

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210367

不同林火烈度对大兴安岭兴安落叶松天然林 林木空间分布格局的影响

王 烁¹ 韩大校¹ 王千雪¹ 丛日征¹ 王晓红¹ 杨 光² 王立中³ 张吉利¹

(1. 中国林科院寒温带林业研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;
3. 大兴安岭农林科学研究院, 黑龙江 加格达奇 156000)

摘要:【目的】林木空间分布格局对于评估森林是否需要经营至关重要, 判断林木处于哪种分布状态(聚集分布、随机分布或者均匀分布)是制定合理的森林经营方案的前提。中重度林火会直接导致林木大量死亡, 进而改变林分直径分布特征及林木空间分布格局。本文主要研究了达尔滨湖国家森林公园林火发生一年后, 不同火烧烈度下兴安落叶松林的林分状态。【方法】通过比较林分直径分布、不同类别树木空间格局及其关联性, 分析林火对林木空间格局的影响。【结果】火烧烈度高的区域, 小径级林木存活数量少, 小死树的聚集半径相对小。与未过火样地相比, 发生火烧的区域, 中活树均出现中等尺度的聚集。中度火烧样地内的中树和小树存在关联性, 中死树与周围的小死树在 4~8 m 范围内呈正相关, 中活树与周围的小死树在 8~20 m 范围内呈负相关。【结论】火烧烈度会影响树木的空间格局以及不同大小不同存活状态树木之间的关联性。针对不同火烧烈度下林木的聚集尺度选择适合的抚育措施对火后森林恢复具有重要意义。本研究可为兴安落叶松林的火后恢复提供科学依据。

关键词: 空间分布格局; 兴安落叶松; 火烈度; *O*-ring 统计

中图分类号: S758.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2023)02-0087-09

引文格式: 王烁, 韩大校, 王千雪, 等. 不同林火烈度对大兴安岭兴安落叶松天然林林木空间分布格局的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(2): 87-95. Wang Shuo, Han Daxiao, Wang Qianxue, et al. Effects of different forest fire intensities on the spatial distribution pattern of natural *Larix gmelinii* forests in the Great Xing'an Mountains of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(2): 87-95.

Effects of different forest fire intensities on the spatial distribution pattern of natural *Larix gmelinii* forests in the Great Xing'an Mountains of northeastern China

Wang Shuo¹ Han Daxiao¹ Wang Qianxue¹ Cong Rizheng¹ Wang Xiaohong¹
Yang Guang² Wang Lizhong³ Zhang Jili¹

(1. Research Center of Cold Temperate Forestry, Chinese Academy of Forestry, Harbin 150086, Heilongjiang, China;

2. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

3. Research Institute of Agriculture and Forestry of Daxing'anling Forestry Group, Jiagedaqui 156000, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] The spatial distribution pattern of trees is important for evaluating whether the forest needs to be managed, and judging which distribution state (aggregated distribution, random distribution, or uniform distribution) of trees is a prerequisite for developing suitable management plans. Moderate and high severity forest fires can kill a large number of trees, and then change the distribution characteristics of stand

收稿日期: 2021-09-15 修回日期: 2022-03-02

基金项目: 中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2019MA007), 国家自然科学基金青年基金项目(31600524)。

第一作者: 王烁, 助理研究员。主要研究方向: 森林经理学。Email: 2529853280@qq.com 地址: 150086 黑龙江省哈尔滨市南岗区学府路 374 号中国林科院寒温带林业研究中心。

责任作者: 张吉利, 副研究员。主要研究方向: 森林生态学。Email: xtaktj@126.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

diameter and the spatial distribution pattern of forest trees. We investigated natural *Larix gmelinii* forests in the Da'erbinhu National Forest Park, Inner Mongolia of northern China one year following a mixed-severity wildfire. [Method] By comparing the distribution of stand diameter, the spatial distribution pattern of different types of trees and their association, we analyzed the influence of fire on the spatial distribution pattern of trees. [Result] The results showed that in high severity areas, the number of small living trees and the gathering radius of small dead trees were relatively small. Compared with the unburned sample plots, the medium living trees presented a clustered distribution at the medium scale in the burned areas. The middle trees and the small trees were associated in the moderate severity burned sample plots. The medium dead trees and the surrounding small dead trees were positively associated within a radius of 4 to 8 m, while the medium living trees and the surrounding small dead trees were negatively associated within a radius of 8 to 20 m. [Conclusion] The spatial pattern of trees and the association between trees of different sizes and different status are affected by the fire severity. Choosing suitable afforestation measures according to the aggregation scale of trees for different fire severities is of great significance to forest restoration after a fire. This study can provide a scientific basis for the protection and rational use of nature larch forests in the Great Xing'an Mountains of northeastern China.

Key words: spatial distribution pattern; *Larix gmelinii*; fire severity; O-ring statistics

林木空间分布格局是林木个体的空间分布方式,是林木个体生物学特性、种内与种间、林木与环境之间综合作用的结果^[1-2]。作为林木种群的重要特征,它不仅反映了森林的演替阶段和动态结构,还能间接指示森林的生物多样性特征和生态功能^[3]。林火可被用于清除林分中不健康的个体^[4]。研究发现,轻度的火烧可以防止森林变得过于茂密^[5];中度火烧有利于耐荫树种生存^[4];混合烈度火烧对于改善林分结构,降低未来重度森林火灾发生的可能性具有重要作用^[6]。林火的发生直接导致树木死亡,从而改变林木空间格局^[7]。根据对林火发生后林木空间格局的分析,在森林经营的实践工作中确定适当的营林措施以保证火后森林结构的稳定性仍然是一个挑战。

