

大兴安岭落叶松毛虫不同危害程度虫害木结构特征

王千雪^{1,2}, 王 烁^{1,2*}, 韩大校^{1,2}, 于宏影^{1,2}, 崔 嵘^{1,2}, 黄 艳^{1,2}, 丛日征^{1,2}

(1. 国家林业和草原局 哈尔滨林业机械研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086;

2. 中国林业科学研究院 寒温带林业研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘 要:以落叶松毛虫林分为研究对象,通过林分空间结构参数一元分布和二元分布的分析方法,对落叶松毛虫不同危害程度虫害木的结构特征进行分析。结果表明,极轻度危害林木的角尺度为 0.470,分布格局为均匀分布,轻度危害林木的角尺度为 0.495,分布格局为随机分布,中度危害林木的角尺度为 0.544,分布格局为聚集分布,落叶松毛虫危害程度越高,林分角尺度越大;极轻度危害、轻度危害和中度危害林木的大小比数分别为 0.483、0.495 和 0.539,危害程度越高,林分大小比数越大。极轻度危害、轻度危害和中度危害虫害木最近 4 株相邻木中,同样为虫害木的比例分别为 57.2%、82.1% 和 91.1%,危害程度越高,虫害木连续分布的情况越多;不同危害程度虫害木的角尺度-大小比数二元分布特征和虫害木比-大小比数二元分布特征有所差异,虫害木比-角尺度二元分布特征差异不明显。在森林经营活动中可以通过调整林分空间结构,降低林分角尺度减少聚集分布、降低林木大小比数改善林木生长状况,从而达到抑制虫害爆发的目的。

关键词:落叶松毛虫;空间结构;虫害木

中图分类号:S763.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)01-0095-05

Structure Characteristics of *Dendrolimus superans* Damaged Trees With Different Damage Degrees in Daxing'an Mountain

WANG Qian-xue^{1,2}, WANG Shuo^{1,2*}, HAN Da-xiao^{1,2}, YU Hong-ying^{1,2}, CUI Rong^{1,2},
HUANG Yan^{1,2}, CONG Ri-zheng^{1,2}

(1. Harbin Research Institute of Forestry Machinery, National Forestry and Grassland Administration, Harbin 150086,

Heilongjiang, China; 2. Research Center of Cold Temperate Forestry, Chinese Academy of Forestry, Harbin 150086, Heilongjiang, China)

Abstract: Taking the *Larix gmelinii* stands damaged by *Dendrolimus superans* as the research object, the spatial structure characteristics of the damaged trees with different damage degrees were analyzed by univariate and bivariate distribution analysis method. The results showed that the uniform angle index (UAI) of extremely lightly-damaged trees was 0.470, and the distribution pattern was uniform. The UAI of slightly-damaged trees was 0.495, and the distribution pattern was random. The UAI of moderately-damaged trees was 0.544, and the distribution pattern was aggregation distribution. The higher damage degree of the stand, the higher uniform angle index. The neighborhood comparison of extremely lightly-damaged, slightly-damaged and moderately-damaged was 0.483, 0.495 and 0.539, indicating the higher degree of the stand, the higher neighbourhood comparison. Among the four adjacent trees with extremely lightly-damaged, slightly-damaged and moderately-damaged trees, the proportions of damaged trees was 57.2%, 82.1% and 91.1%. The greater the degree of damage, the more cases of continuous distribution of damaged trees. The bivariate distribution characteristics of the uniform angle index and neighbourhood compar-

收稿日期:2022-12-03 修回日期:2023-04-04

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2020MA004)。

第一作者:王千雪,工程师。研究方向:森林培育。E-mail:wqx890711@163.com

* 通信作者:王 烁,助理研究员。研究方向:森林经理。E-mail:2529853280@qq.com

ison of the trees with different damage degrees were different from those of damaged tree ratio and neighbourhood comparison, but the difference of bivariate distribution characteristics of the damage tree ratio and uniform angle index were not obviously. In forest management activities, we can adjust the spatial structure of the stand, reduce the stand uniform angle index and the neighbourhood comparison to improve the growth status of trees, so as to achieve the purpose of controlling the outbreak of pests.

