

华北落叶松天然林林隙冠层特征对更新的影响

周 来,张梦弢

(山西农业大学 林学院,山西 太谷 030801)

摘 要:探讨山西省庞泉沟国家级自然保护区华北落叶松天然次生林林隙冠层及光因子对林下更新的影响。对 38 个林隙内幼木每木检尺(基径),测定树高、冠幅,林隙的冠层结构与边缘木特征,利用鱼眼相机拍摄冠层图像共 266 张。使用 Gap Light Analyzer 软件对采集的冠层图像进行数据化处理,得到冠层开度、叶面积指数、林隙总辐射、直接辐射、散射辐射等冠层特征指标,并采用 Pearson 相关性分析法分析林隙冠层结构及光环境与华北落叶松幼苗更新关系。结果表明,林隙中冠层结构和光因子与华北落叶松的更新特征呈显著正相关($P < 0.05$);不同等级林隙内冠层结构与光因子对华北落叶松幼苗的相关性存在较大的差异,在大林隙($110 \sim 150 \text{ m}^2$)内表现出最显著的相关性。所有林隙的冠层开度介于 $24.87\% \sim 38.00\%$ 的样本率为 79% ,总辐射介于 $13\% \sim 21\%$ 的样本率为 79% 。华北落叶松林隙内冠层结构和光因子对华北落叶松幼苗的生长有显著影响,其中面积 $110 \sim 150 \text{ m}^2$ 的林隙最适合华北落叶松幼苗的生长发育。

关键词:林隙更新;冠层结构;光因子;边缘木特征;华北落叶松

中图分类号:S791.22

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)05-0067-06

Effect of Gap Canopy Characteristics on Stand Regeneration of *Larix principis-rupprechtii* Natural Forest

ZHOU Lai,ZHANG Meng-tao

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

Abstract: The objective of this study was to understand the effects of gap canopy and light factors on the understory regeneration of *Larix principis-rupprechtii* natural secondary forest occurring in the Pangquangou National Nature Reserve, Shanxi Province. Young trees in 38 forest gaps were measured based on tally method (base diameter) to obtain the data of the tree height, crown width, canopy structure, and edge wood characteristics of the forest gap. Totally, 266 canopy images were taken with a fish eyeglass camera. The collected canopy images were quantified using Gap Light Analyzer software to obtain canopy characteristics indexes, such as canopy opening, leaf area index, total gap radiation, direct radiation, and scattered radiation. Pearson correlation analysis method was used to analyze the relationship between canopy structure, light environment, and *L. principis-rupprechtii* sapling regeneration. The results showed that the canopy structure in the forest gap was significantly and positively ($P < 0.05$) correlated with the regeneration characteristics of *L. principis-rupprechtii* forest. Significant differences in correlations between the canopy structure, light factor and the sapling growth of *L. principis-rupprechtii* were observed. Significant correlations were found in the large forest gaps ($110 - 150 \text{ m}^2$), The sample rate of canopy opening between 24.87% and 38.00% in all gaps was 79% . The sample rate of total radiation between $13\% - 21\%$

收稿日期:2022-06-24 修回日期:2022-07-18

基金项目:山西省优秀博士资助项目(SXBYKY2021065);山西农业大学博士科研启动项目(2021BQ15);山西省高等学校科技创新项目(2021L138);国家自然科学基金青年科学基金项目(31901308)。

第一作者:周 来,博士,讲师。研究方向:森林资源监测与评价。E-mail:zhoulai807@126.com

was 79%. Canopy structure and light factors in the gaps of *L. principis-rupprechtii* forest present significant effects on the growth of *L. principis-rupprechtii* seedlings, and the gaps with the area of 110 m²—150 m² are the most suitable for the growth and development of the seedlings.