点格局分析是林木空间分布格局研究中常用的研究方法,O-ring 函数由于能够有效地消除 Ripley K 函数的积累效应,所以应用广泛。例如李艳丽等^[8]利用 O-ring 函数研究了蒙古栎-糠椴天然混交林的空间格局问题。Zhang 等^[9]利用 O-ring 函数分析了大兴安岭地区三种林分自然更新过程中的空间格局问题。然而,只是通过树木之间的距离进行竞争作用的检测不足以分析林分结构的细微变化,而标记点格局分析能够将反映树木生长情况的一些附加信息(如胸径、树高、冠幅、生长量和存活状态等),与个体间的距离相结合,来分析林分的空间格局,使林木空间结构研究更加精细化^[10-11]。

大兴安岭林区森林火灾频发,兴安落叶松(*Larix gmelinii*)作为建群种和优势种长期受到林火的干扰。从 1965 年到 2010 年,林火烧毁了该地区超过 180 万 hm^2 的兴安落叶松林,占过火森林总面积的

51%^[12]。虽然兴安落叶松幼苗并不耐火,但是成熟的个体树皮较厚、自然整枝能力较强,因此具有很强的耐火性^[13]。兴安落叶松的种子萌发力强,浅层分布的根更使得兴安落叶松能够生长在排水良好的沼泽地以及多年冻土之上的湿谷底区域^[13]。一般认为在该地区自然发生的周期性野火对兴安落叶松树种具有积极作用^[14]。但是,近几十年来,在气候变化和人类活动的双重干扰下,林火发生的时空动态发生了极大的变化。积极的预防扑救策略使兴安落叶松林的火间隔时间从过去的 30 年延长到 270 年,累积的可燃物和高密度的林分增加了重特大森林火灾发生的风险,并且降低了生态系统的恢复能力^[15-17]。

本研究以大兴安岭地区兴安落叶松林为研究对象,利用 O-ring 点格局分析方法,采用胸径和存活状态作为标记属性,分析不同火烧烈度下,不同大小同种存活状态以及同种大小不同存活状态林木的空间分布格局及其关联性,为兴安落叶松林的火后恢复提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国内蒙古自治区达尔滨湖国家森林公园(49°32'N, 123°19'E)(图 1),地处大兴安岭东南部,属于低山区,地势平坦,几乎没有起伏,海拔 420 ~ 510 m,平均坡度 10° ~ 12°^[18]。该地区为寒温带大陆性季风气候区,冬季漫长而寒冷,夏季短暂而温暖。年平均气温约为 -1.1 °C,无霜期约为 120 d。年降水量在 400 ~ 500 mm 之间,集中在 6—8 月。土壤主要为棕色针叶林土、暗棕壤等^[19]。该地区属



图1 达尔滨湖国家森林公园地理位置

Fig. 1 Geographic location of Da'erbinhu National Forest Park

于天然次生林,在相对寒冷的气候条件下,物种多样性和树种组成相对单一和简单。主要树种是兴安落叶松,其他树种主要包括蒙古栎(*Quercus mongolica*),白桦(*Betula platyphylla*)和黑桦(*Betula dahurica*)^[19]。

1.2 林火特性

2017年5月2日至5月5日,在达尔滨湖国家森林公园发生了一场森林大火,森林过火面积约8 200 hm²,直到冻雨来临才熄灭(2017年5月5日)。在此之前,该地区至少有15年未发生森林火灾,也没有进行森林经营活动。5月3日,最近的远程自动气象站的最高气温记录为28℃,白天平均相对湿度为20%,平均风速为10 m/s(主要是西南偏南),阵风风速约15 m/s。这场混合烈度的森林火灾在景观上造成了不同烈度的过火斑块,本文随机选择了其中的代表斑块进行研究。

1.3 数据收集

树木死亡率被广泛用作衡量针叶林火烈度的指标^[20]。根据样地中树木死亡率的百分比,火烈度可分为3个等级,即轻度(树木死亡率≤40%),中度(40%<树木死亡率≤60%)和重度(树木死亡率>60%)。2018年5月,在每种火烧烈度的兴安落叶松纯林中随机选取3个正方形样地(每个50 m×50 m),共9个,作为火烧样地。在附近未燃烧的兴安落叶松纯林中,随机选择立地条件和林分特征与火烧样地均相似的3个样地(每个50 m×50 m)作为对照样地。为了避免边缘效应对林木空间格局产生影响,在每个样地均设置5 m的缓冲区,调查并记录每个样地中核心区域(即40 m×40 m)范围内所有胸

径≥5 cm的林木的树种、存活状态、胸径、树高、冠幅、位置等数据。由于该地区树种组成相对简单,以最小取样面积和最小取样大小进行分析,这些调查样地可以代表研究区域内不同火烈度的总体情况^[21]。

1.4 数据分析

1.4.1 林分株数统计与直径结构

为了从树木的存活状态和大小两方面分析林分的结构,本研究将树木按照活树与死树进行分组,并且按照胸径的大小,将树木划分为小树(5 cm≤DBH<15 cm)、中树(15 cm≤DBH<25 cm)和大树(DBH≥25 cm)^[22-23],分别统计未火烧样地、轻度火烧样地、中度火烧样地和重度火烧样地中这6类树木(小活树、中活树、大活树、小死树、中死树、大死树)的数量和所占比例,并绘制林分直径分布图,分析林分的直径结构。