Key words: *Dendrolimus superans*; spatial structure; pest damaged tree

森林空间结构是树木及其属性在森林中的空间分布^[1],影响着林木之间的竞争及其空间生态位,对林分的稳定性和发展起着决定性的作用^[2-3]。森林病虫害的发生与森林结构密切相关,空间结构的优良程度决定了林分抵御病虫害侵扰能力的强弱^[4]。因此,研究森林空间结构与病虫害之间的关系,继而通过调整林分结构来实现对病虫害的生态调控,是一项重要且可持续的森防措施。近年来,国外学者研究表明森林食叶害虫空间分布受气象因素、立地条件和林分结构等多种因子的共同影响^[5-6]。国内也有学者开始研究林分空间结构与病虫害之间的关系^[7-9],基于空间结构层面的天然林病虫害研究,对于以森林经营技术措施为主的病虫害生态防控具有重要意义。

兴安落叶松(*Larix gmelinii*)是大兴安岭的森林优势种和建群种,对生态系统的稳定、保护物种多样性和森林可持续发展具有非常重要的作用和地位^[10],落叶松毛虫(*Dendrolimus superans*)属鳞翅目枯叶蛾科松毛虫属,是大兴安岭兴安落叶松的主要食叶害虫之一,由于落叶松毛虫传播速度快、发生面积广、危害严重等特点,近年来人们越来越重视对落叶松毛虫的研究。目前,对落叶松毛虫生物学特性、发生与环境的关系等研究比较深入^[11-12],部分学者从区域尺度上分析了气象条件对落叶松毛虫灾害发生的影响^[13-15],研究表明,落叶松毛虫的空间分布也容易受到森林立地条件、林分结构的影响^[16-17],近年来,国内学者相继针对落叶松毛虫的发生与森林立地类型、林分组成的关系开展了研究,关于落叶松毛虫的发生和林分结构之间的研究已取得了一些进展^[18-19],但还不够深入,缺少林分结构对落叶松毛虫影响的量化研究。因此,本研究以落叶松毛虫林分为对象,对不同危害程度虫害木的空间结构一元分布和二元分布特征进行分析,揭示落叶松毛虫虫害木的结构特征,探索落叶松毛虫林分单木间的空间关系,为大兴安岭落叶松林的资源保护和落叶松毛虫的科学防控提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古绰尔林业局,地处大兴安岭

东南麓(120°17'52"—121°37'50"E, 47°35'21"—48°10'13"N)。北与绰源林业局毗邻,南与阿尔山林业局、柴河林业局接壤,西与红花尔基林业局相连,东与南木林业局为邻。该地区属寒温带大陆性季风气候区,全年平均气温-3.4℃,1月份平均气温-24.9℃,最低气温-44.1℃,7月平均气温16.2℃,最高温度29.9℃。年均降水量426mm,无霜期100~110d。主要森林类型有寒温性针叶林、落叶阔叶林。主要树种为兴安落叶松和白桦(*Betula platyphylla*)。

1.2 样地调查

2021年7月在绰尔林业局巴升河林场选择典型落叶松毛虫林分,设置1hm²固定样地,对样地内所有胸径>5cm的树木运用全站仪进行定位,对样地内林木进行全面调查,调查内容包括坡度、海拔、郁闭度、胸径、树高、冠幅、更新等。在落叶松毛虫下树期于每株树的胸径处环刮去树干的粗皮,涂抹粘虫胶,对落叶松毛虫幼虫进行阻隔,幼虫下树期结束后统计样地内单株林木落叶松毛虫下树的虫口密度分布情况。落叶松毛虫危害程度根据国家林业行业标准《松毛虫监测预报技术规程》(LY/T 3030-2018)划分^[20],极轻度危害为20条·株⁻¹以下,轻度危害为20~40条·株⁻¹,中度危害为41~70条·株⁻¹,重度危害为71条·株⁻¹以上。

