

亚高寒草甸不同坡向金露梅种群的空间分布格局及空间关联

刘旻霞*

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要 植物种群在不同干扰条件下对环境的适应对策可以通过其空间分布格局及关联性反映出来。金露梅是甘南亚高寒草甸中的优势种,通过野外群落调查,运用空间点格局分析的Ripley K 函数,分析甘南不同坡向亚高寒草甸中金露梅种群的空间分布格局及其关联性。结果表明:金露梅种群在3个坡向的分布具有显著差异,重要值、生物量和盖度在北坡均高于南坡;北坡和西坡金露梅种群 I、II 级个体在小尺度上呈显著聚集分布,随着龄级和空间尺度的增加,金露梅种群聚集强度逐渐减弱,趋向于随机分布;南坡由于其生境条件对金露梅生长的抑制,种间竞争激烈,各级金露梅种群的分布格局均以随机分布为主;不同坡向的金露梅种群 I、II 级个体之间在一定尺度内表现为负关联,随着尺度增加,关联度降低,III、IV 级与 I、II 级个体之间的关联性呈显著负关联;较大个体之间无明显关系,表明年龄接近的个体在空间分布上是相互独立的,利于其充分利用环境资源。

关键词 亚高寒草甸; 坡向; 金露梅; 空间格局; 空间关联

Spatial distribution and spatial association of *Potentilla fruticosa* populations on different slope aspects in subalpine meadow. LIU Min-xia* (College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China).

Abstract: The adaptation strategies of plant populations under different disturbance conditions could be reflected by the distribution pattern and correlation. *Potentilla fruticosa* is the dominant species in alpine meadow community in south of Gansu Province, China. Based on the field investigation, *P. fruticosa* population spatial distribution pattern and its correlation were studied by using Ripley K function of spatial point pattern analysis. The results showed that the distribution of *P. fruticosa* population had significant differences on different aspects, and its species richness, diversity index and coverage showed a decreasing trend from north to south slope. The class I and II individuals of *P. fruticosa* population significantly aggregated at small scale in north and west slopes, and *P. fruticosa* clump intensity was gradually weakened with the increase of age and space scale, and finally tended to a random distribution. On south slope, the distribution patterns of all levels of *P. fruticosa* individuals were dominated by random distribution due to the inhibition of the habitat conditions and interspecific competition. On different slope aspects, *P. fruticosa* populations between class I and II individuals showed a negative correlation at certain scale, but the correlation degree decreased with increasing scale. The relationship between the class III and IV individuals and the class I and II individuals had negative correlation significantly. There was no significant relationship among the large individuals, indicating that the individuals with similar age was spatially independent, which was conducive to the full use of environmental resources.

Key words: subalpine meadow; slope aspect; *Potentilla fruticosa*; spatial pattern; spatial correlation.

种群空间分布格局表示个体在水平空间上的分布状况,反映出个体彼此之间在水平空间上的关系,主要分为聚集分布、均匀分布和随机分布3种类型^[1].种群分布格局及其关联性对种群的繁殖、发育、生长,以及对环境资源的利用等具有重要影响,因而不同类型的分布格局能够反映出种群个体对环境资源的利用状况^[1-2].对植物种群的空间分布格局研究已经有较长的历史^[3].这项工作不仅可以了解植物之间的竞争及依存关系,也可以揭示植物的生活对策及状况^[4].

自20世纪20年代分布格局研究开始以来,出现众多研究方法,如距离法、分布型指数法、频次检验法等,而近几年应用较多的是点格局分析法^[5].点格局分析法由Ripley于1977年最早提出,此后被进一步完善^[6].点格局分析法与传统方法相比,克服了种群空间格局研究尺度单一的缺陷,便于在连续尺度上研究种群个体的分布格局变化,因而在植物种群不同尺度空间分布格局及空间关联性的研究中得到广泛应用^[7].目前,采用点格局法,研究了热带山地雨林^[8]、长白山地区^[9]、西藏色季拉山^[10]、皖南山区^[11]等地的植物种群分布格局,从不同尺度探究植物种群的分布状况.