1.4.2 空间点格局分析

点格局分析是将单个树木视为二维空间中的一个点,分析其空间特征。Ripley's K函数是植被空间点格局分析中最常用的方法,但其存在明显的尺度累积效应,即大尺度格局分析易受小尺度累积效应的影响^[24]。为此,Wiegand等^[25]通过用圆环来代替Ripley's K函数中圆的方法提出了O-ring统计,该方法因分离了特定距离的等级,进而可有效消除Ripley's K函数中尺度的累积效应。

O-ring函数分为单变量O-ring函数和双变量O-ring函数,单变量O-ring函数用于分析单个对象的空间分布格局,双变量O-ring函数用于分析两个对象间的空间关联性,具体计算公式如下^[26]:

$$Q_{12}^w(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} \text{Point}_2(R_{1,i}^w(t))}{\sum_{i=1}^{n_i} \text{Area}(R_{1,i}^w(t))} \quad (1)$$

$$\text{Point}_2(R_{1,i}^w(t)) = \sum_x \sum_y S(x,y) P_2(x,y) I_i^w(x_i, y_i, x, y) \quad (2)$$

$$\text{Area}(R_{1,i}^w(t)) = z^2 \sum_x \sum_y S(x,y) P_2(x,y) I_i^w(x_i, y_i, x, y) \quad (3)$$

$$I_i^w(x_i, y_i, x, y) = \begin{cases} 1, & t - w/2 \leq \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \leq t + w/2 \\ 0, & \end{cases} \quad (4)$$

式中: $R_{1,i}^w(t)$ 代表以 i 为圆心、 t 为半径、 w 为宽度的圆环; $\text{Point}_2(X)$ 为研究区域内格局 2 范围内点的数目; $\text{Area}(X)$ 为研究区域面积; (x_i, y_i) 为格局 1 中点坐标值; $P_2(x_i, y_i)$ 为分布在单元格内格局 2 的点数目; $I_i^w(x_i, y_i, x, y)$ 是随目标对象变化而变化的变量; z^2 是一个单元格的面积; $S(x, y)$ 为二分类变量, 满足如下条件:

$$S(x, y) = \begin{cases} 0, & (x, y) \in X \\ 1, & (x, y) \notin X \end{cases} \quad (5)$$

本研究将运用 O -ring 统计中的单变量和双变量点格局分析方法对不同火烧烈度样地中树木的空间格局进行研究。单变量 O -ring 函数用于研究不同火烧烈度样地内 6 种类别(小活树、中活树、大活树、小死树、中死树、大死树)树木的空间格局情况, 使用完全空间随机零假设, 空间尺度采用 $0 \sim 40 \text{ m}$, 199 次 Monte Carlo 模拟得到 99% 的置信区间。若 $O(r)$ 值高于置信区间上限, 表明树木处于聚集分布的状态; 若 $O(r)$ 值在上下限之间, 表明树木处于随机分布的状态; 若 $O(r)$ 值低于置信区间下限, 表明树木处于均匀分布的状态。双变量 O -ring 函数用于研究不同存活状态下, 小树、中树和大树之间的关联性。将 6 种类别树木两两组合, 共得到 12 种组合结果, 分别为: 大活树与周围的中活树、大活树与周围的小活树、中活树与周围的小活树、大活树与周围的中死树、大活树与周围的小死树、中活树与周围的小死树、大死树与周围的中活树、大死树与周围的小活树、中死树与周围的小活树、大死树与周围的中死树、大死树与周围的小死树、中死树与周围的小死树。采用随机标签零假设模型, 空间尺度采用 $0 \sim 40 \text{ m}$, 199 次 Monte Carlo 模拟得到 99% 的置信区间。若 $O(r)$ 值高于置信区间上限, 表明两种状态的树木成正相关; 若 $O(r)$ 值在上下限之间, 表明两种状态的树木不相关; 若 $O(r)$ 值低于置信区间下限, 表明两种状态的树木成负相关^[27]。整个分析过程使用 Programita 软件完成^[25]。

2 结果与分析

2.1 林分株数统计与直径结构

在未火烧样地中, 平均有活树 148 棵(样地内均为活树), 其中 50 棵小活树(占树木总数的 34.09%)、80 棵中活树(占树木总数的 53.79%)、18 棵大活树(占树木总数的 12.11%)。在轻度火烧样地中, 平均有活树 123 棵(占树木总数的 82.65%), 其中 42 棵小活树(占树木总数的 28.49%)、51 棵中活树(占树木总数的 34.44%)、29 棵大活树(占树木总数的 19.71%); 平均有死树 26 棵(占树木总数的 17.34%), 其中 24 棵小死树(占树木总数的 16.46%)、1 棵中死树(占树木总数的 0.88%)、没有大死树。在中度火烧样地中, 平均有活树 85 棵(占树木总数的 48.88%), 其中 17 棵小活树(占树木总数的 10.09%)、56 棵中活树(占树木总数的 32.32%)、11 棵大活树(占树木总数的 6.46%); 平均有死树 89 棵(占树木总数的 51.11%), 其中 76 棵小死树(占树木总数的 43.74%)、11 棵中死树(占树木总数的 6.44%)、1 棵大死树(占树木总数的 0.93%)。在重度火烧样地中, 平均有活树 10 棵(占树木总数的 6.12%), 其中 3 棵小活树(占树木总数的 1.71%)、5 棵中活树(占树木总数的 2.86%)、2 棵大活树(占树木总数的 1.53%); 平均有死树 165 棵(占树木总数的 93.87%), 其中 108 棵小死树(占树木总数的 61.41%)、39 棵中死树(占树木总数的 22.03%)、18 棵大死树(占树木总数的 10.43%)(表 1)。

