

高寒退化草地甘肃棘豆小尺度点格局

冯 威 赵成章* 党晶晶 郑慧玲 段贝贝 韩 玲 徐 婷

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃省湿地资源保护与产业发展工程研究中心, 兰州 730070)

摘 要 植物种群的空间格局是植物与环境协同适应的结果, 体现了植物种群的生活史对策。采用草地群落学调查与点格局分析方法, 在祁连山北坡选择未退化(Ⅰ)、轻度退化(Ⅱ)、中度退化(Ⅲ)和重度退化(Ⅳ)4种高寒草地, 研究了甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)种群小尺度格局的空间异质性。结果表明: 随着天然草地退化程度的加剧, 甘肃棘豆种群高度、盖度、地上生物量和密度增大, 小株丛(一级)比例逐渐减小, 大株丛(二、三级)比例逐渐增大; 甘肃棘豆的分布格局表现出与尺度关联的变化趋势, 在未退化(梯度Ⅰ)和轻度退化(梯度Ⅱ)草地, 甘肃棘豆种群在较小尺度上表现为聚集分布, 较大尺度上表现为随机分布; 在中度(梯度Ⅲ)和重度(梯度Ⅳ)退化草地, 种群空间分布格局则表现出相异的格局特征。随着草地退化程度加剧, 甘肃棘豆种群的聚集分布格局由小尺度转向较大尺度, 体现了植物种群的扩散和更新策略。

关键词 甘肃棘豆; 株丛结构; 种群扩散; 分布格局; 祁连山北坡

Fine-scale spatial patterns of *Oxytropis kansuensis* population in degraded alpine grassland.

FENG Wei, ZHAO Cheng-zhang*, DANG Jing-jing, ZHENG Hui-ling, DUAN Bei-bei, HAN Ling, XU Ting (Research Center of Wetland Resources Protection and Industrial Development Engineering of Gansu Province, College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China).

Abstract: The spatial patterns of plant populations are the results of coordinated adaptation of plants to environment, reflecting the life history strategy of plant populations. The heterogeneity of fine-scale spatial patterns in *Oxytropis kansuensis* population was studied by using the methods of community survey and point pattern analysis. Four kinds of alpine grassland were chosen, including undegraded grassland (Ⅰ), lightly degraded grassland (Ⅱ), moderately degraded grassland (Ⅲ) and severely degraded grassland (Ⅳ) in the northern slope of Qilian Mountains. The results showed that, with the increasing degree of natural grassland degradation, the population height, coverage and aboveground biomass and branch density increased, and the proportion of small bunch decreased, while the proportion of big bunch increased. The spatial distribution pattern of *O. kansuensis* showed a scale-associated change trend. In the undegraded and lightly degraded grasslands, the distribution pattern of *O. kansuensis* showed a clumped distribution on a smaller scale, while showed a random distribution on a larger scale. Meanwhile, in the moderate and heavy degradation grasslands, the spatial distribution pattern of the population showed distinct pattern characteristics. With the increasing degree of natural grassland degradation, the clumped distribution patterns of plant populations shifted from a smaller scale to a larger scale, which reflected the dispersion and regeneration strategy of *O. kansuensis* population.

Key words: *Oxytropis kansuensis*; bunch structure; population dispersion; spatial distribution pattern; northern slope of Qilian Mountains.

植物种群的空间格局作为植物资源生态位、植物个体竞争及其环境适应性的重要表征 (Wiegand *et al.*, 2004; 赵成章等, 2011), 反映了植物种群的环境可塑性机制 (武高林等, 2007; McIntire *et al.*, 2009), 有助于揭示植物种群的稳定性形成和维持机理 (张兴旺等, 2013)。环境的筛选作用使物种聚集在适宜的生态境中且形成规模大小不等的斑块 (梁爽等, 2014), 植物种群的斑块结构在一定尺度上控制着植被的空间格局形态, 其实质是植物种群间的相互作用及其与生态境间协同关系的综合体现 (胡广录等, 2011)。植物种群的大小株丛结构和分布规律, 是植物个体之间相互依赖、相互竞争关系对异质生态境的响应, 这种响应在作用于植物群落结构和种群空间格局方面起到重要的推动作用 (李博等, 1998; 高福元等, 2013)。在过度放牧和气候变迁影响下, 伴随着天然草地的退化, 草地群落的优势种群发生了更替, 对草地群落的结构和功能产生了重大影响, 改变了草地植物的资源空间和种内、种间竞争格局 (任珩等, 2013; 高本强等, 2014), 往往引起植物种群斑块结构形态和株丛结构发生适应性调整, 成为植物种群分布格局形成与转变的重要驱动因素。因此, 植物种群小尺度点格局研究是认识植物表型可塑性机制的重要基础。

