

大兴安岭中部地区不同林分类型结构复杂性评价

董灵波,唐亚如,田栋元,刘兆刚*,蔺雪莹

(东北林业大学林学院,森林生态系统可持续经营教育部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 100040)

摘要:【目的】通过对不同林分类型结构复杂性的评价来确定影响林分结构的主要因素,为后续森林结构经营的精准调整提供理论依据。【方法】以大兴安岭地区翠岗林场的不同林分类型(白桦林、兴安落叶松-白桦混交林和兴安落叶松林)为研究对象,基于不同林分类型的30块固定样地调查数据,从林分结构、林木大小多样性、林分活力和土壤状况4个方面选取13个指标,采用雷达图法对不同林分类型结构复杂性状况进行评价。【结果】3个林分类型林分直径分布均为倒“J”形;林分整体呈随机或轻微均匀分布;林木大小分化呈劣势和中庸分化状态;林分密集程度从中等状态向密集状态转变;林分混交度、Simpson多样性指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数均在兴安落叶松-白桦混交林有最大值,而林分蓄积和健康木占比在兴安落叶松林有最大值;林下天然更新数量、土壤有机质含量、土壤腐殖质层厚度在不同林分间则无显著差异($P>0.05$)。林分结构复杂性评价指数大小依次是兴安落叶松-白桦混交林(0.45)>兴安落叶松林(0.37)>白桦林(0.31),其中混交度、Simpson多样性指数、健康木占比是影响林分结构复杂性的主要因素。【结论】大兴安岭中部地区森林林分结构复杂性整体处于劣势,在后续森林经营中,可适当增加物种多样性,改善林内环境,以促进森林恢复和演替的正向进行。

关键词:林分类型;林分结构;复杂性;评价指标;大兴安岭中部地区

中图分类号:S718

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2023)05-0147-09



Evaluating the structure complexity of different forest types in the central part of the Greater Khingan Mountains

DONG Lingbo, TANG Yaru, TIAN Dongyuan, LIU Zhaogang*, LIN Xueying

(Ministry of Education Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem and Management, School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 100040, China)

Abstract: 【Objective】The complexity of different forest types was evaluated to determine the main factors affecting stand structure and provide a theoretical basis upon which the precise forest management can be developed. 【Method】A total of 30 permanent sample plots comprising different stand types (*Betula platyphylla* forest, *Larix gmelinii*-*Betula platyphylla* mixed forest and *Larix gmelinii* forest) in Cuigang Forest Farm, the Greater Khingan Mountains were investigated and 13 indicators selected to consider four aspects, namely stand structure, forest tree size diversity, forest dynamic and soil conditions. The stand complexity was evaluated using the radar chart method. 【Result】The diameter distribution of the three stand types was found to be in the form of an inverse “J” pattern, with the overall tree distribution generally random; however, slight uniformity was observed. The tree size differentiation was inferior and middling, while stand density varied from medium to dense. The maximum stand mixing, Simpson diversity, Shannon-Wiener and Pielou evenness index results were obtained for *L. gmelinii*-*B. platyphylla* mixed forest, while the maximum stand volume and healthy wood proportion were observed in *L. gmelinii* forest. No significant differences were observed in terms of natural regeneration, soil organic matter, and soil humus layer thickness in different succession stages ($P>0.05$). The forest

收稿日期 Received: 2021-11-19

修回日期 Accepted: 2022-02-21

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD2200502); 黑龙江省自然科学基金项目(YQ2021C006); 黑龙江头雁创新团队计划项目(森林资源高效培育技术研发团队)。

第一作者: 董灵波(farrell0503@126.com), 副教授。*通信作者: 刘兆刚(lzg19700602@163.com), 教授。

引文格式: 董灵波, 唐亚如, 田栋元, 等. 大兴安岭中部地区不同林分类型结构复杂性评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 147-155. DONG L B, TANG Y R, TIAN D Y, et al. Evaluating the structure complexity of different forest types in the central part of the Greater Khingan Mountains[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(5): 147-155. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202111034.

structure complexity was observed in the order of *L. gmelinii*-*B. platyphylla* mixed forest (0.45) > *L. gmelinii* forest (0.37) > *B. platyphylla* forest (0.31), during which the stand mixing, the Simpson diversity index, and the healthy tree proportion were the main factors affecting complexity. 【Conclusion】 The overall complexity of the forest structure is inferior. For the subsequent forest management, increasing the species diversity and improving the forest environment can promote positive progress in forest restoration and succession.