将不同火烧烈度样地内的树木按照 2 cm 一个径阶进行整化径阶, 统计每个径阶内树木的数量, 绘制林分直径分布图(图 2)。从图 2a 中可以看出, 在未发生火烧的样地, 林分直径分布接近正态分布, 平均胸径 17.9 cm(图 2a 中蓝线)。在轻度火烧样地(图 2b), 活树的直径分布同样接近正态分布, 平均胸径 18.8 cm(图 2b 中蓝线), 而死树主要集中在小树区域, 平均胸径只有 9.3 cm(图 2b 中红线)。在中度火烧样地(图 2c), 活树的直径分布接近正态分布, 平均胸径 18.7 cm(图 2c 中蓝线), 死树的直径分布接近倒 J 型分布, 平均胸径 9.8 cm(图 2c 中红线)。在重度火烧样地(图 2d), 由于存活树木数量较少, 不能明显看出其直径结构特征, 但是平均胸径的值较轻度火烧和轻度火烧明显增加, 其值为 22.5 cm(图 2d 中蓝线), 死树的直径分布接近倒 J 型分布, 平均胸径的值同样增加明显, 其值为 13.9 cm(图 2d 中红线)。

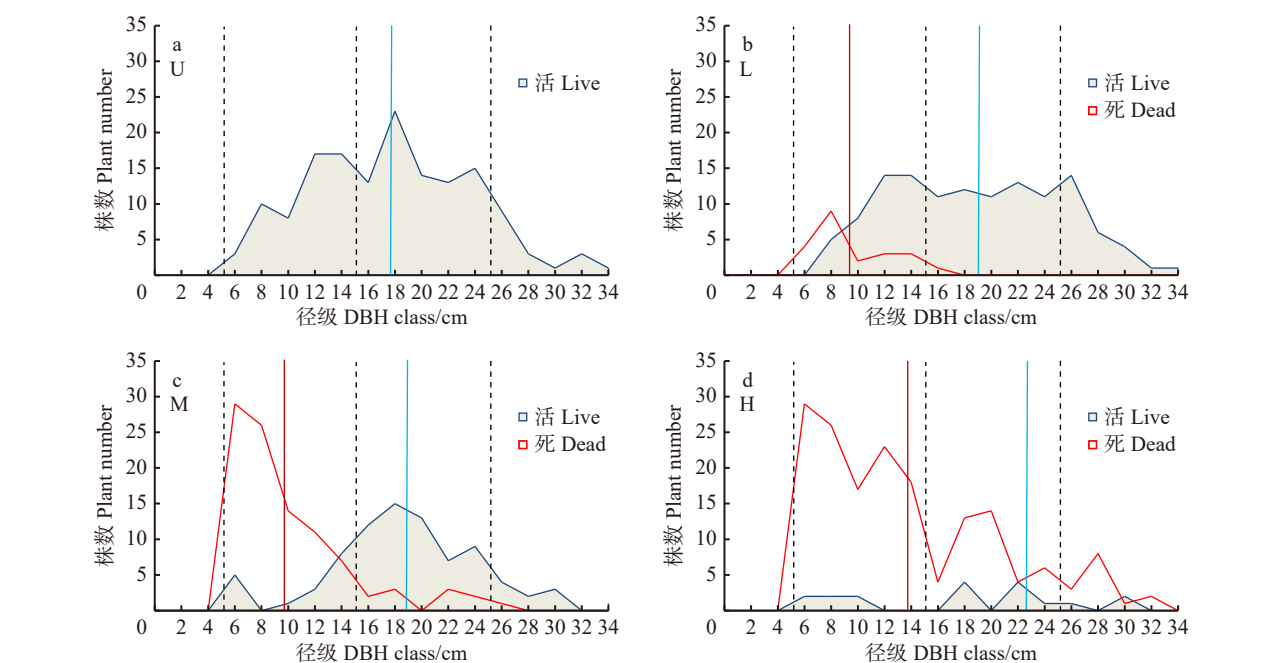
2.2 树木空间格局

2.2.1 不同类别树木空间格局

未火烧、轻度火烧、中度火烧和重度火烧样地

表 1 不同火烧烈度样地内不同状态和大小的树木数量

Tab. 1 Number of trees by status and size in different fire severity sample plots		未火烧 Unburned		轻度火烧 Low severity burned		中度火烧 Moderately burned		重度火烧 Severely burned	
状态 Status	大小 Size	树木数量 Number of trees	占比 Proportion/%	树木数量 Number of trees	占比 Proportion/%	树木数量 Number of trees	占比 Proportion/%	树木数量 Number of trees	占比 Proportion/%
活 Live	树木总量 All trees	148.00 ± 3.29	100	149.00 ± 7.78	100	175.00 ± 7.87	100	176.00 ± 9.97	100
	活树总量 Total live trees	148.00 ± 3.29	100	123.00 ± 3.74	82.65 ± 2.16	85.00 ± 4.49	48.88 ± 3.76	10.00 ± 4.49	6.12 ± 2.59
	小树 Small tree	50.00 ± 2.49	34.09 ± 1.68	42.00 ± 6.79	28.49 ± 3.08	17.00 ± 1.24	10.09 ± 0.56	3.00 ± 0.81	1.71 ± 0.48
	中树 Medium tree	80.00 ± 3.26	53.79 ± 1.29	51.00 ± 4.54	34.44 ± 4.53	56.00 ± 3.39	32.32 ± 3.19	5.00 ± 2.44	2.86 ± 1.39
	大树 Large tree	18.00 ± 0.81	12.11 ± 0.61	29.00 ± 3.29	19.71 ± 2.32	11.00 ± 1.69	6.46 ± 0.85	2.00 ± 1.24	1.53 ± 0.72
	死树总量 Total dead trees			26.00 ± 4.54	17.34 ± 2.16	89.00 ± 9.84	51.11 ± 3.76	165.00 ± 12.39	93.87 ± 2.59
死 Dead	小树 Small tree			24.00 ± 4.11	16.46 ± 1.94	76.00 ± 7.71	43.74 ± 3.22	108.00 ± 6.94	61.41 ± 0.91
	中树 Medium tree			1.00 ± 0.47	0.88 ± 0.26	11.00 ± 1.88	6.44 ± 0.76	39.00 ± 4.89	22.03 ± 1.56
	大树 Large tree			0	0	1.00 ± 0.94	0.93 ± 0.48	18.00 ± 1.69	10.43 ± 1.12



