

不同海拔矮嵩草与火绒草种群分布格局及空间关联性

张娅娅 刘旻霞* 李博文 夏素娟 孙瑞弟 宋佳颖 李全弟

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要 研究植物种群的分布格局及空间关联性是揭示植物种群与环境间关系、自身特性以及种间相互作用的一种重要手段。本研究以甘南高寒草甸为对象, 沿海拔梯度(2900、3500、3800 m) 设置 3 个样地, 采用 Ripley K 函数对不同海拔矮嵩草(*Kobresia humilis*) 与火绒草(*Leontopodium nanum*) 种群的空间分布格局及种间关联性进行了分析。结果表明: (1) 随着海拔的上升, 矮嵩草种群的重要值、盖度、株数等呈递增趋势, 火绒草种群的重要值、盖度、株数等则呈递减趋势。(2) 矮嵩草种群在不同海拔的研究尺度内均表现为聚集分布, 但其聚集的程度有所不同; 火绒草种群在海拔 2900 m 处呈聚集分布状态; 海拔 3500 m 处, 火绒草种群在 0~2.8 m 尺度上呈聚集分布, 但其聚集强度随着研究尺度的增加而逐渐减弱, 最终转变为随机分布; 3800 m 处, 火绒草种群在 0~2 m 尺度内呈聚集分布, 在较大尺度(2~5 m) 上呈随机分布。(3) 海拔 2900 m 处, 矮嵩草与火绒草种群在小尺度(0~1.1 m) 内表现为正相关, 较大尺度上表现为无相关; 海拔 3500 m 处, 在整个研究尺度内表现为负相关; 海拔 3800 m 处, 在小尺度范围(0~1.4 m) 内表现为无相关, 较大尺度上表现为负相关, 且随研究尺度的增大, 其关联性增强。

关键词 矮嵩草; 火绒草; 点格局分析; 海拔; 高寒草甸

Population distribution pattern and spatial correlation of *Kobresia humilis* and *Leontopodium nanum* at different elevations. ZHANG Ya-ya, LIU Min-xia*, LI Bo-wen, XIA Su-juan, SUN Rui-di, SONG Jia-ying, LI Quan-di (College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China).

Abstract: Understanding the distribution pattern and spatial correlation of plant population is important for revealing the relationships between plant population and environmental factors, its own characteristics, and interspecific interaction. In this study, three plots were set up along an elevation gradient (2900, 3500, 3800 m). The population spatial distribution pattern and interspecific correlation of *Kobresia humilis* and *Leontopodium nanum* at different elevations were analyzed by Ripley K function. The results showed that: (1) The importance value, coverage and abundance of *K. humilis* showed an increasing trend, while that of *L. nanum* decreased with increasing altitude. (2) At different altitudes, *K. humilis* showed aggregated distribution at all the studied scales, with different degrees of aggregation among altitudes. *L. nanum* showed aggregated distribution at 2900 m and at the scale of 0–2.8 m, but its aggregation intensity gradually decreased with increasing scale, and finally changed to random distribution at 3500 m. At 3800 m, *L. nanum* showed an aggregated distribution at the 0–2 m scale and a random distribution at the 2–5 m scale. (3) *K. humilis* and *L. nanum* showed a positive correlation each other at the 0–1.1 m scale, but no correlation at larger scales at 2900 m, and a negative correlation at all the studies

国家自然科学基金项目(31360114, 31760135) 资助。

收稿日期: 2019-05-31 接受日期: 2019-11-18

* 通讯作者 E-mail: xiaminl@163.com

scales of 3500 m. At 3800 m, there was no correlation between the two species at the scale of 0–1.4 m and a negative correlation at larger scales, with the correlation increased with increasing scale.

Key words: *Kobresia humilis*; *Leontopodium nanum*; point pattern analysis; altitude; alpine meadow.

格局与尺度之间有密切的关系,尺度的变化会引起格局的变化,这主要是由于空间格局作为植物种群的一个重要特征,是环境条件、种群自身特性及种间关系综合作用的结果(孙世贤等,2016;梅军林等,2017)。植物种群空间格局的研究是生态学的重要内容,对于认识植物种群与生境的相互关系、种内与种间关系以及植物种群的生态过程具有重要的意义(李明辉等,2011)。种群空间格局主要分析种群空间分布格局和种间关联性两个内容,它们是表示群落生态学要素之间在空间格局上关系的两种形式,可以用来分析各种群在任意研究尺度上的分布格局,并且可以展现空间分布格局的聚集强度及其对应的尺度,为各种群在群落中空间格局的对比提供了方便(张金屯,1998)。不同的格局类型不仅可以揭示种群的生物学特性,还可以反映种群的环境资源利用状况,是其在群落中竞争能力、生存能力与最终地位的外在表现(刘振国等,2005)。

至今,国内外生态学家们用过非常多测定不同类型植物种群格局的方法,但在调查固定样地时发现以往的样方分析法很难将各尺度空间格局上植物种群的特征及种间关联性表达完整、清晰,只能在单一尺度上对空间格局进行分析,而点格局分析法在借鉴传统分析方法优点的同时很大程度上克服了其不足,因此可以较为全面地提供各空间尺度信息,研究结果也更为接近实际(Ripley *et al.*, 1977; 马志波等,2017)。利用点格局分析法,国内许多学者研究了北京山区(樊登星等,2016)、藏东南川滇(沈志强等,2016)、中国典型森林生态系统(吴安驰等,2018)、太白山(李国春等,2017)、长白山(杨华等,2014)等地区的植物种群空间分布格局及其关联性,揭示了不同尺度上植物种群的生态学特性及其形成过程。