甘肃棘豆 (*Oxytropis kansuensis*) 是豆科棘豆属多年生草本植物, 主要分布于我国青海、甘肃、四川、云南等省区的高寒牧区, 具有根系发达、枝多叶茂、籽实繁多、抗逆性强等特性 (吴达等, 2003)。近年来, 在祁连山北坡的典型草原, 甘肃棘豆凭借较强的繁殖能力和对放牧干扰的适应能力, 通过空间分布格局的调整, 逐步成为退化草地群落具有竞争优势的物种, 对草地群落的稳定性和草地生产能力产生了重要影响。目前, 学界围绕退化草地棘豆资源分配特征 (何亚平等, 2008)、棘豆属植物土壤种子库种子 (王生耀等, 2008) 和甘肃棘豆毒性作用 (赵剑喜等, 2011) 等方面进行了研究, 但是对天然草地退化过程中甘肃棘豆种群小尺度空间格局的形成过程及其成因认识仍然较为薄弱。鉴于此, 本文运用点格局分析法和群落调查法, 对祁连山北坡高寒退化草地甘肃棘豆种群的空间分布格局进行了研究, 试图认识甘肃棘豆种群建立和发展的动态过程, 揭示高寒草地植物种群空间格局变化的影响机制。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省肃南县康乐草原, 地理位置为 38°47'15.8" N, 99°46'32.7" E, 海拔 2710~2725 m。具有大陆性气候和山地垂直气候特征。年平均气温 1~2 °C, ≥0 °C 的年积温为 2450 °C, 无霜期 80 d; 年降水量 270~450 mm, 主要集中在 6—9 月, 年蒸发量 1480~1620 mm; 年日照时数为 2130.5 h; 土壤以山地栗钙土为主。原生植被属于典型草原亚型的西北针茅草原, 主要植物有: 西北针茅 (*Stipa krylovii*)、甘肃棘豆、扁穗冰草 (*Agropyron cristatum*)、赖草 (*Leymus secalinus*)、星毛委陵菜 (*Potentilla acaulis*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、狼毒 (*Stellera chamaejasme*) 等。受各种环境因子的干扰影响, 以丛生禾草为优势种的草地群落发生了退化, 形成了以甘肃棘豆等毒杂草大规模聚集分布的退化草地。

1.2 样地设置与调查

根据赵成章等 (2004, 2012) 对祁连山北坡天然草地演替过程, 以及主要植物种群环境适应性的长期观察研究结果, 在研究区地貌相对一致、地形平缓的冬春草场, 选择 20 块牧户的围栏草地, 结合草地放牧管理和草地群落学实地调查, 按照草地群落的多样性特征、植物的组成结构、优势种群的更替情况和近 10 年草地的放牧率 (放牧率 = $B/D \times 100\%$, 式中, B 表示 2001—2010 年供试草地的年均牲畜饲养量, D 表示同一时期草地的理论载畜量) 等指标, 选取了 4 块围栏草地分别确定为未退化草地 (I)、轻度退化草地 (II)、中度退化草地 (III) 和重度退化草地 (IV) 进行甘肃棘豆尺度点格局实验 (表 1)。供试草地每年 11 月至次年 6 月放牧, 期间羊群可以在草场自由采食, 6—11 月为禁牧期, 可以避免放牧对观测数据的干扰。

