陈欣,韩有志.华北落叶松林林分密度对林下更新影响研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(2):110-118.
Chen X, Han Y Z. Study on the effect of stand density on understory regeneration in *Larix principis*－*rupprechtii* Forest in North China[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(2):110-118.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202312037

华北落叶松林林分密度对林下更新影响研究

陈欣,韩有志*

(山西农业大学 林学院,山西 晋中 030801)

摘　要:[目的]华北落叶松(*Larix principis*－*rupprechtii*)是寒温带针叶林的优势树种之一。探究华北落叶松的更新特征,可为深入探测华北落叶松林天然更新潜在的生态学机制提供依据。[方法]以关帝山华北落叶松林为研究对象,设置3种林分密度类型,分析不同林分密度林下更新苗组成、结构及空间格局特征。[结果]中密度(825～875 株·hm^{-2})华北落叶松林林下更新状况良好,更新苗数量明显增多(3500 株·hm^{-2}),低龄级更新苗较多,高龄级的更新苗相对较少,更新苗龄级结构呈连续及相对稳定的分布;而低密度(575～700 株·hm^{-2})和高密度(1000～1125 株·hm^{-2})华北落叶松林下更新不佳,更新苗数量明显减少(≤1250 株·hm^{-2}),高密度林下更新苗龄级结构间断,幼苗到幼树的过渡不连续。从更新苗的生长情况看,低密度林分中林下更新苗的株高、地径生长表现最好。更新幼树中的优势树种在3种密度的林分中均呈现明显的集聚分布。低密度和中密度华北落叶松林下更新幼苗的空间异质性强,高密度林下更新幼苗的空间异质性弱。更新幼苗空间变异主要由结构性因素引起。[结论]林分密度过密或过疏都不利于华北落叶松更新,及时进行密度调控有利于华北落叶松林的可持续发展。

关键词:华北落叶松;林分密度;更新苗;格局特征
中图分类号:S791.18　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)02-0110-09

森林更新是森林种群自我繁衍、延续的途径[1-2],直接影响森林资源的维持和永续经营[3],在群落结构稳定及演替中发挥重要作用。森林更新中天然更新作为一种自然恢复机制,具备较高的生态适应性和相对较低的成本[4]。幼苗幼树是天然更新过程中种群发展的主要载体,其存活和生长状况受到多种生物因素和非生物的影响,主要包括林分因子、竞争关系、光照、微地形、土壤质量等[5-10]。

林分密度作为影响森林天然更新重要因素的林分因子,往往通过对林内微环境、灌草植被、凋落物及土壤理化性状等的影响[11-14],从而影响林分发育、林分质量、蓄积量、树种更迭及个体分布。贾亚运等[15]探讨造林密度对杉木幼林生长的影响,结果表明,杉木林分平均树高、胸径、单株材积和蓄积量均随着造林密度的增大呈现先增大后减小的规律。欧芷阳等[16]研究密度对蚬木天然更新的影响,发现乔木密度的增加,使幼苗数量减少,有利于幼苗地径和株高生长。陈聪琳等[17]调查不同密度路域巨桉人工林群落结构和物种多样性,结果显示,高密度林分会限制小胸径级和高度级个体生长,群落逐渐衰退。冯燕辉等[18]研究不同密度华北落叶松林林下枯落物及土壤特征,发现适中的林分密度可改善土壤结构,利于土壤养分积累,促进林木更新和生长发育。米爽等[19]比较不同抚育采伐强度的针阔混交林幼苗更新状况后发现,土壤温度随林分密度的降低而增加,林下生境得以改善,促进更新苗生长。这些研究主要从林分密度影响林内生境,进而影响林下更新的角度进行,但对不同林分密度条件下幼树幼苗的更新状况研究相对较少。

华北落叶松是华北地区寒温带针叶林的主要

收稿日期:2023-12-17　　**修回日期**:2024-01-28
基金项目:国家自然科学基金项目(31901365)
作者简介:陈欣(ORCID:0009-0001-1900-068X),硕士,实验师,研究方向:森林培育学,E-mail:5577192@qq.com
*通信作者:韩有志,教授,博士生导师,E-mail:hyouz606@sohu.com

树种之一,是水源涵养和水土保持的重要森林类型。因此,探究华北落叶松的更新特征,对华北落叶松林的可持续经营,维持森林群落的稳定性具有重要意义。本研究分析关帝山不同密度华北落叶松林下更新苗组成、结构及空间格局特征,以期为深入探测华北落叶松林天然更新潜在的生态学机制提供依据。

