

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.004.009

林隙大小对华北落叶松人工林林下更新动态的影响

张宇, 魏曦*, 梁文俊, 刘子琦, 李福明, 赵怡, 冯泳翰

(山西农业大学林学院, 山西 晋中 030801)

摘要: [目的] 明确关帝山华北落叶松人工林林隙下天然更新现状, 探究林隙大小对更新的影响。[方法] 通过调查不同林隙下华北落叶松幼苗幼树密度、生长现状及林隙下幼苗幼树空间分布, 应用 K2 函数进行点格局分析, 了解林隙下幼苗幼树的空间格局。[结果] (1) 华北落叶松更新密度和生长指标随林隙面积的升高呈现正显著影响 ($P < 0.05$)。林隙大小对幼苗幼树生长指标 (基径、高度、年龄) 的影响最显著, 最大均值多出现在林隙等级 I (20~50 m²), 幼苗幼树密度最大均值分别出现在林隙等级 II (50~100 m²) 和 III (100~150 m²) 中。(2) 幼苗幼树大部分分布在树冠投影区及冠空隙边缘, 且有逐渐向林隙中心生长的趋势。(3) 华北落叶松林样地林隙内更新苗大部分呈现聚集分布且发生在小尺度上, 小部分呈现均匀分布。[结论] 林隙大小对华北落叶松更新有显著影响, 林隙等级 I (20~50 m²) 有助于幼苗的建立和萌发, 随着平均胸径的增大, 为提高资源的有效性、减少更新苗之间的竞争、扩展更多生态位空间, 后期可通过人为干扰扩大林隙面积至等级 II (50~100 m²), 促进幼苗的存活及幼树的生长。

关键词: 华北落叶松更新; 林隙; 点格局分析; 空间结构

中图分类号: S754

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)04-0084-09

林隙大小作为林隙内环境异质性的重要特性, 反映林内的干扰程度并直接影响林隙内的微环境和地被物的分解程度^[1], 因此会对林隙内更新苗的生长和确立产生促进作用^[2]。近年来, 随着对林隙的深入研究, 许多学者对林隙大小反映树种的更新规律进行了多方面研究, Zhu^[3] 研究发现, 日本黑松 (*Pinus thunbergii* Parl.) 幼苗的生长与林隙大小存在正相关关系; 罗桂生等^[4] 研究发现, 油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 人工林中开创林隙短期内显著地影响更新苗生长; 李乒乓^[1] 研究发现, 油松人工林林隙面积在 20~40 m² 有助于林隙内更新苗的发生, 当更新苗木生长到一定阶段, 宜扩大原有林隙至 80 m² 左右, 增强其更新能力。林隙

的形成使其内部微环境发生变化, 对该区域产生较高的资源异质性和物种更新能力^[5], 进而影响分布格局及其镶嵌状况, 最终对森林景观的结构和功能产生影响^[6]。目前对林隙下更新树种的分布格局研究较少, 其中前人^[7] 研究发现, 云冷杉混交林中红松幼苗密度最大值随着林隙的增大一直处于林隙边缘或部分冠下, 幼树密度最大值则由林隙边缘向林隙中心北侧转移。但缺少人工林林隙下更新树种的空间分布的研究。

华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) 是山西省关帝山、管涔山等地海拔 1 800~2 800 m 中高山地带的优势建群树种, 在水源涵养、防风固沙、生态平衡和景观维持等方面发挥着重要作用,

收稿日期: 2021-12-16 修回日期: 2022-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31901365, 31971644); 山西省高等学校科技创新项目 (2021L105); 山西省优秀博士来晋工作奖励资金科研项目 (SXYBKY2018032); 山西农业大学科技创新基金项目 (2018YJ09); 山西农业大学引进人才科研启动项目 (2014YJ19)

* 通讯作者: 魏曦, 博士, 讲师。主要研究方向: 水土保持与林业生态工程。Email: weixi860826@163.com

具有较高的经济价值^[8]。目前,山西省的华北落叶松林下自然更新困难^[9],已有的研究表明,华北落叶松的幼苗幼树多聚集于林隙或林缘等光照充足之处^[10-11]。故本研究在华北落叶松人工林样地,找出15块不同面积大小的林隙(设置5个不同面积等级的林隙,每个林隙等级3个重复),调查华北落叶松更新苗密度及生长指标,同时采用点格局分析^[12-13]对其空间格局进行多尺度分析,以了解不同林隙大小对华北落叶松更新的影响,并探究不同大小林隙下更新苗的空间分布情况,为创建合适林隙、促进华北落叶松更新提供一定的科学依据。