1.3 林分空间结构参数计算

选用目前应用较为广泛的基于相邻木关系的空间结构参数,即反映林木水平分布格局的角尺度(W),体现林木个体大小分化程度的大小比数(U)^[21],其含义及计算方法如下。

1)角尺度 用来描述相邻木围绕参照树的均匀性。

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^n Z_{ij} \quad (1)$$

式中: W_i 为林木*i*点的角尺度; n 为最近相邻木的株数;当第*j*个相邻木的 α 角小于标准角 α_0 时, $Z_{ij}=1$,否则 $Z_{ij}=0$ 。相邻木取 $n=4$ 时,标准角为72°,当 $W_i=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.00$ 时,分别表示参照树很均匀、均匀、随机、不均匀和很不均匀。

2)大小比数 用来描述林木个体大小分化程度

或树种的生长优势程度。

$$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^n k_{ij} \tag{2}$$

式中: U_i 为林木 i 点的大小比数;若相邻木 j 比参照树 i 大, $k_{ij}=1$,否则 $k_{ij}=0$ 。当 $U_i=0、0.25、0.5、0.75、1.00$ 时,分别表示参照树处于优势、亚优势、中庸、劣势和绝对劣势。

1.4 数据分析

使用 Excel 2013 软件对数据进行处理,使用森林空间结构分析软件 Winkelmass 1.0 2006 计算落叶松毛虫林分的空间结构参数^[22],在分析落叶松毛虫害木的林分水平格局时,需要将非虫害木的坐标去除,在分析落叶松毛虫害木微环境时采用空间结构二元分布方法^[23],将虫害木与非虫害木坐标放在一起进行分析,此时将虫害木最近 4 株相邻木中同样为虫害木所占的比例定义为虫害木比,用来表达虫害木周围同样被危害的林木的分布数量。角尺度、大小比数和虫害木比可形成角尺度-大小比数、虫害木比-角尺度和虫害木比-大小比数 3 种组合的相对频率值。相对频率值是指处于某 2 个指标组合的相对频率,即样地中处于某种生存状态的林木株数占总株数的比例。

2 结果与分析

2.1 落叶松毛虫林分基本特征

样地基本特征见表 1,虫害木共 414 株,其中极轻度危害、轻度危害、中度危害的虫害木比例分别为 50.2%、28.2%和 12%。图 1 为不同危害程度虫害木的角尺度分布频率,极轻度危害林木的角尺度为 0.470,分布格局为均匀分布,轻度危害林木的角尺度为 0.495,为随机分布,中度危害林木的角尺度为 0.544,为聚集分布,危害程度越高角尺度值越大,说明落叶松毛虫的危害程度与角尺度呈正相关的关系。图 2 为不同危害程度虫害木的大小比数分布频率,极轻度危害林木的大小比数为 0.483,处于优势状态的林木占多数,轻度危害林木的大小比数为 0.495,整体处于中庸状态,中度危害林木的大小比数为 0.539,处于劣势状态的林木占多数,危害程度越高大小比数值越大,说明落叶松毛虫的危害程度与大小比数也呈正相关关系。

2.2 落叶松毛虫害木最近相邻木结构特征

将整个林分作为研究对象,以虫害木为参照树,分析最近 4 株相邻木与其组成的结构单元特征(表 2)。由表 2 可以看出,不同危害程度的虫害木最近 4 株相邻木大多随机分布在虫害木周围,完全聚集或均匀的比例极少;极轻度危害林木中,3 株相邻木