Key words: forest gap regeneration; canopy structure; light factor; marginal wood feature; *Larix principis-rupprechtii*

林隙是森林的重要组成部分,林隙的形成与消亡是森林不断发育与更新的重要生态过程^[1-2]。相比于林下更新,林隙更新的个体生存条件更加优异,研究林隙更新对森林演替研究具有深远的意义^[3-5]。

目前,国内外对林隙更新研究多是关于林隙面积大小、林隙内更新位置、林隙边缘木的差异等方面。实际上,林隙大小、林隙内位置和林隙边缘木通过影响林隙内微环境进而对树种更新和生长产生重要作用^[6-10],林隙的面积分布格局是林隙的重要特征,直接影响林隙内的生态环境,对幼木更新与生长产生不同的影响^[11-13]。此外,林隙面积对林下更新的优势树种和其他树种的影响存在差异^[14]。最适合林隙更新的林隙面积是一个范围值^[15-17],林隙面积过大或过小会使更新效率有所下降^[18-20]。林隙内位置影响着林隙内更新苗的生长,林隙东北部的幼木更新与生长情况相比林隙的其他部位更好^[19-20]。林隙面积大小和更新苗在林隙内的位置均影响着更新苗所需的光环境。总体来看,关于冠层结构、光环境与林隙内更新关系的研究较少,尤其是针对华北落叶松天然次生林的更少。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)是我国华北地区高山针叶林带中的主要森林建群树种之一,也是黄河流域高山地区的森林更新和荒山造林主要树种之一^[21]。本研究以山西省庞泉沟国家级自然保护区内典型华北落叶松天然次生林为对象,通过调查华北落叶松林林隙的冠层结构,包括林隙的面积(A_{rea})、总辐射(T_{ot} ,%)、直接辐射(T_{DR} ,%)、间接辐射(T_{DF} ,%)、冠层开度(C_o ,%)和叶面积指数(L_{AI})等冠层特征指标,分析其与林隙内更新特征的相关性,明确冠层结构、光环境对林隙更新的影响,旨在为森林可持续经营提供科学合理的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省庞泉沟国家级自然保护区(111°22′—111°33′E, 37°45′—37°55′N),地处吕梁山脉中段,最高峰为关帝山的主峰孝文山,海拔2 831 m,最低海拔1 500 m。该区域属于暖温带气候,年平均气温4.3℃,相对湿度70%,年平均降水

量820 mm左右,无霜期180 d。地貌有高山、低山、丘陵,平均坡度5°~30°,森林覆盖率74%。主要树种有华北落叶松、云杉(*Picea asperata*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、红桦(*Betula albosinensis*)、白桦(*B. platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)等,灌木主要有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、美蔷薇(*R. bella*)、灰栒子(*Cotoneaster acutifolius*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)等,草本主要有华北苔草(*Carex hancockiana*)、小红菊(*Chrysanthemum chanetii*)、野草莓(*Fragaria vesca*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设与调查 2021年7—8月于研究区华北落叶松天然次生林内布设3块有代表性的60 m×60 m规格样地。样地的优势树种均为华北落叶松,伴生少量白桦、云杉,华北落叶松的平均年龄均约80 a,曾受到过不同程度的采伐干扰,平均林分密度约为325株·hm⁻²。调查统计3块样地内所有的林隙,共38个。对于林隙内的幼苗幼树进行每木检尺(基径),测定树高、冠幅,调查记录、统计分析林隙边缘木特征、冠层结构包括:冠层开度、叶面积指数、总辐射、直射辐射、散射辐射等指标。树高>1.3 m但胸径<5 cm的幼木记为幼树。树高<1.3 m的幼木记为多年生幼苗(不含1年生幼苗)。最后,在各林隙中心位置分别设置1 m×1 m的小样方,用于统计1年生华北落叶松幼苗数量(未木质化的幼苗)。

1.2.2 林隙面积确定 本研究林隙形状均近似椭圆,林隙面积采用椭圆面积计算公式^[22],方法如下。

$$S = \pi lw / 4 \quad (1)$$

式中: l 表示最长轴; w 表示最短轴; S 表示林隙面积。

1.2.3 林隙冠层结构与光因子指标测定 使用鱼眼镜头相机对38个林隙冠层进行拍照,采用半球摄影法^[23],在南北方向的直线上设置7个观测点,分别位于林隙中心点、北林冠边缘、南林冠边缘、北林冠树下、南林冠树下、中心点与林隙缘线中心位置^[24],采集的图像要求清晰可见,避免过度曝光,共获得266张图像。

1.2.4 数据处理分析 使用Gap Light Analyzer软件对采集到的冠层图像进行处理^[25],设置生长季节6月1日至8月31日,以及场地经纬度与高程海