1　研究区概况

研究地区位于山西省关帝山林区(37°45′～37°59′N,111°24′～111°37′E),海拔1800～2831 m。本区属温带大陆性气候,年均温4.3 ℃,最低气温－12.4 ℃,最高气温18 ℃,无霜期平均为100～130 d,年均降水量825 mm。土壤为山地棕壤。研究区主要乔木有华北落叶松(*Larix principis－rupprechtii*)、白杆(*Picea meyeri*)、青杆(*Picea wilsonii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、红桦(*Betula albosinensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)等。常见灌木有:北京花楸(*Sorbus discolor*)、金花忍冬(*Lonicera chrysantha*)、刚毛忍冬(*L. hispida*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor Turcz*)、山刺玫(*Rosa davurica Pall.*)等。常见草本有:紫菀(*Aster tataricus*)、老鹳草(*Geranium wilfordii*)、东方草莓(*Fragaria orientalis*)、小红菊(*Dendranthema chanetii*)、黑柴胡(*Bupleurum smithii Wolff*)、瓣蕊唐松草(*Thalictrum petaloideum*)等。

2　研究方法

2.1　样地设置

2020年6月-9月,在全面踏查和样地实测基础上,选择立地条件相似,密度梯度不同的华北落叶松纯林标准样地12个(20 m×20 m),设3种林分密度类型,即低密度(575～700 株·hm^{-2})、中密度(825～875 株·hm^{-2})、高密度(1000～1125 株·hm^{-2}),每个类型4个样地,重复数为4。样地调查包括:乔木树种种类、数量、胸径、树高,用生长锥测定其林龄;林下更新苗的数量、地径、高度、林龄;样地基本情况见表1。

2.2　群落调查

(1)分树种进行每木检尺,记录胸径、树高等生长指标。同时在每个样方内将西南角标记为坐标原点(0,0),建立统一坐标系,将东西方向标记为X轴,南北方向为Y轴,记录立木的坐标。(2)将样地分成5 m×5 m样方,调查样方内更新苗。统计幼树和幼苗种类和株数,记录苗高、地径和年龄,并记录空间位置坐标。幼树指直径10 cm以下,树高2 m以上的树木;幼苗指树高≤2 m的树木。

表1　样地基本情况表

Table 1　Sampling site conditions

样地号 Plot No.	树种组成 Species composition	平均胸径/cm Average diameter	平均树高/m Average height	林龄/a Stand age	海拔/m Altitude	密度/(株·hm^{-2}) Density	密度划分 Density class
1	8L2H	21.7	24.3	65	1860	550	低密度
2	10L	23.9	26.4	65	1955	650	低密度
3	9L1H	23.1	25.4	63	1870	675	低密度
4	8L1H1D	28.6	25.7	63	1920	700	低密度
5	9L1H	22.8	23.8	66	1900	825	中密度
6	9L1H	21.5	21.3	67	1850	850	中密度
7	10L	20.6	22.3	65	1925	850	中密度
8	8L2H	23.5	27.9	75	2070	875	中密度
9	9L1H	22.3	23.5	73	1980	1000	高密度
11	10L	23.9	26.7	76	2050	1025	高密度
10	8L1H1D	21.6	28.5	65	1930	1075	高密度
12	9L1Y	24.2	26.7	75	2020	1125	高密度

注:L代表华北落叶松,H代表桦树,D代表辽东栎,Y代表云杉

Note:L is *Larix principis－rupprechtii*,H is *Betula*,D is *Quercus wutaishanica Mayr*,Y is *Picea asperata Mast*

2.3 数据分析方法

2.3.1 方差均值比法

运用方差均值比(S^2/X)法,分析更新幼树分布特征:$S^2/X=1$时,随机分布;$S^2/X<1$时,均匀分布;$S^2/X>1$时,聚集分布。

2.3.2 变异函数分析方法

依据变异函数分析[20],结合Kriging插值,绘制Kriging插值图,分析更新苗空间格局特征[21]。

3 结果与分析

3.1 不同林分密度林下更新苗组成及密度

不同林分密度林下更新苗组成及密度见表2。可见,不同林分密度林下更新苗组成相同,均出现华北落叶松、桦树和辽东栎更新苗。但从更新密度来看,随着林分密度增加,更新苗密度呈先增加后减少趋势,中密度(825~875 株·hm^{-2})时更新苗密度达最大,呈中密度林分更新苗(3500 株·hm^{-2})>低密度林分更新苗(1650 株·hm^{-2})>高密度林分更新苗(1250 株·hm^{-2})的趋势。

3.2 不同林分密度林下更新苗年龄结构特征

不同林分密度林下更新苗的年龄结构见图1。样地调查结果显示,林下更新幼苗年龄范围在1~8 a,由于5 a以上幼苗更新数量较少,将5~8 a更新苗归为同一组(≥5 a)。由图1可以看出,低密度林分更新苗种群的年龄结构呈偏正态分布,低龄级和高龄级更新苗的个体数较少,3~4 a更新苗数量远大于其它年龄段,个体数以4 a最多,为36.4%。中密度林分中,低龄级更新苗占总株树的72.2%,高龄级的更新苗相对较少,呈逐渐减少指数型的龄级结构。高密度林分中,更新苗个体数量相对较少,林下1~2 a更新苗占绝大多数,更新苗在2 a之后急剧减少,出现部分更新苗龄级缺失现象。由图2可以看出,林下更新苗以华北落叶松为主,伴随有少量的桦树和辽东栎。