2014 年 8 月中旬进行了草地群落学和甘肃棘豆种群的小尺度点格局观测实验。在每个围栏样地用 1 m×1 m 的样方框重复 6 次, 实测并记录样方内所有植物的株高、地上生物量、密度和盖度。在每个围栏样地内, 分别随机设置 3 个 2 m×2 m 的邻接格子样方, 计 3 个重复, 共设置 12 个样方, 每个样方内用 1 m×1 m 的样方框 (样方框内小格子的面积为 10 cm×10 cm) 按一定顺序依次放置 4 次, 以样方框左下角顶点为基点, 记录样方 (2 m×2 m) 中每个甘肃棘豆株丛的地面投影、相对位置以及每个株丛内的

表 1 供试样地群落主要特征指标
Table 1 Community characteristics of plots

| 样地 | 海拔 (m) | 群落特征 | | | 放牧率 (%) |
|------------|-----------|-------------|-----------|--------------|------------|
| | | 高度 (cm) | 盖度 (%) | 优势种 | |
| 未退化 (I) | 2710 | 20.8±1.06 a | 94±4.88 a | 西北针茅 | <90 |
| 轻度退化 (II) | 2718 | 18.2±0.93 b | 84±4.28 b | 西北针茅 甘肃棘豆 | 105~120 |
| 中度退化 (III) | 2715 | 14.1±0.72 c | 80±4.08 b | 甘肃棘豆 | 123~135 |
| 重度退化 (IV) | 2725 | 13.9±0.74 c | 72±3.74 c | 甘肃棘豆 | 138~150 |

同一列数据后不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

枝条数。在室内对取样记录进行处理,统计每个样方(2 m×2 m)内甘肃棘豆株丛数和每个株丛内枝条数(对于压在样线上的株丛数用样方(2 m×2 m)内枝条数占该株丛总枝条数的比例表示,其他株丛参数用实际观测值表示)。根据研究目的,按株丛内枝条数量将甘肃棘豆划分 3 级:一级株丛(1~5 枝)、二级株丛(6~10 枝)、三级株丛(10 枝以上)。

1.3 点格局分析

研究区域内,位于二维空间的点构成点事件,用 $k(d)$ 函数来反映点事件空间布局的依赖程度(Manly, 1991),其定义如下:

$$k(d) = \lambda^{-1} E(N(d_{ij} \leq d))$$

式中, λ 为研究区域内每单位面积点事件的密度, E 为在一定距离尺度下点事件数量的期望, N 为数量, i, j 为两个具有相同特征的点事件, d_{ij} 为点 i 到点 j 的距离, d 为距离尺度。如果一定距离尺度下点事件随机分布,则应有:

$$E(N(d_{ij} \leq d)) = \lambda \pi d^2$$

此时, $k(d) = \pi d^2$;在距离尺度较小的情况下,若点事件为聚集分布, $k(d)$ 的观测值则将大于 πd^2 。估计式为:

$$k(d) = \frac{A}{n^2} \sum_i^n \sum_j^n \frac{I_{ij}(d)}{W_{ij}(d)}$$

式中, A 为样地面积, $\lambda = \frac{n}{A}$, $E = n^{-1} \sum_i^n \sum_j^n \frac{I_{ij}(d)}{W_{ij}(d)}$, n 为样地内甘肃棘豆的数量, i, j 为样方内任意两个具有相同特征的点事件, d_{ij} 表示第 i 株到第 j 株的距离, $I_{ij}(d) = 1$ (当 $d_{ij} \leq d$ 时成立, d_{ij} 为 i 到 j 之间的距离), $W_{ij}(d)$ 为边缘校正的权重,等于以点事件 i 为圆心以 d_{ij} 为半径的圆落在研究区域内的弧长和整个圆周长的比值。

利用 $L(d)$ 函数的估计值判断在此尺度下点事件的分布类型。距离尺度 d 下,若 $L(d) > 0$,为聚集分布;若 $L(d) = 0$,为随机分布;若 $L(d) = 0$,为均匀分布。

$$L(d) = \sqrt{k(d)/\pi} - d$$

一般利用 Monte Carlo 方法(Manly, 1991)来求解随机分布的上下包迹线,如果研究对象实际的值落在上下包迹线的区间内,则在此距离尺度下植物种群是随机分布的;如果研究对象实际的值落在上包迹线以上,则在此距离尺度下植物种群是聚集分布的;如果研究对象实际的值落在下包迹线以下,则在此距离尺度下植物种群是均匀分布的。具体方法是选取 m 组 n 个随机数,每组都利用上述公式求解在不同距离尺度下的 $L(d)$ 值,然后把对应的每个 d 下的 m 个 $L(d)$ 由小到大进行排序,分别保留最大值和最小值作为上下包迹线的取值范围。利用 CAD 软件进行绘图,通过 GetData Graph Digitizer 2.22 软件进行数据采集,通过 Visual Fortran 6.5 进行编程计算。本文采用的步长为 5 cm, Monte Carlo 随机模拟的数目为 20 次,得到上下两条包迹线围成的 95% 置信区间。