U.未火烧; L.轻度火烧; M.中度火烧; H.重度火烧。虚线用于划分小树、中树和大树所在区域; 蓝线代表样地中活树的平均胸径; 红线代表样地中死树的平均胸径。U, unburned; L, low fire severity; M, moderate fire severity; H, high fire severity. The dotted lines are used to divide small trees, medium trees and large trees. The blue lines represent the mean DBH of live trees in the sample plot. The red lines represent the mean DBH of dead trees in the sample plot.

图 2 不同火烧烈度下林分的直径分布
Fig. 2 Stand diameter distribution under different fire severities

内 6 种类别(小活树、中活树、大活树、小死树、中死树、大死树)树木的空间格局分析结果如表 2 所示。由于未火烧样地内的大活树,轻度火烧样地内的中死树和大死树,中度火烧样地内的小活树、大活树、中死树、大死树和重度火烧样地内的小活树、中活树、大活树、大死树均不足 20 株,低于点格局分析的最低样本量要求^[28],所以在研究过程中不对这些类别树木的空间格局进行分析。由表 2 可知,未火烧样地内的小活树、中活树,轻度火烧样地内的小活树、大活树和重度火烧样地内的中死树在研究尺度

表 2 不同火烧烈度样地内不同类别树木的空间分布格局

Tab. 2 Spatial distribution pattern of different types of trees in different fire severity sample plots

类型 Type	尺度 Scale/m									
	0~4	4~8	8~12	12~16	16~20	20~24	24~28	28~32	32~36	36~40
未火烧-小活树 Unburned-small live trees	r	r	r	r	r	r(-)	r(+)	r	r	r
未火烧-中活树 Unburned-medium live trees	r(-)	r(-)	+(r)	r	r	r(+)	r	r	r	r(-)
轻度火烧-小活树 Low severity-small live trees	r	r	r	r	r	r(-)	r	r(+)	r	r
轻度火烧-中活树 Low severity-medium live trees	r	r(+)	r	+(r)	r	r(+)	r	r(-)	r	r(-)
轻度火烧-大活树 Low severity-large live trees	r	r	r	r	r(+)	r	r	r(+)	r	r
轻度火烧-小死树 Low severity-small dead trees	r	r	+(r)	r	r	r	r	r	r(+)	r
中度火烧-中活树 Moderate severity-medium live trees	r	r	r	+	+(r)	r	r(+)	r	r(+)	r(+)
中度火烧-小死树 Moderate severity-small dead trees	r	+(r)	r	r(+)	r	r(+)	r	r(+)	r	r
重度火烧-小死树 High severity-small dead trees	+(r)	r	r	r	r(+)	r	r(-)	r	r	r
重度火烧-中死树 High severity-medium dead trees	r	r	r	r	r	r(-)	r(+)	r	r	r

注: +代表聚集分布, -代表均匀分布, r代表随机分布, -(r)为均匀分布多于随机分布; r(-)表示随机分布多于均匀分布, +(r)、(r)+同理。Notes: + stands for clustering distribution, - for regular distribution, r for random distribution, -(r) for more regular distribution than random distribution, r(-) for more random distribution than regular distribution, the same as +(r) and (r)+.

上均以随机分布为主。轻度火烧样地内的中活树在 0~12 m 尺度上以随机分布为主, 在 12~16 m 尺度上出现明显聚集, 在 16 m 以上的尺度又回归随机分布。轻度火烧样地内的小死树在 0~8 m 尺度上均为随机分布, 在 8~12 m 尺度上出现明显聚集, 在 12 m 以上的尺度又回归随机分布。中度火烧样地内的中活树在 0~12 m 尺度上均为随机分布, 在 12~20 m 尺度上出现明显聚集, 在 20 m 以上的尺度又回归随机分布。中度火烧样地内的小死树在 0~4 m 尺度上为随机分布, 在 4~8 m 尺度上出现聚集, 在 8 m 以上的尺度又回归随机分布。重度火烧样地内的小死树在 0~4 m 尺度上为聚集分布, 在 4 m 以上的尺度主要是随机分布。为了便于观察, 在表 2 中已将出现聚集分布的区域突出显示。

2.2.2 不同类别树木的关联性

未火烧、轻度火烧、中度火烧和重度火烧样地内 6 种类别(小活树、中活树、大活树、小死树、中死树、大死树)树木的关联性分析结果如表 3 所示。在表中仅列出了数据量满足点格局分析样本量要求的分析结果。从表 3 中可知, 不同火烧烈度样地内不同类别树木之间整体呈不相关的状态, 只有 2 种类型在个别尺度上呈正相关或负相关的关联性, 具体如下: 在中度火烧样地内, 中活树与周围的小死树在 8~20 m 尺度范围内呈负相关; 中死树与周围的小死树在 4~8 m 尺度范围内呈正相关。为了便于

