III、IV 级株丛在各样地中均表现为负关联或无关联。这可能是由于 I 级株丛与 II 级株丛生长发育程度相似,二者竞争关系较为明显,与 III、IV 级株丛的个体、表型形态及生理代谢过程等差异较大,在资源获取和利用方面处于弱势地位<sup>[56]</sup>,导致其间主要表现为负关联或无关联。II 级株丛与 III、IV 级株丛在不同尺度范围内主要表现为无关联,III 级与 IV 级株丛在小尺度范围内主要表现为正关联,随尺度增大转变为无关联,表明 III 级与 IV 级株丛之间存在一定的相互依存关系<sup>[45]</sup>,这是由于随着蒙古冰草个体生长发育及密度制约效应等生态过程的转变,其在植物群落中的生态位、对资源的摄取和利用及种内种间关系等发生变化<sup>[57]</sup>。同时,蒙古冰草可以通过无性繁殖(分蘖)进行种群的维持,一定程度上增加了 III、IV 级株丛的比例<sup>[58]</sup>。较大个体由于自身抗逆性增强,加之荒漠草原较高的环境

异质性,导致不同发育阶段的个体空间分布及其关联性改变<sup>[59]</sup>。

#### 4 结论

不同样地植物群落中蒙古冰草和牛枝子的重要值、生态位宽度均较大,其间生态位重叠指数较高,其他物种在不同样地之间变异较大。蒙古冰草种群以 I、II 级株丛为主,在 Q 和 G 样地中 I、II 级株丛占比更高,株丛密度较大;在 D 和 H 样地中,III、IV 级株丛占比增加,株丛密度较小。Q 和 G 样地中蒙古冰草种群在 0—5.0m 尺度范围内主要呈聚集分布,D 和 H 样地呈聚集和随机分布。I 级株丛由小尺度范围内的聚集分布逐渐随尺度增大过渡到随机分布;III 级和 IV 级株丛主要呈随机分布,仅在一定尺度范围内表现出不明显的聚集分布。不同样地中,蒙古冰草 I 级株丛与 II 级、III 级、IV 级株丛在一定尺度范围内呈负关联或正关联,随尺度增大表现为无关联;II 级、III 级、IV 级株丛之间在整个研究尺度范围内主要表现为无关联。

综上,宁夏盐池县荒漠草原蒙古冰草种群总体以 I、II 级株丛为主,种群发展呈增长型;个体越小,小尺度范围内植株聚集分布越明显。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Cabal C, De Deurwaerder H P T, Matesanz S. Field methods to study the spatial root density distribution of individual plants. *Plant and Soil*, 2021, 462(1): 25-43.
- [ 2 ] Munné-Bosch S. Spatiotemporal limitations in plant biology research. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(4): 346-354.
- [ 3 ] 徐浩成, 郑路, 王宏翔, 农友, 陈永康, 李萌, 蔡道雄, 尤业明. 南亚热带红锥大径材培育林幼苗更新及其与母树的空间关联性. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1055-1062.
- [ 4 ] Wang Y B, Zhao R T, Li Y, Yao R, Wu R X, Li W L. Research on the evolution and the driving forces of land use classification for production, living, and ecological space in China's Qilian Mountains Nature Reserve from 2000 to 2020. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(24): 64949-64970.
- [ 5 ] 许爱云, 许冬梅, 刘金龙, 于双, 黄霞悦, 米世明, 朱宁宁. 基于零模型的宁夏荒漠草原优势种群点格局分析. *生态学报*, 2020, 40(12): 4180-4187.
- [ 6 ] Zhao C X, Zhao W J, Jin M, Zhou J Q, Ta F, Wang L, Mou W B, Lei L J, Liu J R, Du J L, Zhang X L. Spatial patterns of *Picea crassifolia* driven by environmental heterogeneity and intraspecific interactions. *Journal of Forestry Research*, 2023, 34(4): 949-962.
