

# 色季拉山急尖长苞冷杉林下灌木群落空间格局及其与倒木 关联性分析

任毅华<sup>1,2,3</sup>, 罗大庆<sup>1,2,3</sup>, 方江平<sup>1,2,3\*</sup>, 卢杰<sup>1,2,3</sup>

(1. 西藏农牧学院 高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏 林芝 860000;  
3. 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000)

**摘 要:**分析西藏色季拉山急尖长苞冷杉原始林下灌木群落的空间分布格局及其与倒木的关联性, 探讨该森林生态系统内灌木的分布规律, 并从空间分布格局角度量化倒木对灌木分布的影响。以色季拉山急尖长苞冷杉原始林下灌木和倒木为研究对象, 通过典型样地调查, 用点格局法分析其空间分布格局以及与倒木的关联性。结果表明: 1) 样地内共有灌木 7 种, 总密度 730 株·hm<sup>-2</sup>, 不同灌木种群分密度依次为杯萼忍冬(359 株·hm<sup>-2</sup>)>长尾槭(185 株·hm<sup>-2</sup>)>西南花楸(61 株·hm<sup>-2</sup>)>猴斑杜鹃(55 株·hm<sup>-2</sup>)>冰川茶藨子(53 株·hm<sup>-2</sup>)>光秃绣线菊(株·hm<sup>-2</sup>)>峨眉蔷薇(株·hm<sup>-2</sup>); 2) 在 0~50 m 空间尺度内, 冰川茶藨子、猴斑杜鹃、长尾槭、杯萼忍冬以集群分布为主要特征; 西南花楸以随机分布为主要特征, 只是在个别尺度呈现显著的集群分布; 3) I 腐烂等级倒木与灌木在 0~50 m 空间尺度上呈显著的负关联, 倒木整体与灌木及 II~V 腐烂等级倒木与灌木在 0~50 m 空间尺度上均无显著关联。不同灌木种群因对环境的适应性不同而具有不同的空间分布格局, 灌木空间格局形成的生态过程及倒木对灌木空间分布的影响均具有复杂性。

**关键词:**灌木; 空间点格局分析; 急尖长苞冷杉; 色季拉山

**中图分类号:** S718.53      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-7461(2021)04-0060-06

## Spatial Pattern of Shrub Community and Its Correlation with Fallen Logs in *Abies georgei* var. *smithii* Forests in the Sejila Mountains

REN Yi-hua<sup>1,2,3</sup>, LUO Da-qing<sup>1,2,3</sup>, FANG Jiang-ping<sup>1,2,3\*</sup>, LU Jie<sup>1,2,3</sup>

(1. Research Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi 860000, Tibet, China;  
2. National Forest Ecosystem Observation & Research Station, Linzhi 860000, Tibet, China;  
3. Tibet Key Laboratory of Forest Ecology in Plateau Area, Ministry of Education, Linzhi 860000, Tibet, China)

**Abstract:** To analyze the spatial distribution pattern of shrub community and its correlation with fallen logs in primitive forest of *Abies georgei* var. *smithii*, distributed in the Sejila Mountain, Southeastern Tibet. To explore the distribution law of the shrubs in the forest ecosystem, and to quantify the influence of fallen logs on shrub distribution from the spatial distribution pattern. The typical plot method and spatial point pattern method were adopted used to investigate shrubs and fallen logs and correlations. 1) Seven kinds of shrubs were found in the sample plots with a total density of 730 plant·hm<sup>-2</sup>. The densities of 7 shrubs were the order of *Lonicera inconspicua* (359)>*Acer caudatum* (185)>*Sorbus rehderiana* (61)>*Rhododendron faucium* (55)>*Ribes glaciale* (53)>*Spiraea mollifolia* var. *glabrata* (12)>*Rosa omeiensis* (5 plants·hm<sup>-2</sup>). 2) Within the spatial scale of 0~50 m, *R. glaciale*, *R. faucium*, *A. caudatum*, and *L. inconspic-*

ua exhibited aggregation distribution, while *S. rehderiana* was characterized by random distribution, but presented significant cluster distribution at individual scale. 3) From 0 to 50 m spatial scale, the correlations between the downed logs of I decay level and shrub were significant, but the correlations between the downed logs of II—V decay level and shrubs were not significant, and the correlations between downed logs as a whole and shrubs were also not significant. Different shrub communities show different spatial distribution patterns due to their adaptabilities to the environment. The ecological process of shrub spatial pattern formation and the influence of fallen logs on shrub distribution are complicated.