观察, 在表 3 中已将出现关联性的区域突出显示。

3 讨 论

3.1 不同火烧烈度下林木直径的变化

在不同的火烧烈度下, 林分整体的直径分布趋势差异不大, 主要区别在数量的变化上。在未发生火烧样地, 林分中的树木均处于存活状态, 直径分布接近正态分布, 说明林分正处于稳定的状态, 树木主要集中在 16~20 cm 径阶区域, 一个径阶最多有 20 株树。在轻度和中度火烧样地, 存活树木直径分布依然接近正态分布, 但是径阶对应株数的最大值明显减少, 最多只有 15 株, 说明林火的发生可以有效减少林木数量。这与 Yu 等^[29]在林火对内蒙古呼伦贝尔地区沙地松林空间格局的影响研究中结论较一致。各个过火样地中, 死树的直径分布均接近倒 J 型分布, 主要集中在小树区域, 并且火烧烈度越高, 死亡小树的数量越多, 径阶对应株数的最大值越高, 这说明, 相比于大树, 小树更容易燃烧。兴安落叶松的耐火性通常随年龄和胸径的增加而增加^[30], 这是因为小树的树皮很薄, 树冠离地面很近, 在地表火发生时非常容易燃烧。而大树具有较厚的树皮和足够高的树冠, 这些耐火特性使得其更容易抵抗地表火的侵袭, 增加生存机会^[31]。本文的结果与加利福尼亚州的针叶树混交林, 美国的黄松林和墨西哥的杰弗里松林中得到的研究结果一致^[5,31-32]。

表 3 不同火烧烈度样地内不同类别树木的关联性

Tab. 3 Association of different types of trees in different fire severity sample plots

类型 Type	尺度 Scale/m									
	0 ~ 4	4 ~ 8	8 ~ 12	12 ~ 16	16 ~ 20	20 ~ 24	24 ~ 28	28 ~ 32	32 ~ 36	36 ~ 40
未火烧-大活树与周围的中活树 Unburned-medium live trees around large live trees	r	r	r	r	r	r	r(+)	r(+)	r	r(+)
未火烧-大活树与周围的小活树 Unburned-small live trees around large live trees	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
未火烧-中活树与周围的小活树 Unburned-small live trees around medium live trees	r	r	r	r(-)	r	r(-)	r	r	r(+)	r
轻度火烧-大活树与周围的中活树 Low severity-medium live trees around large live trees	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
轻度火烧-大活树与周围的小活树 Low severity-small live trees around large live trees	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
轻度火烧-大活树与周围的小死树 Low severity-small dead trees around large live trees	r	r	r	r(-)	r	r	r	r	r	r
轻度火烧-中活树与周围的小活树 Low severity-small live trees around medium live trees	r	r	r(+)	r	r(+)	r	r(+)	r	r	r
轻度火烧-中活树与周围的小死树 Low severity-small dead trees around medium live trees	r	r	r	r	r	r(-)	r	r	r	r
中度火烧-大活树与周围的中活树 Moderate severity-medium live trees around large live trees	r	r(+)	r	r	r(-)	r	r	r	r	r
中度火烧-大活树与周围的小死树 Moderate severity-small dead trees around large live trees	r	r	r(+)	r	r	r(+)	r(+)	r	r(-)	r(-)
中度火烧-中活树与周围的小活树 Moderate severity-small live trees around medium live trees	r(+)	r	r	r	r	r	r	r	r	r(+)
中度火烧-中活树与周围的小死树 Moderate severity-small dead trees around medium live trees	r(-)	r(-)	-	-	-	r(-)	r	r(-)	r(-)	r
中度火烧-中死树与周围的小活树 Moderate severity-small live trees around medium dead trees	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
中度火烧-中死树与周围的小死树 Moderate severity-small dead trees around medium dead trees	r	+	r	r	r	r(+)	r	r	r	r
重度火烧-大活树与周围的小死树 High severity-small dead trees around large living trees	r	r	r	r(-)	r	r	r	r(-)	r	r
重度火烧-大死树与周围的中死树 High severity-medium dead trees around large dead trees	r	r	r	r(+)	r	r	r	r(+)	r	r
重度火烧-大死树与周围的小死树 High severity-small dead trees around large dead trees	r	r(-)	r	r	r	r	r	r	r	r
重度火烧-中活树与周围的小死树 High severity-small dead trees around medium live trees	r	r(-)	r(-)	r	r	r	r(+)	r	r	r
重度火烧-中死树与周围的小活树 High severity-small live trees around medium dead trees	r	r(+)	r	r	r	r	r	r	r	r(+)
重度火烧-中死树与周围的小死树 High severity-small dead trees around medium dead trees	r(+)	r	r	r(-)	r	r(-)	r	r	r	r

注: +代表正相关, -代表负相关, r 代表不相关, -(r)表示负相关多于不相关; r(-)表示不相关多于负相关, +(r)、(r)+同理。Notes: + represents positive association, - represents negative association, r represents non-association, -(r) represents more negative association than non-association, and r(-) represents more non-association than negative association, the same as +(r) and (r)+.