- [ 7 ] 王鑫厅, 王殿杰, 李海兵, 邵阳, 姜超, 刘芳, 李素英, 苗百岭. 点格局研究过程中 K-函数的累积效应. *应用生态学报*, 2022, 33(5): 1275-1282.
- [ 8 ] Yates L A, Brook B W, Buettel J C. Spatial pattern analysis of line-segment data in ecology. *Ecology*, 2022, 103(2): e03597.
- [ 9 ] Yang K T, Chen G P, Xian J R. Stomatal distribution pattern for 90 species in Loess Plateau - Based on replicated spatial analysis. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110120.
- [ 10 ] 刘万龙. 异质生境下荒漠草原蒙古冰草群落特征及种群分布格局[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [ 11 ] Ao T G B Y, Gao L J, Wang L C, Li Y Q, Zhao Y, Lang M L, Yang X J. Cloning and expression analysis of AP2/EREBP transcription factor gene (MwAP2/EREBP) in *Agropyron mongolicum* Keng. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2017, 9(12): 2031-2038.
- [ 12 ] Che Y H, He Y T, Song N, Yang Y P, Wei L, Yang X M, Zhang Y, Zhang J P, Han H M, Li X Q, Zhou S H, Liu W H, Li L H. Four-year and five-developing-stage dynamic QTL mapping for tiller number in the hybrid population of *Agropyron* Gaertn. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 835437.
- [ 13 ] Zhao Y, Gao C P, Shi F L, Yun L, Jia Y S, Wen J Q. Transcriptomic and proteomic analyses of drought responsive genes and proteins in *Agropyron mongolicum* Keng. *Current Plant Biology*, 2018, 14: 19-29.
- [ 14 ] 许爱云. 宁夏荒漠草原蒙古冰草种群小尺度空间格局研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [ 15 ] 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): 4554-4559.
- [ 16 ] Wang J, Gao X Q, Wang X, Song W X, Wang Q, Wang X C, Li S X, Fu B Z. Exogenous melatonin ameliorates drought stress in *Agropyron mongolicum* by regulating flavonoid biosynthesis and carbohydrate metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1051165.
- [ 17 ] Fan B B, Sun F C, Yu Z, Zhang X F, Yu X X, Wu J, Yan X X, Zhao Y, Nie L Z, Fang Y Y, Ma Y H. Integrated analysis of small RNAs, transcriptome and degradome sequencing reveal the drought stress network in *Agropyron mongolicum* Keng. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 976684.
- [ 18 ] Hui AN, Li G Q. Differential effects of grazing on plant functional traits in the desert grassland. *Polish Journal of Ecology*, 2014, 62(2): 239-251.
- [ 19 ] Yang Y, Liu B R, An S S. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China. *Catena*, 2018, 166: 328-338.
- [ 20 ] Li G Q, Zhao P P, Shao W S, Jin C Q, Song L X, Chen Y Y. Effect of enclosure on reproductive allocation of wheatgrass *Agropyron mongolicum* populations in desert steppes. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(24): 14023-14030.
- [ 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 ] 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.
- [ 23 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

- [24] Levins R. Evolution in changing environments; some theoretical explorations. Princeton; Princeton University Press, 1968.
- [25] Pianka E R. The structure of lizard communities. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 53-74.
- [26] 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.
- [27] 许宏斌, 苏艳龙, 张雷, 刘红梅, 刘丽英, 杨溢文, 李琳. 围封 10 年对荒漠草原群落物种多样性与优势种空间分布格局的影响. 生态学报, 2024, 44(10): 4334-4341.
- [28] 彭少麟, 向言词. 植物外来种入侵及其对生态系统的影响. 生态学报, 1999, 19(4): 560-568.
- [29] 刘丽丹, 谢应忠, 邱开阳. 宁夏盐池沙地 3 种植物群落的数量特征. 中国沙漠, 2013, 33(2): 343-348.