表2 不同密度林下更新苗组成及密度

Table 2 The constitute and density of seedlings in the undergrowth with different stand densities

样地类型 Type of sampling area	幼树 Sapling			幼苗 Seedling		
	树种 Species	密度/(株·hm^{-2}) Density	总密度/(株·hm^{-2}) Total Density	树种 Species	密度/(株·hm^{-2}) Density	总密度/(株·hm^{-2}) Total Density
低密度(575~700 株·hm^{-2})	桦树	500	500	华北落叶松 桦树 辽东栎	550 475 125	1150
中密度(825~875 株·hm^{-2})	桦树 辽东栎 华北落叶松	800 150 125	1075	华北落叶松 桦树 辽东栎	1775 400 250	2425
高密度(1000~1125 株·hm^{-2})	桦树 华北落叶松	300 50	350	华北落叶松 桦树 辽东栎	375 250 275	900

注:幼树指直径10 cm以下,树高2 m以上的树木;幼苗指树高≤2 m的树木

Note: Sapling indicated trees less than 10 cm in diameter and taller than 2 m; Seedling indicated trees less than 2 m in height

3.3 不同林分密度林下更新苗生长结构特征

林下更新苗的株高和地径分布见图3。由图3可以看出,更新苗的株高和地径分布在不同密度林分中差异明显。更新苗的平均株高在低密度林分最大,为38 cm,其次是中密度林分、高密度林分,分别为26、21 cm,更新苗的平均株高表现为低密度>中密度>高密度的倒J型曲线。更新苗的最大平均地径出现在低密度林分中,为0.42 cm,明显高于中密度(0.25 cm)和高密度林分(0.22 cm),具体表现为:低密度>中密度>高密度。

林下各树种更新苗的株高和地径分布见图4。由图4可以看出,各树种更新苗的平均地径和株高在不同密度林分中差异显著。平均地径和株高都在华北落叶松更新苗中出现最大值,说明华北落叶松幼苗在更新苗中处于优势地位。各树种更新

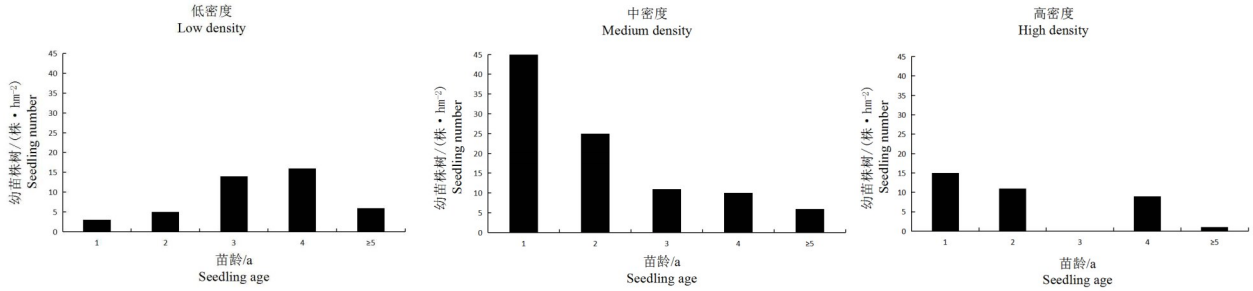

图1　不同密度林下更新苗的年龄结构

Fig.1　Age structure of seedlings under different densities

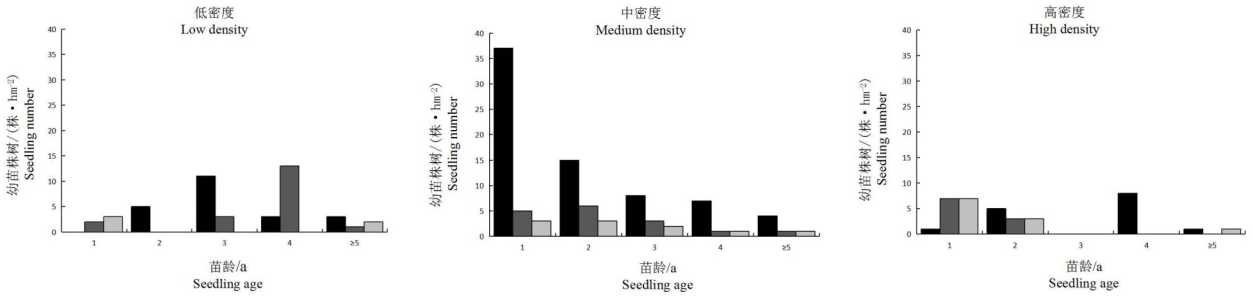

图2　不同密度林下各龄级更新苗的树种组成

Fig.2　Tree species composition of seedlings with different age structure under different densities