胸径比虫害木大的结构单元最多,所占比例为 25.7%。轻度危害林木中,2 株相邻木胸径比虫害木大的结构单元最多,所占比例为 25.3%。中度危害林木中,4 株相邻木胸径比虫害木小的结构单元最多,所占比例为 28.9%;从虫害木比可以看出,极轻度危害林木中,有 57.2%的虫害木最近 4 株相邻木全部为虫害木,轻度危害林木中,有 82.1%的虫害木最近 4 株相邻木全部为虫害木,中度危害林木中有 91.1%的虫害木最近 4 株相邻木全部为虫害木,随着危害度的增加,虫害木的连续分布情况增多。

表 1 落叶松毛虫林分样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of Larix gmelinii stands damaged by Dendrolimus superans

类型	胸径/cm			密度/ (株·hm ⁻²)	断面积/ (m ² ·hm ⁻²)
	最小	最大	平均		
全林	7.0	38.6	24.1	458	20.88
极轻度危害	7.0	36.0	22.8	230	9.39
轻度危害	8.8	38.6	25.4	129	6.54
中度危害	11.0	37.0	26.1	55	2.94

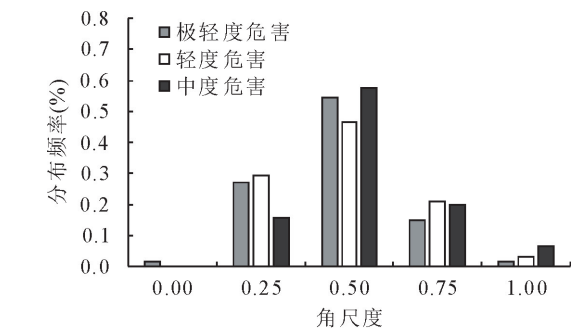


图 1 角尺度分布频率

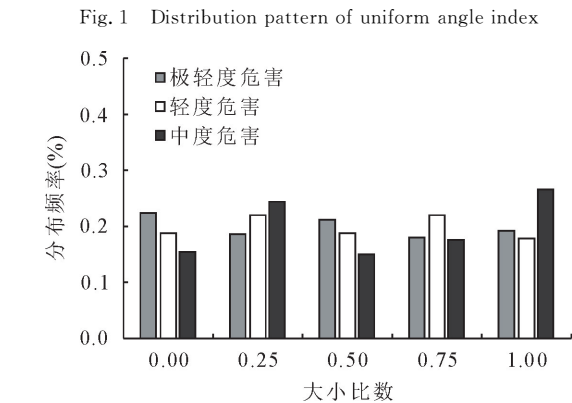


图 2 大小比数分布频率

Fig. 2 Distribution pattern of neighbourhood comparison

2.3 落叶松毛虫害木相邻木二元分布特征

2.3.1 角尺度与大小比数的二元分布 由表 3 可知,不同危害程度的角尺度-大小比数二元分布差异明显。极轻度危害林木中,角尺度为 0.5,大小比数分别为 0.75 和 1 组合的频率最高,所占比例为 26.74%,说明随机分布且胸径处于劣势状态的林木较多;轻度危害虫害木中,角尺度分别为 0 和 0.25,

表 2 虫害木结构参数一元分布特征

Table 2 Distribution characteristics of structural parameters of the damaged trees

参数取值	极轻度危害					轻度危害					中度危害				
	0	0.25	0.50	0.75	1.00	0	0.25	0.50	0.75	1.00	0	0.25	0.50	0.75	1.00
角尺度	0.032	0.321	0.540	0.107	0.000	0.021	0.400	0.474	0.084	0.021	0.044	0.244	0.555	0.133	0.022
大小比数	0.144	0.182	0.182	0.257	0.235	0.242	0.242	0.253	0.158	0.105	0.289	0.222	0.244	0.111	0.133
虫害木比	0.000	0.048	0.080	0.300	0.572	0.000	0.000	0.032	0.147	0.821	0.000	0.000	0.022	0.067	0.911

表 3 角尺度与大小比数的二元分布

Table 3 Bivariate distribution of neighborhood pattern and neighborhood comparison