- [30] 刘润红, 常斌, 荣春艳, 姜勇, 杨瑞岸, 刘星童, 曾惠帆, 傅桂焕. 漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种群生态位. 应用生态学报, 2018, 29(12): 3917-3926.
- [31] Zhang J, Zhang B G, Liu Y, Guo Y Q, Shi P, Wei G H. Distinct large-scale biogeographic patterns of fungal communities in bulk soil and soybean rhizosphere in China. The Science of the Total Environment, 2018, 644: 791-800.
- [32] 陈聪琳, 赵常明, 刘明伟, 徐凯, 徐文婷, 熊高明, 葛结林, 邓滢, 申国珍, 谢宗强. 神农架南坡小叶青冈+曼青冈常绿阔叶林主要木本植物生态位与种间联结. 生态学报, 2024, 44(11): 1-15.
- [33] 董雪, 李永华, 辛智鸣, 姚斌, 包岩峰, 脱登峰, 袁凡, 段瑞兵, 李新乐, 汪静, 孙志成, 王海, 陈旭. 敦煌西湖荒漠-湿地生态系统优势物种生态位研究. 生态学报, 2020, 40(19): 6841-6849.
- [34] Wang J, Liu J J, Liu C, Ding X Y, Wang Y. Species niche and interspecific associations alter flora structure along a fertilization gradient in an alpine meadow of Tianshan Mountain, Xinjiang. Ecological Indicators, 2023, 147: 109953.
- [35] 雷德芳, 王志杰. 黔中喀斯特地区马尾松群落主要物种的种间联结、生态位及群落稳定性特征. 生态学报, 2024, 44(10): 4353-4367.
- [36] 李美慧, 李玉华, 晏昕辉, 拓行行, 杨梦茹, 王子临, 李伟. 半灌木扩张驱动的草地植物多样性与地上生产力特征及其关系研究. 草业学报, 2023, 32(5): 27-39.
- [37] 景海超, 刘颖慧, 贺佩, 张家琦, 董婧怡, 汪怡. 青藏高原典型区生态系统服务空间异质性及其影响因素——以那曲市为例. 生态学报, 2022, 42(7): 2657-2673.
- [38] 韩大勇, 张维, 努尔买买提·依力亚斯, 杨允菲. 植物种群更新的补充限制. 植物生态学报, 2021, 45(1): 1-12.
- [39] 刘金龙, 王莹, 许爱云, 陶利波, 于双, 许冬梅. 干旱胁迫下 5 种禾本科牧草幼苗期的生理特性. 草业科学, 2018, 35(5): 1106-1115.
- [40] 沈艳, 刘彩凤, 马红彬, 赵菲, 谢应忠. 荒漠草原土壤种子库对草地管理方式的响应. 生态学报, 2015, 35(14): 4725-4732.
- [41] Ma X X, Zhao Y G, Yang K, Ming J, Qiao Y, Xu M X, Pan X H. Long-term light grazing does not change soil organic carbon stability and stock in biocrust layer in the hilly regions of drylands. Journal of Arid Land, 2023, 15(8): 940-959.
- [42] Xiao J, Liu B, Yao Y Y, Guo Z F, Jia H Y, Kong L R, Zhang A M, Ma W J, Ni Z F, Xu S B, Lu F, Jiao Y N, Yang W Y, Lin X L, Sun S L, Lu Z F, Gao L F, Zhao G Y, Cao S H, Chen Q, Zhang K P, Wang M C, Wang M, Hu Z R, Guo W L, Li G Q, Ma X, Li J M, Han F P, Fu X D, Ma Z Q, Wang D W, Zhang X Y, Ling H Q, Xia G M, Tong Y P, Liu Z Y, He Z H, Jia J Z, Chong K. Wheat genomic study for genetic improvement of traits in China. Science China Life Sciences, 2022, 65(9): 1718-1775.
- [43] Zhang H N, Chen S F, Zheng X, Ge X M, Li Y, Fang Y M, Cui P, Ding H. Neighborhood diversity structure and neighborhood species richness effects differ across life stages in a subtropical natural secondary forest. Forest Ecosystems, 2022, 9: 100075.
