

祁连山祁连圆柏幼苗种群结构及空间分布格局

田晓萍^{1,2,3}, 南忠仁¹, 陈鹏^{2,3}, 占玉芳^{2,3}, 钱万建^{2,3}

(1. 兰州大学, 甘肃 兰州 730020; 2. 张掖市林业科学研究院, 甘肃 张掖 734000; 3. 张掖市林业科学研究院 协同创新基地, 甘肃 张掖 734000)

摘要:以祁连山中段不同海拔高度(2 600~3 400 m)祁连圆柏天然更新幼苗为研究对象,通过典型样地调查,采用点格局法分析其种群结构及空间分布格局。结果表明:1)祁连山祁连圆柏天然更新幼苗数量稀少且不能正常发育生长,在 1 m^2 样方尺度上,幼苗密度最大为 1.53 ± 1.00 株 $\cdot\text{m}^{-2}$,祁连圆柏幼苗高度主要集中Ⅰ、Ⅱ级(0.5~20 cm),高度大于50 cm的幼苗数量严重不足甚至缺失,种群结构不稳定,处于衰退状态。2)祁连圆柏幼苗数量随着海拔升高先增大后减少,在海拔3 100 m和3 200 m样地内幼苗生长状况较好,较低海拔和较高海拔幼苗生长状况较差。3)在0~10 m空间尺度下,祁连山祁连圆柏幼苗以聚集分布为主要特征,只是在个别尺度下呈随机分布,这是祁连山祁连圆柏种群长期适应自然环境的结果。因此,在祁连山浅山区退化林分生态修复中,植被配置格局应以集群配置为主。研究结果可为揭示祁连圆柏种群天然更新障碍机制及祁连山林区特别是阳坡的植被恢复提供理论参考。

关键词:祁连圆柏; 幼苗; 点格局分析; 海拔; 祁连山

中图分类号:S791.44

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)03-0018-06

Population Structure and Spatial Distribution Patterns of *Sabina przewalskii* Seedlings in the Qilian Mountains

TIAN Xiao-ping^{1,2,3}, NAN Zhong-ren¹, CHEN Peng^{2,3}, ZHAN Yu-fang^{2,3}, QIAN Wan-jian^{2,3}

(1. Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. Zhangye Academy of Forestry, Zhangye 734000, Gansu, China; 3. Collaborative innovation base of Zhangye Academy of Forestry, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract: The population structure and spatial distribution patterns of *Sabina przewalskii* seedlings at an altitude of 2 600 to 3 400 m in the middle of the Qilian Mountains were analyzed by used the typical plots investigation and point pattern method. The results showed that 1) the number of regenerated seedlings was rare and the seedlings could not grow normally. The maximum seedling density was 1.53 ± 1.00 plants $\cdot\text{m}^{-2}$, their heights were mainly concentrated in grade I and II (0.5–20 cm). Seedlings with the height over 50 cm were seriously insufficient and even missing, indicating the population structure were unstable and in a recession state. 2) With the increase of altitude, the seedling density of *S. przewalskii* firstly increased and then decreased, the seedling growth was better at an altitude of 3 100 and 3 200 m, but showed poor growth status at the lower and higher altitude. 3) Within the spatial scale of 0–10 m, *S. przewalskii* seedlings exhibited aggregation distribution, but presented random distribution at individual scale, which was the result of long-term adaptation of *S. przewalskii*. Therefore, for the ecological restoration of damaged forests in the shallow mountainous areas of the Qilian Mountains, the vegetation configuration pattern should be primarily based on the cluster configuration. The study provides theoretical references for demonstrating the natural regeneration barrier of *S. przewalskii* population and the vegetation rehabilitation in

收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-11-16

基金项目:国家自然科学基金(32060337);甘肃林业科技计划项目(2020kj006)。

第一作者:田晓萍,在读博士,副研究员。研究方向:森林生态学。E-mail:tianxiaoping8018@163.com

the Qilian Mountains, especially on the sunny slope.