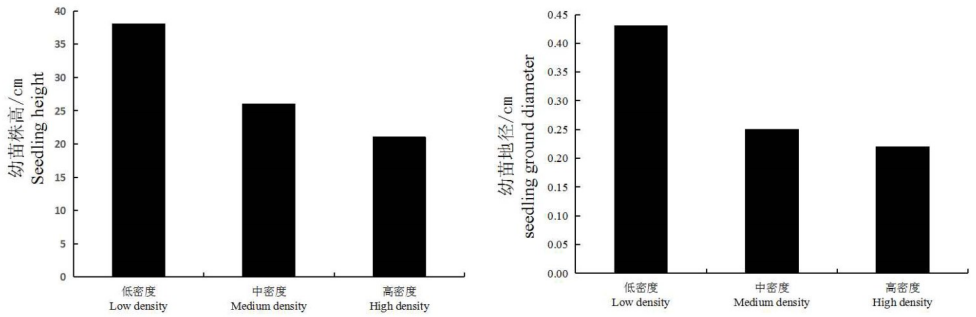

图3　不同密度林下更新苗的株高与地径

Fig.3　Height and ground diameter of seedlings under different densities

苗地径和株高均表现为低密度＞中密度＞高密度　　的倒J型曲线。

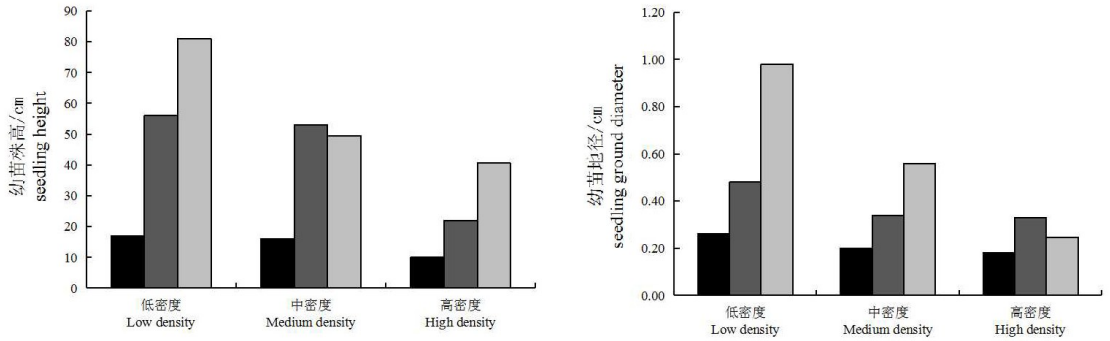

图4　不同密度林下各树种更新苗的株高与地径

Fig.4　Height and ground diameter of seedlings of different tree species under different densities

3.4 不同林分密度林下更新格局特征

3.4.1 林下更新幼树的分布特征

每个样地16个5 m×5 m的小样方,分样地计算小样方内更新幼树胸高直径分布,见表3。计算不同树种更新幼树S^2/X比值,分析其分布特征。从表3可以看出,各更新幼树在3种林分密度下的方差均值比均大于1,呈集聚分布。

从更新幼树分布情况来看(图5),3种林分密度林下,优势树种均呈集聚分布。同一更新树种在一地区集聚分布,其它地区散生或无分布。不同更新树种呈现出明显的镶嵌分布。更新幼树中,华北落叶松胸高断面积大,呈零星状分布;桦树和辽东栎胸高断面积虽不大,但其密度却很大,表现出显著的聚集性。

3.4.2 林下更新幼苗的空间分布格局分析

对不同密度林下更新幼苗进行变异函数分析,进行模型拟合(表4)。依据模型参数,分析更新幼苗的空间格局特征。

从表4可以看出,低密度林分中,林下更新苗基台值为35.81,空间结构比为0.64,更新幼苗中64%的空间变异由结构性因素引起,36%的空间变异由随机性因素引起。高密度林分中,更新苗的基台值为8.59,空间结构比为0.85,更新幼苗中85%的空间变异由结构性因素引起,15%的空间变异由随机性因素引起。随着林分密度的增大,林下更新苗基台值减小,空间结构比增大,结构性因素对空间变异中的影响增大,随机性因素作用减小。

表3 不同密度林下更新幼树直径分布表

Table 3 Distribution index of diameter at regeneration sapling with different stand densities

样地类型 Type of sampling area		华北落叶松 *L. principis-rupprechtii*	桦树 *Betula*	辽东栎 *Q. liaotungensis*
低密度	幼树平均值($cm^2/25m^2$)	—	1.25	—
	幼树指数(S^2/X)	—	3.04	—
中密度	幼树平均值($cm^2/25m^2$)	0.35	1.16	0.02
	幼树指数(S^2/X)	4.70	6.47	3.08
高密度	幼树平均值($cm^2/25m^2$)	0.31	1.17	—
	幼树指数(S^2/X)	4.13	6.48	—