危害程度	角尺度	空间结构二元分布				
		U=0	U=0.25	U=0.50	U=0.75	U=1.00
极轻度危害	0.00	0.53	0.00	0.00	1.07	1.60
	0.25	3.74	5.88	6.42	8.02	8.02
	0.50	7.49	11.23	8.56	13.37	13.37
	0.75	2.67	1.07	3.21	3.21	0.53
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
轻度危害	0.00	0.00	9.47	13.68	0.00	1.05
	0.25	0.00	8.42	13.68	2.11	0.00
	0.50	2.11	8.42	10.53	4.21	0.00
	0.75	0.00	6.32	7.37	1.05	1.05
	1.00	0.00	7.37	2.11	1.05	0.00
中度危害	0.00	0.00	2.22	2.22	0.00	0.00
	0.25	2.22	6.67	6.67	2.22	6.67
	0.50	20.00	8.89	13.33	6.67	6.67
	0.75	4.44	4.44	2.22	2.22	0.00
	1.00	2.22	0.00	0.00	0.00	0.00

大小比数为 0.5 组合的频率最高,所占比例为 27.36%,说明均匀分布且胸径处于中庸状态的林木较多;中度危害虫害木中,角尺度为 0.5、大小比数为 0 组合的频率最高,所占比例为 20%,说明随机分布且胸径处于优势状态的林木较多。

2.3.2 虫害木比与角尺度的二元分布 由表 4 可知,不同危害程度的虫害木比-角尺度二元分布差异不明显。不同危害程度虫害木中,虫害木比为 1、角尺度为 0.5 的组合频率最高,比例分别为 29.41%、35.79%和 48.89%,说明随机分布且相邻木中 4 株全部为虫害木的林木最多,且随着危害度的增大,所占比例也增大。其次为虫害木比为 1、角尺度为 0.25 的组合,比例分别为 18.18%、34.74%和 24.44%,说明均匀分布且相邻木中 4 株全部为虫害木的林木较多,其他几种组合关系所占比例较小。

2.3.3 虫害木比与大小比数的二元分布 由表 5 可知,不同危害程度的虫害木比-大小比数二元分布差异明显。极轻度危害虫害木中,虫害木比为 1、大小比数为 1 的组合频率最高。轻度危害虫害木中,虫害木比为 1、大小比数为 0.5 组合频率最高。中

度危害虫害木中,虫害木比为 1、大小比数为 0 的组合频率最高,比例分别为 16.04%、21.05%和 28.89%。极轻度危害林木胸径处于劣势状态且相

表 4 虫害木比与角尺度的二元分布

Table 4 Bivariate distribution of pest tree radio and neighborhood pattern

危害程度	虫害木比	空间结构二元分布				
		W=0	W=0.25	W=0.50	W=0.75	W=1.00
极轻度危害	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	2.14	2.14	0.53	0.00
	0.50	0.53	1.60	4.28	1.60	0.00
	0.75	0.00	10.16	18.18	1.60	0.00
	1.00	2.67	18.18	29.41	6.95	0.00
轻度危害	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	1.05	1.05	0.00	1.05
	0.75	0.00	4.21	10.53	0.00	0.00
	1.00	2.11	34.74	35.79	8.42	1.05
中度危害	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	2.22	0.00	0.00
	0.75	0.00	0.00	4.44	2.22	0.00
	1.00	4.44	24.44	48.89	11.11	2.22

表 5 虫害木比与大小比数的二元分布

Table 5 Bivariate distribution of pest tree radio and neighborhood comparison

危害程度	虫害木比	空间结构二元分布				
		U=0	U=0.25	U=0.50	U=0.75	U=1.00
极轻度危害	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	1.07	2.14	0.00	1.60	0.00
	0.50	1.07	1.07	3.21	2.14	0.53
	0.75	3.74	6.42	5.35	7.49	6.95
	1.00	8.56	8.56	9.63	14.44	16.04
轻度危害	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	1.05	1.05	0.00	1.05	0.00
	0.75	4.21	4.21	4.21	1.05	1.05
	1.00	18.95	18.95	21.05	13.68	9.47
中度危害	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	2.22	0.00
	0.75	0.00	6.67	0.00	0.00	0.00
	1.00	28.89	15.56	24.44	8.89	13.33