金露梅为蔷薇科委陵菜属多年生落叶灌木植物,其生长具有喜湿润、低温的特点,在我国西北、西南等山区均有分布.甘南地区亚高寒草甸分布较广,金露梅也是该区域产量较高的牧草;同时,它在保护生物多样性、水土保持及水源涵养上具有重要意义^[12-13].目前,关于金露梅的研究主要包括金露梅的群落学及生理特征研究^[14-15],关于坡向对金露梅种群分布格局及空间关联性的影响研究较少,尤其是甘南地区金露梅灌丛的分布格局及其成因研究尚未见报道,坡向对立地生境的光照、土壤水分及养分会产生影响,从而影响植物的生长,进而影响种群的分布格局.为此,本文运用点格局分析法对不同坡向亚高寒草甸金露梅种群的空间分布格局及其关联性进行研究,旨在了解金露梅种群在不同坡向生境中的空间分布特征,并为充分认识金露梅种群对环境变化的响应机制及适应对策提供科学参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区处于青藏高原东北边缘(34°56' N, 102°54' E, 海拔3000 m).气候类型为寒温湿润高原气候,年均气温2.1℃,最冷月12月至次年2月平均

气温-8.6℃,而最热月6—8月平均气温11.4℃,≥0℃的年积温1732℃,年降水量557.4 mm.植被分布属亚高山草甸,主要包含莎草科、禾本科和多种双子叶植物.其中,南坡植被分布主要以矮蒿草(*Kobresia humilis*)、蒲公英(*Taraxacum lugubre*)和三刺草(*Aristida triset*)等为优势种;西坡主要以黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、米口袋(*Gueldenstaedtia verna*)为优势种;北坡主要以金露梅为优势种.土壤类型为高寒草甸土.研究区样地如图1.

1.2 样地设置与调查

2016年7月中旬在甘南进行了野外群落学调查.在研究区的北坡、西坡和南坡分别选取海拔坡度相近的具有代表性的样地,根据样地内金露梅种群的分布状况及金露梅的生长特征在各样地分别设置10 m×10 m的样方,并采用相邻格子法将样方划分为100个1 m×1 m的小样方.在各个坡向上,以样方的左下角顶点为原点,通过平面直角坐标确定每个金露梅灌丛的相对位置,并在坐标纸上记录小样方中每个金露梅植株的地面投影及其分枝数.并记录金露梅的地上生物量、实测盖度及其他生物特征等信息.为了研究不同龄级的金露梅格局及其关联性,将金露梅划分为4级:Ⅰ级(1~6枝)、Ⅱ级(7~12枝)、Ⅲ级(12~17枝)、Ⅳ级(17枝以上),并对3个坡向每个样方中的各级金露梅个体数量进行统计.

1.3 研究方法

1.3.1 点格局分析 将每个植物个体视为二维空间的一个点,从而形成空间分布的点图.点格局分析法采用Ripley K函数,以个体组成二维点图为基础进行格局及关联性分析^[16].该方法可对不同尺度下的种群空间格局进行分析,也能够简易地反映出各龄级个体间的空间关联,通过Monte-Carlo拟合可对坐标信息充分利用,具有较强的检验能力,其描述的结

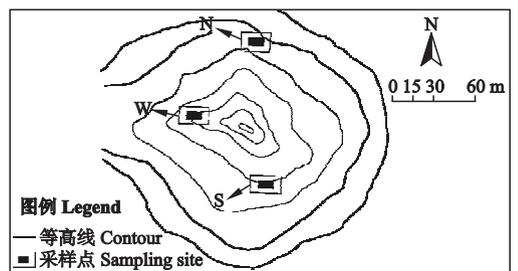


图1 研究区样地布置

Fig.1 Sample plot of the study area.

N: 北坡 North slope; W: 西坡 West slope; S: 南坡 South slope. 下同 The same below.

果与实际更吻合,被广泛应用于种群的空间格局分析中,公式如下^[17]:

$$K(t) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{I_t(u_{ij})}{W_{ij}} \quad (i \neq j) \quad (1)$$

式中: A 为样地总面积; n 为样地内金露梅的数量; u_{ij} 为第*i*株金露梅与第*j*株金露梅个体的间距; t 为空间尺度,当 $u_{ij} \leq t$ 时, $I_t(u_{ij}) = 1$,当 $u_{ij} > t$ 时, $I_t(u_{ij}) = 0$; W_{ij} 为消除边界效应的权重,具体指代以点*i*为圆心、 u_{ij} 为半径的圆落在面积*A*中的弧长与圆周的比值。

为了在随机分布下保持稳定的方差,且与*t*呈线性关系,通常引入 K/π 的平方根将式(1)改进为 $L(t)$ 函数,从而能够更好地将格局关系表现出来:

$$L(t) = \sqrt{K(t)/\pi} - t \quad (2)$$

式中:当 $L(t) = 0$,种群为随机分布; $L(t) > 0$,种群为聚集分布; $L(t) < 0$ 时,种群为均匀分布。

1.3.2 空间关联分析 种群间的空间关联性分析,实际上是2个种群之间的点格局分析,也称为多元点格局分析^[18]。为研究不同龄级的金露梅个体在空间上的关联性,Ripley K 函数可转换为双变量形式以进行计算,具体如下:

$$K_{ab}(t) = \frac{A}{n_a \cdot n_b} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{I_t(u_{ij})}{W_{ij}} \quad (i \neq j) \quad (3)$$