Key words: *Sabina przewalskii*; seedling; point pattern analysis; altitude; Qilian Mountains

天然更新是森林生态系统自我繁衍和恢复的主要方式^[1],是森林资源再生产的重要过程,对实现森林的可持续经营有决定性作用^[2]。木本植物实生幼苗天然更新作为森林植被恢复与演替的主要方式,其定植、生长及扩散等过程影响了未来森林群落的物种构成、种群结构、分布格局及演替进程^[3],幼苗阶段是森林演替过程中最重要和最敏感的阶段,开展幼苗种群结构、空间分布规律及天然更新等方面的探究,有助于推测森林演替过程及方向^[4]。

种群空间分布格局是植物种群的重要属性,是种群生物学特性、种内及种间关系及环境条件等综合作用的体现^[5-6]。研究种群结构及其空间分布格局,对阐明种群特性及其发展趋势、群落稳定性等具有重要意义^[7]。植物种群在群落中的分布格局与空间尺度大小密切相关^[8-9]。点格局分析方法是研究种群空间格局的重要方法^[10-11],可在不同尺度上研究种群空间分布格局,且不受样地大小和种群密度的影响,其结果清晰准确^[12-13],被广泛应用于植物群落空间格局研究中^[14-15]。

祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)是我国特有常绿针叶树种。在祁连山林区,以它为建群种的天然林主要分布在海拔 2 500~3 500 m,伴生树种少,天然更新十分困难^[16]。祁连圆柏作为祁连山林区亚高山暗针叶林带中唯一分布在阳坡或半阳坡上的森林类型,在寒区和旱区水土保持和水源涵养方面起重要的作用,具有其他针叶树种不可替代的生态价值^[17-18]。迄今为止,关于祁连山祁连圆柏天然更新幼苗种群空间分布格局的研究报道很少。因此,本研究主要对祁连山祁连圆柏天然更新幼苗的种群结

构及空间分布格局进行分析研究,旨在了解祁连圆柏种群的分布特征及其发展趋势,为进一步揭示祁连圆柏种群天然更新障碍机制及该群落的保护与植被恢复提供借鉴和参考。

1 研究区概况

研究区位于祁连山自然保护区寺大隆林区的天涝池流域(38°25′18″—38°26′38″N,99°54′00″—99°56′55″E)。海拔 2 600~3 450 m,年平均气温 0.6℃,无霜期 140 d 以下,年均蒸发量 1 005 mm,年降水量 400 mm,且集中在 5—9 月,属典型的温带高寒半干旱气候。祁连圆柏林呈小块状分布在海拔 2 600~3 400 m 的阳坡、半阳坡,乔木成单一,无其他伴生树种。灌木主要有金露梅(*Dasiphora fruticosa*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、高山绣线菊(*Spiraea alpina*)等。该区域土壤类型主要为山地森林灰褐土、山地栗钙土、高山草甸土^[19-20]。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

2021 年 7 月对祁连山天涝池流域祁连圆柏种群集中分布地,沿海拔分别设置 20 m×20 m 的样地 6 个,将每个样地分成 16 个 5 m×5 m 的小样方。每个小样方西南角为坐标原点,X 轴为东西方向,Y 轴为南北方向。测量并记录每株祁连圆柏幼苗及母树相对于坐标原点的 X 轴、Y 轴距离及祁连圆柏的高度、胸(地)径,并记录样地经纬度、海拔等信息(表 1)。因所调查样地灌木植物种类和数量很少,所以该文不考虑灌木植物对祁连圆柏更新幼苗的影响。

表 1 样地基本特征
Table 1 Characteristics of sample plots

样地	经纬度	海拔/m	坡度/(°)	坡位	坡向	平均树高/m	平均胸径/cm	干扰情况
1	38°26′39″N,99°54′00″E	2 600	28.56	下坡	东南坡	5.57	13.72	无
2	38°26′14″N,99°55′10″E	2 800	19.42	中坡	西南坡	6.46	17.18	无
3	38°26′18″N,99°55′39″E	3 000	30.05	下坡	南坡	5.71	13.37	有
4	38°26′02″N,99°55′57″E	3 100	35.23	中坡	南坡	6.02	15.71	少
5	38°25′31″N,99°56′28″E	3 200	29.32	中坡	南坡	6.56	17.69	少
6	38°25′26″N,99°56′54″E	3 400	20.34	上坡	南坡	6.37	22.02	有