1.4 数据处理

采用 Excel 软件和 SPSS 16.0 统计分析软件对本实验数据进行处理和分析,不同退化梯度设置间的种群生物学特征和株丛大小结构特征的平均值差异性的比较采用单因素方差(one-way ANOVA, Tukey's HSD)分析,差异显著性采用 Duncan 氏新复极差法检验。

2 结果与分析

2.1 退化草地甘肃棘豆种群的生物学特征

如表 2 所示,不同退化草地的植株高度存在显著差异($P < 0.05$),随着草地退化,甘肃棘豆植株高度逐渐升高。甘肃棘豆地上生物量、盖度和密度在不同退化草地均存在显著差异($P < 0.05$),随着草地退化,地上生物量、盖度和密度持续增加,从未退化到重度退化草地,地上生物量增加了 151.1%,盖度增加了 162.5%,种群密度增加了 170.0%。表明随着天然草地退化加剧,甘肃棘豆种群的生境条件得

表 2 不同退化梯度甘肃棘豆种群生物学特征
Table 2 Biological characteristics of *Oxytropis kansuensis* in different degradation gradients

| 样地 | 高度(m) | 地上生物量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) | 盖度(%) | 密度(株丛 $\cdot \text{m}^{-2}$) |
|---------|-------------|---|-----------|-------------------------------|
| 未退化(Ⅰ) | 9.8±0.51 c | 18.2±0.95 d | 16±0.82 d | 20±1.04 d |
| 轻度退化(Ⅱ) | 11.6±0.59 b | 23.7±1.33 c | 25±1.32 c | 35±1.86 c |
| 中度退化(Ⅲ) | 13.4±0.68 a | 30.1±1.54 b | 31±1.61 b | 47±2.44 b |
| 重度退化(Ⅳ) | 13.5±0.68 a | 45.7±2.38 a | 47±2.40 a | 58±2.96 a |

表 3 甘肃棘豆种群株丛大小(株丛 $\cdot \text{m}^{-2}$)结构
Table 3 Bunch size structure of *Oxytropis kansuensis* population

| 样地 | 一级 | 二级 | 三级 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 未退化(Ⅰ) | 17±0.88 d | 3±0.16 d | 1±0.05 d |
| 轻度退化(Ⅱ) | 26±1.38 c | 6±0.33 c | 3±0.16 c |
| 中度退化(Ⅲ) | 30±1.53 b | 11±0.57 b | 6±0.33 b |
| 重度退化(Ⅳ) | 35±1.86 a | 14±0.71 a | 10±0.52 a |

到逐渐改善,种群规模逐步扩大。

2.2 退化草地甘肃棘豆种群大小结构

统计结果(表 3)表明,甘肃棘豆种群大小结构在不同退化梯度样地存在差异。随着草地退化,不同大小级株丛个体数逐渐增多。不同大小级株丛在不同退化草地均存在显著差异($P<0.05$)。不同大小级株丛占同一退化梯度株丛总数的比例随着草地退化呈现出规律性的变化趋势:小株丛(一级)比例下降,从未退化草地的 81.0%下降到重度退化草地的 56.4%;大株丛(二级、三级)比例增加,从未退化的 19.1%增加到重度退化的 43.6%。从未退化到重度退化,甘肃棘豆种群株丛大小结构发生了适应性调整。