式中: n_a 、 n_b 分别为种群*a*和种群*b*的个体数; i 和*j*为种群*a*和种群*b*的个体,改进函数为:

$$L_{ab}(t) = \sqrt{K_{ab}(t)/\pi} - t \quad (4)$$

式中:当 $L_{ab}(t) > 0$ 时,表示不同龄级个体在*t*尺度上表现为正关联;当 $L_{ab}(t) = 0$ 时,不同龄级个体在*t*尺度上无相关关系;当 $L_{ab}(t) < 0$ 时,不同龄级个体在*t*尺度上表现为负关联。

通常用 Monte-Carlo 方法^[19]计算空间分布的上、下包迹线,从而形成 $L(t)$ 和 $L_{ab}(t)$ 的置信区间。通过野外实测数据对不同尺度下的 $L(t)$ 和 $L_{ab}(t)$ 值进行计算,通过判断其与包迹线的位置关系来判定分布格局及关联性。具体为: $L(t)$ 值位于包迹线以上则种群为聚集分布,在包迹线之间种群为随机分布,在包迹线以下种群为均匀分布。空间关联性的判定方法与之类似,即 $L_{ab}(t)$ 值位于包迹线以上表明呈正关联,在包迹线之间表明无相关关系,在包迹线以下表明呈负关联。

野外调查数据采用 Get Data Graph Digitizer 2.25软件进行坐标数据提取,并通过 Excel 2007、Programita 2014 软件进行数据统计分析。选取的尺度空间为 5 m,通过 Monte Carlo 法随机模 20 次,得

到 2 条包迹线围成的 95% 置信区间,利用 SigmaPlot 10.0 作图。金露梅生物学特征通过 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和差异显著性检验($\alpha = 0.05$)。图表中数据为平均值 \pm 标准误。

2 结果与分析

2.1 不同坡向金露梅种群的生物学特征

金露梅种群在 3 个坡向的分布具有显著差异,其中北坡分布最多,金露梅的重要值达 0.63,而南坡分布较少。随着坡向梯度的变化,其盖度、生物量和重要值呈现北坡高于南坡的趋势(表 1)。

2.2 不同坡向金露梅种群大小组成

在各个坡向上,各龄级的金露梅个体数量分布大致相同,均为 I 级 > II 级 > III 级 > IV 级。在坡度、海拔相同的条件下,随着坡向由北到南的变化,金露梅种群的 I、II 级个体数逐渐减少,而 III、IV 级个体数逐渐增多(表 2)。

2.3 金露梅种群的点格局分析

金露梅种群的总体数量分布上,呈北坡 > 西坡 > 南坡,且整体上看来均表现为聚集分布,但各个坡向上个体的分布表现出较大差异,说明金露梅种群的分布格局与空间尺度有密切关系(图 2),但仅从图 2 无法看出金露梅种群不同龄级个体的分布格局在各个空间尺度上的变化特征。

在北坡、西坡和南坡 3 个坡向上,各级金露梅灌丛的分布状况及聚集程度明显不同。北坡 I 级金露梅灌丛在各个尺度内均表现为明显的聚集分布,且

表 1 不同坡向金露梅种群的生物学特征

Table 1 Biological characteristics of *Potentilla fruticosa* populations on different slope aspects

坡向 Slope aspect	重要值 Importance value	盖度 Coverage (%)	生物量 Biomass (g)	株高 Height (cm)
北坡 North slope	0.63 \pm 0.08a	76.6 \pm 2.0a	113.57 \pm 1.03a	64.26 \pm 0.09a
西坡 West slope	0.35 \pm 1.02b	50.0 \pm 2.2b	95.62 \pm 1.52b	43.84 \pm 0.21b
南坡 South slope	0.17 \pm 0.45c	20.4 \pm 2.3c	52.41 \pm 1.23c	18.44 \pm 0.12c

表 2 不同坡向金露梅种群的大小组成

Table 2 Composition of *Potentilla fruticosa* population size on different slope aspects

坡向 Slope aspect	龄级 Class			
	I	II	III	IV
北坡 North slope	188	132	32	26
西坡 West slope	74	69	48	32
南坡 South slope	65	58	56	33

聚集程度比较高,随着年龄的生长,其分布情况发生改变;II级金露梅灌丛在0~2.6 m尺度上表现为聚集分布,在2.6~5 m尺度上为随机分布;西坡I级金露梅灌丛则与北坡相反,在各个尺度上均表现为随机分布;II级金露梅灌丛在0~0.9 m内为随机分布,0.9~5 m内表现为聚集分布. III、IV级金露梅灌丛无论在北坡还是西坡均表现为随机分布.各个龄级的金露梅灌丛在南坡上均表现为随机分布(图3).