拔,分析得到各林隙的冠层结构包括冠层开度、叶面积指数与 3 种辐射量,包括总辐射量、直接辐射量、散射辐射量,统计其最小值、最大值与平均值。使用 Excel 2020、SPSS 22.0 和 OriginPro 2022 软件进行数据处理分析、表格制作及绘图。采用 Pearson 相关性分析法对各个林隙内冠层结构与幼苗更新特征的相关关系进行分析。

2 结果及分析

2.1 林隙特征统计

调查的林隙面积为 30~150 m²,3 个样地的坡度分别为 SW235°、SW276°和 SW225°,为阳坡或半阳坡。坡度 12°~20°,为研究区的典型山地特征。样地海拔 1 970~2 010 m。将林隙面积进行分级,即 30~70 m² 为小林隙,70~110 m² 为中林隙,110~150 m² 为大林隙。中林隙最多,共 21 个;小林隙 8 个;大林隙 9 个。林隙边缘木统计特征见

表 1。林隙边缘木由白杆(*Picea meyeri*)、华北落叶松与白桦 3 个种树种组成,主要树种为华北落叶松,占比为 87%,白杆为 11%,极少数为白桦,仅占 2%。白桦的平均冠幅较华北落叶松和白杆大,而平均树高较小,平均胸径中等。

冠层结构及光因子特征林隙分级统计见表 2。比较冠层因子在不同等级林隙内的最小值、最大值与平均值,对比不同等级林隙平均值大小,结果表明,总体趋势为随着林隙面积的增加,冠层开度增大,叶面积指数减小,3 种辐射量也随之增大。

表 1 林隙边缘木特征统计

Table 1 Characteristics of the trees in forest gap edge

树种	数量 占比(%)	平均胸径/ cm	平均冠幅/ m	平均树高/ m
白杆	11	29.86	5.86	27.63
华北落叶松	87	33.97	6.32	29.64
白桦	2	30.30	8.00	22.45

表 2 林隙分级冠层结构及光因子特征统计

Table 2 Canopy structure and light factor characteristics of different forest gaps

冠层因子	小林隙			中林隙			大林隙		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
C _o (%)	27.78	42.98	32.48	29.37	48.01	36.25	29.48	45.41	37.93
L _{AI}	0.83	1.48	1.41	0.81	1.39	1.25	0.84	1.36	1.10
T _{ot} (%)	13.57	19.43	16.22	15.21	21.46	17.49	14.58	23.76	18.02
T _{DR} (%)	7.55	14.53	11.28	9.42	19.57	12.67	13.29	18.81	14.54
T _{DF} (%)	6.64	11.93	8.91	8.90	13.47	9.84	8.67	14.41	9.56

2.2 更新特征统计

林隙内幼苗幼树的更新特征统计结果见表 3。林隙内幼苗幼树主要由白杆和华北落叶松组成,华北落叶松多年生幼苗数量最多(87 株),白杆幼树的数量最少(31 株)。华北落叶松更新数量明显高于白杆。华北落叶松多年生幼苗的平均地径为 0.89 cm,与白杆多年生幼苗平均地径相同,但地径

的最大值前者(1.28 cm)小于后者(2.43 cm)。华北落叶松多年生幼苗的平均冠幅为 31.87 cm,低于白杆(34.4 cm),但冠幅最大值前者(53 cm)高于后者(45.3 cm)。华北落叶松幼树的平均地径(1.59 cm)和冠幅(43.12 cm)均低于白杆(1.91 cm 和 62.38 cm),幼树的最大值也有相同的趋势。华北落叶松幼苗幼树更新的质量(地径和冠幅)总体上较白杆差。

表 3 林隙内主要幼苗幼树特征

Table 3 Characteristics of the main seedlings in the forest gaps

树种	株数	地径/cm			冠幅/cm		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
白杆(H≥1.3 m)	31	0.18	3.70	1.91	41	233	62.38
白杆(H<1.3 m)	49	0.10	2.43	0.89	8	45.3	34.4
华北落叶松(H≥1.3 m)	38	0.22	3.27	1.59	24	65	43.12
华北落叶松(H<1.3 m)	87	0.14	1.28	0.89	9	53	31.87