1 研究区与研究方法

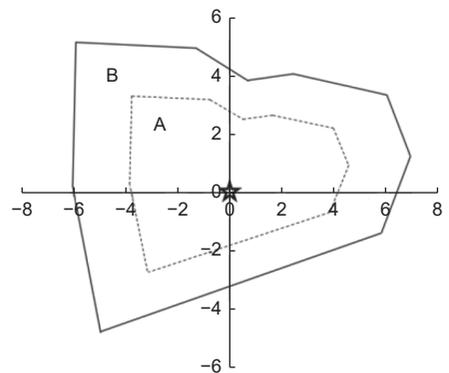
1.1 研究区概况

研究区位于山西庞泉沟国家级自然保护区,地理坐标为 $37^{\circ}45' \sim 37^{\circ}59' \text{ N}$, $111^{\circ}22' \sim 111^{\circ}33' \text{ E}$,地处吕梁山脉中段的关帝山腹地^[14]。该区属于典型暖温带大陆性季风气候,年均气温 4.3°C ,相对湿度70%,年日照时间 $1\,900 \sim 2\,100 \text{ h}$,7月平均气温为 17.5°C ,1月平均气温 -10.2°C ,年均降水量 820 mm 左右,降水分布极为不均匀,多集中在6—8月,年蒸发量 $1\,100 \sim 1\,500 \text{ mm}$,无霜期约为 180 d ^[14]。该区大多为破碎陡峭的山地地貌,坡度 $15^{\circ} \sim 31^{\circ}$,受到变质作用的影响^[14],岩石以花岗岩和片麻岩为主^[15]。土壤属于山地土壤^[14]。试验区内植物资源十分丰富,优势树种为华北落叶松,伴生树种有云杉(*Picea asperata* Mast.)、油松、白桦(*Betula platyphylla* Suk)等,林下灌木主要有忍冬(*Lonicera japonica* Thunb.)、茶条槭(*Acer ginnala* Maxim.)、绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)等,林下草本植物主要由毛茛(*Ranunculus japonicus* Thunb.)、细叶苔草(*Carex rigescens* (Franch.) S. Y. Liang & Y. C. Tang)、东方草莓(*Fragaria orientalis* Losinsk.)、车前(*Plantago asiatica* L.)等物种组成^[14]。

1.2 调查方法

2021年夏(6—7月),在研究区内设置华北落叶松人工林样地,调查林分中的15个林隙,根据林隙大小,设置5个等级大小的林隙,每一林隙等级设置3个重复。对每个林隙内边缘木的种类、胸径(DBH)、高度(H)、坐标(X, Y)、树

冠朝向林隙中心投影半径(CR)进行测量。调查林隙内更新苗的生长状况,包括:苗高、地径、年龄。依据更新高度(RH)和胸径将更新苗分为:幼苗($0.1 \text{ m} \leq \text{RH} < 1 \text{ m}$)、幼树($\text{RH} \geq 1 \text{ m}$, $\text{DBH} < 5 \text{ cm}$),幼苗幼树之和为总体更新苗。本研究中,林隙代表的是扩展林隙(文中简称为林隙),即所有边缘木围成的多边形,将多边形的重心作为林隙中心建立坐标系。为区分林隙不同区域空间异质性,将每一个林隙划分为冠空隙区域(A区,近似等同于冠层林隙的垂直投影)和林冠投影区域(B区,林隙向林隙中心过渡的区域),如图1所示。



注:林隙中心(☆) Center point of the gap; A:冠空隙区域(Vertical projection of the canopy opening); B:林冠投影区域(Crown projection of border trees)。

图1 林隙分区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gap partition

1.3 林隙面积的确定

林隙形状采用海伦公式计算,其原理采用形成木与边缘木构建三角形,计算三角形面积,再求和来估算林隙面积^[16]。其公式为:

$$A = \sqrt{s-a}(s-b)(s-c) \quad (1)$$

式中: A 为三角形面积; s 为半周长; a 、 b 、 c 分别为各边边长。

则林隙面积:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n \quad (2)$$

1.4 林隙的基本特征

本研究区所调查的林隙均为形状不规则的林隙,林隙大小在 $20 \sim 300 \text{ m}^2$ 。采用上限排外法将15个林隙依据面积大小划分为I($20 \sim 50 \text{ m}^2$)、II($50 \sim 100 \text{ m}^2$)、III($100 \sim 150 \text{ m}^2$)、IV($150 \sim 200 \text{ m}^2$)、V($\geq 200 \text{ m}^2$)5个等级。从表1可见:华北落叶松林分布在海拔 $1\,998 \sim 2\,107 \text{ m}$ 的山坡