2.3 退化草地甘肃棘豆种群的点格局分析

不同退化草地不同尺度(0~100 cm)下,甘肃棘豆株丛的空间分布格局特征如图 1 所示。在未退化(Ⅰ)样地甘肃棘豆种群格局在 $d\leq 29$ cm 尺度上呈现聚集分布;在 $d\geq 29$ cm 尺度上均呈随机分布。在轻度退化(Ⅱ)样地甘肃棘豆种群格局在 $d\leq 46$ cm 尺度上呈现聚集分布且聚集尺度增大;在 $d\geq 46$ cm 尺度上呈现随机分布。在中度退化(Ⅲ)样地甘肃棘豆种群格局在 $d\leq 13$ cm 和 32~51 cm 尺度上呈现聚集分布;在 13~32 cm 较小尺度出现随机分布,在 $d\geq 51$ cm 尺度上呈现随机分布。在重度退化(Ⅳ)样地中甘肃棘豆种群格局在较大尺度 53~71 cm 尺度上呈现聚集分布;在 $d\leq 20$ cm 尺度上呈现均匀分布格局;在 20~53 cm 和 $d\geq 71$ cm 尺度范围内均呈随机分布。甘肃棘豆种群的分布格局统计上是显著的($P<0.05$)。在所研究的空间尺度范围内,甘肃棘豆种群空间分布格局随着天然草地退化程度的加剧总体表现为由小尺度聚集逐渐转向较大尺度聚集。

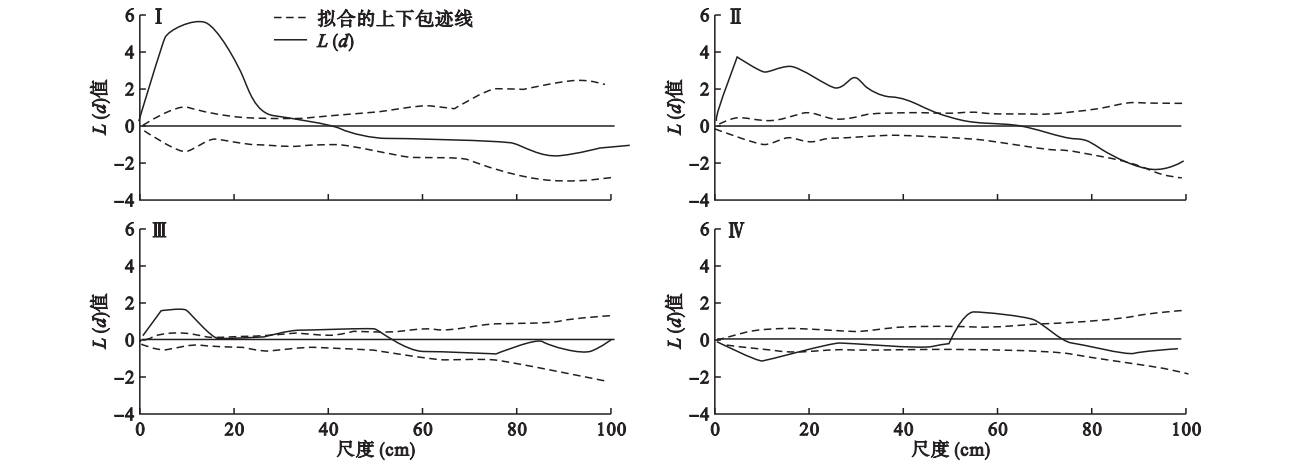


图 1 甘肃棘豆种群点格局
Fig.1 Point pattern analysis for *Oxytropis kansuensis* population
Ⅰ:未退化草地;Ⅱ:轻度退化草地;Ⅲ:中度退化草地;Ⅳ:重度退化草地。

3 讨论与结论

在复杂生境中植物的种群空间格局是植物种群斑块形态和株丛结构资源权衡机制的综合反映 (Benot *et al.*, 2013; 刘鹏等, 2014; 张敏等, 2015)。在退化草地群落, 随着优势种群西北针茅的退化, 草毡表层的破碎释放了部分资源和空间 (任珩等, 2013), 甘肃棘豆种群从零星分布演变为成片分布, 种群规模不断扩大, 空间分布格局实现了由小尺度聚集分布向较大尺度聚集分布的转变, 这种变化可能与草地群落环境和甘肃棘豆株丛结构的改变密切相关。