2.4 不同龄级金露梅种群空间关联性

北坡 I 和 II 级金露梅灌丛在 0~2.1 m 尺度上表现为显著负关联,2.1 m 之后关联性降低,随着尺

度增加最终至无关联; I 与 III 级、I 与 IV 级金露梅灌丛在整个尺度内表现为负关联; II 与 III 级、II 与 IV 级金露梅灌丛在整个尺度内表现为负关联; III 与 IV 级金露梅灌丛在所有尺度上均表现为无关联;西坡 I 与 II 级金露梅灌丛在 0~2.6 m 尺度上表现为显著的负关联,2.6~5 m 尺度上则转为无关联; I 与 III 级金露梅灌丛在研究尺度范围内同样表现为负关联, I 与 IV 级金露梅灌丛在 0~1.2 m 小尺度内为无关联,随后转为负关联; II 与 III 级、II 与 IV 级金露梅灌丛在整个研究尺度上均表现为负关联; III 与 IV 级金露梅灌丛在各尺度内表现为无关联;南坡 I 与 II

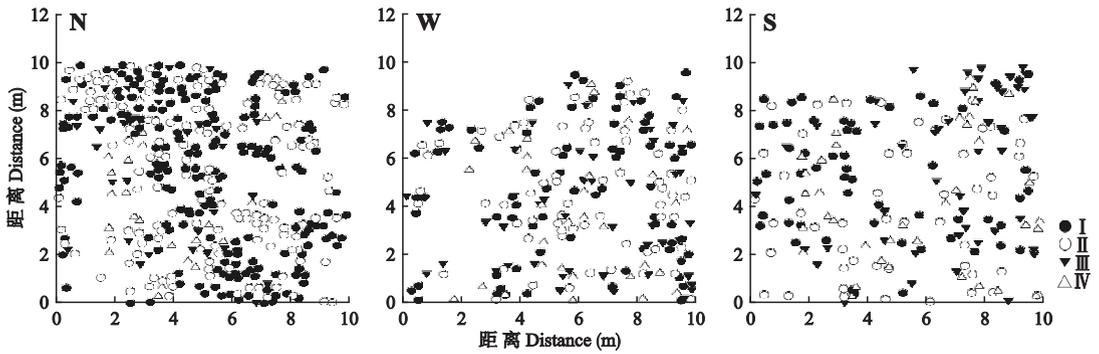


图2 金露梅种群个体空间分布
Fig.2 Individual spatial distribution of *Potentilla fruticosa* populations.