上, 分布坡向主要为半阴坡西北方向; 坡度主要在 $8^{\circ} \sim 38^{\circ}$ 范围内; 坡位在上、中、下均有分布,

林隙开度在 $37^{\circ} \sim 67^{\circ}$ 之间, 常伴生有少量云杉、白桦等。

表 1 各林隙样地的基本特征

Table 1 The basic characteristics of forest gap

处理 Treatment	林隙号 Gap number	扩展林隙面积/m ² Expanded gap area	林隙年龄/a Gap age	坡度/(°) Slope	坡向 Slope aspect	坡位 Slope aspect	海拔/m Elevation	开度/% Canopy openess	形成方式 Manners of formation	形成木 Gap makers	干扰状况 Disturbed condition
I	Gap-1	22.305	14	22	西北	中	2 030	49.18	BB + S	LYS	无
	Gap-2	30.621	1	26	西北	下	2 018	38.47	BB	LYS、BH	无
	Gap-3	48.76	14	15	西北	中	2 039	37.21	BB + U	LYS、YS	无
	Gap-4	71.011	0.3	17	西北	上	2 073	47.98	BB + U	LYS、BH	无
II	Gap-5	71.725	5.3	22	西北	中	2 041	52.06	BB	LYS	无
	Gap-6	72.335	8	32	西北	上	2 073	44.16	BB	LYE、BH	无
	Gap-7	115.765	8	16	西北	上	2 068	44.55	BB	LYS、BH	无
III	Gap-8	126.246	6.7	8	西北	上	2 060	53.62	BB + S	LYS	无
	Gap-9	140.68	30	19	西北	中	2 041	51.33	Thinning	LYS、BH	有
	Gap-10	150.243	21.3	14	西北	上	2 055	42.10	Thinning	LYS	有
IV	Gap-11	183.637	24.3	24	西北	中	1 998	54.49	BB	LYS	无
	Gap-12	198.605	9	18	西	下	2 054	57.15	BB	LYS	无
	Gap-13	209.473	1.6	17	西北	上	2 073	53.08	BB + U	LYS、BH	无
V	Gap-14	216.742	4.5	17	东	中下	1 996	60.99	BB	LYS、BH	无
	Gap-15	299.496	20.7	38	西北	上	2 107	66.36	BB + U	LYS、YS	无

注: Thinning: 间伐, BB: 干基折断 Breakage at base, U: 掘根风倒 Uprooting, S: 枯立木 Standing death. LYS: 华北落叶松, BH: 白桦, YS: 云杉。

1.5 数据处理

1.5.1 林隙大小对更新的差异性检验 Excel 2010 对数据进行整理, IBM SPSS Statistics 25.0 软件进行单因素方差分析, 并用 Duncan 法进行多重比较 ($\alpha=0.05$), 统计不同大小林隙下幼苗、幼树和总体更新苗的密度和生长指标 (高度、基径、年龄) 的差异。图表中数据均以“平均值±标准差”表示。

1.5.2 林隙内更新苗空间分布 Excel 2010 对数据进行统计, Origin 软件完成空间分布图。

1.5.3 空间格局与种间关联性 对华北落叶松纯林林隙下更新苗空间格局的分析, 使用 $K2$ 函数进行描述, 用尺度 r 作为横坐标, 上下包络线作为纵坐标, 进行绘图。 $K2$ 函数能够有效地避免因“虚拟聚合”导致的误差, 其公式为:

$$K2(r) = dg(r)/dr \quad (3)$$

$$g(r) = (2\pi r)^{-1} dK(r)/dr \quad (4)$$

空间点格局分析采用单变量 $K2_{11}(r)$ 函数分析, $K2$ 函数值若在上下包迹线之间, 符合随机分布; 若在下包络线下方, 则呈聚集分布; 若在上包络线上方, 则呈均匀分布。数据分析使用 Programita 软件完成, 通过 199 次蒙特卡洛拟合, 分别取第 5 个最高值和第 5 个最低值, 得到 99% 的置信区间。数据处理及绘图采用 Excel 2010 以及 Origin 软件完成^[17]。

2 结果与分析

2.1 林隙大小对幼苗幼树密度及生长指标的影响

2.1.1 林隙大小对幼苗幼树密度的影响 所有更新苗的密度在不同林隙面积等级中均有正显著性差异 (表 2)。5 个林隙面积等级中, 华北落叶松幼苗、幼树、总体更新苗密度平均值变化范围分别为 $0.09 \sim 0.52$ 株·m⁻²、 $0.10 \sim 0.82$ 株·m⁻²、 $0.22 \sim 0.96$ 株·m⁻²。幼苗密度林隙等级 III 下最大, 为 0.52 株·m⁻², 等级 I 次之; 幼树、总体更新苗的密

度等级 II 下最大,分别为 $0.82 \text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.96 \text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$, 等级 I 次之 ($P<0.05$)。幼苗、幼树和总体更新苗

最低平均密度分别在等级 IV、III 和等级 IV, 分别为 $0.09 \text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.10 \text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.22 \text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

表 2 不同林隙大小下更新苗密度

Table 2 Seedling density under different forest gap sizes

密度 Density/(株·m ⁻²)	林隙大小 Gap size/m ²				
	I	II	III	IV	V
Se	0.31±0.16 a	0.14±0.01 a	0.52±0.40 ab	0.09±0.06 b	0.14±0.13 ab
Sa	0.45±0.28 a	0.82±0.59 b	0.10±0.07 ab	0.13±0.01 ab	0.27±0.16 b
All	0.76±0.38 a	0.96±0.59 b	0.63±0.34 a	0.22±0.04 ab	0.41±0.28 a

注:不同字母表示不同林隙面积等级之间的显著性差异 ($P<0.05$)。

Different letters indicate significant differences between different gap area grades. Se: 幼苗Seedling; Sa: 幼树Sapling; All: 总体更新苗。下同The same below.