3.2 不同类别树木空间格局的变化

未火烧样地中的树木在所有尺度上均呈现随机分布,而过火样地中的树木在不同尺度上呈现出不同的分布格局。轻度火烧、中度火烧和重度火烧样地中的小死树,在小尺度范围内均出现聚集分布,聚集尺度分别在 8 ~ 12 m、4 ~ 8 m 和 0 ~ 4 m,反映出随着聚集尺度降低,火烧烈度逐渐增加的趋势,这可能是因为小树聚集的地方林分密度高,在地表火发生时,林火在林分密度高的区域传播更快,因为那里积累了更多的可燃物^[29,33],所以更容易发生高烈度火烧。轻度火烧和中度火烧样地中的中活树在 12 ~ 16 m 尺度范围内聚集分布,这可能是因为未火烧样

地中的树木基本处于随机分布,而林火的发生导致小树出现聚集性死亡,小树死亡后林分出现间隙,所以存活树木在中等尺度呈现聚集分布,这与前人在北美松林研究中得出的过火后树木大多聚集分布类似^[34]。

3.3 不同类别树木的关联性

在未火烧、轻度火烧和重度火烧样地中,不同状态大树、中树和小树之间并没有表现出关联性,而在中度火烧样地中,中死树与周围的小死树在 4 ~ 8 m 范围内呈正相关,中活树与周围的小死树在 8 ~ 20 m 范围内呈负相关,说明小树的分布格局对中树的存活状态影响较大。由于密集的小树会产生大量的可

燃物^[33],因此那些周围有小树聚集的中树会因为周围可燃物的累积而死亡,而那些周围没有小树聚集的中树会有更大的几率存活^[32]。

3.4 火后森林抚育建议

在进行火后森林抚育中可依据聚集尺度大小制定相应的抚育措施,例如,在存活林木分布相对聚集的中低度火烧区域进行间伐,以减少林木聚集和可燃物的积累,在存活林木分布相对稀疏的高烈度火烧区域进行补植补造,从而增加林分的稳定性。与此同时,在抚育过程中还应该考虑不同类别树木之间的关联性,例如,在存活中树周围不要补植过多的小树,造成潜在的可燃物积累,从而降低中树对未来可能发生的林火的抵抗力。

4 结 论

本研究利用点格局空间结构的分析方法,对达尔滨湖国家森林公园不同火烧烈度下兴安落叶松林内的不同类别树木的空间格局及其关联性进行研究。结果表明,火烧烈度高的区域,小径级林木存活数量少,小死树的聚集半径相对小。与未过火样地相比,发生火烧的区域,中活树均出现中等尺度的聚集。中度火烧样地内的中树和小树存在关联性,中死树与周围的小死树在4~8 m范围内呈正相关,中活树与周围的小死树在8~20 m范围内呈负相关。综上所述,火烧烈度会影响树木的空间格局以及不同大小不同存活状态树木之间的关联性。针对不同火烧烈度下林木的聚集尺度选择适合的抚育措施对火后森林恢复具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 杨慧, 姜安如, 高益军, 等. 北京东灵山地区白桦种群生活史特征与空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 272-282.
Yang H, Lou A R, Gao Y J, et al. Life history characteristics and spatial distribution of the *Betula platyphylla* population in the Dongling Mountain Region, Beijing, China[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(2): 272-282.
- [2] 马芳, 王顺忠, 冯金朝, 等. 北京东灵山优势种群树木死亡对空间格局与生境的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7669-7678.
Ma F, Wang S Z, Feng J Z, et al. The study of the effect of tree death on spatial pattern and habitat associations in dominant populations of Dongling Mountains in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7669-7678.
- [3] Zenner E K, Hibbs D E. A new method for modeling the heterogeneity of forest structure[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 129(1-3): 75-87.
- [4] Lydersen J M, Collins B M, Miller J D, et al. Relating fire-caused change in forest structure to remotely sensed estimates of fire severity[J]. Fire Ecology, 2016, 12(3): 99-116.
- [5] Stevens C S, Sieg C H, Hunter M E. Ten years after wildfires: how does varying tree mortality impact fire hazard and forest resiliency[J]. Forest Ecology and Management, 2012, 267: 199-208.
- [6] Sparkle M. Mixed-severity fire fosters heterogeneous spatial patterns of conifer regeneration in a dry conifer forest[J]. Forests, 2018, 9(1): 1-17.
- [7] Sparks A M, Talhelm A F, Partelli F R, et al. An experimental assessment of the impact of drought and fire on western larch injury, mortality and recovery[J]. International Journal of Wildland Fire, 2018, 27: 1-8.
- [8] 李艳丽, 杨华, 邓华锋. 蒙古栎-糠椴天然混交林空间格局研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(3): 33-41.
Li Y L, Yang H, Deng H F. Spatial distribution patterns of *Quercus mongolica* and *Tilia mandshurica* natural mixed forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(3): 33-41.
- [9] Zhang L Y, Dong L B, Liu Q, et al. Spatial patterns and interspecific associations during natural regeneration in three types of secondary forest in the central part of the Greater Khingan Mountains, Heilongjiang Province, China[J]. Forests, 2020, 152(11): 1-18.
- [10] 倪瑞强, 唐景毅, 程艳霞, 等. 长白山云冷杉林主要树种空间分布及其关联性[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(6): 28-35.
Ni R Q, Tang J Y, Cheng Y X, et al. Spatial distribution patterns and associations of main tree species in spruce-fir forest in Changbai Mountains, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(6): 28-35.
- [11] 白小军, 贾琳, 谷会岩. 大兴安岭次生林区优势种落叶松分布格局及竞争作用[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4194-4202.
Bai X J, Jia L, Gu H Y. Spatial distribution pattern and competition relationship of the dominant *Larix gmelinii* species in Greater Khingan Mountains' secondary forest area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4194-4202.
- [12] 胡海清, 魏书精, 孙龙. 1965—2010 年大兴安岭森林火灾碳排放的估算研究[J]. 植物生态学报, 2012, 36(7): 629-644.
Hu H Q, Wei S J, Sun L. Estimation of carbon emissions due to forest fire in Daxing'an Mountains from 1965 to 2010[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(7): 629-644.
- [13] Ban Y, Xu H, Kneeshaw B D. Gap regeneration of shade-intolerant *Larix gmelini* in old-growth boreal forests of northeastern China[J]. Journal of Vegetation Science, 1998, 9(4): 529-536.
- [14] Cai W, Yang J, Liu Z, et al. Post-fire tree recruitment of a boreal larch forest in Northeast China[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 307: 20-29.
- [15] 刘志华, 常禹, 贺红士, 等. 火控制政策对大兴安岭森林景观、可燃物动态及火险的长期影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(1): 70-79.
Liu Z H, Chang Y, He H S, et al. Long-term effects of fire suppression policy on forest landscape, fuels dynamics, and fire risks in Great Xing'an Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(1): 70-79.