各级林隙内的更新幼苗幼树数量特征见表 4。由表 4 可知,中林隙内更新幼苗幼树的数量最多(81 株),华北落叶松多年生幼苗和幼树数量在中林隙中均为最大值,分别为 32 株和 16 株。白杆也有相同趋势,但小林隙内白杆幼树的更新数量较多。

2.3 林窗特征对更新的影响

林隙内华北落叶松多年生幼苗数量最多,其他的幼苗幼树数量相对较少,因此主要针对华北落叶松多年生幼苗进行分析,探究冠层结构与光因子对华北落叶松多年生幼苗的更新特征的影响关系,幼

苗的更新特征包括树高、地径和冠幅。对取得的数据进行信度与效度分析结果见表 5、表 6。Cronbach α 系数值为 0.603, KMO 值为 0.760, P 为 0.001, 即取得的数据可以满足进一步的相关性分析。

表 4 林窗分级更新特征

Table 4 Regeneration features of different forest windows

树种	林窗更新苗数		
	小林窗	中林窗	大林窗
白杆($H \geq 1.3$ m)	12	11	8
白杆($H < 1.3$ m)	13	22	14
华北落叶松($H \geq 1.3$ m)	9	16	13
华北落叶松($H < 1.3$ m)	26	32	28
合计	60	81	63

表 5 Cronbach 信度分析

Table 5 Cronbach reliability analysis

项数	样本量	Cronbach α 系数
9	38	0.603

表 6 KMO 和 Bartlett 的检验

Table 6 KMO and Bartlett's tests

KMO 值		0.760
Bartlett 球形度检验	近似卡方	829.441
	d_f	36
	P	0.001

冠层结构与光因子对华北落叶松多年生幼苗的植株数量的影响关系见图 1, 得知 38 个林窗中, 总辐射的样本分布区间为 13%~30.57%, 13%~21% 的样本率最大; 冠层开度的样本分布区间为 24.87~53.19%, 24.87%~38% 的样本率最高。

用 Pearson 分析所有林窗中多年生幼苗的苗高、地径、冠幅与林窗面积、冠层结构和光因子之间的关系(表 7), 结果表明, 树高与总辐射、直接辐射、散射辐射、冠层开度和林窗面积有着极显著的正相关关系($P < 0.01$)。地径与总辐射、直接辐射、散射辐射、冠层开度和林窗面积均呈显著正相关($P < 0.05$)。冠幅与散射辐射、冠层开度呈显著正相关($P < 0.05$)。然而树高、地径、冠幅与叶面积指数的相关性系数均为负值, 树高、地径分别与叶面积指数呈显著负相关关系($P < 0.05$)。

不同面积等级林窗内林窗特征对华北落叶松更新的影响见表 8, 结果表明, 小林窗的冠层开度与幼苗的树高、地径与冠幅呈显著正相关($P < 0.05$), 散射辐射和总辐射分别与幼苗的地径和冠幅呈显著正相关($P < 0.05$), 直接辐射与幼苗的更新特征为不显著相关($P > 0.05$), 叶面积指数与幼苗的更新特征为负相关但不显著。这说明在小林窗内, 冠层开度和总辐射、散射辐射是影响华北落叶松幼苗更新

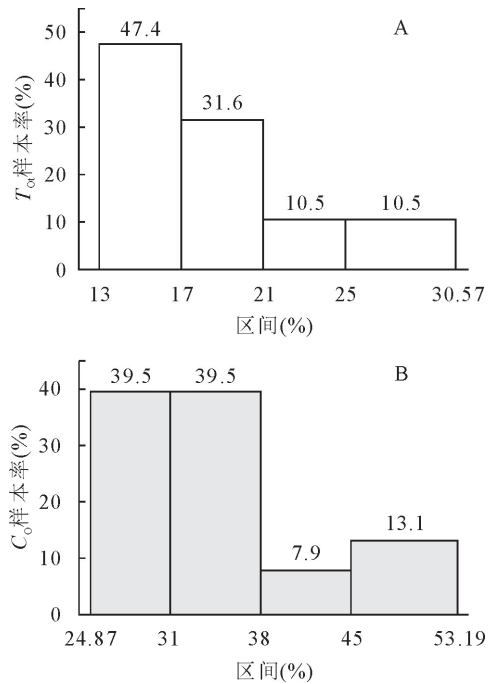


图 1 T_{ot} 和 C_o 区间样本率

Fig. 1 T_{ot} and C_o interval sample rates

表 7 冠层结构、光因子与华北落叶松幼苗更新特征的相关性

Table 7 Correlation of canopy structure, light factors and regeneration characteristics of *L. principis-rupprechtii* seedlings