植物种群的空间分布格局是种间、种内关系影响下, 植物种群表型可塑性和生活史对策的综合反映 (Manly, 1991; 赵成章等, 2010)。在未退化 (I) 草地中, 甘肃棘豆在 0~29 cm 尺度和 29~100 cm 尺度范围分别表现为聚集分布和随机分布。形成这种分布格局的可能原因是: (1) 在植物群落中处于劣势的植物种群对群落资源的竞争相对微弱, 为抵抗优势种群的胁迫, 种群个体间相互庇护形成聚集分布 (任珩等, 2013), 该样地属于祁连山典型草原区的原生植被, 草地群落优势种西北针茅控制着整个群落资源, 甘肃棘豆作为伴生种群, 只能选择在西北针茅斑块的间隙和斑块周围生长发育, 甘肃棘豆通过抱团生长的方式在小尺度上形成了种群聚集分布斑块; (2) 甘肃棘豆斑块形成初期, 斑块内部小株丛比例较大 (表 3), 种群的密度、盖度和高度相对较小 (表 2), 零星分布在草地群落中下层, 甘肃棘豆小斑块之间的联系较为松散, 伴随着尺度的增加甘肃棘豆小斑块间的平均距离扩大, 因而在较大尺度上表现出随机分布格局。

植物种群内部的株丛结构对其斑块的形态和分布格局具有重要影响 (Gonzalez *et al.*, 2010)。在轻度退化 (II) 草地中, 甘肃棘豆聚集分布格局的尺度区间从未退化草地中的 0~29 cm 增大到 0~46 cm, 种群随机分布尺度缩小在 46~100 cm 区间。这主要是因为家畜的放牧行为抑制了西北针茅的生存空间, 甘肃棘豆凭借家畜不采食的特性逐步增大了生境适合度, 植物的密度、高度和盖度显著增加 (表 2), 种群的资源竞争能力得到进一步提高, 空间分布格局聚集区间尺度不断增大; 在甘肃棘豆种群规模不断增加的同时, 其株丛结构发生了显著变化, 大株丛 (二、三级) 比例增加 (表 3), 引发了斑块合并

现象, 在较大范围内形成了种间资源竞争新格局。

在相对拥挤的生境中, 植物种群因种内竞争加剧而发生自疏现象 (党晶晶等, 2014)。中度退化草地中, 甘肃棘豆种群空间分布格局在 13~32 cm 较小尺度上出现随机分布; 重度退化草地中, 甘肃棘豆种群在 53~71 cm 较大尺度上呈现聚集分布。造成这种格局变化的原因可能是: (1) 在过度放牧干扰和甘肃棘豆种群拓殖影响下, 西北针茅种群退化消亡释放了丰富的资源和空间, 推动合并后的甘肃棘豆斑块内部小株丛发展为大株丛, 大株丛数量持续增加 (表 3), 使得种群分布规模逐步扩大并占据了草地群落的主导地位; 大株丛数量持续增加又必然造成种内生态位发生重叠, 引起种内个体间的水分、养分等资源竞争, 种群发生自疏现象, 从而导致种群在小尺度上出现随机分布。(2) 不断发生的甘肃棘豆斑块合并补充了西北针茅种群衰退后释放的资源生态位, 维持了种群的竞争优势, 并通过保持一定数量的大株丛促使斑块结构趋于稳定, 逐渐形成了以大斑块为中心、周围聚集小斑块的分布形态, 在较大尺度上表现为聚集分布格局; 甘肃棘豆种群分布格局的聚集分布尺度增大的过程, 反映了植物种内、种间竞争模式转变的生态适应机制, 是植物种群扩散与更新的动力来源。

综上所述, 家畜的放牧干扰抑制了草地群落优势种群西北针茅的生存空间并改变了草地群落的结构, 随着甘肃棘豆在群落中地位与作用的变化, 其株丛大小结构的适应性调整促进了植被斑块结构的改变, 实现了种群聚集分布格局由小尺度向较大尺度的转变。甘肃棘豆斑块的合并成为甘肃棘豆种群拓殖和更新的决定因素, 体现了草原植物在适应异质生境过程中的分布区扩散策略。另外, 甘肃棘豆种群与其他植物种群的空间关系也影响着种群的空间分布格局, 因而有待于从空间关联的角度深入分析。