矮嵩草属莎草科嵩草属,是亚高寒草甸的伴生种及高寒草甸的建群种,适宜冷凉湿润的山地气候,其抗性非常强,是高寒草甸耐旱、耐寒、耐贫瘠及耐辐射物种的典型代表。由于长期受人为踩踏、放牧干扰和寒冷气候的影响,其形成了独特的维持机制,

自我调控能力和系统稳定性都较强,成为了高寒草甸群落的优势种(李积兰等,2016)。火绒草是菊科火绒草属的植物,抗逆性强、喜湿、耐寒,但又具有抗旱性,多生长在海拔2700~3400 m的高寒草甸上。目前,对高寒草甸点格局的研究主要集中在坡向对植物种群空间格局影响的研究上(刘旻霞等,2018),而关于高寒草甸草本植物不同海拔分布格局的研究比较鲜见。为更深入地了解、探索高寒草甸区植物种群分布格局的形成机制,探究该地区的物种共存、多样性维持机制及不同优势种的资源利益策略,本研究结合微观的点格局与宏观的地理环境,从空间格局角度研究甘南高寒草甸不同海拔对其主要物种矮嵩草与火绒草分布的影响,旨在认识矮嵩草与火绒草种群的生态学过程、生态学特性及其对环境异质性的适应对策,为高寒草甸地区的物种多样性保护及生态环境恢复提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区地处甘肃省西南部的甘南高寒草甸区,33°06′N—36°10′N,100°46′E—104°44′E(图1),大部分区域海拔在3000 m左右。该区处于青藏高原与黄土高原的过渡带,东连甘肃省的陇南市、定西市,南临四川阿坝州,西接青海,北接甘肃省临夏回族自治州。甘南高寒草甸区属于高原高寒湿润气候,年均温-2.5~6℃,气温南高北低,年日照时数2000~2500 h,多年平均降雨量600~800 mm,多集中在6—9月,降雨变率较大,年蒸发量约1238 mm。

其植被组成属于典型的高寒草甸植被。海拔2900 m的主要植物有火绒草、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、矮嵩草、乳白香青(*Anaphalis lactea*)等;海拔3500 m为矮嵩草、嵩草(*Kobresia Willd*)、珠芽蓼(*Polygonum vivipurum*)、火绒草、秦艽(*Gentiana macrophylla*)、棘豆(*Oxytropis montana*)、蛇含委陵菜(*Potentilla kleiniana*)等;海拔3800 m为矮嵩草、羊茅(*Festuca ovina*)、米口袋(*Gueldenstaedtia multiflora*)、莓叶委陵菜(*Potentilla fragarioides*)、火绒草等。

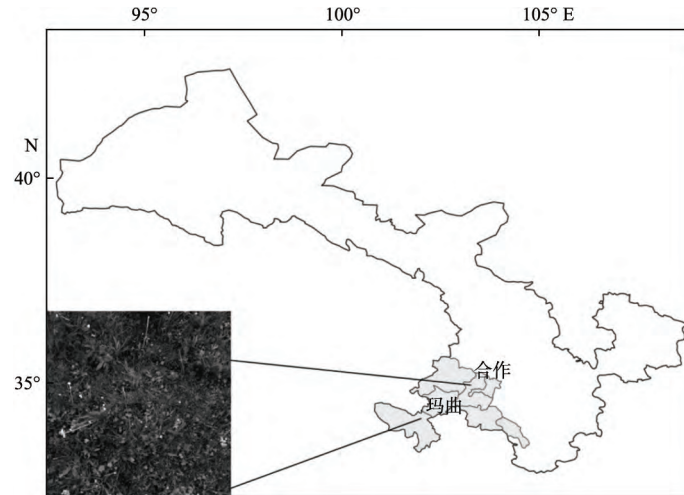


图1 研究区位置示意图

Fig.1 Study area location map

土壤为高寒草甸土。

1.2 样地设置

2018年7月中旬,在研究区(兰州大学高寒草甸与湿地生态系统定位研究站的合作点和玛曲点,如图1所示)内选择了坡度接近、坡向相同的山坡,沿海拔2900 m向上,每隔一定的海拔设置一个样地,最终确定了2900、3500、3800 m 3个不同海拔(环境有明显改变且有明显的植被过渡),设置了3个样地(表1)。

应用点格局分析法取样,要求一个适当的样地面积,为的是使研究区内种群的各种格局都能呈现,而样地呈正方形或长方形最好,为此我们在3个不同海拔样地的南坡各设置一个10 m×10 m的样方,之后再再将大样方划分为100个1 m×1 m的小样方,将大样方左下角定为坐标原点,对每个小样方中矮嵩草和火绒草个体进行定位并记录其坐标。

1.3 研究方法

研究种群空间分布格局的方法有很多,本文采用由Ripley于1977年提出的Ripley K函数进行空间点格局的分析,该函数是通过划定一定的研究区域,借助该研究区内植物种群个体的坐标进行空间