Keywords: stand type; stand structure; complexity; evaluation index; the Greater Khingan Mountains

天然林是森林资源的主体,其物种资源丰富,结构层次复杂,在维持生物多样性、调节气候和碳平衡等生态方面起着不可替代的作用^[1]。大兴安岭森林是中国最重要的天然林之一,其森林覆盖率达60%以上,是我国东北地区重要的生态屏障。由于长期的人为破坏和自然干扰,大兴安岭地区从一个原始天然林群落逐渐演变为天然次生林群落。使其失去了原有的生态环境、生物多样性和林分结构。森林经营是林业发展的永恒主题,其经营活动是以林分的结构调整为基础^[2-3]。如何基于大兴安岭次生林现有的林分结构特征开展具有针对性的森林经营活动,是目前的研究热点。

林分结构是森林结构的基本单元,体现了林木个体及其属性的连接方式,其复杂性是实现森林生态系统生物多样性和可持续发展的基础^[4-5]。了解当前林分结构复杂性优劣,是森林是否迫切需要经营调整的依据^[6]。由于森林类型和结构的复杂多样,单一的评价指标如树种空间多样性指数(TSS)、结构竞争指数(SCI)、林分空间结构指数(FSSI)和林分空间结构距离(FSSD)等不能全面地评价林分结构的复杂程度。因此,多角度、多指标的综合评价,才能合理而全面地体现当前林分结构的复杂程度,从而有针对性地开展森林经营活动^[7-10]。惠刚盈等^[11]从林分结构和林分活力两个方面选取8个指标对小陇山锐齿栎混交林和蛟河红松阔叶林林分状态进行评价,进而确定经营措施的优先性。张连金等^[12]从林分密度、空间分布格局和内部竞争等10个方面构建了经营迫切性评价指标体系,结果表明侧柏人工林经营迫切性强。根据对森林评价对象和目的的不同,采用的评价体系包括森林经营迫切性评价体系、森林健康评价体系和森林经营模式评价体系等^[13-15]。近年来,随着森林结构化经营体系的不断发展和完善,多指标体系的综合分析方法有很多,如熵值-AHP法、综合指数法、乘法法等^[16-18]。

本研究以大兴安岭中部地区翠岗林场天然白桦林、天然兴安落叶松-白桦混交林和天然兴安落

叶松林3个不同林分类型为研究对象,从林分结构、林木多样性、林分活力和土壤状况4个方面选择相应指标,利用雷达图法对各林分类型的林分结构复杂性进行科学量化和评价,以期识别出制约林分结构复杂性的关键可控因素,为该地区森林质量的精准提升提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

翠岗林场位于大兴安岭中部地区(124°11'E, 52°02'N),海拔415~858 m。该地区是寒温带大陆性季风气候,年均气温4.5°,年均降水量500 mm,夏季温暖而多雨,冬季严寒而干燥。主要集中在7—8月。土壤类型有棕色针叶林土、暗棕壤和冲击土等,主要乔木树种有白桦(*Betula platyphylla*)、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、云杉(*Picea asperata*)、山杨(*Populus davidiana*)等;灌木主要有兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、越桔(*Vaccinium vitis-idaea*)、杜香(*Rhododendron tomentosum*)等;草本主要有穗薹草(*Carex tristachya*)、稗子(*Echinochloa crusgalli*)、角盘兰(*Herminium monorchis*)等。

1.2 数据来源

在全面踏查的基础上,于2018—2019年在施业区内选择不同林分类型且有代表性的天然白桦林(白桦蓄积 $\geq 65\%$)、天然兴安落叶松-白桦混交林(各树种蓄积 $< 65\%$)、天然兴安落叶松林(落叶松蓄积 $\geq 65\%$)分别设置20 m \times 30 m的固定样地各10块。采用相邻格子调查法,对样地内所有胸径 ≥ 5 cm的树木进行每木检尺,记录林木的树种、胸径、树高、冠幅、相对坐标等基本指标,同时记录样地内天然更新的幼苗幼树(树高 ≥ 30 cm)的地径、胸径、树高、相对坐标。在样地中心位置取A0(枯枝落叶层)、A1(腐殖质层)、A2(淋溶层)层土壤样品,经研磨风干后测其理化性质。各林型样地基本特征见表1。