随林隙等级的增加,华北落叶松幼苗、幼树更新密度整体无明显规律的变化趋势,但幼树密度在 I、II、IV 和 V 等级的林隙中明显大于相同林隙等级的幼苗密度,幼苗密度在林隙等级 III 中显著大于相同林隙等级的幼树密度。说明幼苗对不同等级林隙下极限光照的反应剧烈,主要是因为林隙面积大小、冠层开度、光照强度、水分含量、枯落物蓄积量、土壤养分含量等生态因子差异较大,导致了林隙更新苗数量不同。

2.1.2 林隙大小对幼苗幼树生长指标的影响 由表 3 分析得出,不同林隙等级对华北落叶松更新苗(幼苗、幼树、总体更新苗)的高生长具有显著性影响 ($P<0.05$),并具有相同的变化趋势,即随林隙等级增大呈现出“先增大后减小”的趋势。幼苗

的平均高生长最大值 (0.60 m) 位于林隙等级 V 中,等级 I 为 0.54 m 次之,在等级 III 最低为 0.17 m ;幼树和总体更新苗的平均高生长最大值均位于等级 I 中,分别为 3.45 m 、 2.36 m 。对于基径在 5 个林隙面积等级中均有显著影响 ($P<0.05$),且最大均值均出现在等级 I 中,其幼苗、幼树和总体更新苗基径的最大均值分别为 0.85 cm 、 2.90 cm 、 1.90 cm ,与幼树和总体更新苗的高生长最大均值所在林隙一致。此外,对年龄的显著性分析得出,幼苗、幼树和总体更新苗的最大均值林隙都处于林隙等级 I 中。综上所述,表明不同林隙大小对华北落叶松更新有显著影响,华北落叶松幼苗、幼树和总体更新苗均在等级 I 生长状况最好。

表 3 不同林隙幼苗幼树生长指标

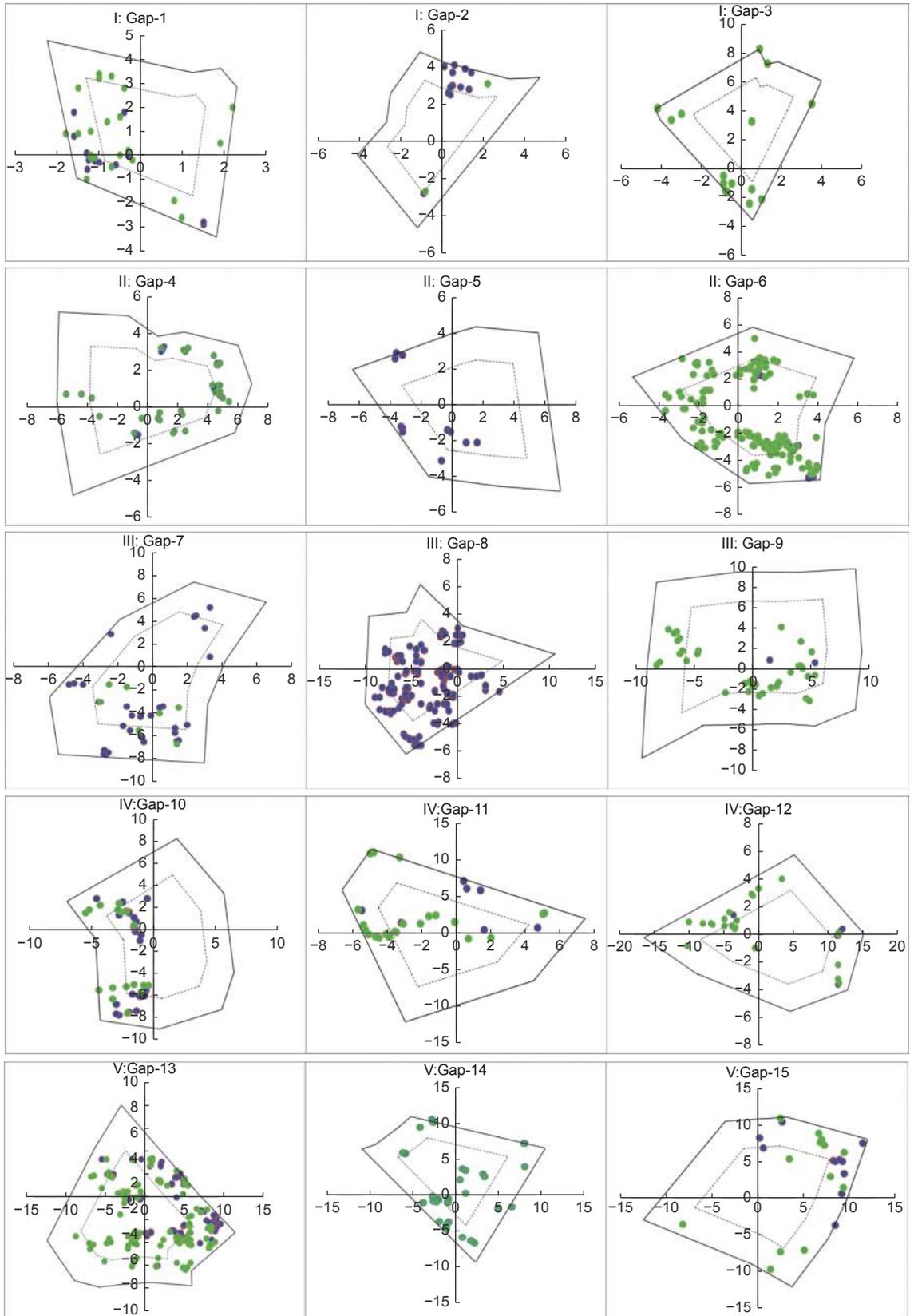
Table 3 Seedling and sapling growth indexes among stand gap sizes