格局分析的一种重要工具,目前已被广泛应用于分析种群分布格局的各项研究中(Tun *et al.*, 2004; Druckenbrod *et al.*, 2005)。

1.3.1 种群空间分布格局分析 即Ripley K函数,其计算结果 $K(r)$ 值能够反映出植物种群的空间分布格局,具体公式如下:

$$K(r) = \frac{M}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{I_r(t_{ij})}{W_{ij}} (i \neq j) \quad (1)$$

式中: M 为研究区面积; n 表示研究区域内某植物种群的个体数量; t_{ij} 为两个点 i 到 j 的距离; r 为空间尺度; $I_r(t_{ij})$ 为指示函数,当 $t_{ij} \leq r$ 时 $I_r(t_{ij}) = 1$;当时 $t_{ij} > r$ $I_r(t_{ij}) = 0$; W_{ij} 为权重值,可以用来校正边界误差。

在实际中,通常会公式(1)简化,用Ripley L函数代替,其公式如下:

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r \quad (2)$$

当 $L(r) = 0$,为随机分布;当 $L(r) > 0$,为聚集分布;当 $L(r) < 0$,为均匀分布。Monte-Carlo是用来求解随机分布的上下包迹线的常用方法,其结果一般有3种:如果研究对象的实际值落在上下包迹线的区间内,则是随机分布;实际值落在上下包迹线的区间以上,则是聚集分布;实际值落在上下包迹线区间以下,则是均匀分布。

1.3.2 种间空间关联性分析 为分析不同植物种群在空间内的关联性,可将Ripley K函数推广至双变量进行估计,具体公式如下:

$$K_{12}(r) = \frac{M}{n_1 \times n_2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{I_r(t_{ij})}{W_{ij}} (i \neq j) \quad (3)$$

表1 调查地点详细信息

Table 1 Details of the survey location

样地 Plot	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Elevation (m)	坡向 Slope	放牧强度 Grazing intensity	是否围栏 Fencing or not
1	101°52'28"	33°39'44"	2900	南	相同	否
2	101°56'26"	33°58'50"	3500	南	相同	否
3	102°52'55"	34°5'51"	3800	南	相同	否

式中: n_1 代表种群 1 的个体数、 n_2 代表种群 2 的个体数; i 及 j 分别代表种 1 和种 2 的个体, 用 $L_{12}(r)$ 取代 $K_{12}(r)$, 公式为:

$$L_{12}(r) = \sqrt{\frac{K_{12}(r)}{\pi}} - r \quad (4)$$

当 $L_{12}(r) = 0$ 表明两种群间在尺度 r 下无关联; 当 $L_{12}(r) > 0$ 表明两种群在尺度 r 下存在正相关性; 当 $L_{12}(r) < 0$ 表明两种群在尺度 r 下为空间负关联。一般采用 Monte-Carlo 随机模拟方法模拟 99% 置信区间, 计算出 $L_{12}(r)$ 的值, 若 $L_{12}(r)$ 的值在置信区间以上, 表明二者为正相关; 在置信区间之间为无相关; 在置信区间以下为负相关。

1.4 数据处理

采用 GetData Graph Digitizer 2.25 软件提取所需坐标数据, 利用 Excel 2010、Programita 2014 等软件对数据进行分析处理。本文以 5 m 作为空间研究尺度, 利用 Monte-Carlo 法随机模拟 99 次, 获得 95% 置信区间, 运用 Sigmaplot 10.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同海拔矮嵩草与火绒草种群变化

由表 2 可知, 在不同海拔上, 矮嵩草及火绒草种群的分布存在较显著的差异。矮嵩草种群随海拔的升高其重要值、盖度及株数都呈增加趋势, 在海拔

3800 m 上重要值高达 0.812; 火绒草种群的重要值、盖度及株数随着海拔的升高逐渐减少。海拔 2900 m 处火绒草的株数与矮嵩草的株数相比差异并不显著, 但随着海拔上升到 3800 m 时, 矮嵩草种群的株数、盖度明显高于火绒草种群的株数及盖度。

2.2 矮嵩草与火绒草种群的空间分布格局

矮嵩草种群分布密度 3800 m > 3500 m > 2900 m, 火绒草种群分布密度 2900 m > 3500 m > 3800 m; 总体来看, 种群个体分布主要表现为聚集分布, 但不同研究尺度内种群的分布格局有明显差异(图 2)。

矮嵩草种群在不同海拔的研究尺度内均表现为聚集分布, 但每个海拔上聚集的程度又有所差异。海拔 2900 和 3500 m 上, 随着研究尺度的增大, 矮嵩草种群的聚集程度逐渐减弱; 海拔 3800 m 处, 矮嵩草种群的聚集程度随着研究尺度的增大逐渐增强(图 3)。

火绒草种群在 2900 m 海拔上呈聚集分布状态; 海拔 3500 m 处, 火绒草种群在 0~2.8 m 研究尺度内呈聚集分布, 随着研究尺度的增加, 其聚集程度逐渐减弱, 最终转变为随机分布; 3800 m 处, 火绒草种群在 0~2 m 尺度内呈聚集分布, 随研究尺度的增加逐渐趋向随机分布(图 4)。这说明受海拔的影响, 两种群形成了自己独特的生境环境, 其表现出的生长特征也具有显著的差异性。