**Key words:** shrub; spatial point pattern analysis (SPPA); *Abies georgei* var. *smithii*; Sejila Mountains

空间分布格局是森林群落结构的重要特征之一,在一定程度上可反映群落的形成、干扰过程、种内种间竞争及环境异质性对森林群落的影响等生态过程<sup>[1-3]</sup>,对于认识植物群落种内种间关系、动态过程及植物群落与环境之间的相互关系具有重要作用<sup>[4-6]</sup>。传统的空间格局分析通常受种群密度和空间尺度的影响,具有一定的局限性。点格局分析法是张金屯<sup>[7]</sup>1998年引入我国的一种空间分布格局分析法,该方法是以植物个体的空间坐标为基础,将每个个体视为二维空间中的一个点,由此形成植物个体的空间分布点图,在空间分布点图的基础上进行空间格局分析。与传统方法相比,其最大优势就是可以显示空间格局发生的所有尺度,且不受样地大小和种群密度影响,其结果更为直观,也更接近实际<sup>[7-10]</sup>,因此被广泛应用于植物群落空间格局研究中,极大推动了我国植物群落空间结构研究的发展<sup>[11-12]</sup>。

灌木是森林生态系统中重要的生态单元,对于森林生态系统物质和能量的固定、消耗、积累和转化有重要意义<sup>[13]</sup>。但在以往研究中,往往偏重于占绝对优势的乔木树种,而对灌木群落则重视不足。倒木泛指森林群落中因各种干扰而形成的基径 $\geq 10$  cm、长度 $\geq 1$  m、倾斜度超过 $45^\circ$ 的死木质残体<sup>[14-16]</sup>,它与枯立木、大枯枝、树桩、粗根残体一起总称为粗木质残体。倒木是森林植被与森林土壤间水分交换、物质流动的重要界面<sup>[17]</sup>。在倒木形成过程中往往伴随着林隙的产生和林内光、温、水肥等的再分配,进而影响林下植物群落结构<sup>[18]</sup>,对于维持森林生态系统的稳定性和生物多样性保育具有重要意义。

色季拉山急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)林是我国西藏东南部林区暗针叶林的典型代表之一,为成过熟原始林,人为干扰少,林内林隙发达,灌木及倒木资源丰富。本研究以色季拉山急尖长苞冷杉原始林为对象,通过典型样地法对林内灌木群落及倒木进行调查,分析灌木群落空间分布格局及其与倒木的关联性。其结果可为进一步完善

该林区森林生态系统结构与功能,揭示该区生物多样性维持机制提供理论依据。

## 1 研究区概况

色季拉山位于西藏东南部林芝地区工布自然保护区境内( $94^\circ 25' - 94^\circ 45' E$ ,  $29^\circ 35' - 29^\circ 57' N$ ),是念青唐古拉山向南延伸的余脉,与喜马拉雅山向东发展的山系相连,属于湿润山地暖温带和半湿润山地温带气候。年平均气温 $2.0^\circ C \sim -4.5^\circ C$ ,最高月(7月)平均气温 $11.1^\circ C$ ,最低月(1月)平均气温 $-14.0^\circ C$ ,极端最低气温 $-31.6^\circ C$ ,极端最高气温 $24.0^\circ C$ 。年均降水 $1\,134.1$  mm,春夏季节降水占全年 $79.4\%$ ,年均蒸发量 $544.0$  mm,年均相对湿度 $78.8\%$ 。

试验地设于色季拉山东坡318国道大阴坡路段下方500 m处,海拔3 850 m,地形起伏较大,平均坡度 $16^\circ$ 。林分是以急尖长苞冷杉为绝对优势的成过熟原始林,主林层平均高度27.68 m,平均胸径42.59 cm,郁闭度 $0.4 \sim 0.9$ 。林下灌木主要有猴斑杜鹃(*Rhododendron faucium*)、杯萼忍冬(*Lonicera inconspicua*)、西南花楸(*Sorbus rehderiana*)、长尾槭(*Acer caudatum*)、冰川茶藨子(*Ribes glaciale*)、峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis*)、光秃绣线菊(*Spiraea mollifolia* var. *glabrata*)等;草本主要有大钟花(*Megacodon stylophorus*)、五裂蟹甲草(*Paraseneccio quinquelobus*)、管花鹿药(*Smilacina henryi*)、扭柄花(*Streptopus obtusatus*)、蛇莓(*Duchesnea indica*)等。地表苔藓层发达,平均盖度 $95\%$ ,平均高度7 cm,土壤为漂灰化山地暗棕壤,腐殖质化程度明显。