- [44] 宗国, 白雪娇, 张淑媛, 蔡军奇. 辽东山区次生林乔木幼苗分布格局与种间空间关联性. 应用生态学报, 2018, 29(1): 18-24.
- [45] 闫秀, 窦建德, 黄维, 黄文广, 李小伟. 宁夏珍稀濒危植物半日花种群结构和点格局分析. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3614-3620.
- [46] 丹杨, 杜灵通, 王乐, 马龙龙, 乔成龙, 吴宏玥, 孟晨. 荒漠草原人工灌丛化对蒸散发及其组分的影响——以盐池县为例. 生态学报, 2020, 40(16): 5638-5648.
- [47] West P W, Ratkowsky D A. Problems with models assessing influences of tree size and inter-tree competitive processes on individual tree growth: a cautionary tale. Journal of Forestry Research, 2022, 33(2): 565-577.
- [48] 杨壹, 邱开阳, 李静尧, 谢应忠, 刘王锁, 黄业芸, 王思瑶, 鲍平安. 贺兰山东坡典型植物群落多样性垂直分布特征与土壤因子的关系. 生态学报, 2023, 43(12): 4995-5004.
- [49] 李晓田, 王铁娟, 韩文娟, 张丽, 张慧, 刘晓婷, 刘雅洁. 东阿拉善珍稀濒危植物绵刺种群结构与点格局分析. 植物生态学报, 2023, 47(4): 506-514.
- [50] Pereira Silveira A, Martins R F, Sousa Menezes B, Soares Araújo F. Is the spatial pattern of a tree population in a seasonally dry tropical climate explained by density-dependent mortality? Austral Ecology, 2018, 43(2): 191-202.
- [51] 涂洪润, 李娇凤, 刘润红, 梁士楚, 兰泽南, 章欣仪, 康馨丹, 姜勇. 桂林岩溶石山櫟木种群空间格局及其关联性. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2621-2630.
- [52] 王婷婷, 张桥英, 张运春, 唐梦娥, 廖望. 喜旱莲子草在增温背景下的密度制约与生长权衡. 生态学报, 2022, 42(22): 9100-9110.
- [53] 薛文艳, 杨斌, 张文辉, 于世川. 桥山林区麻栎种群不同发育阶段空间格局及关联性. 生态学报, 2017, 37(10): 3375-3384.
- [54] Araus J L, Kefauver S C, Vergara-Díaz O, Gracia-Romero A, Rezzouk F Z, Segarra J, Buchailot M L, Chang-Espino M, Vatter T, Sanchez-Bragado R, Fernandez-Gallego J A, Serret M D, Bort J. Crop phenotyping in a context of global change: What to measure and how to do it. Journal of Integrative Plant Biology, 2022, 64(2): 592-618.
- [55] 孙佳慧, 史海兰, 陈科宇, 纪宝明, 张静. 植物细根功能性状的权衡关系研究进展. 植物生态学报, 2023, 47(8): 1055-1070.
- [56] 朱春全. 生态位态理论与扩充假说. 生态学报, 1997, 17(3): 324-332.
- [57] Li Z K, Li X Y, Zhou S, Yang X F, Fu Y S, Miao C Y, Wang S, Zhang G H, Wu X C, Yang C, Deng Y H. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances. Science China Earth Sciences, 2022, 65(11): 2083-2114.
- [58] 张晓龙, 吴梦迪, 吴秋堂, 王立冬, 张树岩, 黎磊, 韩广轩, 管博. 克隆植物对异质生境的适应对策研究进展. 生态学报, 2022, 42(10): 4255-4266.
- [59] 俞响, 白小军, 王志一. 大兴安岭次生林区不同龄级落叶松 (*Larix gmelinii*) 生态位特征和竞争关系. 生态学报, 2022, 42(12): 4912-4921.