表 2 两物种在不同海拔的变化(平均值±标准差)

Table 2 Changes in the two species at different altitudes (mean±SE)

海拔 (m)	矮嵩草 <i>Kobresia humilis</i>			火绒草 <i>Leontopodium nanum</i>		
	株数 Number	盖度 Coverage	重要值 Importance value	株数 Number	盖度 Coverage	重要值 Importance value
2900	398	18.32±1.02 a	0.43±0.03 b	425	7.01±1.03 a	0.37±0.09 a
3500	634	29.57±0.71 b	0.52±0.18 a	285	3.05±0.28 b	0.16±0.16 b
3800	712	31.38±0.12 c	0.81±0.31 a	206	2.19±1.16 c	0.14±0.03 c

注: 不同的字母表示差异性显著 ($\alpha=0.05$)。

Note: Different letters indicate significant differences ($\alpha=0.05$).

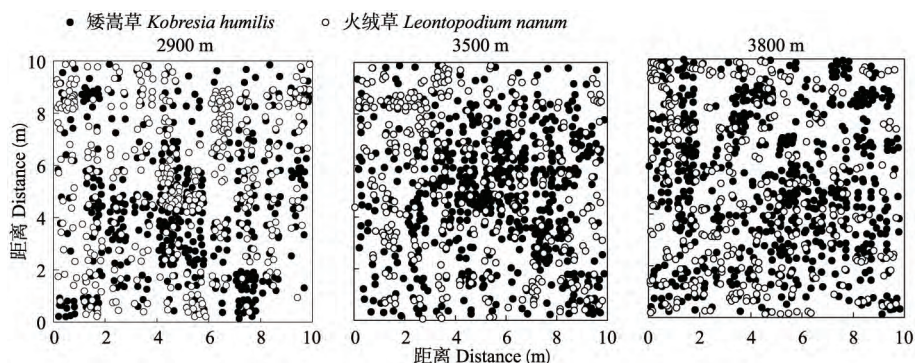


图 2 不同海拔矮嵩草和火绒草的空间分布散点图

Fig.2 Spatial distributions of *Kobresia humilis* and *Leontopodium nanum* at different altitudes

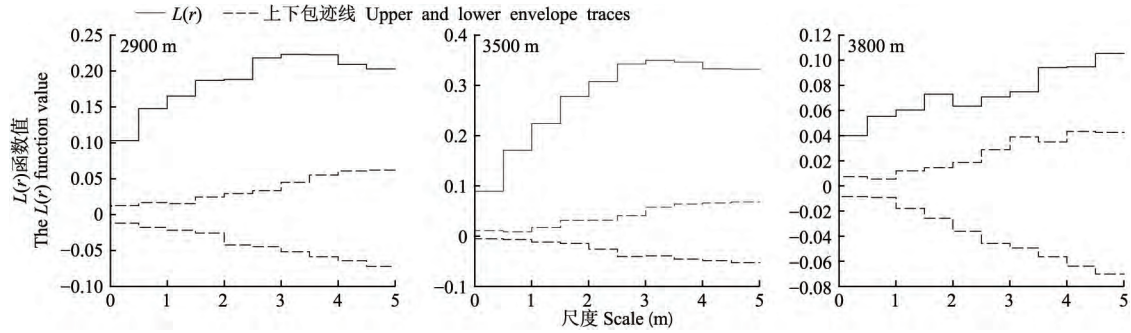


图 3 不同海拔矮嵩草种群点格局

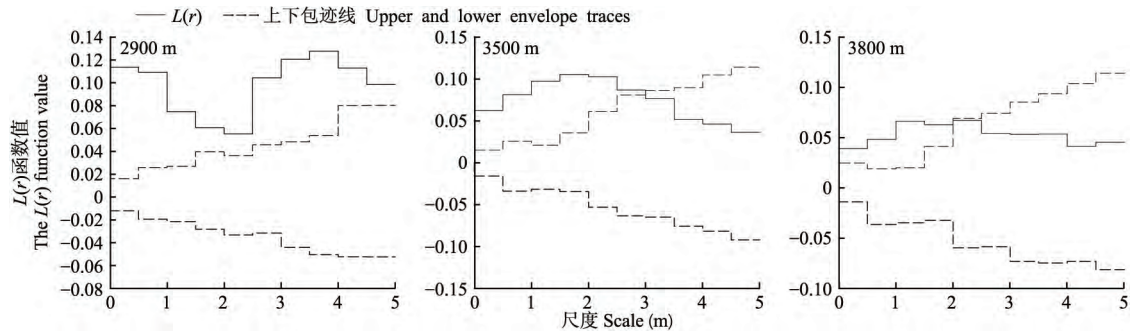
Fig.3 Point pattern analysis for *Kobresia humilis* population at different altitudes