冠层特征	树高	地径	冠幅
T_{ot}	0.588 **	0.388 *	0.304
T_{DR}	0.548 **	0.351 *	0.229
T_{DF}	0.576 **	0.398 *	0.389 *
C_o	0.535 **	0.340 *	0.398 *
L_{AI}	-0.556 **	-0.339 *	-0.318
Area	0.474 **	0.355 *	0.214

注: * 表示显著相关($P < 0.05$); ** 表示极显著相关($P < 0.01$), 下同。

的最主要因素; 中林窗内, 总辐射和直接辐射对幼苗的树高表现出显著正相关性($P < 0.05$)。总体上, 中林窗的冠层结构与华北落叶松幼苗的更新特征相关性不显著。大林窗内, 冠层结构和光因子与华北落叶松幼苗的树高呈极显著正相关($P < 0.01$), 与叶面积指数为显著负相关($P < 0.05$), 散射辐射和冠层开度与幼苗的冠幅呈显著正相关($P < 0.05$)。总体上, 大林窗的冠层结构和光因子对华北落叶松幼苗的更新有显著的促进作用。

3 结论与讨论

3.1 结论

华北落叶松林窗内冠层结构和光因子对华北落叶松幼苗的生长有显著的影响, 其中面积为 110~150 m² 的林窗最适合华北落叶松天然次生林幼苗

的生长发育。最适合华北落叶松幼苗生长的总辐射为 13%~21%,冠层开度为 24.87%~38%。

表 8 面积等级林隙的冠层结构、光因子与华北落叶松幼苗更新特征的相关性

Table 8 Correlation between canopy structure, light factors and regeneration characteristics of *L. principis-rupprechtii* seedlings

林隙等级	冠层结构及光因子	树高	地径	冠幅
小林隙	T_{ot}	0.320	0.453 *	0.490 *
	T_{DR}	0.241	0.371	0.370
	T_{DF}	0.360	0.479 *	0.554 *
	C_O	0.431 *	0.484 *	0.662 *
	L_{AI}	-0.195	-0.174	-0.448 *
中林隙	T_{ot}	0.390 *	0.272	0.259
	T_{DR}	0.420 *	0.180	0.311
	T_{DF}	0.143	0.234	0.057
	C_O	0.100	0.138	-0.068
	L_{AI}	-0.264	-0.267	0.011
大林隙	T_{ot}	0.973 **	0.556	0.720 *
	T_{DR}	0.888 **	0.552 *	0.496 *
	T_{DF}	0.920 **	0.480 *	0.847 **
	C_O	0.812 **	0.335	0.854 **
	L_{AI}	-0.814 **	-0.280	-0.700 *

3.2 讨论

在 3 个不同等级的林隙内,大林隙冠层结构与光因子对华北落叶松幼苗的更新特征有显著的正相关性,这种林隙冠层因子随林隙面积的变化趋势与前人的研究成果一致^[26-27]。小林隙内,散射辐射和冠层开度与幼苗更新特征有显著正相关性。小林隙的光主要为透射光,而幼苗主要依靠散射光进行光合作用,保障幼苗的正常更新与生长^[12,28]。而中林隙内,冠层结构和光因子与幼苗更新特征没有表现出显著相关性。这可能是由于林隙内不仅有华北落叶松幼苗更新,也有白杆幼苗植株生长,华北落叶松为喜阳喜光树种^[28],光环境对其有明显的促进作用,这在本研究 3 个不同等级林隙差异中得以验证,前人相关研究也发现,不同面积等级的林隙会对光合有效辐射与土壤温度产生显著影响^[12]。而白杆为云杉属植物,为喜阴树种^[29],在中林隙内与华北落叶松树种存在竞争关系,两者在生长空间与营养条件等方面彼此竞争,限制了华北落叶松幼苗的生长发育^[24]。除了其他树种的竞争外,灌草的盖度、高度等环境因子也会影响林下更新^[30]。而在大林隙中,由于有足够的生长空间与光环境,喜阳的华北落叶松幼苗处于优势地位。样地所在林地内,存在牛等牲畜对部分植株幼苗的破坏情况,因此外来干扰因素可能对研究结果会有一定的影响。

致谢:感谢山西农业大学林学院冯梁梁、王辰、

梁月鹏、茹川鉴、贺文静、杨杰艳等同学在数据采集、处理等方面的努力付出,同时感谢基金项目的资金支持!