生长指标 Growth index	项目 Item	林隙大小 Gap size/m ²				
		I	II	III	IV	V
高 Height/m	Se	0.54±0.08 a	0.40±0.15 ab	0.17±0.03 b	0.35±0.25 ab	0.60±0.00 c
	Sa	3.45±1.37 a	1.90±0.10 ab	1.85±0.65 b	1.52±0.63 b	1.73±0.12 ab
	All	2.36±1.82 a	0.35±0.25 ab	0.17±0.03 b	0.47±0.21 ab	0.83±0.50 ab
基径 Ground diameter/cm	Se	0.85±0.75 a	0.37±0.22 ab	0.17±0.03 ab	0.60±0.23 a	0.55±0.45 a
	Sa	2.90±0.86 a	1.00±0.00 ab	2.10±1.10 ab	1.50±0.55 ab	1.67±0.33 ab
	All	1.90±1.14 a	0.37±0.22 b	0.18±0.03 b	0.60±0.23 b	1.03±0.55 ab
年龄 Age/a	Se	3.50±0.50 a	2.33±0.88 bc	1.67±0.33 b	2.33±1.16 ab	2.50±1.50 a
	Sa	9.67±2.91 a	6.50±0.50 ab	5.50±0.50 ab	7.00±0.58 c	6.67±0.88 b
	All	7.33±3.84 a	2.33±0.88 ab	1.67±0.33 ab	2.00±1.00 a	2.67±0.88 ab

2.2 林隙下幼苗幼树空间分布

本研究发现(图 2),等级 I 中华北落叶松幼

苗、幼树主要分布在冠空隙区(A区)边缘及林冠投影区(B区),呈聚集分布,林隙中心附近有少



注：蓝色实心圆环 (●) 为华北落叶松幼苗；绿色实心圆环 (●) 为华北落叶松幼树。Note: Blue solid ring (●) refers to Larch Seedlings of *Larix principis-rupprechtii*; The green solid ring (●) is Seedlings.

图 2 林隙内更新苗空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of regeneration seedlings in forest gap plots

量的幼苗幼树生长,且幼苗幼树聚集分布在林隙的某一个方向上。林隙等级 II、III、IV、V 都存在与林隙等级 I 相似的空间分布规律(其中坐标原点为林隙中心)。

2.3 林隙下幼苗幼树的空间格局

采用单变量 $K2_{11}(r)$ 函数分析,从每一面积等级林隙中各选取更新良好的 1 个典型林隙,共 5 个。对 5 个典型林隙华北落叶松更新苗的空间格局进行分析(图 3)。由于林隙面积大小的不同,故不同林隙研究的尺度都有所不同。

典型林隙 Gap-1 在 0~2.1 m 尺度范围上呈现聚集分布,2.1~2.6 m 尺度范围上呈现随机分布,2.6~3.0 m 尺度范围上均匀分布;Gap-4 在 0~

2.7、3.5~5.7 m 尺度范围上呈现聚集分布,2.7~3.5、5.7~6.0 m 尺度范围上显示随机分布;Gap-7 在 0~6.0 m 尺度范围上显示聚集分布,6.0~8.0 m 尺度范围上显示随机分布;Gap-11 中在 0~2.8、3.6~5.4 m 尺度范围上聚集分布,2.8~3.6、5.4~8.0 m 尺度范围上随机分布;Gap-13 中在 0~10.0 m 尺度范围上聚集分布。华北落叶松更新苗在典型林隙 Gap-1 中随尺度的增大逐渐呈现聚集分布、随机分布和均匀分布;在 Gap-4、Gap-11 中随尺度的增大由聚集分布向均匀分布交替出现;Gap-7 中均随尺度的增大由聚集分布逐渐趋向随机分布;Gap-13 在所研究的尺度上均为聚集分布。