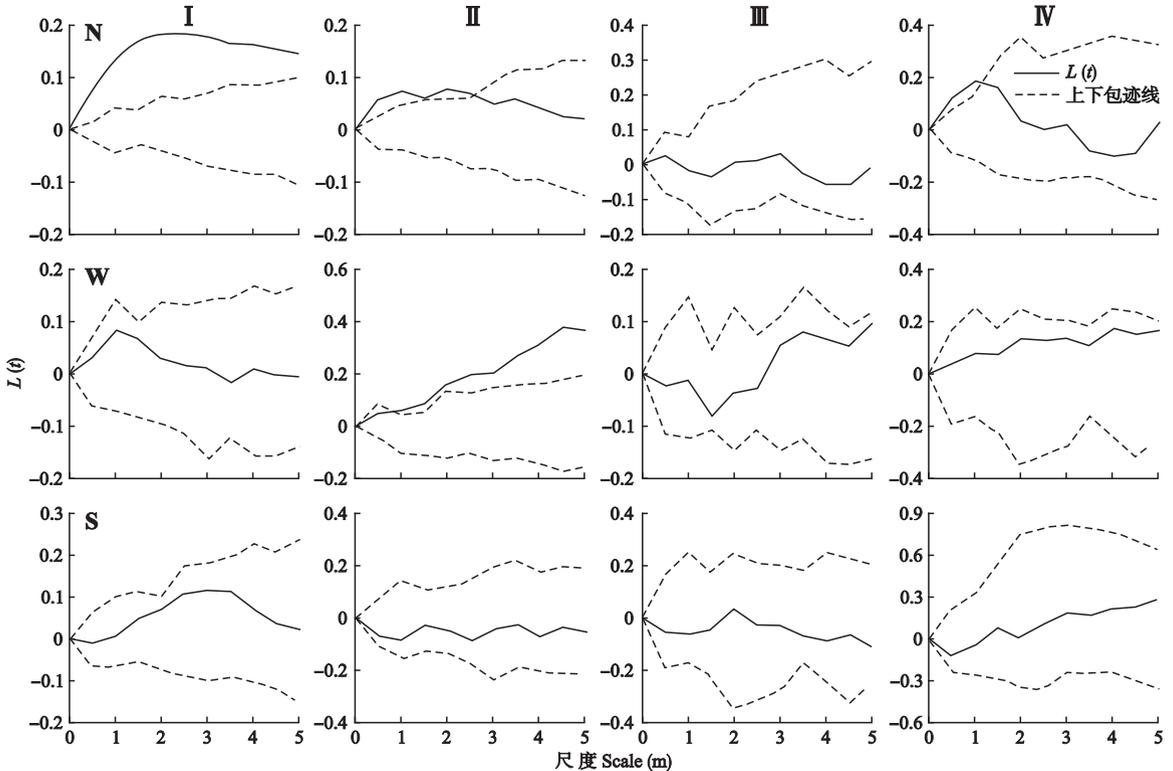


图3 不同坡向金露梅种群的点格局分析
Fig.3 Point pattern analysis for *Potentilla fruticosa* populations on different slope aspects.

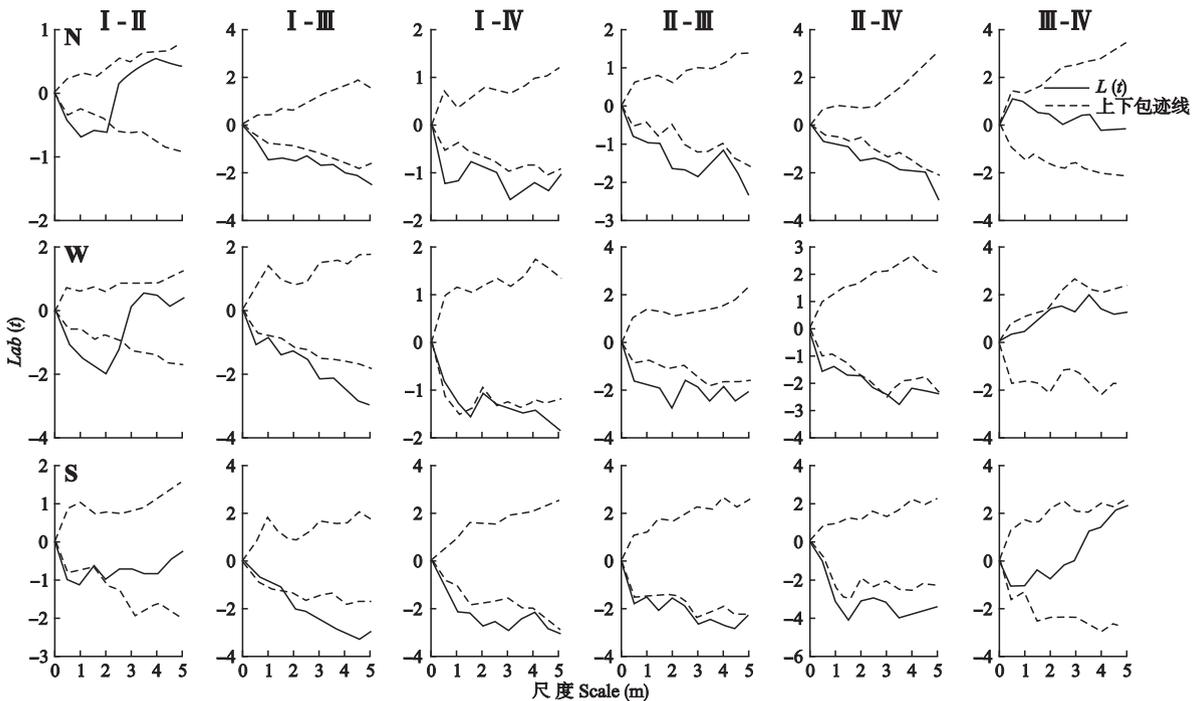


图4 不同坡向金露梅种群的空间关联性

Fig.4 Spatial association between *Potentilla fruticosa* populations on different slope aspects.

级金露梅灌丛在 0~1.5 m 尺度上表现为显著的负关联,1.5~5 m 尺度内为无关联; I 与 III 级在 0~1.6 m 尺度上为无关联,1.6~5 m 为负关联.其中, I 与 IV、II 与 IV、III 与 IV 级金露梅灌丛的关联性在北坡一致(图 4).总体而言,各级金露梅个体之间的关联性在各个坡向上大致相同,仅有个别小尺度上表现出差异性,表明金露梅种群对坡向微地形变化表现出响应策略.