## 2 研究方法

### 2.1 样地调查

森林群落的空间分布点格局分析要求样地以长方形或正方形为宜,且边长在50 m以上,如果 $< 50$  m,则大尺度上的格局则有可能被忽略<sup>[19]</sup>。鉴于此,于2018年11月,在色季拉山东坡海拔3 800 m

处设置 100 m×100 m 固定样地,并将其划分为 25 个 20 m×20 m 调查单元,记录每个调查单元的坡度、坡向、盖度、植物种类等信息,采用相邻网格法对样地内所有灌木及倒木进行每木检尺,并编号。记录灌木物种名、株数(丛数)、高度、冠幅、基径、坐标等信息;记录倒木坐标、大小头直径、长度、着地状况、植被覆盖等内容。并依据 5 级腐烂系统确定倒木腐烂等级,分别用 I、II、III、IV、V 表示,倒木腐烂等级划分标准见文献[14]。

2.2 点格局分析

本研究所有空间分布格局均采用 Ripley 的  $L$  函数进行分析, $L$  函数由 Ripley 的  $K$  函数改进而来,详细数学原理见文献[7,19-22]。以样地边长的 1/2,即 50 m 为最大空间尺度,以 1 m 为步长值,采用 Monte-Carlo 检验拟合计算上下包迹线,拟合检验 100 次,对应 99% 的置信水平。用 Excel 2016 软件对原始数据进行统计与分析,并绘制点格局分析图。

在点格局分析图中,观测值在上包迹线以上为集群分布,在上下包迹线中间为随机分布,在下包迹线以下为均匀分布;在关联度分析图中,观测值在上包迹线以上为正关联,在上下包迹线中间为无关联,在下包迹线以下为负关联。

3 结果与分析

3.1 灌木整体点格局分析

样地内共有灌木 7 种,总密度为 730 株· $\text{hm}^{-2}$ ,不同灌木种群分别占总密度的百分比为:杯萼忍冬(49.18%)>长尾槭(25.34%)>西南花楸(8.36%)>猴斑杜鹃(7.53%)>冰川茶藨子(7.26%)>光秃绣线菊(1.64%)>峨眉蔷薇(0.68%)(图 1)。对 730 株灌木进行空间点格局分析,发现:在 0~50 m 尺度内,整体灌木呈显著的集群分布,且聚集强度随空间尺度的增大,呈先降低再升高后平稳的趋势。聚集强度最低值为 0.138,在 7 m 空间尺度上;最高值为 0.921,在 45 m 空间尺度上(图 2)。

3.2 不同灌木种群的点格局分析

样地内灌木共有杯萼忍冬、冰川茶藨子、猴斑杜鹃、西南花楸、长尾槭、光秃绣线菊、峨眉蔷薇等 7 种,其中光秃绣线菊、峨眉蔷薇分别为 12 株和 5 株,属于偶见种,因样本数量少,做点格局分析意义不大,因此只对其余 5 种灌木进行点格局分析(图 3)。结果表明:杯萼忍冬在 32 m 尺度以内,观测值与包迹线基本为重合状态,说明在 32 m 尺度内,杯萼忍冬接近或达到显著的集群分布,但随着尺度的进一

步增大,开始转为显著的集群分布;冰川茶藨子、猴斑杜鹃和长尾槭在 0~50 m 空间尺度内均呈现显著的集群分布;西南花楸观测值在 0~50 m 空间尺度内基本处于上下包迹线中间,只是在个别尺度在上包迹线以上,说明西南花楸总体以随机分布为主要特征,只是在个别空间尺度内达到显著的集群分布。