注:本表中数据以5 m×5 m小样方为基本统计单位

Note: The data in this table take 5 m×5 m square as the basic statistical unit

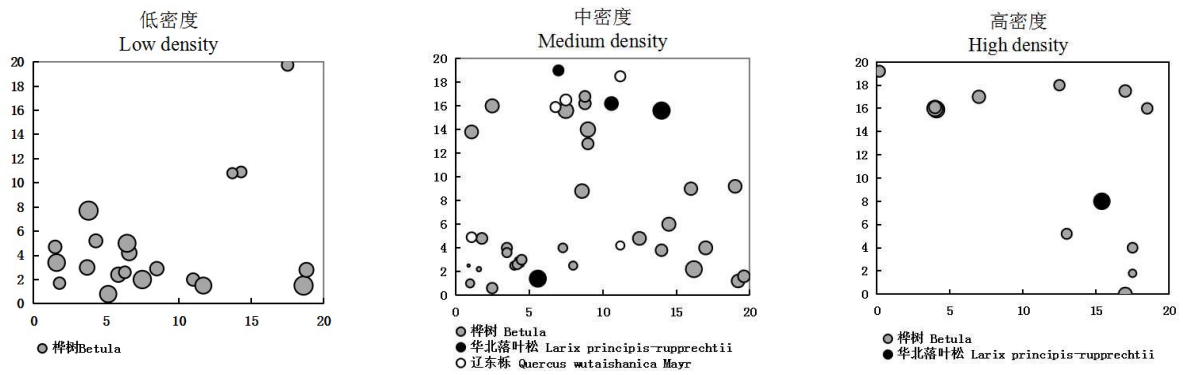

图5 不同密度林下更新幼树的断面积分布图

Fig.5 The map of basal area distributions of sapling with different stand densities

基于变异函数分析,估计Kriging插值,绘制更新幼苗Kriging插值图(图6),评价更新幼苗的空间分布格局。从图6可以看出,低密度和中密度华北落叶松林下更新幼苗的空间异质性强,高密度林下更新幼苗的空间异质性弱。随着林分密度的增加,林下更新苗的空间异质程度降低。

4 讨论

4.1 林分密度对更新苗组成及密度的影响

林分密度是影响森林天然更新的重要因子,密度变化对林下光照强度、水分含量、枯落物蓄积量、土壤养分含量等生态因子均有很大的影响,进

表4　不同密度林下更新幼苗变异函数模拟分析参数

Table 4　Variance function simulation analysis parameters of seedlings with different stand densities

样地类型 Type of sampling area	模型 Model	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill C_0+C	变程 Range(a)	空间结构比 Proportion C/C_0+C	决定系数 R^2
低密度	球形	12.78	35.81	28.57	0.64	0.99
中密度	球形	1.90	34.42	8.60	0.95	0.43
高密度	高斯	1.29	8.59	26.66	0.85	0.91

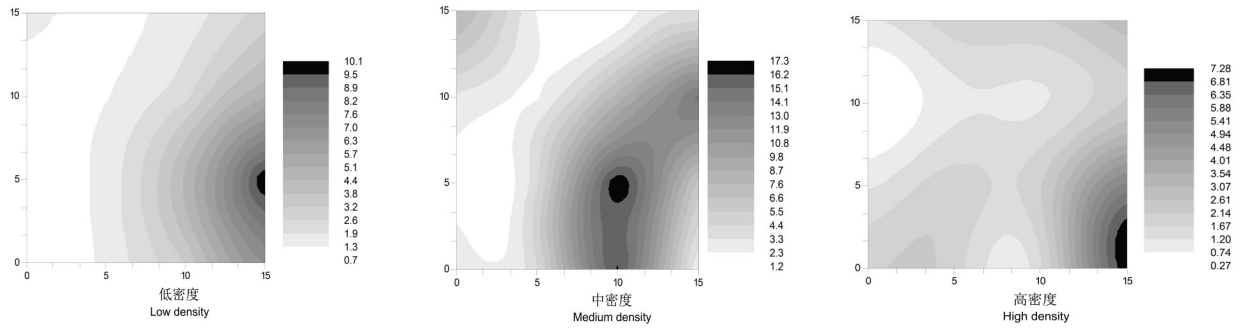

图6　更新幼苗克立格空间插值图

Fig.6　Kriging map for seedlings

而一定程度影响林内种子萌发和幼树生长。本研究表明,中密度华北落叶松林更新状况良好,过疏和过密林分更新状况不佳。这与康冰等[22]、张希彪[23]和卫舒平[24]研究结果一致。林分密度过低,林下太阳辐射强度强,影响种子发芽和灌草植物的光照、水分和养分竞争,抑制幼苗存活。林分密度增大,林下太阳辐射强度降低,促进更新苗存活。然而林分密度过大,林下种间、种内竞争加强,林木生长受到抑制,导致死亡率增加。