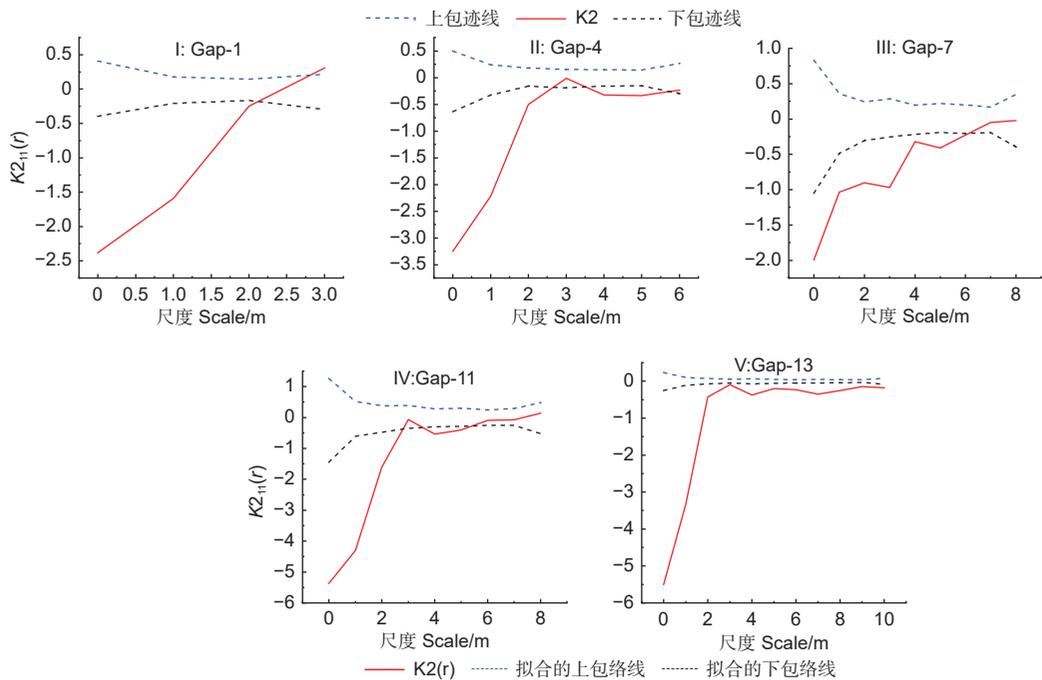


图 3 典型样地更新苗点格局

Fig. 3 Pattern of regeneration seedling sites in typical plots

3 讨论

3.1 幼苗幼树密度及生长指标(基径、高度、年龄)对林隙大小的响应

本研究结合华北落叶松幼苗幼树密度和生长指标进行分析,林隙大小对华北落叶松更新生长有显著影响。在 5 个不同面积等级的林隙中,幼苗密度在等级 III (100~150 m²) 最大,幼树和总体更新苗密度均在等级 II (50~100 m²) 最大,其各自密度均在等级 I (20~50 m²) 次之;其中,等级 I 中更新苗的各生长指标(基径、高度、年龄)最好。

这与王洪涛^[18]发现华北落叶松在 100~150 m² 的林隙内更新苗数量最多,盖力岩^[19]发现华北落叶松在 120~140 m² 的林隙内更新密度最大的研究结果不一致。本研究出现上述结果,说明幼苗幼树最高密度虽然处于等级 II、III,但相较于等级 I,其得到光照充足,加剧了种内竞争,使得营养物质损失较为明显,林木个体生长由于受到生存空间、水分和养分等资源不足的限制,故无生长良好的大径级、大高度级和大龄级苗木。

本研究出现幼苗幼树密度不同差异的原因,很

大程度上与林隙大小有关,林隙等级 I 既能满足幼苗生长需要的光照,又可以在幼苗阶段提供遮荫,但随着年龄的增长,需光量逐渐增加,等级 I 提供的空间及光照有限,从而限制幼苗生长和幼树发育,使得更新苗最大密度会随林隙面积的增加出现在等级 II 和 III 上;而在林隙等级 III 以上的林隙中,灌草植物的萌发和生长产生快速响应,改变了林隙下资源和水分的利用率,增大幼苗与已经占据有利微立地幼树的竞争,从而抑制了更新苗的萌发和生长^[20],故不利于更新苗的生长。

本研究中,苗龄与树龄最大均值均位于林隙等级 I 中,但幼苗幼树的密度最大均值均不在等级 I 内,其原因是林内光照不足,较大苗龄更新苗不耐荫而死亡引起的株数下降,致使密度降低,且不能满足更新苗之间的较大生长分化而产生的较小竞争,致使竞争力较弱的新萌发苗的确立和存活出现困难^[21],从而存活的较大年龄的苗木数量较多。综上所述,最大生长指标出现在等级 I,更新密度在等级 I 次之,说明等级 I 对华北落叶松更新生长产生积极效应。