3 讨 论

刘旻霞等^[20]对甘南亚高寒草甸的研究中指出,杂草及金露梅等灌木是北坡的优势功能群,南坡的优势功能群主要以禾草为主,且北坡植物群落丰富度和盖度大于南坡.本研究发现,金露梅种群在 3 个坡向的分布具有显著差异,其中北坡分布最多,所对应的重要值达 0.63,而南坡分布相对较少,随着坡向梯度的变化,其盖度、生物量和重要值呈现出自北坡向南坡递减的趋势(表 1),与上述结果一致.其原因主要与金露梅的生物学特性有关:金露梅的生长具有喜湿润、低温的特点,在北半球,太阳辐射较多的南坡,日照时数长,蒸发量大,因此热而干旱;而北坡受到了较少的太阳辐射,日照时数短,蒸发量小,因此比较潮湿、阴冷,有利于金露梅的生存发展^[21-22],体现出植物种群对环境异质性的响应策略.

种群空间分布格局是其生物学特性及环境因子共同作用的结果,同时也受种群的演替阶段、个体生长、生境差异,以及自然干扰和人为干扰等因素影响.种群格局的变化表现出种群适应新环境的生存策略及应对机制,利于其更有效地获取资源而生存^[23].聚集分布表明,种群内部之间的生态关系是相互有利(正向)的,随机分布反映了种群内部之间无明显生态关系,均匀分布则说明种群内部间的生态关系为相互排斥(负向)^[24].通过研究金露梅种群空间分布格局对不同坡向的响应,进一步揭示了金露梅种群对异质生境的响应机制.坡向会对立地生境的光照、土壤水分及养分产生影响,从而影响植物的生长,进而影响种群分布格局^[25].本研究发现,北坡坡向上 I 级金露梅灌丛表现为明显的聚集分布,随着年龄的增长,其分布状况发生了改变,聚集强度逐渐降低,仅在小尺度内表现为聚集分布,随着空间尺度的增加,其格局主要以随机分布为主.当其年龄到达 IV 级时,经过小尺度的聚集之后又转变为随机分布(图 3).兰国玉等^[26]对热带森林样地中优势树种的研究表明,幼树个体及中龄树的格局主要为聚集分布,随着年龄的增长,成年树则表现出明显的随机分布;李伟等^[27]研究了南方红豆杉(*Taxus mairei*)种群的分布格局,同样得出随着红豆杉个体龄级的增加,其分布格局由聚集分布逐渐趋于随机

分布.本研究与上述研究结果一致.原因可能与金露梅种群的生物学特性有关.有研究表明,种群在小尺度内的聚集分布利于其形成群体效应,利于自身适应环境并能够增强种间竞争能力,促进种群的正常生长^[28].马熙华等^[21]在研究祁连山地区不同坡向金露梅种群的空间格局过程中发现,北坡坡向上水资源充足,低龄金露梅个体选择抱团生长方式来抵御种间竞争,从而有力推动其在北坡生境中的拓展,进一步巩固其优势地位,但随着金露梅个体年龄及种群密度的增加,为了获得充足养分而种内及种间竞争增多,金露梅除了受其他物种排斥外,也会因种内竞争发生自疏现象.西坡处于北坡与南坡的过渡段,金露梅灌丛分布相对减少(图2),且物种多样性丰富,种间排斥作用加剧,因此,I级金露梅灌丛表现为明显的随机分布,随着年龄的增长,其对环境具有一定的响应机制,能够抵制其他物种的排斥,资源获取及竞争能力增强,聚集程度增大,II级金露梅灌丛在0.9~5 m尺度上转变为聚集分布,但当其生长到一定阶段,对环境资源及土壤养分的需求增加,由于激烈的竞争同样会产生自疏或他疏现象,因而III、IV级金露梅灌丛以随机分布为主.南坡由于其水分短缺且光照较强,不利于金露梅的生长,主要分布着矮嵩草(*Kobresia humilis*)等物种.金露梅种群的少量分布主要源于西坡及北坡种子的随机扩散.Janzen-Connell假说^[29]认为,种子存活率与母树的空间距离呈负相关,种子的死亡率主要受种群密度及距离影响.由此可知,南坡坡向上金露梅个体不易存活,且环境的胁迫及种间竞争使金露梅种群的生长被限制,植被分布稀疏,种群个体间距离较远,生长无明显规律性,因而在研究尺度内各龄级均呈随机分布^[20,29].