参考文献:

[1] 徐成立.燕山山地华北落叶松人工林林隙特征及其影响[D].保定:河北农业大学,2007.

[2] 李谭宝,李淑静,王彩云.黄龙山白皮松林林隙物种多样性动态[J].西北林学院学报,2015,30(4):66-72.

LI T B, LI S J, WANG C Y. Gap dynamics of species diversity in *Pinus bungeana* forest in Huanglong Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(4): 66-72. (in Chinese)

[3] 陈龙斌,孙昆,张旭,等.林隙干扰对森林生态系统的影响[J].应用生态学报,2021,32(2):701-710.

CHEN L B, SUN K, ZHANG X, et al. Effects of forest gap disturbance on forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2): 701-710. (in Chinese)

[4] 段文标,景鑫,周美珩,等.林隙大小对不同林型天然红松混交林土壤有机碳和全氮的影响[J].生态学杂志,2015,34(8):2077-2084.

DUAN W B, JING X, ZHOU M H, et al. Effect of gap size on soil organic carbon and total nitrogen in different types of natural *Pinus koraiensis* mixed forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(8): 2077-2084. (in Chinese)

[5] 李伟成,盛海燕,杨慧敏,等.延胡索根际土壤细菌多样性与结构对毛竹林隙面积的响应[J].生态学杂志,2019,38(6):1716-1724.

LI W C, SHENG H Y, YANG H M, et al. Responses of *Corydalis yanhusuo* rhizosphere soil bacterial community diversity and structure to gap size in a moso bamboo forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6): 1716-1724. (in Chinese)

[6] 李佳欣,牟长城,田博宇,等.林隙大小和隙内位置对小兴安岭蒙古栎林内红松光合能力的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2022,46(2):159-168.

LI J X, MOU C C, TIAN B Y, et al. Effects of gap sizes and within-gap positions on the photosynthetic capacity of *Pinus koraiensis* in *Quercus mongolica* forests in Xiaoxing'an Mountains[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2022, 46(2): 159-168. (in Chinese)

[7] NEWELL P, KING S, KALLER M. Foraging behavior of pileated woodpeckers in partial cut and uncut bottomland hardwood forest[J]. Forest Ecology & Management, 2009, 258(7): 1456-1464.

[8] GRAY A N. Gap size, within-gap position and canopy structure effects on conifer seedling establishment[J]. The Journal of Ecology, 1996, 84(5): 635-645.

[9] DIACI J, GYOEREK N, NAGEL G. Response of *Quercus robur* L. seedlings to north-south asymmetry of light within gaps in floodplain forests of Slovenia[J]. Annals of Forest Science, 2008, 65(1): 1-8.

[10] 陈佳,曲美学,李丹,等.椴树红松林林隙边缘木特征研究[J].西南林业大学学报:自然科学,2021,41(2):93-99.