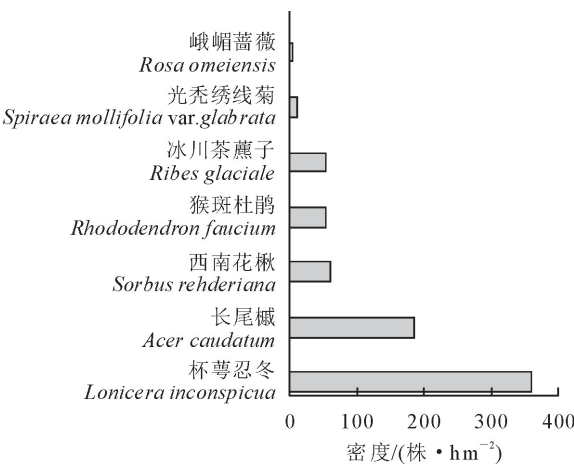


图 1 灌木群落数量特征

Fig. 1 Quantitative characteristics of shrub community

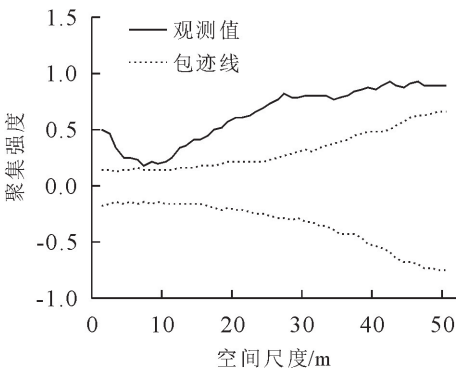


图 2 整体灌木点格局分析

Fig. 2 An overall spatial point pattern analysis (SPPA) of shrub community

3.3 灌木与倒木在空间分布上的关联性

本研究中对倒木定义为基径 $\geq 10$  cm 的死亡木,这样的倒木粗壮,分解稳定而缓慢,在林内存在时间长<sup>[23]</sup>,因此,不同腐烂等级倒木与灌木的空间关联性实质上是灌木对不同时间尺度倒木在空间分布上的反映<sup>[18]</sup>。样地内共有倒木 322 株,其中不同腐烂等级数量分别为: I 级(112 株)> II 级(69 株)> III 级(53 株)> IV 级(46 株)> V 级(42 株),具体空间分布格局见文献[18],此处仅分析灌木与倒木在空间分布上的关联性(图 4)。结果表明:仅 I 级倒木与灌木在 0~50 m 空间尺度上呈显著的负关联;倒木整体与灌木及 II~V 级倒木与灌木在 0~50 m 空间尺度上均无显著关联。