邻木有4株为虫害木的林木较多,轻度危害胸径处于中庸状态且相邻木4株全部为虫害木的林木较多,中度危害胸径处于优势状态且相邻木4株全部为虫害木的林木较多。

3 讨论与结论

不同危害程度的落叶松毛虫林分结构特征有所差异,极轻度危害林木分布格局为均匀分布,轻度危害林木为随机分布,中度危害林木为聚集分布,危害程度越高角尺度值越大,说明落叶松毛虫的危害程度与角尺度呈正相关的关系。不同危害程度的大小比数值也有所差异,危害程度越高大小比数值越高,说明落叶松毛虫的危害程度与大小比数也呈正相关的关系。这与孙晨辉^[24]对长白山原始林空间结构与落叶松毛虫虫口密度关系的研究结果一致。聚集分布时给松毛虫提供了有利的条件,导致虫口数量最高。危害程度与大小比数呈正相关,表明落叶松毛虫喜欢取食优势度低的林木,这与自然状态下害虫通常的危害规律吻合^[9]。森林经营中可以通过调整林分空间结构,即减少聚集分布、降低林木大小比数,改善林木生长状况以抑制虫害的发生。

林分空间结构参数的二元分布能够更精细地提供林分空间结构特征^[25-26]。二元分布中,虫害木的角尺度-大小比数二元分布特征差异明显,极轻度危害林木中处于随机分布且为劣势状态的比例最大,轻度危害林木中处于随机分布且优势度在中庸水平的比例最大,中度危害林木中处于随机分布且为优势状态的比例最大;虫害木比-角尺度二元分布特征差异不明显,均为随机分布且最近4株林木全部为虫害木的比例最大;虫害木比-大小比数二元分布特征有所差异,极轻度危害林木最近4株全部为虫害木且为劣势状态的比例最高,轻度危害和中度危害林木中最近4株全部为虫害木且为优势状态的比例最高。森林经营中可参考二元分布结果通过密度调整减小虫害木比,从而达到降低落叶松毛虫危害程度的目的。

一元分布特征能够了解虫害木与最近4株林木的总体特征和差异,运用结构参数二元分布能够更加详细地刻画每株虫害木与其相邻木的关系。本研究对不同危害程度下的落叶松毛虫林分空间结构特征进行了分析,可为以森林经营技术措施为主的落叶松毛虫防控提供科学依据。

参考文献:

[1] POMMERENING A. Approaches to quantifying forest structures[J]. *Forestry*, 2002(3):305-324.

[2] PRETZSCH H. Analysis and modeling of spatial stand structures. Methodological considerations based on mixed beech-larch stands in Lower Saxony[J]. *Forest Ecology and Management*, 1997, 97(3):237-253.

[3] 惠刚盈, 胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究[J]. *林业科学研究*, 2001, 14(1):23-27.

[4] 梁军, 朱彦鹏, 孙志强, 等. 森林生态系统组成和结构与病虫害防治[J]. *中国森林病虫*, 2012, 31(5):7-12.

LIANG J, ZHU Y P, SUN Z Q, *et al.* Relationship of forest ecosystem composition and structure with management of pests[J]. *Forest Pest and Disease*, 2012, 31(5):7-12. (in Chinese)

[5] BALE J S, MASTERS G J, HODKINSON I D, *et al.* Herbivory in global climate change research: Direct effects of rising temperature on insect herbivores[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8:1-16.

[6] Gray D R. The relationship between climate and outbreak characteristics of the spruce budworm in eastern Canada[J]. *Climatic Change*, 2008, 87:361-383.