种间关联理论中正关联是由于一个物种对另一物种产生依赖或者物种同处于异质环境中,对环境条件产生相似的适应及反应而产生;负关联则是由于两物种在资源的获取中互相竞争或者对于环境需求的差异综合作用下产生^[4].张华等^[30]对青海云杉(*Picea asperata*)不同龄级个体关联研究表明,云杉种群I、II级个体在空间分布上存在着相互排斥的生态关系.本研究显示,金露梅种群I、II级个体在一定尺度内表现为负关联,种群的幼小个体在最初生长中对养分及空间资源的需求一致,在资源及生存空间的争夺中,必然存在激烈的竞争.随着尺度空间的增加,金露梅种群I、II级个体之间关联性减小,最终至无关联,这与III、IV级个体之间为无关联的结果类似,均体现了年龄相近的个体在空间分布

上保持着相互独立,从而利于其对环境资源的充分利用.III、IV级个体与I、II级个体间的空间关联性为显著的负关联,表明较大个体的生长对幼小个体产生了抑制作用,这与王磊等^[31]对南方红豆杉种群不同龄级个体空间关联研究结果一致.金露梅种群在一定的资源限制下,较大个体(III、IV级)对土壤养分及光热等的需求比竞争力较低的幼小个体(I、II级)更多,加上内部竞争激烈,对于幼小个体的介入具有一定的排斥,因而抑制了幼小个体的生长.

综上所述,不同龄级金露梅灌丛的空间分布格局及空间关联性对坡向梯度有明显的响应,表明金露梅种群随着环境的改变,其分布格局变化比较明显.研究表明,金露梅种群的空间分布格局及空间关联性不仅与其本身的生物学特性有关,而且也受种内及种间相互作用和生境异质性影响.甘南地区为重要的牧区,应进一步研究放牧等人为因素影响下金露梅种群的分布格局类型,从而更好地认识金露梅种群的生长规律,并使金露梅种群保持稳定,以充分发挥其在水土保持、微气候调节及对水源涵养的生态效应.

参考文献

- [1] Dale MRT. Spatial pattern analysis in plant ecology. *Ecology*, 1999, **88**: 366-370
- [2] Druckenbrod DL, Shugart HH, Davies I. Spatial pattern and process in forest stands within the Virginia piedmont. *Journal of Vegetation Science*, 2005, **16**: 37-48
- [3] Bai C (白聪), Yan M (闫明), Bi R-C (毕润成), et al. Spatial pattern analysis of dominant species in *Exochorda giraldii* community in Xingtang Temple of Taiyue Mountains, Shanxi, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2014, **38**(12): 1283-1295 (in Chinese)
- [4] Liu Y-H (刘珏宏), Gao H (高慧), Zhang L-H (张丽红), et al. Comparative analysis of inter-specific association within the *Stipa grandis*-*S. krylovii* community in typical steppe of Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2010, **34**(9): 1016-1024 (in Chinese)
- [5] Li M-H (李明辉), He F-H (何风华), Liu Y (刘云), et al. Analysis methods of stand spatial distribution pattern. *Ecologic Science* (生态科学), 2003, **22**(1): 77-81 (in Chinese)
- [6] Haase P. Spatial pattern analysis in ecology based on Ripley's K-function: Introduction and methods of edge correction. *Journal of Vegetation Science*, 1995, **6**: 575-582
- [7] Andersson M. Spatial analysis of two-species interactions. *Oecologia*, 1992, **91**: 134-140
- [8] Liang S (梁爽), Xu H (许涵), Lin J-Y (林家怡), et al. Spatial distribution pattern of the dominant species *Girroniera subaequalis* in tropical montane rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2015, **38**(12): 1273-1282 (in Chinese)
- [9] Wang X-Y (王晓雨), Yu D-P (于大炮), Zhou L (周