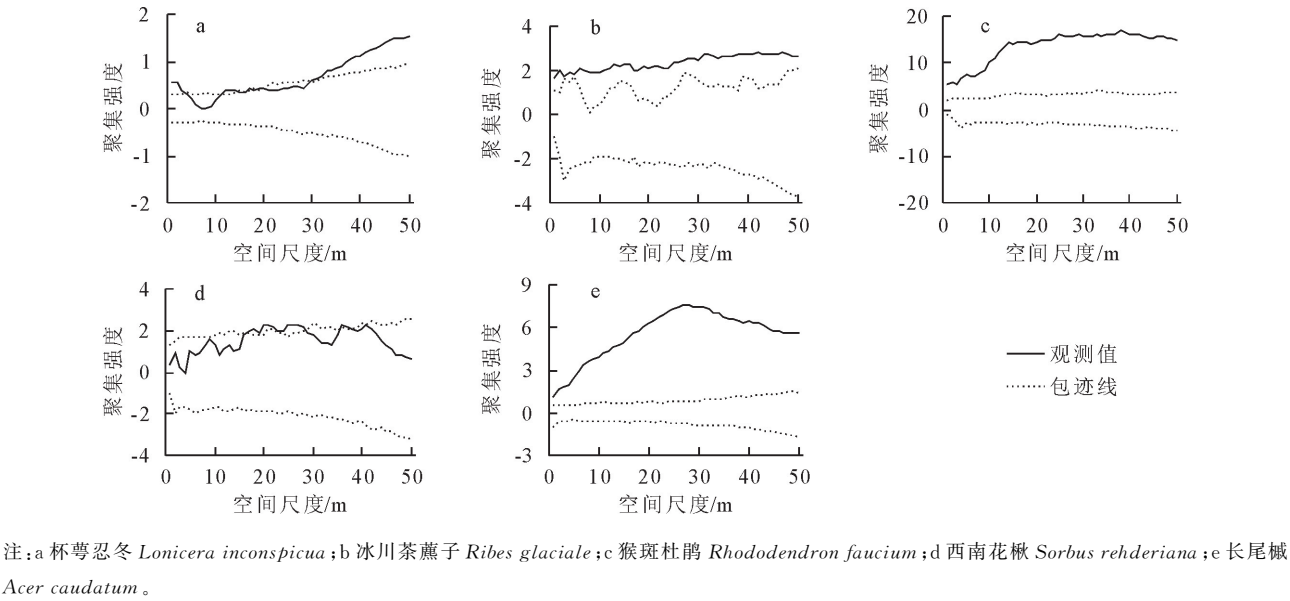


图 3 不同灌木种群点格局分析  
Fig. 3 SPPA of different shrub communities

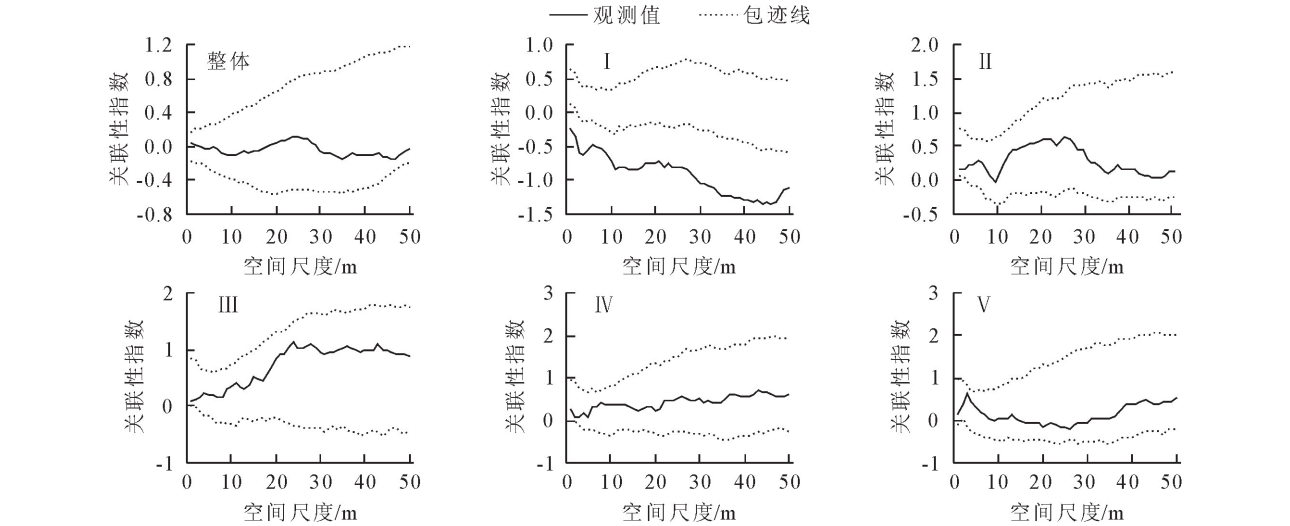


图 4 倒木与灌木在空间分布上的关联性  
Fig. 4 Correlation between logs and shrubs

4 结论与讨论

本研究中,冰川茶藨子、猴斑杜鹃、长尾槭、杯萼忍冬在 0~50 m 空间尺度内均以集群分布为主要特征,而西南花楸则以随机分布为主要特征,这与灵空山油松辽东栎林生态系统<sup>[13]</sup>、九连山米槠林生态系统<sup>[24]</sup>和镶黄旗黄花山天然杜松林生态系统<sup>[25]</sup>中优势灌木种群空间分布特征基本一致,这可能与林内环境异质性以及灌木种群对环境的适应性有关。罗大庆等<sup>[26]</sup>认为林隙干扰是色季拉山急尖长苞冷杉林下自然更新的主要驱动力,这种作用可能也适合于灌木。灌木处于乔木树冠之下,其分布往往受控于上层乔木及林隙的分布<sup>[27]</sup>,林冠和林隙在林内的分布不均导致光、温、水、肥等自然资源呈斑块状