2.2 幼苗结构分析

从幼苗的高度结构来分析祁连圆柏天然更新幼苗的结构。依据国家《森林资源连续清查技术规程》(GB/T 38590—2020)评价标准^[21]及黄婷等^[22]对祁连圆柏幼苗高度进行划分,并结合调查样地祁连圆

柏幼苗生长现状,高度小于 50 cm 的祁连圆柏幼苗按 10 cm 一个等级划分,50~100 cm 划分按 30 cm 一个等级划分,大于 110 cm 的划为一个等级,祁连山祁连圆柏更新幼苗高度共划分为 8 个高度级:Ⅰ级≤10 cm,10 cm<Ⅱ级≤20 cm,20 cm<Ⅲ级≤

30 cm, 30 cm < IV 级 ≤ 40 cm, 40 cm < V 级 ≤ 50 cm, 50 < VI 级 ≤ 80, 80 < VII 级 ≤ 110 cm, VIII 级 > 110 cm。分别统计不同海拔样地中每一个高度级祁连圆柏幼苗、幼树的个体株数, 绘制高度级结构图。

2.3 点格局分析

点格局分析采用 Ripley^[10] 提出的 K 函数。

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

式中: A 为样地面积; n 为样方中物种的总数; u_{ij} 为植株 i 和 j 之间的距离; r 表示空间尺度。当 $u_{ij} \leq r$ 时, $I_r(u_{ij}) = 1$; 当 $u_{ij} > r$ 时, $I_r(u_{ij}) = 0$ 。 W_{ij} 表示权重, 用于消除边界效应。

Besag^[23] 修正了的 $L(r)$ 函数, 将公式(1)简化为:

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

式中: 当 $L(r) > 0$, 则种群在尺度 r 下服从聚集分布; 当 $L(r) = 0$, 则种群在尺度 r 下服从随机分布; 当 $L(r) < 0$, 则种群在尺度 r 下服从均匀分布。

2.4 数据处理

利用 SPSS26.0 软件统计分析, 结果以平均值 ± 标准误差表示。采用 Programita 软件进行点格局分析, 选取的空间尺度为 0~10 m, 通过 100 次 Monte-Carlo 随机模拟得到 $L(r)$ 的 99% 置信区间, 并拟合检验计算上下包迹线(envelopes)。 $L(r)$ 如果在上下包迹线之间为随机分布; $L(r)$ 高于上包迹线为聚集分布; $L(r)$ 低于下包迹线为均匀分布^[14]。采用 Origin 软件绘图。

3 结果与分析

3.1 祁连圆柏天然更新幼苗随海拔高度数量分布特征

祁连圆柏幼苗数量随着海拔升高先增大后减少, 差异达到极显著水平(图 1)。其中, 海拔 3 100、3 200 m 样地中的幼苗数量较多, 在 1 m² 的样方尺度上, 幼苗密度分别为 1.53 ± 1.00 株 · m⁻² 和 1.39 ± 0.68 株 · m⁻², 海拔 3 000 m 次之, 为 0.69 ± 0.47 株 · m⁻²; 海拔 2 600 m 幼苗数量最少, 幼苗密度仅为 0.24 ± 0.22 株 · m⁻²。

3.2 祁连圆柏天然更新幼苗种群高度结构

祁连山不同海拔祁连圆柏幼苗高度分布不均匀, 祁连圆柏幼苗主要集中在 I、II 高度级(0.5~20 cm), 分别占幼苗总数量的 54.59%、17.85%(图 2)。各高度级幼苗数量随着海拔高度的上升呈先增加后降低的趋势; 随幼苗高度级增大, 各海拔样地中 III 级以上幼苗数量逐渐减少, III 级以上幼苗分别