4.2　林分密度对更新苗年龄结构的影响

更新种群的更新密度和年龄结构反应种群的更新潜力和延续能力[25-26]。本研究中,低密度林分更新苗的年龄结构呈偏正态分布;中密度林分的更新苗数量最多,而且从低龄级到高龄级更新苗的个体数呈倒J型分布,表现出了更为稳定的更新结构[27];高密度林分中的更新苗个体数量相对较少,甚至部分龄级没有更新苗,呈现出有间隔的年龄波。这与王旭刚[28]研究结果一致。低密度林分,荫蔽程度较低,更新苗初期生长遭遇强烈光照,导致低龄级更新苗存活率低。中密度林分,荫蔽程度与光照资源相对平衡,更新苗存活率高,数量多,但随着更新苗对光照、水分和养分等需求增大,种群发生自疏和它疏,死亡率增大,个体数量递减。高密度林分,更新苗接受不到充足的阳光,从而影响更新苗的存活。

4.3　林分密度对更新苗生长结构的影响

不同林分密度内林内资源不同[29-30],间接影响更新苗的生长[31]。本研究中林下更新苗的株高和地径在不同密度林分中差异明显。更新苗的生长指标(株高、地径)在低密度林分中表现最好。在低密度林分中,更新苗能够获得充足的伸展空间和较好的光照条件,另外生长条件良好,使得种内竞争小,营养物质多,更新苗不会受到养分、水分以及生存空间等资源不足的限制。

4.4　林分密度对林下更新格局的影响

森林群落空间分布格局受树种特性、物理环境、干扰等因素的影响[32],具有高度的空间异质性。本研究中不同林分密度林下更新苗的分布格局不同。更新幼树中的优势树种集聚分布。更新幼苗空间变异主要由结构性因素引起,随着林分密度的增大,更新苗空间异质强度降低。但本研究中林分种类少、研究样地有限,林下更新苗的空间分布格局研究粗浅,今后应综合各因子的作用及影响程度,深入探究林分因子的异质性及其相关性。

5 结论

分析不同林分密度林下更新苗组成、结构及空间格局特征,结果表明中密度(825～875 株·hm^{-2})华北落叶松林下更新良好,更新苗数量明显增多(3500 株·hm^{-2}),低龄级更新苗较多,高龄级的更新苗相对较少,更新苗龄级结构呈连续及相对稳定的分布;而低密度(575～700 株·hm^{-2})和高密度(1000～1125 株·hm^{-2})华北落叶松林下更新不佳,更新苗数量明显减少(≤1250 株·hm^{-2}),高密度林下更新苗龄级结构间断,幼苗到幼树的过渡不连续。从更新苗的生长情况看,低密度林分中林下更新苗的株高、地径生长表现最好。更新幼树中的优势树种在3种密度的林分中均呈现明显的集聚分布。低密度和中密度华北落叶松林下更新幼苗的空间异质性强,高密度林下更新幼苗的空间异质性弱。更新幼苗空间变异主要由结构性因素引起。林分密度过密或过疏都不利于华北落叶松更新,及时进行密度调控有利于华北落叶松林可持续发展。但具体林分密度为多少时更有利于华北落叶松更新苗生长和更新,还有待进一步研究。

参 考 文 献

[1]Liang W J, Wei X. Factors promoting the natural regeneration of *Larix principis－rupprechtii* plantation in the Lvliang Mountains of central China[J]. PeerJ, 2020, 8: e9339.

[2]韩有志,王政权. 森林更新与空间异质性[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 615-619.
Han Y Z, Wang Z Q. Spatial heterogeneity and forest regeneration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(5): 615-619.

[3]陈启民,罗青红,宁虎森,等. 古尔班通古特沙漠南缘不同林龄人工梭梭林主林层和更新层特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 739-747.
Chen Q M, Luo Q H, Ning H S, et al. Characteristics of main layer and regeneration layer of *Haloxylon ammodendron* plantations at different ages on the southern edge of the Gurbantunggut Desert, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 739-747.

[4]Kolo H, Ankerst D, Knoke T. Predicting natural forest regeneration: a statistical model based on inventory data[J]. European Journal of Forest Research, 2017, 136(5): 923-938.

[5]邵佳怡,杜建会,李升发,等. 高山林线生态交错区木本植物幼苗分布特征、更新机制及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2854-2864.
Shao J Y, Du J H, Li S F, et al. Tree seedling distribution, regeneration mechanism and response to climate change in alpine treeline ecotone[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(8): 2854-2864.

[6]Atanasso J A, Mensah S, Salako K V, et al. Factors affecting survival of seedling of *Afzelia africana*, a threatened tropical timber species in West Africa[J]. Tropical Ecology, 2021, 62(3): 443-452.

[7]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.

[8]黄慧敏,董蓉,何丹妮,等. 冠层结构和光环境的时空变化对紫耳箭竹种群特征的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2129-2138.
Huang H M, Dong R, He D N, et al. Effects of temporal and spatial variation of canopy structures and light conditions on population characteristics of *Fargesia decurvata*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2129-2138.