参考文献

- 党晶晶, 赵成章, 董小刚, 等. 2014. 藏嵩草和矮嵩草种群空间分布格局对水分的响应. 生态学杂志, 33(7): 1734-1740.
- 高本强, 袁自强, 王斌先, 等. 2014. 施肥和刈割对亚高山草甸物种多样性与生产力及其关系的影响. 植物生态学报, 38(5): 417-424.
- 高福元, 赵成章. 2013. 高寒退化草地狼毒种群株丛间格局控制机理. 生态学报, 33(10): 3114-3121.
- 何亚平, 费世民, 段元文, 等. 2008. 海北地区草地退化对棘豆植物资源分配的影响. 四川林业科技, 29(4): 9-16.

- 胡广录, 赵文智, 王 岗. 2011. 干旱荒漠区斑块状植被空间格局及其防沙效应研究进展. 生态学报, **31**(24): 7609–7616.
- 李 博, 陈家宽, A. R. 沃金森. 1998. 植物竞争研究进展. 植物学通报, **15**(4): 18–29.
- 梁 爽, 许 涵, 林家怡, 等. 2014. 尖峰岭热带山地雨林优势树种白颜树空间分布格局. 植物生态学报, **38**(12): 1273–1282.
- 刘 鹏, 王孝安, 郭 华, 等. 2014. 北桑寄生种群的分布格局及其寄生特性. 生态学杂志, **33**(2): 303–309.
- 任 珩, 赵成章. 2013. 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系. 生态学报, **33**(2): 0435–0442.
- 王生耀, 王 堃, 拉 旦. 2008. 土壤种子库中棘豆属种子的密度、寿命和活力测定. 草原与草坪, (6): 50–53.
- 吴 达, 梁 冰, 师彦平, 等. 2003. 甘肃棘豆研究进展. 中国草食动物, **23**(1): 37–39.
- 武高林, 杜国祯. 2007. 植物形态生长对策研究进展. 世界科技研究与发展, **29**(4): 47–51.
- 张 敏, 杨洪晓. 2015. 滨海沙滩珊瑚菜种群的空间格局及其对岸垄的响应. 生态学杂志, **34**(1): 47–52.
- 张兴旺, 张小平, 郭传友, 等. 2013. 皖北石灰岩山地青檀种群不同发育阶段的点格局分析. 生态学杂志, **32**(3): 542–550.
- 赵成章, 樊胜岳, 殷翠琴, 等. 2004. 毒杂草型退化草地植被群落特征研究. 中国沙漠, **24**(4): 507–512.
- 赵成章, 高福元, 王小鹏, 等. 2010. 黑河上游高寒退化草地狼毒种群小尺度点格局分析. 植物生态学报, **34**(11): 1319–1326.
- 赵成章, 任 珩. 2012. 退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性. 生态学报, **32**(22): 6946–6954.
- 赵成章, 任 珩, 盛亚萍, 等. 2011. 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, **31**(21): 6388–6395.
- 赵剑喜, 李 丽, 刘晔玮, 等. 2011. 甘肃棘豆对小鼠的急性毒性研究. 安徽农业科学, **39**(31): 19180, 19226.
- Benot ML, Bittebiere AK, Ernault A, *et al.* 2013. Fine-scale spatial patterns in grassland communities depend on species clonal dispersal ability and interactions with neighbours. *Journal of Ecology*, **101**: 626–636.
- Gonzalez M, Ladet S, Deconchat M, *et al.* 2010. Relative contribution of edge and interior zones to patch size effect on species richness: An example for woody plants. *Forest Ecology and Management*, **259**: 266–274.
- Manly BFJ. 1991. Randomization and Monte Carlo Methods in Biology. London: Chapman and Hall.
- McIntire EJB, Fajardo A. 2009. Beyond description: The active and effective way to infer processes from spatial patterns. *Ecology*, **90**: 46–56.
- Wiegand T, Moloney KA. 2004. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos*, **104**: 209–229.

作者简介 冯 威,男,1990年生,硕士研究生,主要从事生物地理学研究。E-mail: fw11521@163.com

责任编辑 张 敏