分布,进而造就了大多数林下灌木的集群分布特征。色季拉山急尖长苞冷杉原始林为成过熟原始林,大径木心腐严重,且急尖长苞冷杉属于浅根速生树种,抗外界干扰能力差,因此林隙斑块发达,林下灌木因适应林隙环境而呈现显著的集群分布。此外,灌木自身对环境适应性的差异也会影响其空间分布,有些种适应范围广,而有些种适应范围小,因此在同一环境下不同物种表现为不同空间分布格局。在本研究调查过程中发现西南花楸在林内、林缘、林隙均有分布,且生长良好,说明其对环境条件变化不太敏感,其空间分布也以随机分布为主要特征。

本研究中Ⅰ级倒木与灌木在 0~50 m 空间尺度上呈显著的负关联,这可能与倒木形成过程中对下方植物的压塌作用有关。在本研究中,倒木的起



测基径为 10 cm,所调查倒木密度高达 322 株·hm<sup>-2</sup>,平均基径为 31.65 cm,这样的倒木在存活时已经具备一定的高度和较发达的冠幅,而倒木形成过程又是在异常气候驱动下集中形成<sup>[18]</sup>,所以在倒木产生大面积适宜灌木生存的林隙环境同时,还会因压塌作用造成其周边大量灌木死亡,由于Ⅰ级倒木形成时间短,此时灌木幼苗还未占领由其形成的林隙环境,因此Ⅰ级倒木对林下灌木的影响应该以负面作用为主,在空间分布上则表现为负关联。倒木整体与灌木及Ⅱ~Ⅴ级倒木与灌木在 0~50 m 空间尺度上均无显著关联,这可能与试验地内林隙的形成机制、种间竞争、地表苔藓层对植物幼苗根系生长的影响等生态过程的复杂性有关。其一,本研究虽然表明林隙有助于灌木形成以集群分布为主的空间分布格局,但林隙的形成具有复杂性,它不仅受倒木影响,同时还受异常气候、病虫害、火灾、种内种间竞争、老龄个体生理死亡等因素影响<sup>[28]</sup>,这些因素综合作用于林隙,有可能削弱倒木与灌木在空间分布上的关联性;其二,在倒木形成林隙后,灌木以及乔木更新幼苗、草本等植物均会迅速占领林隙,进而发生强烈的种间竞争,也可能削弱倒木与灌木在空间上的关联性;其三,据调查,样地内苔藓层平均盖度在 90%以上,厚度 7 cm,有研究表明苔藓层因隔断了乔木更新幼苗根系与森林土壤的接触而导致大量更新幼苗死亡<sup>[29]</sup>,这种作用对灌木可能同样有效,进而对倒木与灌木在空间分布上的关联性起到削弱作用。这些生态过程综合影响灌木群落的生长,最终导致倒木与灌木在空间分布上以无关联为主要特征。

高寒森林生态系统各组间相互作用过程极为复杂,单从倒木角度分析其对林下灌木群落空间分布的影响,用以揭示高寒森林生态系统维持机制,还略显单薄,在今后研究中需结合多种环境要素进行综合分析,以进一步明晰其维持机制。另灌木群落作为森林生态系统中重要的生态单元,对于生物多样性保育、水土流失以及维持森林生态系统的稳定等方面发挥着重要作用<sup>[30-31]</sup>,但在以往的森林群落结构研究中多以优势乔木树种为主,对林下灌木关注略显不足,今后应进一步加强该方面研究,以进一步完善森林生态系统结构与功能。

参考文献:

[1] BEETS P N, HOOD I A, KIMBERLEY M O, *et al.* Coarse woody debris decay rates for seven indigenous tree species in the central North Island of New Zealand[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(4): 548-557.

[2] DUNCAN R P, STEWART G H. The temporal and spatial a-

nalys of tree age distributions[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, 21(12): 1703-1710.

[3] 刘妍妍,金光泽. 小兴安岭阔叶红松林粗木质残体空间分布的点格局分析[J]. *生态学报*, 2010, 30(22): 6072-6081.

LIU Y Y, JIN G Z. Spatial point pattern analysis for coarse woody debris in a mixed broadleaved-Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6072-6081. (in Chinese)

[4] 陈杰,李文君,钟娇娇,等. 陕西米仓山巴山冷杉天然林群落物种多样性及种群分布格局[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2019, 47(1): 69-78, 89.