[7] 王静, 梁军, 焦一杰, 等. 杨树人工林林木个体大小比数与溃疡病发生程度的关系[J]. *林业科学*, 2012, 48(11):57-62.

WANG J, LIANG J, JIAO Y J, *et al.* Relationships between neighborhood comparison of short-rotation poplar plantations and canker disease incidence[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(11):57-62. (in Chinese)

[8] 梁军, 马琳, 黄咏槐, 等. 森林空间结构对松赤枯病发生程度的影响[J]. *林业科学*, 2016, 52(8):60-67.

LIANG J, MA L, HUANG Y H, *et al.* Impact of forest spatial structure on damaging degree of pine needle blight[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(8):60-67 (in Chinese)

[9] 黄咏槐, 梁军, 马琳, 等. 森林空间结构对崑崙山腮扁叶蜂虫口密度的影响[J]. *林业科学*, 2018, 54(7):87-93.

HUANG Y H, LIANG J, MA L, *et al.* Impact of forest spatial structure on the population density of *Cephalcia kunyushanica* (Hymenoptera: Pamphiliidae) [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(7):87-93. (in Chinese)

[10] 温晶, 张秋良, 韩胜利, 等. 不同抚育间伐强度对兴安落叶松林分平均直径和树高生长的影响[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(5):163-166.

WEN J, ZHANG Q L, HAN S L, *et al.* Effects of different thinning intensities on the average diameter and height growth of *Larix gmelinii* forest[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(5):163-166. (in Chinese)

[11] 陈宏伟, 胡远满, 常禹, 等. 我国大兴安岭林区落叶松毛虫综合研究进展[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(1):119-127.

CHEN H W, HU Y M, CHANG Y, *et al.* Advances in the researches of *Dendrolimus superans* of Daxing'an Mountain of China[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(1):119-127. (in Chinese)

[12] 邹莉, 张国权, 黄建伟. 东北地区落叶松毛虫研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(9):2584-2587.

ZOU L, ZHANG G Q, HUANG J W. Research progress of *Dendrolimus superans* in northeast of China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(9):2584-2587. (in Chinese)