表1 样地基本特征
Table 1 Basic characteristics of the plots

林型 forest type	统计项 statistic item	平均树龄/ a average age	平均胸径/cm mean DBH	平均树高/m average height	林分密度/ (株·hm ⁻²) stand density	白桦蓄积 占比/% proportion of BF volume	落叶松蓄积 占比/% proportion of LF volume
BF	最小值 min	39.00	10.76	11.03	633.30	65.36	0.04
	最大值 max	46.00	14.24	14.20	1 583.30	99.43	31.89
	平均值 mean	42.20	12.18	11.89	1 140.40	76.01	16.82
	标准差 SD	2.03	1.28	0.94	329.07	10.70	10.68
	变异系数/% CV	20.73	10.51	7.91	28.86	14.08	63.50
MF	最小值 min	45.00	10.51	10.86	866.30	25.72	35.16
	最大值 max	66.00	15.55	15.32	1 550.00	52.03	61.47
	平均值 mean	54.40	12.39	12.27	1 257.00	40.56	52.78
	标准差 SD	6.73	1.43	1.34	240.78	7.93	7.16
	变异系数/% CV	12.37	11.54	10.92	19.16	19.55	13.57
LF	最小值 min	49.00	9.88	9.51	600.00	5.18	67.88
	最大值 max	86.00	20.86	16.48	2 250.00	19.54	93.53
	平均值 mean	62.60	12.56	11.62	1 501.90	12.15	83.46
	标准差 SD	12.09	3.07	1.90	488.08	5.72	8.12
	变异系数/% CV	19.31	24.44	16.35	32.50	47.08	9.73

注:BF.白桦林 *Betula platyphylla* forest; MF.兴安落叶松-白桦混交林 *Larix gmelinii-Betula platyphylla* mixed forest; LF.兴安落叶松林 *Larix gmelinii* forest。下同。The same below.

1.3 研究方法

1.3.1 指标的选取

遵循科学性、灵敏性、全面性、可操作性的原则,从林分结构、林木多样性、林分活力、土壤状况4个方面,选取13个指标。

1)林分结构指标包括直径分布(C1)、角尺度(C2)、混交度(C3)、大小比数(C4)、密集度(C5)。其中,直径分布(C1)能很好地反映林分的生长分布状况,是林分结构最基础和最重要的表现特征^[19]。理想的天然异龄林直径结构分布呈现倒“J”形曲线, q 值(相邻径阶株数之比)通常为1.2~1.7,说明该异龄林的株数分布合理,赋值为1;处于多峰分布,赋值为0.5;单峰分布时,林分接近同龄林,赋值为0^[6]。角尺度(C2)是描述林木在地域上的水平分布格局。当林分平均角尺度(W_i)小于0.475时,林分水平分布处于均匀分布;介于[0.475,0.517]时,林分处于随机分布;大于0.517时,林分处于聚集分布。 W_i 越接近0.5,林木水平分布格局越理想^[20]。混交度(C3)用来描述树种的隔离程度,是正向指标,其值越大越好。通常认为混交度越大,同种聚集的情况越少,林分生产力越大,林分结构越好。大小比数(C4)反映了林木个体的分化程度,定性描述了参照树所处的生长状态,其均值能够对林型整体的大小差异状态进行描述,是逆向指标。大小比数越大代表相邻木大于参

照树所占的比例越大,参照树越不占优势。密集度(C5)反映林木的拥挤程度及林木个体的生长空间,同时还阐述了不同林木之间的竞争情况^[21]。密集度越大代表树冠重叠比例越大,是逆向指标,越小越好。

2)林木多样性包括树种 Simpson 多样性指数(C6)、Shannon-Wiener 指数(C7)、Pielou 均匀度指数(C8)。其中,Simpson 多样性指数(C6)是测定种群组织水平常用的指标之一,指数越大,说明各种个体分配越均匀,也表示群落多样性好。Shannon-Wiener 指数(C7)反映各个树种间的均匀性,其值越大,各树种间分布越均匀,其树种丰富度越高。Pielou 均匀度指数(C8)反映了各物种个体数目分配的均匀程度,物体个数越均匀,则多样性越丰富^[22]。