- 莉), *et al.* Spatial patterns of a treeline *Betula ermanii* Cham population on the north slope of Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35** (1): 116–124 (in Chinese)
- [10] Xie C-Q (解传奇), Tian M-X (田民霞), Zhao Z-R (赵忠瑞), *et al.* Spatial point pattern analysis of *Abies georgei* var. *Smithii* forest of Sygera Mountains in southeast Tibet, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(6): 1617–1624 (in Chinese)
- [11] Wang L (王磊), Sun Q-W (孙启武), Hao C-Y (郝朝运), *et al.* Point pattern analysis of different age-class *Taxus chinensis* var. *mairei* individuals in mountainous area of southern Anhui Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(2): 272–278 (in Chinese)
- [12] Li H-Q (李红琴), Song C-G (宋成刚), Zhang F-W (张法伟), *et al.* Comparison on fixed carbon amount of shrub and herb of *Potentilla fruticosa* shrub meadow in alpine region of Qinghai Province. *Journal of Plant Resources and Environment* (植物资源与环境学报), 2014, **23**(3): 1–7 (in Chinese)
- [13] Liu J-Q (刘建泉), Sun J-Z (孙建忠). Change of spatial pattern of *Potentilla fruticosa* population along altitudinal gradient in Dongdahe forest area of Qilian Mountains Nature Reserve. *Pratacultural Science* (草业科学), 2012, **29**(5): 804–808 (in Chinese)
- [14] Liu M-X (刘旻霞), Ma J-Z (马建祖). Study on proline accumulation patterns of six plant species under adversity stress. *Pratacultural Science* (草业科学), 2010, **27**(4): 134–138 (in Chinese)
- [15] Liu M-X (刘旻霞), Ma J-Z (马建祖). Physio-ecological response of plants to environmental stresses in sub-alpine meadow in Gannan. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture* (农业系统科学与综合研究), 2010, **26**(3): 288–292 (in Chinese)
- [16] Ripley BD. Modelling spatial patterns. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 1977: 172–212
- [17] Gray L, He F. Spatial point-pattern analysis for detecting density-dependent competition in a boreal chronosequence of Alberta. *Forest Ecology and Management*, 2009, **259**: 98–106
- [18] Gao F-Y (高福元), Zhao C-Z (赵成章), Zhuo M-L (卓马兰), *et al.* Spatial distribution and spatial association of *Stellera chamaejasme* population in the different altitude in degraded alpine grassland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(3): 605–612 (in Chinese)
- [19] Manly BFJ. *Randomization and Monte Carlo Methods in Biology*. New York: Chapman & Hall, 1991
- [20] Liu M-X (刘旻霞), Ma J-Z (马建祖). Responses of plant functional traits and soil factors to slope aspect in alpine meadow of South Gansu, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **12**(3): 3295–3300 (in Chinese)
- [21] Ma X-H (马熙华), Fang J-F (方金福). Spatial distribution patterns of *Potentilla fruticosa* population on different aspects of slope in alpine grassland. *Animal Husbandry and Feed Science* (畜牧与饲料科学), 2016, **37**(6): 49–52 (in Chinese)
- [22] Sternberg M, Shoshany M. Influence of slope aspect on Mediterranean woody formations: Comparison of a semi-arid and an arid site in Israel. *Ecological Research*, 2001, **16**: 335–345
- [23] Yang J-L (杨君珑), Wang H (王辉), Wang B (王彬), *et al.* Spatial distribution pattern and interspecific association of main tree species in *Pinus tabuliformis* forest in Ziwoing Mountains. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2007, **27**(4): 791–796 (in Chinese)
- [24] Ma X-L (马小丽), Zhao C-Z (赵成章), Zhang Q (张茜), *et al.* Spatial pattern and spatial association of *Melica przewalskyi* and *Artemisia frigida* in degraded grassland. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2013, **32**(2): 299–304 (in Chinese)
- [25] Liu Z-X (刘振学), Ren G-X (任广鑫), Kang B (康冰), *et al.* Study on secondary forest community species diversity of different slope in Xinjia Mountain. *Research on Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2011, **18**(4): 197–202 (in Chinese)
- [26] Lan G-Y (兰国玉), Hu Y-H (胡跃华), Cao M (曹敏), *et al.* Establishment of Xishuangbanna tropical forest dynamics plot: Species compositions and spatial distribution patterns. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2008, **32**(2): 287–298 (in Chinese)
- [27] Li W (李伟), Wang R-X (王瑞雪), Zhang G-F (张光富), *et al.* Point pattern analysis of *ex-situ* population of *Taxus wallichiana* var. *mairei*. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2014, **33**(1): 16–22 (in Chinese)
- [28] Han L (韩路), Wang H-Z (王海珍), Peng J (彭杰), *et al.* Spatial distribution patterns and dynamics of major population in *Populus euphratica* forest in upper reaches of Tarim River. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2007, **27**(8): 1668–1673 (in Chinese)
- [29] Connell JH. On the role of natural enemies in preventing competitive exclusion in some marine animals and in rain forest trees// *Dynamics of Populations*, 1971, 298–312
- [30] Zhang H (张华), Huang Q (黄琴), Zhao C-Y (赵传燕), *et al.* Spatial pattern analysis of individuals in different age-classes of *Picea crassifolia*. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2016, **35**(5): 1182–1187 (in Chinese)
- [31] Wang L (王磊), Sun Q-W (孙启武), Hao C-Y (郝朝运), *et al.* Point pattern analysis of different age-class *Taxus chinensis* var. *mairei* individuals in mountainous area of southern Anhui Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(2): 272–278 (in Chinese)

作者简介 刘旻霞, 女, 1972年生, 博士, 教授。主要从事植物生态学与恢复生态学研究。E-mail: xiamin@163.com

责任编辑 孙菊