- HE A N, SU L, WU X J, *et al.* A comparison of the photosynthetic characteristics and agronomic indexes of *Polygonatum cyrtoneura* and *Polygonatum sibiricum* [J]. Journal of Huaihua University, 2020, 39(5): 6-10. (in Chinese)
- [11] 徐晓蓝, 徐世浩, 梁宗锁, 等. 不同叶位黄精叶片的光合日变化及其影响因子[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2020, 48(2): 119-128.
- XU X L, XU S H, LIANG Z S, *et al.* Photosynthetic physiological characteristics and its influencing factors of *Polygonatum sibiricum* Red. leaves in different positions [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2020, 48(2): 119-128. (in Chinese)
- [12] 黄竹珺, 李茜, 陈丹, 等. 云南地区滇黄精中黄精多糖的提取及其含量的测定[J]. 生物化工, 2021, 7(4): 107-109.
- HUANG Z J, LI X, CHEN D, *et al.* Content determination of polygonatum polysaccharides in *Polygonatum kingianum* in Yunnan Province [J]. Biological Chemical Engineering, 2021, 7(4): 107-109. (in Chinese)
- [13] 区余端, 苏志尧. 粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构与林下光照动态[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5637-5645.
- OU Y D, SU Z Y. Dynamics of canopy structure and understory light in montane evergreen broadleaved forest following a natural disturbance in north Guangdong [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5637-5645. (in Chinese)
- [14] 刘文海, 高东升, 束怀瑞. 不同光强处理对设施桃树光合及荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(10): 2069-2075.
- LIU W H, GAO D S, SHU H R. Effects of different photon flux density on the characteristics of photosynthesis and chlorophyll II fluorescence of peach trees in protected Culture [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(10): 2069-2075. (in Chinese)
- [15] 杨建宇, 刘晓娟, 杨晓杰. 森林冠层结构与光环境及其对林下植被生长和格局的影响[J]. 高师理科学刊, 2015, 35(7): 57-62.
- YANG J Y, LIU X J, YANG X J. Forest canopy structure, light environment and their effects on the vegetation pattern and growth of understory in forests [J]. Journal of Science of Teachers College and University, 2015, 35(7): 57-62. (in Chinese)
- (上接第 99 页)
- [13] 刘志明, 晏明, 张旭东, 等. 气象因子对落叶松毛虫的影响分析[J]. 灾害学, 2002, 17(4): 33-38.
- [14] 杨淑香, 赵慧颖, 包兴华. 基于人工神经网络的落叶松毛虫发生量预测模型的研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(28): 72-75.
- YANG S X, ZHAO H Y, BAO X H. A study on the forecast model of *Dendrolimus superans* butler occurrence based on artificial neural network [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(28): 72-75. (in Chinese)
- [15] 于跃, 房磊, 方国飞, 等. 气象因子对落叶松毛虫种群数量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2839-2847.
- YU Y, FANG L, FANG G F, *et al.* Influences of meteorological factors on larch caterpillar population [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2839-2847. (in Chinese)
- [16] 李莉, 孟焕文, 孙旭. 落叶松毛虫生物学[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2002, 23(1): 101-103.
- LI L, MENG H W, SUN X. Bionomics of *Dendrolimus superans* butler [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2002, 23(1): 101-103. (in Chinese)
- [17] 佟丽丽, 严善春, 王琪, 等. 落叶松针叶内缩合单宁含量与树龄及家系的关系[J]. 生态学杂志, 2010, 29(2): 221-225.
- TONG L L, YAN S C, WANG Q, *et al.* Relationship of condensed tannin content in larch needles with larch stand age and its family [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(2): 221-225. (in Chinese)
- [18] 于跃, 房磊, 王凤霞, 等. 落叶松毛虫发生的空间分布及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1285-1293.
- YU Y, FANG L, WANG F X, *et al.* Spatial distribution of larch caterpillar and its driving factors [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(5): 1285-1293. (in Chinese)
- [19] 孙晨辉, 许嘉巍, 靳英华, 等. 长白山原始林空间结构与落叶松毛虫虫口密度关系研究[J]. 林业调查规划, 2022, 47(1): 72-80.
- SUN C H, XU J W, JIN Y H, *et al.* Relationship between spatial structure of primary forest and population density of *Dendrolimus superans* in Changbai Mountains [J]. Forest Inventory and Planning, 2022, 47(1): 72-80. (in Chinese)
- [20] 方国飞, 张旭, 谭宏利, 等. LY/T3030 松毛虫监测预报技术规程[S]. 北京: 国家林业和草原局, 2018.
- [21] 惠刚盈, 赵中华, 陈明辉. 描述森林结构的重要变量[J]. 温带林业研究, 2020, 3(1): 14-20.
- HUI G Y, ZHAO Z H, CHEN M H. Important variables describing forest structure [J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2020, 3(1): 14-20. (in Chinese)
- [22] 惠刚盈, 克劳斯·冯佳多. 森林空间结构量化方法 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- [23] 李远发. 林分空间结构参数二元分布的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [24] 孙晨辉. 长白山原始林森林结构对落叶松毛虫数量影响研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2021.
- [25] 姜星宇, 徐华东, 陈文静. 基于集成学习和 Sentinel-2 的落叶松毛虫虫害区识别[J]. 森林工程, 2023, 39(6): 147-155.
- [26] 赵中华, 刘灵, 王宏翔, 等. 红花岗基沙地樟子松天然林枯立木特征分析[J]. 林业科学研究, 2017, 30(5): 788-796.
- ZHAO Z H, LIU L, WANG H X, *et al.* Dead standing trees characteristics analysis of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* natural forest in Honghuaerji [J]. Forest Research, 2017, 30(5): 788-796. (in Chinese)