CHEN J, QU M X, LI D, et al. Forest gap border tree charac-

- teristics in the *Tilia amurensis*-*Pinus koraiensis* forest[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences Edition, 2021, 41(2): 93-99. (in Chinese)
- [11] 闫淑君, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带常绿阔叶林林隙面积的 Weibull 分布模型研究[J]. 江西农业大学学报: 自然科学, 2002(6): 802-805.
YAN S J, HONG W, WU C Z. A study on Weibull model for gap area in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Wanmulin[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis: Natural Sciences Edition, 2002(6): 802-805. (in Chinese)
- [12] 罗桂生, 马履一, 贾忠奎, 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.
LUO G S, MA L Y, JIA Z K, *et al.* Comparison of environmental factors differences in gaps with different size of *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(5): 86-94. (in Chinese)
- [13] 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.
HE D N, YANG H, WEN J, *et al.* Density and spatial distribution of seedlings and saplings in different gap sizes of a spruce-fir mixed stand in Changbai Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 1916-1922. (in Chinese)
- [14] 郑德祥, 蔡杨新, 许鲁东, 等. 闽北闽粤栲天然林林隙物种数量特征及更新规律分析[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(3): 92-99.
ZHENG D X, CAI Y X, XU L D, *et al.* Analyses on quantitative characteristics and regeneration regularity of species of gap in natural forest of *Castanopsis fissa* in northern Fujian[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2017, 26(3): 92-99. (in Chinese)
- [15] 秦琰. 油松人工林林隙特征及其对更新的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
- [16] 张最最. 兴安落叶松林林隙特征与更新研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [17] 师静, 许彦红, 李任波, 等. 松花坝水库云南松林隙天然更新研究[J]. 林业调查规划, 2009, 34(6): 48-51.
SHI J, XU Y H, LI R B, *et al.* Study on natural regeneration of *Pinus yunnanensis* around Songhuaba reservoir[J]. Forest Inventory and Planning, 2009, 34(6): 48-51. (in Chinese)
- [18] 李晖, 杨华, 谢榕. 长白山云冷杉林林隙冠层特征及与幼苗幼树的关系[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(7): 54-62.
LI H, YANG H, XIE R. Canopy characteristics in gaps and its relationship with seedlings and saplings in a spruce-fir forest in the Changbai Mountain area of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(7): 54-62. (in Chinese)
- [19] WAGNER H S. Gap structure and establishment of Silver birch regeneration (*Betula pendula* Roth.) in Norway spruce stands (*Picea abies* L. Karst.)[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 229(1): 314-324.
- [20] WANG Z, YANG H, DONG B, *et al.* Regeneration response to canopy gap size in a Chinese pine plantation: species diversity patterns, size structures and spatial distributions[J]. Forest Ecology & Management, 2017, 397: 97-107.
- [21] TIAN H, CHENG X, HAN H, *et al.* Seasonal variations and thinning effects on soil phosphorus fractions in *Larix principis-rupprechtii* Mayr. plantations[J]. Forests, 2019, 10(2): 1-16.
- [22] 宋新章, 张智婷, 肖文发, 等. 长白山次生杨桦林采伐林隙乔灌木幼苗更新比较研究[J]. 林业科学研究, 2008, 21(3): 289-294.
SONG X Z, ZHANG Z T, XIAO W F, *et al.* Study on seedling regeneration of arbor and shrub in logging gaps in *Populus davidiana*-*Betula platyphylla* secondary forests in Changbai Mountain[J]. Forest Research, 2008, 21(3): 289-294. (in Chinese)
- [23] MACFARLANE C. Classification method of mixed pixels does not affect canopy metrics from digital images of forest-overstorey[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151(7): 833-840.
- [24] 刘志理, 金光泽. 小兴安岭白桦次生林叶面积指数的估测[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2505-2513.
LIU Z L, JIN G Z. Estimation of leaf area index of secondary *Betula platyphylla* forest in Xiaoxingan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2505-2513. (in Chinese)
- [25] 马泽清, 刘琪璟, 曾慧卿, 等. 南方人工林叶面积指数的摄影测量[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 1971-1980.
- [26] 周振钊, 范春楠, 郭忠玲, 等. 长白山红松阔叶林林隙及更新特征[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2019, 20(2): 161-167.
- [27] Downey, M, Valkonen, *et al.* Natural tree regeneration and vegetation dynamics across harvest gaps in Norway spruce dominated forests in southern Finland[J]. Canada Journal Forest Research, 2018, 48(2): 524-532.
- [28] 马惠英, 文英, 韩云花, 等. 水曲柳阔叶混交林冠层光分布与天然更新相关性研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 97-101.
MA H Y, WEN Y, HAN Y H, *et al.* Correlations between light distribution of the crown layer and natural regeneration of *Fraxinus mandshurica*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 97-101. (in Chinese)
- [29] 张芸香, 李海波, 郭晋平. 实验条件下华北落叶松和白杆苗期生长策略的差异比较[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 7064-7071.
ZHANG Y X, LI H B, GUO J P. Comparison of growth strategy for *Larix principis-rupprechtii* and *Picea meyeri* seedlings under controlled conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 7064-7071. (in Chinese)
- [30] 井赛, 张静, 侯晓巍, 等. 三江源东部祁连山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)