3)林分活力包括林分蓄积(C9)、健康木占比(C10)、天然更新数量(C11)。其中,林分蓄积(C9)采用大兴安岭地区一元材积公式进行计算^[23],不仅能够反映森林生产力的高低和地力状况,还是反映森林生态环境的重要依据。健康木占比(C10)是林分内健康且生长完好的林木比例。主要通过林木的外部特征(如弯曲、枯梢、被压、病虫害等)进行判断。根据GB/T 26424—2010《森林资源规划设计调查技术规程》规定^[24]的森林健康状况为依据进行评价,样地内健康林木占比100%

为健康状态,赋值为1;健康林木占比 $\geq 90\%$ 为亚健康状态,赋值为0.75;健康林木占比 $\geq 70\%$ 为中健康状态,赋值为0.5;健康林木占比 $< 70\%$ 为不健康,赋值为0。林下天然更新数量(C11)直接影响森林的演替方向和恢复程度,根据 GB/T 26424—2010^[24]中的幼苗幼树(苗高 > 50 cm)密度标准为依据进行评价:幼苗幼树数量密度 $\geq 2\ 500$ 株/hm²时,林分更新良好,赋值为1;[500, 2 500)株/hm²时,林分天然更新状况一般,赋值为0.5; < 500 株/hm²时,林分更新状况较差,赋值为0。

4)土壤状况包括土壤有机质含量(C12)、土壤腐殖质层厚度(C13)。土壤有机质(C12)是林分营养的主要来源,能促进林分的生长发育,也是表征土壤肥力高低的重要指标之一。了解群落演替中的土壤有机质对群落演替过程具有重要意义。以全国第2次土壤普查养分含量分级标准为依据进行划分^[25]。有效土壤厚度等同于最具有肥力特征的土壤腐殖质层(C13)^[26];根据 GB/T26424—2010^[24]中的腐殖质层厚度为依据进行评价,即腐殖质层厚度 ≥ 10 cm为较厚,赋值为1;[5, 10) cm为中等状态,赋值为0.5; < 5 cm时,腐殖质层偏薄,赋值为0。

各评价标准和评价值见表2,各指标的赋值情况及算法可参考相应文献^[6, 20, 24-25]。

$$W_i = 1/4 \sum_{i=1}^n Z_{ij}; \quad (1)$$

$$M_i = 1/4 \sum_{i=1}^n V_{ij}; \quad (2)$$

$$U_i = 1/4 \sum_{i=1}^n k_{ij}; \quad (3)$$

$$C_i = 1/4 \sum_{i=1}^n y_{ij}; \quad (4)$$

$$J_D = 1 - \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right)^2; \quad (5)$$

$$H = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i; \quad (6)$$

$$J_H = H / \ln S. \quad (7)$$

式中: W_i 为第*i*株参照木的角尺度,当参照木与第*j*株相邻木组成的夹角小于标准角 72° 时, $Z_{ij}=1$,否则 $Z_{ij}=0$ ^[27]; M_i 为第*i*株参照木的混交度,当参照树*i*与第*j*株相邻木非同种时, $V_{ij}=1$,否则 $V_{ij}=0$; U_i 为第*i*株参照木的大小比数,当参照树*i*比第*j*株相邻木小时, $k_{ij}=1$,否则 $k_{ij}=0$; C_i 为第*i*株参照木的密集度,当参照树*i*与第*j*株相邻木树冠投影重叠时, $y_{ij}=1$,否则 $y_{ij}=0$; J_D 为 Simpson 多样性指数, S 为样地内物种数, n_i 为第*i*个种的个体数量, N 为全部个体总数; H 为 Shannon-Wiener 多样性指数, p_i 为第*i*个种

在全体物种中的重要比例, $p_i = n_i/N$; J_H 为 Pielou 均匀度指数。

表2 评价指标体系

Table 2 The evaluation index system

评价指标 evaluation index	评价标准 evaluation standard	评价值 evaluation value
	$q \in [1.2, 1.7]$	1
直径分布 diameter distribution	多峰分布	0.50
	单峰分布	0
角尺度 uniform angle	适度指标	[0, 1]
混交度 mingling	正向指标	[0, 1]
大小比数 dominance	负向指标	[0, 1]
密集度 crowding	负向指标	[0, 1]
Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	正向指标	[0, 1]
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	正向指标	[0, 1]
Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	正向指标	[0, 1]
林分蓄积 stand volume	正向指标	[0, 1]
	100	1
健康木占比/% healthy tree proportion	[90, 100)	0.75
	[70, 90)	0.50
	< 70	0
	$\geq 2\ 500$	1
天然更新数量/(株·hm ⁻²) natural regeneration quantity	[500, 2 500)	0.50
	< 500	0
	> 3	1
土壤有机质质量分数/% content soil organic matter	[1, 3]	0.50
	< 1	0
	≥ 20	1
腐殖质层厚度/cm humus layer thickness	[10, 20)	0.50
	< 10	0