占幼苗总数量的 5.86%、3.64%、3.96%、5.33%、3.64% 和 5.12%。海拔 3 100 m 和 3 200 m 样地的幼苗总数及其 I、II 级幼苗数量最多, 其中 I 级幼苗数量分别占其样地幼苗总数的 54.25% 和 54.32%; 而海拔 3 400 m 样地中 III 级以上幼苗仅有 4 株, 占该调查样地幼苗总数的 2.06%。总体看, 祁连山祁连圆柏更新幼苗不能正常发育生长, 导致幼树数量严重不足, 甚至缺失, 种群结构不稳定, 更新种群处于衰退状态。

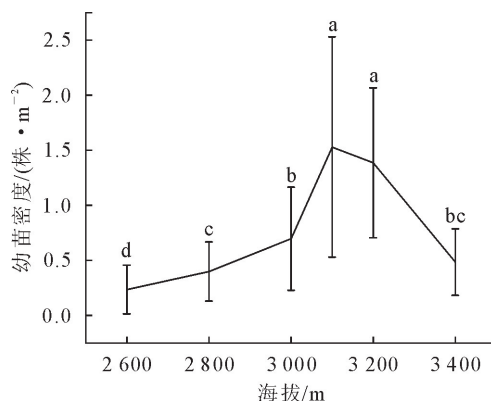


图 1 不同海拔高度祁连圆柏幼苗密度

Fig. 1 The seedling density of *S. przewalskii* at different altitudes

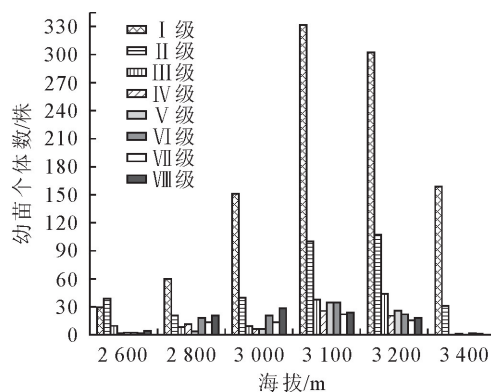


图 2 不同海拔高度祁连圆柏幼苗高度结构

Fig. 2 The seedling height structure at different altitudes

3.3 祁连圆柏天然更新幼苗种群空间点格局分析

海拔 3 100 m 和 3 200 m 样地内祁连圆柏幼苗数量多, 分别为 612 株和 556 株; 海拔 3 000、3 400 m 样地内幼苗数量次之, 分别为 279、213 株; 祁连圆柏自然分布的最低海拔(2 600 m)样地内幼苗数量最少, 仅有 94 株。其幼苗的分布特点大致表现为母树周边密度较大, 在海拔 3 000~3 200 m 样地中表现最为突出(图 3)。祁连圆柏幼苗的数量因母树而异, 在母树周围一定距离其幼苗分布较为密集, 而超出这一距离范围时聚集程度逐渐降低。

祁连圆柏幼苗种群在 0~10 m 尺度下均呈显著的聚集分布, 聚集强度随尺度变大而降低(图 4)。在海拔 2 800 m 样地中, 祁连圆柏幼苗种群在

5.8~6.4 m 及 9.2~10.0 m 尺度下呈随机分布,其他尺度下呈聚集分布。在海拔 3 100 m 样地中,祁连圆柏幼苗种群在 9.8~10.0 m 尺度下呈随机分布,其他尺度下呈聚集分布。