图 4 不同海拔火绒草点格局

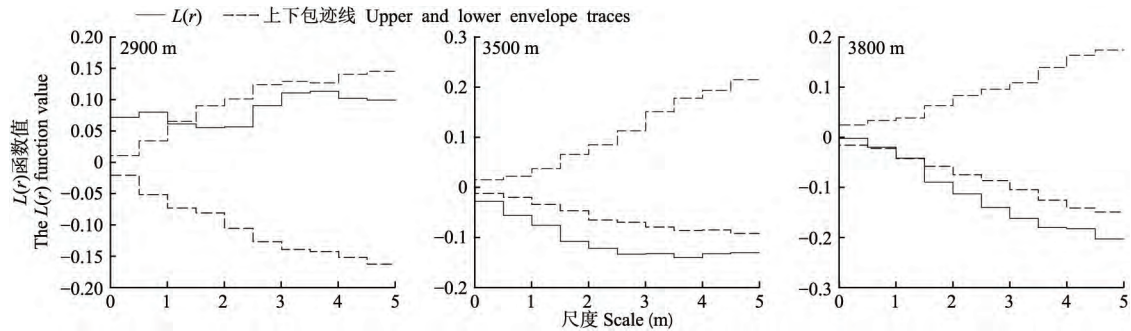
Fig.4 Spatial point pattern for *Leontopodium nanum* population at different altitudes

图 5 不同海拔矮嵩草与火绒草种群之间的关联性分析

Fig.5 Spatial association analysis of *Kobresia humilis* and *Leontopodium nanum* populations at different altitudes

2.3 不同海拔矮嵩草和火绒草种群的空间关联性

图 5 显示,海拔 2900 m 处,矮嵩草与火绒草种群在小尺度(0~1.1 m)研究范围内表现为正相关,随着研究尺度的增加,其相关性逐渐减弱,最终转变为无相关;海拔 3500 m,两种群表现为负相关;海拔 3800 m,在小尺度研究范围(0~1.4 m)内表现为无相关,在较大尺度(1.4~5 m)上表现为负相关,且随着研究尺度的增大,其关联性增强。说明矮嵩草与火绒草种群受环境因子及种间长期竞争的影响,二者的空间关联性在不同的海拔上表现出了显著的差异性。

3 讨论

海拔对植被的生存、繁殖有重要的生态学意义。虽然植物的生长并不受海拔的直接影响,但海拔的变化会使得温度等各种影响植物生存的因素发生改变,而植被为了适应这种改变,会通过生理结构、变化形态等进行响应(张蕊, 2017)。尤海舟等(2010)通过研究川滇高山栎种群不同海拔空间格局的尺度效应及个体间空间关联发现,种群空间格局及其个体间关联与海拔、植株形体大小及空间尺度等密切相关,且物种聚集分布的聚集规模和个体间关联的

关联程度也受到海拔因子的强烈影响。本研究对不同海拔南坡的矮嵩草与火绒草进行了研究, 结果发现, 随着海拔的变化, 矮嵩草与火绒草种群的空间分布呈现出不同的变化格局。矮嵩草在海拔 2900 m 分布最少, 而火绒草在 2900 m 分布最多, 并随着海拔的上升, 矮嵩草种群的株数、盖度与重要值呈递增趋势, 火绒草种群的株数、盖度与重要值呈递减趋势, 这主要是由矮嵩草与火绒草种群的生物学特性造成的。莎草科地上生物量与海拔呈显著正相关, 随海拔升高, 温度降低, 而湿度升高, 土壤有机质、含水量因子和速效氮等都相对较高(李凯辉等, 2007), 作为莎草科植物的矮嵩草能够充分地利用养分等资源, 具有明显的生长优势; 而火绒草是高寒草原植物, 适合生长于海拔较高的寒冷山区, 但当海拔升高到一定程度, 它的适应能力会有所下降。有研究表明, 火绒草叶片的最大净光合速率随着海拔从 2300 m 升高到 2800 m 呈现下降趋势, 而最大净光合速率会影响火绒草吸收 CO_2 的量, 进而影响火绒草的产量(何涛等, 2005), 这个研究结果也可以解释本研究中火绒草种群随海拔的升高其株数、盖度与重要值呈下降趋势的原因。

种群的分布格局是指某一种群个体在水平空间上的分布状况, 它可以反映出种群个体在水平空间上的一种相互关系, 一般分为均匀分布、随机分布、聚集分布 3 种类型(Haase *et al.*, 1995)。植物群落中不同生活型的物种对环境的响应不尽相同, 所以沿海拔梯度同样呈现出不同的多样性格局(高远等, 2009)。本研究发现, 矮嵩草种群在不同海拔的研究尺度内均表现为聚集分布, 但每个海拔上聚集的程度又有所差异(图 3), 这可能是因为矮嵩草是形成于低温环境下的一种具有高抗逆性的特殊种群, 其生物学特性使得其具有超强的环境适应能力, 且矮嵩草空间资源占有率较大, 能够快速繁殖, 易形成聚集分布状态; 但在不同海拔山地的南坡, 土壤的水分、光照等环境因子及受人为因素影响的程度等各不相同, 导致其种群的具体分布存在一定的差异。海拔 2900 m, 矮嵩草种群呈聚集分布, 这可能是因为该研究样地距离合作市区较近, 因而受到游人、放牧及牲畜踩踏等人为干扰较大, 植物种群个体间形成了一种抱团抵御外界干扰以获取生存空间与资源的现象, 所以在研究尺度内呈聚集分布; 海拔 3500 m 处物种丰富度较高, 根据生态位的补偿效应可知不同物种能更有效地利用多种资源(杨晓凤等,