1.3.2 数据处理

森林林分的指标复杂多样,既有定性指标也有定量指标,指标取值和单位相差较大,没有可比性。为消除量纲及单位的影响,需要对这些正向指标和负向指标进行标准化处理,使其变成[0, 1]的无量纲数值。对于指标本身没有量纲且在[0, 1]的正向指标则不需要进行处理,即指标值越大越好。负向指标大小比数、密集度越小越好,以1减去大小比数或密集度的差值作为该指标的评价值。

$$x'_{ij} = (x_{ij} - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}). \quad (8)$$

式中: x'_{ij} 为标准化处理之后的评价值; x_{ij} 为原始值。 x_{\min} 为原始指标中的最小值; x_{\max} 为原始指标中的最大值。

角尺度是一个中间型指标,根据其不同取值区

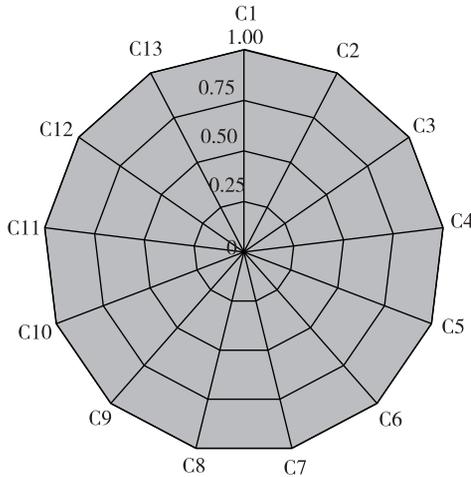
间范围,进行正向化处理。

$$W'_i = \begin{cases} 1-(0.475-W_i) & W_i < 0.475 \\ 1 & 0.475 \leq W_i \leq 0.517 \\ 1-(W_i-0.517) & W_i > 0.517 \end{cases} \quad (9)$$

式中: W_i 为角尺度原始值; W'_i 为正向化处理后的角尺度。

1.3.3 林分结构复杂性综合评价

采用定性指标和定量指标相结合的方法,利用雷达图法对不同林分类型结构复杂性进行评价。雷达图是进行多指标体系比较分析的专业图表,从雷达图中能直观地看出指标实际值与理想值的偏离程度^[28]。凡是单因子评价价值 <0.5 的都是不合格指标^[11],示意图如图 1。



C1.直径分布 diameter distribution; C2.角尺度 uniform angle; C3.混交度 mingling; C4.大小比数 dominance; C5.密集度 crowding; C6. Simpson 多样性指数 Simpson diversity index; C7. Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index; C8. Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index; C9. 林分蓄积 stand volume; C10. 健康木占比 healthy tree proportion; C11. 天然更新数量 natural regeneration quantity; C12. 土壤有机质质量分数 content of soil organic matter; C13. 腐殖质层厚度 humus thickness。下同。The same below.

图 1 林分结构综合评价雷达图

Fig. 1 The radar diagram of evaluation of stand structure

综合评价价值 P 计算公式如下:

$$S_a = \sum \frac{1}{2} \times L_1 \times L_2 \times \sin\theta; \quad (10)$$

$$P_a = S_a / S_b. \quad (11)$$

式中: L_1 、 L_2 为三角形部分相邻指标值; θ 为相邻指标之间构成的夹角; S_a 为现实林分指标间围成闭合图形面积; S_b 为理想林分状态,即当所用指标值都是 1 时,围成闭合图形的面积; P_a 为复杂性评价指标, P_a 为值越大,越接近于 1,林分结构越复杂,