CHEN J, LI W J, ZHONG J J, *et al.* Species diversity and spatial distribution pattern of *Abies fargesii* natural forest community in Shaanxi Micangshan mountain[J]. *Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed.*, 2019, 47(1): 69-78, 89. (in Chinese)

[5] 杨洪晓,张金屯,吴波,等. 毛乌素沙地油蒿种群点格局分析[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(4): 563-570.

YANG H X, ZHANG J T, WU B, *et al.* Point pattern analysis of *artemisia ordosica* population in the MU US sandy land[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(4): 563-570. (in Chinese)

[6] 沈志强,卢杰,华敏,等. 西藏色季拉山高山松种群点格局分析[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2016, 44(5): 73-81.

SHEN Z Q, LU J, HUA M, *et al.* Spatial point pattern of *Pinus densata* forests of Sejila Mountains in Tibet[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2016, 44(5): 73-81. (in Chinese)

[7] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析[J]. *植物生态学报*, 1998, 22(4): 57-62.

ZHANG J T. An alysis of spatial point pattern for plant species[J]. *Acta phytoecologica sinica*, 1998, 22(4): 57-62. (in Chinese)

[8] TOFT C A, FRAIZER T. Spatial dispersion and density dependence in a perennial desert shrub[J]. *Ecological Monographs*, 2003, 73(4): 605-624.

[9] SEWART G H, ROSE A B. The significance of life history strategies in the developmental history of mixed beech forests, New Zewland[J]. *Vegetatio*, 1990, 87(2): 101-114.

[10] 李明辉,何风华,刘云,等. 天山云杉种群空间格局与动态[J]. *生态学报*, 2005, 25(5): 1000-1006.

LI M H, HE F H, LIU Y, *et al.* Spatial distribution pattern of tree individuals in the schrenk spruce forest, Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1000-1006. (in Chinese)

[11] 张兴旺,张小平,郭传友,等. 皖北石灰岩山地青檀种群不同发育阶段的点格局分析[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 542-550.

ZHANG X W, ZHANG X P, GUO C Y, *et al.* Point pattern analysis of *Pteroceltis tatarinowii* at its different development stages in limestone mountain area of North Anhui, East China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 542-550. (in Chinese)

[12] 杨晓凤,苗艳明,张钦弟,等. 五鹿山白皮松林不同龄级立木的点格局分析[J]. *植物研究*, 2013, 33(1): 24-30.

[13] 张雅丽,郭东翌,许驭丹,等. 灵空山自然保护区油松辽东栎林灌木层物种组成及空间格局分析[J]. *山西大学学报:自然科学版*

学版,2014,37(1):132-138.

ZHANG L Y, GUO D G, XU Y D, *et al.* Aanalysis on the species composition and spatial pattern of the shrub layer in pine and oak forest of Lingkong mountain nature reserve, Shanxi [J]. Journal of Shanxi University: Nat. Sci. Ed. ,2014,37(1): 132-138. (in Chinese)

[14] 同恩荣,王希华,黄建军. 森林粗死木质残体的概念及其分类[J]. 生态学报,2005,25(1):158-167.

YAN N R, WANG X H, HANG J J. Concept and classification of coarse woody debris in forest ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica,2005,25(1):158-167. (in Chinese)

[15] 魏书精,孙龙,魏书威,等. 森林生态系统粗木质残体研究进展[J]. 浙江农林大学学报,2013,30(4):585-598.

WEI S J, SUN L, WEI S W, *et al.* Coarse woody debris in forest ecosystems:a review[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2013,30(4):585-598. (in Chinese)

[16] 袁杰,侯琳,张硕新. 森林粗木质残体研究进展[J]. 西北林学院学报,2011,26(4):90-98.

YUAN J, HOU L, ZHANG S X. Research progress in coarse woody debris[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011,26(4):90-98. (in Chinese)

[17] 薛建辉,郝奇林,何常清,等. 岷江上游两种亚高山林分枯落物层水文特征研究[J]. 水土保持学报,2009,23(3):170-174.

XUE J H, HAO Q L, HE C Q, *et al.* Hydrological characteristics of two typical subalpineforests in the upper reaches of Minjiang river[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(3):170-174. (in Chinese)

[18] 张金屯,孟东平. 芦芽山华北落叶松林不同龄级立木的点格局分析 [J]. 生态学报,2004,24(1):35-40.