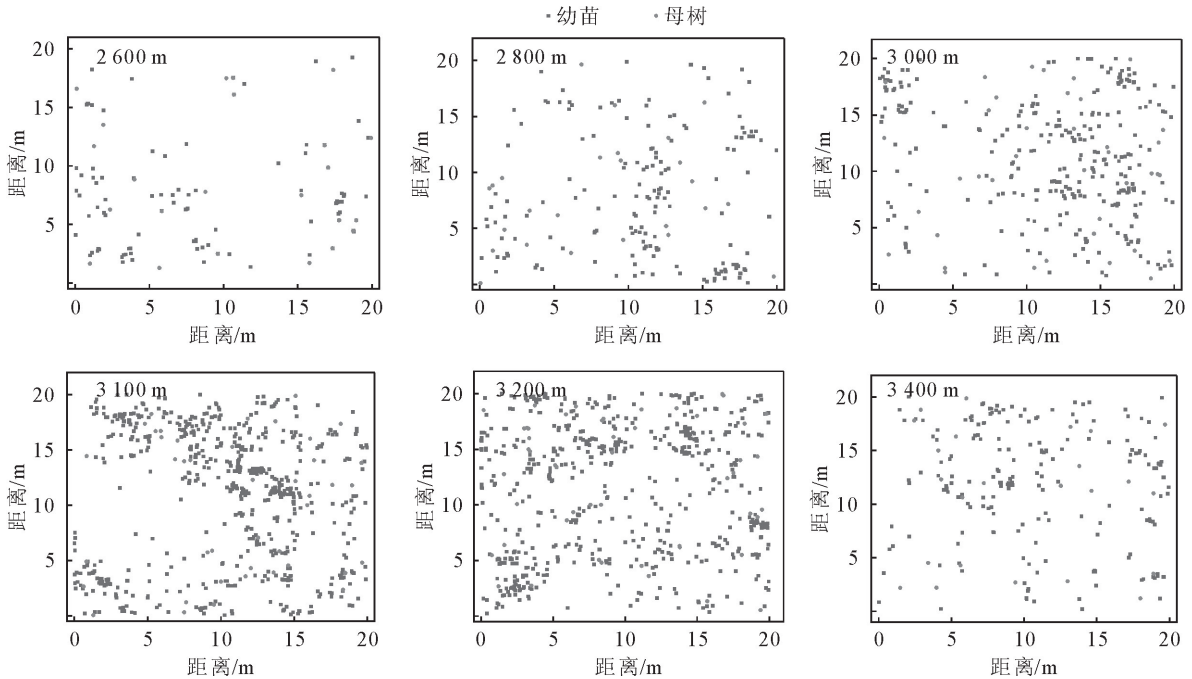


图 3 祁连山不同海拔祁连圆柏种群空间位置

Fig. 3 Spatial location of *S. przewalskii* at different altitudes in the Qilian Mountains

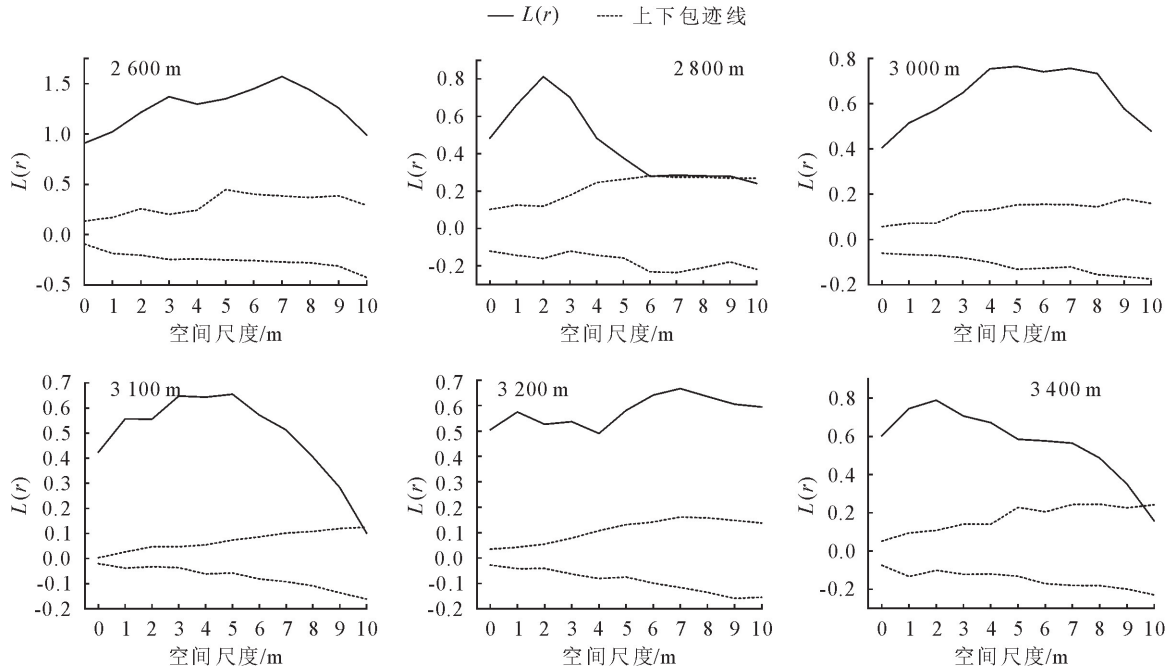


图 4 祁连山不同海拔祁连圆柏幼苗空间分布格局

Fig. 4 Spatial distribution pattern of *S. przewalskii* seedling at different altitudes in the Qilian Mountains