2013), 加之该海拔处的水热条件非常适合矮嵩草的生长, 这样会造成矮嵩草在空间上的聚集; 在海拔 3800 m 处, 虽然各生境因子发生了很大变化, 但是由于矮嵩草具有超强的抗性, 在众多的物种中仍然具有较强的竞争力, 造成其在该梯度下呈聚集分布状态。火绒草种群在海拔 2900 m 整个研究尺度内呈聚集分布, 这可能是因为在此处水热条件等生境条件非常适宜火绒草种群的生存生长, 因此火绒草种群呈聚集分布状态; 海拔 3500 m, 在 0~2.8 m 尺度上火绒草种群呈聚集分布, 但聚集强度由于研究尺度的增加而逐渐减弱, 最终转变为随机分布, 这可能是因为海拔 3500 m 物种多样性丰富(南坡约 20 种 $\cdot 0.25 \text{ m}^{-2}$), 种间竞争激烈, 火绒草种内通过聚集以达到相互庇护, 但由于其竞争力无法与其他优势物种相抗衡, 在激烈的竞争过程中产生自疏或他疏现象(夏素娟等, 2018), 致使火绒草种群在整个研究尺度由聚集过渡为随机分布; 海拔 3800 m 处, 火绒草种群在 0~2 m 尺度上呈聚集分布, 在较大研究尺度(2~5 m) 内呈随机分布, 出现这种情况可能是因为海拔 3800 m 处的水、热等条件已经不宜火绒草的生长, 而火绒草种群为了生存, 种内个体间形成一种“抱团取暖”的现象, 但是当它长期受到其他种群(如: 矮嵩草、莓叶委陵菜等)的排挤时, 其聚集程度会逐渐下降, 因而在较大尺度内呈随机分布。

作为群落的重要特征之一, 空间关联性是重要的数量、结构指标, 是种间或种内关系的一种表现形式, 是群落形成、演化的基础, 也是群落分类的依据, 种间关系包括正相关、负相关和无相关 3 种类型(Frost *et al.*, 2000)。本研究结果表明, 矮嵩草与火绒草种群在不同海拔上其种间关联性各不相同; 海拔 2900 m 处, 在小尺度(0~1.1 m) 内表现为正相关, 可能是因为海拔 2900 m 的水热条件等生境因子不仅适宜矮嵩草的生长, 也适宜火绒草的生长, 就是说有相似的生态位, 从而出现正相关关系; 但随着研究尺度的进一步增大, 两种群的空间格局由正相关转变为无相关, 可能是因为相似的生态位下, 两种群之间逐渐表现出了一种正向关系, 而竞争变为次要, 争夺资源的策略转变为共享(刘旻霞等, 2017)。海拔 3500 m, 在整个研究尺度内表现为负相关, 可能是因为海拔 3500 m 处光照充足, 土壤含水量大, 适合较多物种的生长, 如莓叶委陵菜、乳白香青等占有一定资源的杂草, 虽然矮嵩草处于优势地位, 但依然会受到众多物种的排挤, 因此在整个研究尺度内

矮嵩草与火绒草存在一种竞争关系,呈现出负相关状态,这恰好体现了当物种间利用同一资源时,其相互间的竞争排斥作用就越强烈的物种竞争原理,因此表现出负关联是合理的(党晶晶等,2014;田慧霞等,2017);也有可能是受生态位互补效应的影响,多数火绒草贴地匍匐生长,而矮嵩草直立生长,因此二者在资源利用上存在一定的差异,从而呈现出一种负相关状态(李昂等,2012)。海拔3800 m,在小尺度(0~1.4 m)上表现为无相关,可能是因为火绒草分布密度较小,其种群个体大多数以随机的形式分布在矮嵩草种群边缘,没有对矮嵩草种群的生长繁殖造成实质性的影响;在较大尺度研究范围内表现为负相关,可能是因为该海拔下火绒草的分布密度虽然较小,但它仍然与矮嵩草之间存在资源竞争,一旦火绒草种群个体数量减少,矮嵩草就能得到更加充足的水分、养分等有利的生长因素,故而矮嵩草与火绒草种群在较大空间范围内呈现负相关(贾成朕等,2017);也有可能是该海拔处火绒草形体太小,与矮嵩草的形体产生过大差异,竞争作用对弱小竞争者火绒草愈加不利,所以表现为负相关(赵成章等,2011)。

甘南高寒草甸矮嵩草与火绒草种群对不同的海拔表现出不同的变化,这种变化是由环境异质性、物种自身的生物学特性以及种群间的相互关系共同决定的。本研究有助于我们更深入地了解、探索高寒草甸区植物种群分布格局的形成机制,对更好地保护甘南高寒草甸、维护高寒草甸生态系统的完整性及稳定性具有重要意义。

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. [Dang JJ, Zhao CZ, Dong XG, et al. 2014. Response of *Kobresia tibetica* and *Kobresia humilis* population spatial pattern to soil moisture. *Chinese Journal of Ecology*, **33**(7): 1734-1740.]