森林结构越完整。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型结构特征

不同林分类型结构指标值如表 3 所示,林分直径分布呈倒“J”形(图 2)。

表 3 不同林分类型结构指标值

Table 3 Values of structure indicators for different stand types

指标 index	BF	MF	LF
直径分布 diameter distribution	1.41±0.26 a	1.31±0.21 a	1.28±0.24 a
角尺度 uniform angle	0.51±0.04 b	0.47±0.04 a	0.49±0.03 ab
混交度 mingling	0.29±0.14 a	0.43±0.08 b	0.30±0.17 a
大小比数 dominance	0.51±0.03 a	0.51±0.06 a	0.48±0.06 a
密集度 crowding	0.49±0.14 ab	0.44±0.16 a	0.63±0.22 b
Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	0.34±0.14 a	0.51±0.06 b	0.34±0.11 a
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	0.58±0.20 a	0.77±0.19 b	0.58±0.18 a
Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	0.59±0.22 a	0.90±0.12 b	0.56±0.15 a
林分蓄积/(m ³ ·hm ⁻²) stand volume	93.33±30.48 a	112.59±20.26 ab	134.79±47.48 b
健康木占比/% healthy tree proportion	68.60±16.32 a	84.2±10.63 b	90.20±8.99 b
天然更新数量/(株·hm ⁻²) natural regeneration quantity	709±286.41 a	1 227±1 038.76 a	1 090±584.04 a
土壤有机质质量分数/% content of soil organic matter	5.48±40.75 a	5.51±26.31 a	5.47±39.97 a
腐殖质层厚度/cm humus thickness	16.80±3.46 a	16.50±3.92 a	17.50±4.25 a

注:表中数据为平均值±标准误差,同行不同字母表示不同林分类型间差异显著($P < 0.05$)。下同。The data in table is mean ± standard error, and different letters in the same row column meant significant difference at 0.05 level among stand types. The same below.

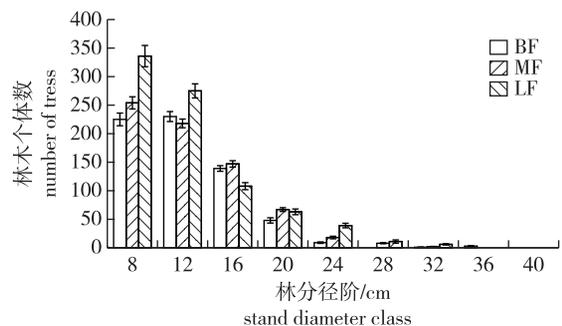


图 2 各林型直径分布

Fig. 2 Diameter distribution of different stand types

BF、MF、LF 的直径分布(q 值)分别为 1.41、1.31 和 1.28,符合异龄林直径分布的特点,且不同林分类型直径分布(q 值)间的差异性不显著。白

桦林(BF)和兴安落叶松林林分(LF)水平分布格局均为随机分布(角尺度为0.49~0.51),而兴安落叶松-白桦混交林(MF)则呈轻微的统一分布(角尺度为0.47)。3个林型均处于中度混交,兴安落叶松-白桦混交林混交度最大(0.43),与其他两个林分类型存在显著性差异。林木大小分化程度在白桦林和混交林阶段都处于劣势(大小比数为0.51),而兴安落叶松林则处于中等状态(大小比数为0.48),各林分类型间无显著性差异。林分由初始的中等密集(密集度为0.49)向比较密集(密集度为0.63)方向发展。

林木多样性指标中,Simpson多样性指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数3个指标在兴安落叶松-白桦混交林阶段有最大值,分别是0.51、0.77和0.90,且与白桦林和兴安落叶松林存在显著性差异。

林分活力指标中,林分蓄积量不断增大,且白桦林林分平均蓄积量与兴安落叶松林林分平均蓄积量存在显著性差异;白桦林与混交林及落叶松健康木占比之间存在显著性差异;天然更新数量在兴安落叶松-白桦混交林阶段有最大值(1227),但与其他林分类型无显著性差异。

土壤状况指标中,土壤有机质、腐殖质层厚度波动不大且均无明显差异。

2.2 不同林分类型结构复杂性

各林分类型结构复杂性依次是兴安落叶松-白桦混交林(0.45) > 兴安落叶松林(0.37) > 白桦林(0.31),且兴安落叶松-白桦混交林林分结构复杂性显著优于白桦林($P < 0.05$),而白桦林和兴安落叶松林间的差异则不显著。不同林分类型雷达图见图3。不同林分类型结构复杂性最优样地各指标值见表4。