4 结论与讨论

4.1 结论

祁连山祁连圆柏天然更新幼苗数量稀少且不能正常发育生长,幼树严重不足甚至缺失,种群结构不

稳定,属于衰退型。种群中 I、II 级(高度 0.5~20 cm)幼苗所占比例最大,I 级幼苗占总数的 54.59%,但绝大部分未达到 1 m 而死亡。各高度级祁连圆柏幼苗数量随着海拔的上升呈现先增加后降低的趋势,在海拔 3 100 m 和 3 200 m 样方内幼

苗生长状况较好,较低海拔和较高海拔幼苗生长状况较差。祁连山祁连圆柏天然更新幼苗个体的分布格局受空间尺度影响较小,在 0~10 m 空间尺度下,祁连山祁连圆柏幼苗以聚集分布为主要特征,在个别尺度下呈随机分布,这是种群长期适应自然环境的结果。祁连圆柏是祁连山水源涵养林主要建群种之一,具有很高的水源涵养及水土保持价值,因此在祁连山浅山区祁连圆柏退化林分生态修复中,其植被配置格局应以集群配置为主。

4.2 讨论

更新种群的高度级结构是指示更新现状与未来发展潜力的重要的因子^[24]。本研究发现,祁连山祁连圆柏天然更新幼苗稀少,在 1 m² 的样方尺度上,祁连圆柏更新幼苗密度最多仅为 1.53±1.00 株·m⁻²;同时,幼苗高度主要集中 I、II 级(高度 0.5~20 cm),当高度达到 20 cm 以上数量锐减,经过强烈的环境筛选,大部分未达到 50 cm 而死亡。可见,祁连山祁连圆柏更新幼苗不能正常发育生长,幼树数量严重不足,甚至缺失,种群结构不稳定,更新幼苗幼树种群处于衰退状态,这与井赛等^[25]对三江源东部祁连圆柏天然更新的研究结果一致。

祁连山祁连圆柏幼苗数量随着海拔升高先增大后减少,海拔 3 100 m 和 3 200 m 样方内种子萌发及其幼苗生长状况较好,较低海拔和较高海拔幼苗生长状况较差,可能是因为高海拔地区土壤立地条件较差,土层较薄、保水性差,土壤温度较低^[26],植物根系扩散困难^[10],而引起幼苗死亡的主因是土壤含水量较低^[27]。低海拔样地中草本盖度较高,阻碍了种子和土壤层的接触,影响了种子的萌发和幼苗的建植^[28-29]。同时,自然条件下祁连圆柏种子萌发率极低,野外观测实生苗较少,并且定植的幼苗很难正常成长,而造成幼苗大量死亡的原因有待进一步研究。

种群生物学特性、种内及种间关系及环境条件等决定了植物种群的空间分布格局,种群分布格局也因空间尺度大小及个体龄级不同而异^[30-32],不同的分布类型体现出种群对环境不同的响应机制^[5,12],聚集分布是种群内部正向关系的体现,有利于提高幼苗存活率^[12]。本研究表明,祁连圆柏天然更新幼苗个体的分布格局受空间尺度影响较小,在所调查的空间尺度下($r < 20$),各海拔祁连圆柏幼苗的分布格局略有差异,但总体呈现较为显著的聚集分布。因为幼苗生命力脆弱,在生长过程中需要集聚起来抵抗外界不利因素,另外,祁连圆柏天然林为种子繁殖,种子往往散播在母株周围,所以种群会呈现聚集分布,这也是祁连圆柏种群长期适应自然环