- [16] Chang Y, He H S, Hu Y, et al. Historic and current fire regimes in the Great Xing'an Mountains, northeastern China: implications for long-term forest management[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254(3): 445–453.
- [17] Hu T, Zhou G. Drivers of lightning- and human-caused fire regimes in the Great Xing'an Mountains[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 329: 49–58.
- [18] 刘树超, 陈小中, 覃先林, 等. 内蒙古毕拉河林场森林火灾受害程度遥感评价[J]. *林业资源管理*, 2018(1): 90–95.
- Liu S C, Chen X Z, Qin X L, et al. Remote sensing assessment of forest fire damage degree in Bilahe Forest Farm, Inner Mongolia[J]. *Forest Resources Management*, 2018(1): 90–95.
- [19] 李文辉. 浅谈毕拉河林业局立地类型分布特点[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2010, 33(3): 48–50.
- Li W H. Elementary discussion on the distribution characteristics of site types of Bilahe Forestry Bureau[J]. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 2010, 33(3): 48–50.
- [20] Keeley J E. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18: 116–126.
- [21] 王睿智, 国庆喜. 小兴安岭阔叶红松林木本植物种-面积关系[J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 4091–4098.
- Wang R Z, Guo Q X. Woody plants species-area relationships in a broad-leaved Korean pine forest in the Xiaoxing'an Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 4091–4098.
- [22] 赵广东, 熊凯, 许格希, 等. 川西米亚罗亚高山暗针叶林主要优势种岷江冷杉和糙皮桦的空间格局及其关联性分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 1–12.
- Zhao G D, Xiong K, Xu G X, et al. Spatial patterns and associations of main dominant species *Abies fargesii* var. *faxoniana* and *Betula utilis* in Miyaluo subalpine dark coniferous forest of western Sichuan, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(8): 1–12.
- [23] 张春雨, 赵秀海, 夏富才. 长白山次生林树种空间分布及环境解释[J]. *林业科学*, 2008, 44(8): 1–8.
- Zhang C Y, Zhao X H, Xia F C. Spatial distribution of tree species and environmental interpretations of secondary forest in Changbai Mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(8): 1–8.
- [24] Condit R, Ashton P S, Baker P, et al. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species[J]. *Science*, 2000, 288: 1414–1418.
- [25] Wiegand T, Moloney K A. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology[J]. *Oikos*, 2004, 104(2): 209–229.
- [26] 孙云霞, 刘兆刚, 董灵波. 帽儿山地区 1983—2016 年森林景观空间点格局及其关联动态性[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2601–2614.
- Sun Y X, Liu Z G, Dong L B. Spatial point patterns and their association dynamics of forest landscapes in Maoershan Region, Northeast China between 1983 and 2016[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2601–2614.
- [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.
- Shu L, Liu Z G, Dong L B. Spatial pattern and forest regeneration characteristics of natural secondary forest in Maoershan, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(6): 1945–1955.
- [28] 祝燕, 白帆, 刘海丰, 等. 北京暖温带次生林种群分布格局与种间空间关联性[J]. *生物多样性*, 2011, 19(2): 252–259.
- Zhu Y, Bai F, Liu H F, et al. Population distribution patterns and interspecific spatial associations in warm temperate secondary forests, Beijing[J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19(2): 252–259.
- [29] Yu H, Wiegand T, Yang X, et al. The impact of fire and density-dependent mortality on the spatial patterns of a pine forest in the Hulun Buir Sandland, Inner Mongolia, China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(10): 2098–2107.
- [30] 胡海清. 大兴安岭原始林区林木火疤的研究[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(4): 68–72.
- Hu H Q. Study on fire scar of trees in Daxing'an Mountains' virgin forest region[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(4): 68–72.
- [31] Stephens S L, Fry D L, Vizcaino E F. Wildfire and spatial patterns in forests in northwestern Mexico: the United States wishes it had similar fire problems[J]. *Ecology and Society*, 2008, 13(2): 1–12.
- [32] Mantgem P J, Stephenson N L, Knapp E B, et al. Long-term effects of prescribed fire on mixed conifer forest structure in the Sierra Nevada, California[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(6): 989–994.
- [33] Fulé P Z, Covington W W. Spatial patterns of Mexican pine-oak forests under different recent fire regimes[J]. *Plant Ecology*, 1998, 134: 197–209.
- [34] Andrew J L, Derek C. Tree spatial patterns in fire-frequent forests of western North America, including mechanisms of pattern formation and implications for designing fuel reduction and restoration treatments[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 267: 74–92.

(责任编辑 范娟
责任编辑 臧润国)