樊登星,余新晓. 2016. 北京山区栓皮栎林优势种群点格局分析. *生态学报*, **36**(2): 318-325. [Fan DX, Yu XX. 2016. Spatial point pattern analysis of *Quercus variabilis* and *Pinus tabulaeformis* populations in a mountainous area of Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, **36**(2): 318-325.]

高远,慈海鑫,邱振鲁,等. 2009. 山东蒙山植物多样性及其海拔梯度格局. *生态学报*, **29**(12): 6377-6384. [Gao Y, Ci HX, Qiu ZL, et al. 2009. Plant diversity and its elevational gradient patterns in Mengshan Mountain, Shandong, China. *Acta Ecologica Sinica*, **29**(12): 6377-6384.]

何涛,吴学明,王学仁,等. 2005. 不同海拔火绒草光合特性的研究. *西北植物学报*, **25**(12): 2519-2523. [He T, Wu XM, Wang XR, et al. 2005. Photosynthetic characteristics of *Leontopodium leontopodioides* growing at different altitudes. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, **25**(12): 2519-2523.]

贾成朕,苗百岭,姜威,等. 2017. 阿拉善典型荒漠群落种群空间格局及种间关联的尺度依赖性. *内蒙古大学学报*, **48**(2): 142-148. [Jia CL, Miao BL, Jiang W, et al. 2017. Scale dependence of spatial distribution pattern and association of a typical community in Alashan desert. *Journal of Inner Mongolia University*, **48**(2): 142-148.]

李昂,张鸣,杜国祯. 2012. 物种组成、丰富度、播种密度和土壤养分对群落补偿效应的影响. *生态学杂志*, **31**(10): 2443-2448. [Li A, Zhang M, Du GZ. 2012. Impacts of species composition, richness, sowing density, and soil nutrients on the complementary effect of plant communities. *Chinese Journal of Ecology*, **31**(10): 2443-2448.]

李国春,宋华东,李琦,等. 2017. 太白山巴山冷杉林主要树种与开花秦岭箭竹的空间点格局分析. *应用生态学报*, **28**(11): 3487-3493. [Li GC, Song HD, Li Q, et al. 2017. Spatial point pattern analysis of main trees and flowering *Fargesia qinlingensis* in *Abies fargesii* forests in Mt. Taibai of the Qinling Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **28**(11): 3487-3493.]

李积兰,李希来. 2016. 高寒草甸矮嵩草的环境适应性研究进展. *生态科学*, **35**(2): 156-165. [Li JL, Li XL. 2016. Research progress on environmental adaptability of *Kobresia humilis* in alpine meadow. *Ecological Science*, **35**(2): 156-165.]

李凯辉,胡玉昆,王鑫,等. 2007. 不同海拔梯度高寒草地上生物量与环境因子关系. *应用生态学报*, **18**(9): 2019-2024. [Li KH, Hu YK, Wang X, et al. 2007. Relationships between aboveground biomass and environmental factors along an altitude gradient of alpine grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **18**(9): 2019-2024.]

李明辉,何风华,潘存德. 2011. 天山云杉天然林不同林层的空间格局和空间关联性. *生态学报*, **31**(3): 620-628. [Li MH, He FH, Pan CD. 2011. Spatial distribution pattern of different strata and spatial associations of different strata in the Schrenk Spruce Forest, northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, **31**(3): 620-628.]

刘旻霞,李文,连依明. 2018. 基于Ripley $K(r)$ 函数的金露梅与蒲公英种群空间分布格局及其关联性. *生态学杂志*, **37**(7): 1925-1931. [Liu MX, Li W, Lian YM. 2018. Spatial distribution and association of *Potentilla fruticosa* and *Taraxacum mongolicum* based on Ripley's $K(r)$ function. *Chinese Journal of Ecology*, **37**(7): 1925-1931.]

刘旻霞,李例蓉,车应弟,等. 2017. 甘南亚高寒草甸坡向梯度上矮嵩草与珠芽蓼种群点格局及其关联性. *生态学杂志*, **36**(10): 2685-2691. [Liu MX, Li LR, Che YD, et al. 2017. Spatial distribution pattern and association of *Kobresia humilis* and *Polygonum viviparum* under different slope aspects in a subalpine meadow of Gannan. *Chinese Journal of Ecology*, **36**(10): 2685-2691.]