[9]董莉莉,汪成成,赵济川,等. 辽东山区蒙古栎次生林天然更新特征及其影响因子分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 94-101, 109.
Dong L L, Wang C C, Zhao J C, et al. Natural regeneration characteristics and influencing factors of *Quercus mongolica* secondary forest in the mountainous area of Eastern Liaoning[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2023, 51(1): 94-101, 109.

[10]Dyderski M K, Gazda A, Hachułka M, et al. Impacts of soil conditions and light availability on natural regeneration of Norway spruce *Picea abies* (L.) H. Karst. in low-elevation mountain forests[J]. Annals of Forest Science, 2018, 75(4): 91.

[11]吴雪铭,余新晓,陈丽华,等. 间伐强度对坝上樟子松林下持水能力的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2347-2354.
Wu X M, Yu X X, Chen L H, et al. Effects of thinning intensity on the understory water-holding capacity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in the Bashang Area of North China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2347-2354.

[12]林立文,邓羽松,李佩琦,等. 桂北地区不同密度杉木林枯落物与土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 200-207, 215.
Lin L W, Deng Y S, Li P Q, et al. Study on the effects of litter and soil hydrology of different density *Cunninghamia lanceolata* forests in northern Guangxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 200-207, 215.

[13]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.
Bu R Y, Liang W J, Wei X, et al. Soil nutrient characteristics of *Larix principis－rupprechtii* forest with different stand densities[J]. Journal of Forest and Environment, 2021, 41(2): 140-147.

[14]张洋洋,周清慧,许骄阳,等. 林分密度对马尾松林下植物与土壤种子库多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7):

2355-2362.
Zhang Y Y, Zhou Q H, Xu J Y, et al. Impacts of stand density on diversity of understory plant and soil seed banks in a *Pinus massoniana* plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2355-2362.

[15]贾亚运,何宗明,周丽丽,等. 造林密度对杉木幼林生长及空间利用的影响[J]. 生态学杂志,2016,35(5):1177-1181.
Jia Y Y, He Z M, Zhou L L, et al. Effects of planting densities on the growth and space utilization of young Cunninghamia lanceolata plantation[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(5): 1177-1181.

[16]欧芷阳,庞世龙,谭长强,等. 林分结构对桂西南蚬木种群天然更新的影响[J]. 应用生态学报,2017,28(10):3181-3188.
Ou Z Y, Pang S L, Tan C Q, et al. Effects of forest structure on natural regeneration of *Excentrodendron hsienmu* population in Southwest Guangxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(10): 3181-3188.

[17]陈聪琳,孙一淼,龚利梅,等. 不同密度路域巨桉人工林群落结构和物种多样性[J]. 森林与环境学报,2022,42(1):20-28.
Chen C L, Sun Y M, Gong L M, et al. Community structure and species diversity of *Eucalyptus grandis* plantations with different stand densities in road area[J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(1): 20-28.

[18]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.
Feng Y H, Liang W J, Wei X, et al. On litter and soil characteristics of *Larix* principis-rupprechtii forest with different stand densities [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2021, 46(3): 179-187.

[19]米爽,宋子龙,秦江环,等. 抚育采伐对吉林蛟河针阔混交林幼苗更新的影响[J]. 北京林业大学学报,2019,41(5):159-169.
Mi S, Song Z L, Qin J H, et al. Effects of tending thinning on seedling regeneration in a mixed conifer-broadleaf forest in Jiaohe, Jilin Province of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 159-169.

[20]李颖,张婕,郭东罡,等. 基于大样地油松种群的地统计学分析[J]. 植物科学学报,2015,33(2):158-164.
Li Y, Zhang J, Guo D G, et al. Geostatistical analysis of *Pinus* tabulaeform is population spatial patterns based on large plots [J]. Plant Science Journal, 2015, 33(2): 158-164.

[21]李艳丽,杨华,亢新刚,等. 长白山云冷杉针阔混交林天然更新空间分布格局及其异质性[J]. 应用生态学报,2014,25(2):311-317.
Li Y L, Yang H, Kang X G, et al. Spatial heterogeneity of natural regeneration in a spruce-fir mixed broadleaf-conifer forest in Changbai Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 311-317.

[22]康冰,王得祥,崔宏安,等. 秦岭山地油松群落更新特征及影响因子[J]. 应用生态学报,2011,22(7):1659-1667.
Kang B, Wang D X, Cui H A, et al. Regeneration characteristics and related affecting factors of *Pinus* tabulaeformis secondary forests in Qinling Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7): 1659-1667.

[23]张希彪,上官周平,王金成,等. 子午岭人工油松林群落更新特征及影响因子[J]. 山地学报,2014,32(5):561-567.
Zhang X B, Shangguan Z P, Wang J C, et al. The regeneration characteristics and affecting factors of *Pinus* tabulaeformis artificial forests of ziwu mountains, China [J]. Mountain Research, 2014, 32(5): 561-567.