ZHANG J T, MENG G P. Spatial pattern analysis of individuals in different age-classes of *Larix principis-rupprechtii* in Luya mountain reserve, Shanxi, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(1):35-40. (in Chinese)

[19] 康佳鹏,马盈盈,马淑琴,等. 荒漠绿洲过渡带桉柳种群结构与空间格局动态[J]. 生态学报,2019,39(1):1-11.

KANG J P, MA Y Y, MA S Q, *et al.* Dynamic changes of spatial pattern and structure of the *Tamarix ramosissima* population at the desert-oasis ecotone of the Tarim Basin [J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(1):1-11. (in Chinese)

[20] 刘旻霞,连依明,李文. 微地形对优势种群点格局和关联性的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(5):1569-1575.

LI M X, LIAN Y M, LI W. Effects of microtopography on the pattern and association of dominant population [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(5):1569-1575. (in Chinese)

[21] 田慧霞,李钧敏,毕润成,等. 山西太岳山白桦种群结构和空间分布格局[J]. 生态学杂志,2017,36(1):1-10.

TIAN H X, LI J M, BI R C, *et al.* *Betula platyphylla* population structure and its spatial distribution pattern in Taiyue mountain of Shanxi, China [J]. Chinese Journal of Ecology 2017,36(1):1-10. (in Chinese)

[22] 马豪霞,任毅华,侯磊,等. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉林粗木质残体储量与倒木分解研究[J]. 西北林学院学报,2016,31(5):68-73.

MA H X, REN Y H, HOU L, *et al.* Studies on the reserves of coarse woody debris and Decomposition of fallen trees in *abies georgei* var. *smithii* forest of Sygera mountains in Tibet[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016,31(5):68-73. (in Chinese)

[23] 徐国良,汤正华,廖娟. 九连山保护区米槎群落主要种群空间分布格局研究[J]. 湖南林业科技,2013,40(2):15-19,43.

[24] 康霞,姚云峰,李钢铁,等. 镶黄旗黄花山天然杜松林群落结构与种群分布格局研究[J]. 林业资源管理,2012(2):47-53.

[25] 罗大庆,郭泉水,薛会英,等. 西藏色季拉山冷杉原始林林隙更新研究[J]. 林业科学研究,2002,15(5):564-569.

[26] 白雪娇,李步航,张健,等. 长白山阔叶红松林灌木物种组成、结构和空间分布[J]. 应用生态学报,2010,21(8):1899-1906.

BAI X J, LI B H, ZHANG J, *et al.* Species composition structure spatial distribution of shrubs in broad-leaved Korean pine (*pinus koraiensis*) mixed forest in Changbai Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(8):1899-1906. (in Chinese)

[27] 罗桂生,马履一,贾忠奎,等. 油松人工林林隙天然更新及与环境相关性分析[J]. 北京林业大学学报,2019,41(9):59-68.

LUO G S, MA L Y, JIA Z K, *et al.* Correlation analysis between natural regeneration and environment in canopy gap of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University,2019,41(9):59-68. (in Chinese)

[28] 王瑞红,李江荣,潘刚. 色季拉山急尖长苞冷杉天然更新影响因素[J]. 浙江农林大学学报,2018,35(6):1038-1044.

WANG R H, LI J R, PAN G. Natural regeneration factors of *Abies georgei* var. *smithii* on Sejila mountain[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018,35(6):1038-1044. (in Chinese)

[29] 杜丽侠,邢韶华. 北京八达岭地区灌木群落空间分布格局与土壤环境因子的关系分析[J]. 西北植物学报,2009,29(3):601-607.

DU L X, XING S H. Relationship between spatial distribution pattern of shrub community and environmental factors in Badaling of Beijing [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2009,29(3):601-607. (in Chinese)

[30] 秦永胜,余新晓,陈丽华,等. 北京密云水库流域水源保护林区径流空间尺度效应的研究[J]. 生态学报,2001,21(6):913-918.

QIN Y S, YU X X, CHEN L H, *et al.* Spatial scale effects of runoff on the water resource conservation forest watershed within the Miyun reservoir basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001,21(6):913-918. (in Chinese)