3.2 林隙下幼苗幼树空间分布分析

研究表明,更新苗分布区域主要为 A 区边缘和 B 区,这与崔丽红等^[22]研究结果表现一致,这是因为林隙边缘到林隙中心森林资源存在递增的趋势^[8]。林隙过渡区有边缘木存在,为幼苗生长提供庇荫作用,土壤及光照条件良好,又不至与边缘木产生激烈的环境与资源竞争,从而利于种子的萌发、出苗及生长^[23],但幼树生长阶段耐荫能力减弱^[10],林隙边缘不利于幼树生长,故其分布趋势逐渐由林隙边缘向林隙中心转移。更新苗出现其分布方向不同的原因可能因为光合有效辐射进入林隙的总量由多种因素共同决定,主要包括林隙大小、立地条件、林隙内的位置、边缘木的高度、以及日照等条件,使得林隙内不同区域、不同位置造成资源的异质性,导致不同林隙下同位置同一方向、同一林隙下不同位置间的微环境存在一定差异性^[24-25],最终使幼苗幼树容易生长在接收充足光照的方向。目前,华北落叶松更新苗数量较多,更新和存活下来的苗木在林隙下呈斑块状的异质性分布,对于这些更新苗需要进行长期观测,以达到了解不同林隙大小对幼苗幼树更新生长的长期影响。

3.3 幼苗幼树空间格局分析

分析更新苗空间格局(图 3)发现:在华北落

叶松林隙中更新苗一般在小尺度上呈现聚集分布,在大尺度上发生随机分布,这与以往的研究结论大致相同^[13,26],与 Sarah 等^[27]对林隙内的黄桦和东半球衫幼苗幼树更新的空间格局大部分是聚集分布具有一致性。在研究的尺度内,华北落叶松更新苗在林隙内整体上呈斑块状聚集分布在某一方向上,聚集程度较高,这是因为幼苗常出现簇生群落,且林隙下的生态环境利于更新苗发育和华北落叶松萌蘖更新,更新苗呈现聚集分布,此分布格局利于幼苗相互庇护,从而抵御外界环境的伤害,提高生存机会;发生随机分布表明大尺度上更新苗之间不产生相互作用。

生态学空间格局非常依赖尺度大小,本研究说明幼苗幼树间相互作用发生在一定尺度空间范围内,超出一定范围内,植物个体间相互作用将大大减弱^[26]。

4 结论

关帝山华北落叶松人工林林隙面积范围为 20~300 m²,大、中、小林隙在林区内均有分布,且该地区华北落叶松人工林林隙一部分为人为干扰形成,另一部分由于自然因素(大风、病虫害、生理因素等)形成的林隙^[28]。本研究表明华北落叶松更新密度和生长指标随林隙面积等级的升高呈现显著性影响($P<0.05$)。幼苗幼树生长指标的最大均值多出现在林隙等级 I (20~50 m²);幼苗幼树密度最大均值分别出现在林隙等级 II (50~100 m²) 和 III (100~150 m²) 中,等级 I 次之。适当大小的林隙面积能够增强华北落叶松更新能力,在森林经营中林隙等级 I 有助于种子萌发和幼苗的建立,随着平均胸径的增大,成熟个体增加,为提高资源的有效性、减少更新苗之间的竞争、扩展更多生态位空间,后期可通过人为干扰扩大林隙面积至等级 II 来促进幼苗的存活及幼树的生长。

参考文献:

- [1] 李兵兵,秦 琰,刘亚茜,等.燕山山地油松人工林林隙大小对更新的影响[J].林业科学,2012,48(6):147-151.
- [2] Spies T A, Franklin J F. Gap characteristics and vegetation response in coniferous forests of the Pacific Northwest[J]. Ecology, 1989, 70(3): 543-545.
- [3] Zhu J J, Matsuzaki T, Lee F Q, et al. Effect of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment

- in a coastal pine forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 182(1): 339-354.
- [4] 罗桂生. 油松人工林林隙环境因子与天然更新研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [5] Gálhidy L, Mihók B, Hagyó A., *et al.* Effects of gap size and associated changes in light and soil moisture on the understorey vegetation of a Hungarian beech forest[J]. *Plant Ecology*, 2006, 183(1): 133-145.
- [6] 宋新章, 肖文发. 林隙微生境及更新研究进展[J]. *林业科学*, 2006, 42(5): 114-119.
- [7] 贺丹妮, 杨华, 温静, 等. 长白山云冷杉针阔混交林不同林隙下幼苗幼树密度及空间分布[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 1916-1922.
- [8] 高润梅, 石晓东, 王林, 等. 当年生华北落叶松幼苗的耐旱性[J]. *林业科学*, 2015, 51(7): 148-156.
- [9] 梁文俊, 魏曦, 赵伟文, 等. 关帝山不同林分结构华北落叶松林枯落物水文效应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 324-329 + 337.
- [10] 李进, 石晓东, 高润梅, 等. 华北落叶松天然次生林更新及影响因素[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(6): 588-596.
- [11] 张钦弟, 毕润成, 张金屯, 等. 庞泉沟自然保护区寒温带针叶林演替优势种格局动态分析[J]. *生态学报*, 2012, 32(18): 5713-5720.
- [12] 秦舟, 韩有志, 张梦弢, 等. 华北落叶松林分空间格局及种间关联性研究[J]. *林业资源管理*, 2019, 48(4): 80-85.
- [13] 张中惠, 郭建斌, 王彦辉, 等. 六盘山辽东栎林种群结构和空间分布格局[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(6): 1091-1099.
- [14] 卜瑞瑛, 梁文俊, 魏曦, 等. 不同林分密度华北落叶松林的土壤养分特征[J]. *森林与环境学报*, 2021, 41(2): 140-147.
- [15] 冯燕辉, 梁文俊, 魏曦, 等. 不同林分密度华北落叶松林枯落物及土壤特征分析[J]. *西南师范大学学报:自然科学版*, 2021, 46(3): 179-187.
- [16] 鲜骏仁, 胡庭兴, 王开运, 等. 川西亚高山针叶林林窗特征的研究[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(3): 6-10.
- [17] 崔玉华, 韩有志, 张梦弢, 等. 不同干扰强度下针阔混交林树种空间格局及种间关联性[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2053-2060.
- [18] 王洪涛. 关帝山华北落叶松林隙更新调查研究[J]. *科技情报开发与经济*, 2009, 19(24): 152-155.
- [19] 盖力岩, 于树峰, 徐学华, 等. 木兰围场华北落叶松人工林林隙对天然更新的影响[J]. *河北林果研究*, 2014, 29(3): 253-257.
- [20] Gaudio N, Balandier P, Perret S, *et al.* Growth of understorey Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) saplings in response to light in mixed temperate forest[J]. *Forestry*, 2011, 84(2): 187-195.
- [21] 王智斌. 冠层林隙面积对油松和华北落叶松更新苗生长和空间分布的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [22] 崔丽红, 孙海静, 张曼, 等. 华北落叶松和油松混交林林隙特征及更新研究[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(1): 14-19.
- [23] 杨秀清, 韩有志. 关帝山次生杨桦林种群结构与立木的空间点格局[J]. *西北植物学报*, 2010, 30(9): 1895-1901.
- [24] 罗桂生, 马履一, 贾志奎, 等. 油松人工林不同大小林隙环境因子差异性比较[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(5): 86-94.
- [25] Cordero I, Jiménez M D, Delgado J A, *et al.* Spatial and demographic structure of tara stands (*Caesalpinia spinosa*) in Peru: Influence of present and past forest management[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 377: 71-82.
- [26] 闫海冰, 韩有志, 杨秀清, 等. 华北山地典型天然次生林群落的树种空间分布格局及其关联性[J]. *生态学报*, 2010, 30(9): 2311-2321.
- [27] Sarah K. Poznanovic A J. Poznanovic C R, *et al.* Spatial patterning of underrepresented tree species in canopy gaps 9 years after group selection cutting[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 331: 1-11.
- [28] Hammond M E, Pokorný R, Dobrovolný L, *et al.* Effect of gap size on tree species diversity of natural regeneration – case study from Masaryk Training Forest Enterprise Křtiny[J]. *Journal of Forest Science*, 2020, 66(10): 407-419.

Effects of Gap Size on Regeneration Dynamics of *Larix principis-rupprechtii* Forest

ZHANG Yu, WEI Xi, LIANG Wen-jun, LIU Zi-qi, LI Fu-ming, ZHAO Yi, FENG Yong-han

(College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China)

Abstract: [Objective] To explore the natural regeneration in *Larix principis-rupprechtii* plantation in Guandi Mountain, and explore the effect of gap size on regeneration. [Methods] In this study, the density, growth status and spatial distribution of seedlings of *Larix principis-rupprechtii* under different gap sizes were investigated. The K2 function point pattern analysis was performed for exploring spatial pattern of seedlings under different gap sizes. [Results] (1) The regeneration density and growth indices of *Larix principis-rupprechtii* were positively correlated with the increase of gap area ($P < 0.05$). Gap size had the most significant effect on sapling growth indexes (base diameter, height and age). The maximum mean values of growth indexes mostly appeared in gap grade I ($20 \sim 50 \text{ m}^2$), and the maximum mean values of seedlings and saplings density appeared in gap grade II ($50 \sim 100 \text{ m}^2$) and III ($100 \sim 150 \text{ m}^2$), respectively. (2) Saplings mostly distributed in the canopy projection area and canopy gap edge, and gradually distributed in the center of the gap. (3) In the gap of *Larix principis-rupprechtii*, most of the saplings were aggregated and distributed in small scale, and few saplings were evenly distributed. [Conclusion] Gap size has a significant effect on regeneration of *Larix principis-rupprechtii*. Gap grade I ($20 \sim 50 \text{ m}^2$) is conducive to seedling establishment and germination. In addition, the gap area could be enlarged to grade II ($50 \sim 100 \text{ m}^2$) by human disturbance to promote seedling survival and sapling growth.

Keywords: regeneration of *Larix principis-rupprechtii*; forest gap; point pattern analysis; space structure

(责任编辑: 彭南轩)