[24]卫舒平,梁文俊,魏曦,等. 不同密度华北落叶松林天然更新及其影响因子[J]. 应用生态学报,2022,33(10):2687-2694.
Wei S P, Liang W J, Wei X, et al. Natural regeneration of *Larix principis*－*rupprechtii* plantations with different densities and its influencing factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(10): 2687-2694.

[25]张婷,张文辉,郭连金,等. 黄土高原丘陵区不同生境小叶杨人工林物种多样性及其群落稳定性分析[J]. 西北植物学报,2007,27(2):340-347.
Zhang T, Zhang W H, Guo L J, et al. Species diversity and community stability of *Populus simonii* plantations in different habitats in hilly area of the Loess Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(2): 340-347.

[26]Moktan M R, Gratzer G, Richards W H, et al. Regeneration of structure of mixed conifer forests under single-tree harvest management in the western Bhutan Himalayas [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258(3): 243-255.

[27]姜冬冬,林建勇,李娟,等. 濒危植物闽楠幼苗更新及环境解释[J]. 西北植物学报,2023,43(11):1969-1974.
Jiang D D, Lin J Y, Li J, et al. Characteristics and environmental interpretation of seedling regeneration in the endangered species *Phoebe bournei*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2023, 43(11): 1969-1974.

[28]王旭刚. 关帝山不同密度天然次生针叶林林下针叶树更新苗特征研究[D]. 太谷:山西农业大学,2018.
Wang X G. Reaserch on the characteristics of regeneration seedlings in different density of natural secondary coniferous forest in Guandi Mountain [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2018.

[29]薛立,傅静丹. 影响植物竞争的因子[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(2):6-15.
Xue L, Fu J D. A review on factors affecting plant competition [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(2): 6-15.

[30]Maherali H, DeLucia E H. Influence of climate-driven shifts in biomass allocation on water transport and storage in ponderosa pine[J]. Oecologia, 2001, 129(4): 481-491.

[31]陈圣宾,宋爱琴,李振基. 森林幼苗更新对光环境异质性的响应研究进展[J]. 应用生态学报,2005,16(2):365-370.
Chen S B, Song A Q, Li Z J. Research advance in response of forest seedling regeneration to light environmental heterogeneity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 365-370.

[32]董灵波,田栋元,刘兆刚. 大兴安岭次生林空间分布格局及其尺度效应[J]. 应用生态学报,2020,31(5):1476-1486.
Dong L B,Tian D Y,Liu Z G. Spatial distribution pattern and scale effect of secondary forests in Daxing'anling,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(5):1476-1486.

Study on the effect of stand density on understory regeneration in *Larix principis-rupprechtii* Forest in North China

Chen Xin, Han Youzhi*
(*College of Forestry,Shanxi Agricultural University,Jinzhong 030801,China*)

Abstract:[Objective]*Larix principis—rupprechtii* is one of the dominant tree species in the cold temperate coniferous forest. Exploring the regeneration characteristics of *L. principis—rupprechtii* forest can provide a basis for a deeper understanding of the potential ecological mechanism of natural regeneration in *L. principis—rupprechtii* forest. [Methods]Taking *L. principis—rupprechtii* forest in Guandi Mountain area as the research object, three stand density types were set up to analyze the composition, structure, and spatial patterns of understory regeneration under different stand densities. [Results]In moderate density (825~827 plants•hm^{-2}) *L. principis—rupprechtii* forest, the understory regeneration was in good condition, with a significant increase in the number of regeneration seedlings (3500 plants•hm^{-2}), mostly at low age levels, and relatively fewer seedlings at higher age level, showing a continuous and relatively stable distribution of regeneration seedling age levels. However, in low density (575~700 plants/hm$^{2)}$ and high density (1000~1125 plants•hm^{-2}) *L. principis—rupprechtii* forests, the understory regeneration was poor, with a significant decrease in the number of regeneration seedlings($\leqslant$1250 plants•hm^{-2}), and the age level structure of regeneration seedlings was discontinuous transition from saplings to young trees. In terms of growth, the plant height and ground diameter growth of understory regeneration seedlings were best in low density stands. Dominant tree species among the regeneration saplings showed significant aggregation distribution in all three stand densities. The spatial heterogeneity of regeneration seedlings were strong in low and moderate density of *L. principis—rupprechtii*, while it was weak in high—density stands. Spatial variation of regeneration seedlings was mainly caused by structural factors. [Conclusion]Excessive stand density, either too dense or too sparse, is detrimental to the regeneration of *L. principis—rupprechtii* forest. Timely density regulation is beneficial for the sustainable development of *L. principis—rupprechtii* forest in North China.

Keywords:*Larix principis—rupprechtii*, Stand density, Regeneration, Pattern characteristic

(编辑:郭玥微)