境的结果。因此,在祁连山浅山区祁连圆柏退化林分生态修复中,其植被配置格局应以集群配置为主。祁连圆柏幼苗的分布特点大致表现为母树周边密度较大,在海拔 3 000~3 200 m 样地中表现最为突出;祁连圆柏幼苗的数量因母树而异,在母树周围一定距离其幼苗分布较为密集,而超出这一距离范围时聚集程度逐渐降低。原因可能是所调查样地的坡度较大,种子掉落时会沿着坡度滚落一段距离,也可能是祁连圆柏种子通过啮齿类动物进行二次传播,但传播的距离比较短,因而大尺度空间内为随机分布。

参考文献:

- [1] 程瑞梅,沈雅飞,封晓辉,等.森林自然更新研究进展[J].浙江农林大学学报,2018,35(5):955-967.
CHENG R M, SHEN Y F, FENG X H, *et al.* Research review on forests natural regeneration[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, 35(5): 955-967. (in Chinese)
- [2] 朱弘,杨乐,岳春雷,等.杭州午潮山天然次生林木本幼苗组成及其时空分布格局[J].生态学报,2022,42(15):6220-6228.
ZHU H, YANG L, YUE C L, *et al.* Composition and the spatio-temporal distribution pattern of tree seedling in natural secondary forest of Wuchao Mountain, Hangzhou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6220-6228. (in Chinese)
- [3] 贾炜玮,解希涛,姜生伟,等.大兴安岭新林林业局 3 种林分类型天然更新幼苗幼树的空间分布格局[J].应用生态学报,2017,28(9):2813-2822.
- [4] 闫琰,姚杰,张新娜,等.吉林蛟河不同演替阶段针阔混交林木本植物幼苗空间分布与年际动态[J].生态学报,2016,36(23):7644-7654.
- [5] 孙世贤,卫智军,吴新宏,等.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[J].生态学报,2016,36(23):7570-7579.
SUNS X, WEI Z J, WU X H, *et al.* Point pattern and spatial association of primary plant populations in the seasonal regulation of grazing intensity in desert grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7570-7579. (in Chinese)
- [6] 沈志强,卢杰,华敏,等.西藏色季拉山暗针叶林 5 个主要植物种群点格局分析[J].西北林学院学报,2016,31(1):7-14.
SHEN Z Q, LU J, HUA M, *et al.* Point pattern analysis of five main plant populations of dark coniferous forest in the Sejila Mountains, Tibet, China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 7-14. (in Chinese)
- [7] 姚慧芳,卢杰,王超,等.波密岗乡华山松林优势植物空间格局及其关联性[J].西北林学院学报,2021,36(4):110-117.
YAO H F, LU J, WANG C, *et al.* Spatial pattern and correlation of dominant plants in *Pinus armandii* forest in Bomigang Township[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 110-117. (in Chinese)
- [8] 许强,吕金枝,苗艳明,等.翅果油树群落主要物种空间分布格局及其关联性[J].植物学报,2016,51(1):49-57.
- [9] 任毅华,罗大庆,方江平,等.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[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 60-65.
- REN Y H, LUO D Q, FANG J P, *et al.* Spatial pattern of shrub community and its correlation with fallen logs in *Abies georgei* var. *smithii* forests in the Sejila Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 60-65. (in Chinese)
- [10] RIPLEY B D. Modelling spatial pattern[J]. Journal of the Royal statistical Society: Series B, 1977, 39: 17-212.
- [11] DIGGLE P J. Statistical analysis of spatial point patterns[J]. Biometrics, 1983, 32(30): 659-667.
- [12] 贾喆亭, 杨九艳, 孙艳霞, 等. 阿拉善高原珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)种群空间格局[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 119-128.
- JIA Z T, YANG J Y, SUN Y X, *et al.* Spatial distribution pattern of *Salsola passerina* population in Alashan Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 119-128. (in Chinese)
- [13] 郭融, 李英杰, 岳永杰, 等. 库布齐沙漠东缘小叶杨不同发育阶段种群空间格局研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(6): 190-196.
- GUO R, LI Y J, YUE Y J, *et al.* Population spatial pattern of *Populus simonii* at different developmental stages in the east of Hobq Desert[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(6): 190-196. (in Chinese)
- [14] 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): 344-349.
- [15] 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)
- [16] 刘贤德, 王清忠, 孟好军. 祁连山圆柏[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 25.