- 刘振国,李镇清. 2005. 植物群落中物种小尺度空间结构研究. 植物生态学报, **29**(6): 1020-1028. [Liu ZG, Li ZQ. 2005. Perspectives on small-scale spatial structure of plant species in plant communities. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **29**(6): 1020-1028.]
- 马志波,肖文发,黄清麟,等. 2017. 生态学中的点格局研究概况及其在国内的应用. 生态学报, **10**(19): 339-347. [Ma ZB, Xiao WF, Huang QL, et al. 2017. A review of point pattern analysis in ecology and its application in China. *Acta Ecologica Sinica*, **10**(19): 339-347.]
- 梅军林,庄枫红,马姜明,等. 2017. 桂林喀斯特地区克隆生长红背山麻杆种群的点格局分析. 生态学报, **37**(9): 3164-3171. [Mei JL, Zhuang FH, Ma JM, et al. 2017. Spatial point pattern analysis of *Alchornea trewioides* population clonal growth in the karst area of Guilin. *Acta Ecologica Sinica*, **37**(9): 3164-3171.]
- 沈志强,华敏,丹曲,等. 2016. 藏东南川滇高山栎种群不同生长阶段的空间格局与关联性. 应用生态学报, **27**(2): 387-394. [Shen ZQ, Hua M, Dan Q, et al. 2016. Spatial pattern analysis and associations of *Quercus aquifolioides* population at different growth stages in South-east Tibet, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **27**(2): 387-394.]
- 孙世贤,卫智军,吴新宏,等. 2016. 不同放牧强度季节调控下荒漠草原主要植物种群点格局及空间关联性. 生态学报, **36**(23): 7570-7579. [Sun SX, Wei ZJ, Wu XH, et al. 2016. Point pattern and spatial association of primary plant populations in the seasonal regulation of grazing intensity in desert grassland. *Acta Ecologica Sinica*, **36**(23): 7570-7579.]
- 田慧霞,李钧敏,毕润成,等. 2017. 山西太岳山白桦种群结构和空间分布格局. 生态学杂志, **36**(1): 1-10. [Tian HX, Li JM, Bi RC, et al. 2017. *Betula platyphylla* population structure and its spatial distribution pattern in Taiyue Mountain of Shanxi, China. *Chinese Journal of Ecology*, **36**(1): 1-10.]
- 吴安驰,邓湘雯,任小丽,等. 2018. 中国典型森林生态系统乔木层群落物种多样性的空间分布格局及其影响因素. 生态学报, **38**(21): 7727-7738. [Wu AC, Deng XW, Ren XL, et al. 2018. Biogeographic patterns and influencing factors of the species diversity of tree layer community in typical forest ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(21): 7727-7738.]
- 夏素娟,刘旻霞,朱恭,等. 2018. 荒漠植物红砂与西北针茅种群的空间格局及其关联性. 西北植物学报, **38**(11): 2129-2137. [Xia SJ, Liu MX, Zhu G, et al. 2018. Spatial distribution pattern and association between desert plant of *Reaumuria songarica* and *Stipa sareptana* var. *krylovii* population. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, **38**(11): 2129-2137.]
- 杨华,李艳丽,沈林,等. 2014. 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, **34**(16): 4698-4706. [Yang H, Li YL, Shen L, et al. 2014. Spatial distributions and associations of main tree species in a spruce-fir forest in the Changbai Mountains area in north-eastern China. *Acta Ecologica Sinica*, **34**(16): 4698-4706.]
- 杨晓凤,苗艳明,张钦弟,等. 2013. 五鹿山白皮松林不同龄级立木的点格局分析. 植物研究, **33**(1): 24-30. [Yang XF, Miao YM, Zhang QD, et al. 2013. Spatial pattern analysis of individuals in different age-classes of *Pinus bungeana* in Wulu Mountain Reserve, Shanxi, China. *Bulletin of Botanical Research*, **33**(1): 24-30.]
- 尤海舟,刘兴良,缪宁,等. 2010. 川滇高山栎种群不同海拔空间格局的尺度效应及个体间空间关联. 生态学报, **30**(15): 4004-4011. [You HZ, Liu XL, Miao N, et al. 2010. Individual association and scale effect of spatial pattern of *Quercus aquifolioides* populations along the elevation gradients. *Chinese Journal of Ecology*, **30**(15): 4004-4011.]
- 张震. 2017. 太岳山针阔混交林不同海拔空间格局研究(硕士学位论文). 临汾: 山西师范大学. [Zhang M. 2017. A study on the spatial pattern of coniferous and broad-leaved mixed forest at different altitude in Taiyue Mountain (Master's thesis). Linfen: Shanxi Normal University.]
- 张金屯. 1998. 植物种群空间分布的点格局分析. 植物生态学报, **22**(4): 344-349. [Zhang JT. 1998. Analysis of spatial point pattern for plant species. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **22**(4): 344-349.]
- 赵成章,高福元,盛亚萍,等. 2011. 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, **34**(3): 492-498. [Zhao CZ, Gao FY, Sheng YP, et al. 2011. Fine-scale spatial distribution and spatial association of *Stellera chamaejasme* population. *Arid Land Geography*, **34**(3): 492-498.]
- Druckenbrod DL, Shugart HH, Davies I. 2005. Spatial pattern and process in forest stands within the Virginia Piedmont. *Journal of Vegetation Science*, **16**: 37-48.
- Frost I, Rydin H. 2000. Spatial pattern and size distribution of the animal-dispersed *Quercus rubur* in two spruce-dominated forests. *Ecoscience*, **7**: 38-44.
- Haase P. 1995. Spatial pattern analysis in ecology based on Ripley's *K*-function: Introduction and methods of edge correction. *Journal of Vegetation Science*, **6**: 575-582.
- Ripley BD. 1977. Modeling spatial patterns. *Journal of the Royal Statistical Society*, **39**: 172-212.
- Tun ZJ, Pin MD. 2004. Spatial pattern analysis of individuals in different age-classes of *Larix principis-rupprechtii* in Luya mountain reserve, Shanxi, China. *Acta Ecologica Sinica*, **24**: 35-40.

作者简介 张娅娅,女,1994年生,硕士研究生,主要从事植物生态学与环境生态学研究。E-mail: 18418137993@163.com
责任编辑 张敏