- [17] 田晓萍, 马力, 占玉芳. 祁连山北坡中段祁连圆柏群落学特征的研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(2): 77-83.
- TIAN X P, MA L, ZHAN Y F. Community characteristics of *Sabina przewalskii* in northern slope of Qilian Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(2): 77-83. (in Chinese)
- [18] 汪有奎, 贾文雄, 刘潮海, 等. 祁连山北坡的生态环境变化[J]. 林业科学, 2012, 48(4): 21-26.
- WANG Y K, JIA W X, LIU C H, *et al.* Ecological environment change in the north slope of the Qilianshan Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(4): 21-26. (in Chinese)
- [19] 李文娟, 黄力平, 赵传燕, 等. 黑河上游天涝池流域典型灌木生态参数研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 1073-1079.
- [20] 赵宇豪, 高俊红, 高婵婵, 等. 黑河天涝池流域典型林分生态水文化学特征[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4636-4645.
- [21] 国家林业和草原局. 森林资源连续清查技术规程: GB/T 38590—2020[M]. 北京: 中国标准出版社, 2020: 38.
- [22] 黄婷, 郝家田, 杜一尘, 等. 青海三江源地区三种天然圆柏林更新特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 297-303.
- HUANG T, HAO J T, DU Y C, *et al.* Regeneration characteristics of three natural *Juniperus* forests in the Three-River Headwater region of Qinghai Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(2): 297-303. (in Chinese)
- [23] BESA J. Contribution to the discussion of Dr. Ripley's paper[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1977, 39: 193-195.
- [24] 石蒙蒙. 长白山次生林云冷杉幼苗幼树空间分布与关联性[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [25] 井赛, 张静, 侯晓巍, 等. 三江源东部祁连圆柏天然更新特征研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(3): 52-58.
- JING S, ZHANG J, HOU X W, *et al.* Natural regeneration characteristics of *Juniperus przewalskii* the forest in the east of three-river resource region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(3): 52-58. (in Chinese)
- [26] 陈迪马. 天山云杉天然更新微生境及其幼苗格局与动态分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2006.
- [27] 舒兰, 刘兆刚, 董灵波. 帽儿山天然次生林内主要木本植物空间格局及更新特点[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1945-1955.
- [28] 李璟, 周朵朵, 陈颂, 等. 关帝山云杉次生林树木更新与土壤养分的空间关联性[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2363-2370.
- LI J, ZHOU D D, CHEN S, *et al.* Spatial associations between tree regeneration and soil nutrient in secondary *Picea* forest in Guandi Mountains, Shanxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2363-2370. (in Chinese)
- [29] 地力夏提·包尔汉, 张绘芳, 朱雅丽, 等. 准格尔盆地梭梭天然更新幼苗空间格局与影响因素[J]. 西部林业科学, 2019, 48(6): 130-134.
- [30] 李月飞, 陈林, 李学斌, 等. 荒漠草原不同土壤条件下猪毛蒿幼苗种群的点格局分析[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6273-6281.
- LI Y F, CHEN L, LI X B, *et al.* Point pattern analysis of an *Artemisia scoparia* seedling population under different soil conditions in a desert steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6273-6281. (in Chinese)
- [31] 闫秀, 窦建德, 黄维, 等. 宁夏珍稀濒危植物半日花种群结构和点格局分析[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3614-3620.
- YAN X, DOU J D, HUANG W, *et al.* Population structure and point pattern analysis of rare and endangered plant *Heli-anthemum soongoricum* in Ningxia, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3614-3620. (in Chinese)
- [32] 沈志强, 卢杰, 华敏, 等. 西藏色季拉山暗针叶林5个主要植物种群点格局分析[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 7-14.
- SHEN Z Q, LU J, HUA M, *et al.* Point pattern analysis of five main plant populations of dark coniferous forest in the Sejila Mountains, Tibet, China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 7-14. (in Chinese)