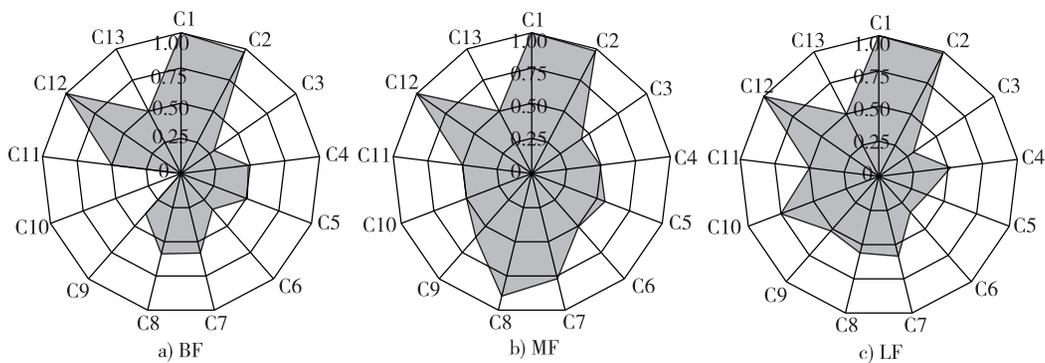


图3 不同林分类型雷达图

Fig. 3 Radar maps of different stand types

表4 不同林分类型结构复杂性最优样地各指标值

Table 4 Index values of the optimal plots of stand structure complexity in different stand types

指标 index	BF	MF	LF	指标 index	BF	MF	LF
直径分布 diameter distribution	倒“J”形	倒“J”形	倒“J”形	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	0.77	0.71	0.63
角尺度 uniform angle	随机分布	随机分布	随机分布	林分蓄积/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) stand volume	131.12	105.39	194.84
混交度 mingling	0.43	0.56	0.42	健康木占比/% healthy tree proportion	84.81	90.35	97.30
大小比数 dominance	0.51	0.50	0.42	天然更新数量/(株· hm^{-2}) natural regeneration quantity	617	4 000	1 233
密集度 crowding	0.42	0.77	0.19	土壤有机质质量分数/% content of soil organic matter	5.12	5.24	5.41
Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	0.35	0.62	0.45	腐殖质层厚度/cm humus thickness	19	15	14
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	0.54	1.15	0.69	综合评价价值 overall evaluation value	0.42	0.54	0.50

在白桦林阶段,混交度、大小比数、密集度、Simpson 多样性指数、林分蓄积、健康木占比、天然更新等 54% 的指标没有达到标准 0.5,影响林分结构复杂性(图 3a)。白桦林林分不稳定,物种多样性低,林分空间充足,林木大小分化程度处于劣势,抵抗力弱,有较多不健康林木,天然更新不足,林木蓄积量偏低,森林处于不稳定状态。兴安落叶松-白桦混交林阶段,混交度、大小比数等 15% 的指标未达到基线 0.5(图 3b)。混交林时期,树种多样性有所增大,林木大小分化程度仍旧处于劣势,需要林窗更新或林冠下更新,来调节林分的整个更新状态。兴安落叶松林阶段的混交度、密集度、Simpson 多样性指数等 23% 的指标小于 0.5(图 3c)。树种多样性下降,且分布不均,整体仍较单一,林木越来越拥挤,个体生长空间较小。由雷达图可直观看出,兴安落叶松林健康木占比显著优于白桦林和兴安落叶松-白桦混交林,而兴安落叶松-白桦混交林 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数和林分蓄积优于白桦林和兴安落叶松林。林分结构指标不存在全部指标达到最优状态的样地,在一些指标上较好,如直径分布、林木空间分布格局角尺度;而在其他指标上较差,如混交度、Simpson 多样性指数。

3 讨论

本研究采用空间代替时间的方法对不同林分类型结构复杂性进行分析。3 种林型是大兴安岭地区常见的林分类型。从不同林分类型的结构特征可以看出,大部分样地的水平分布格局、直径分布状态较为合理,不同胸径大小林木所占的比例,可以保持林分稳定的发展状态。由于大兴安岭独特的地理位置,土壤腐殖质层厚度始终处于中等水平,且适宜在该地区生长的树种类型比较有限,因此,树种组成较单一,物种多样性较低。许多学者研究表明,物种多样性指数和均匀度指数的变化趋势常常是一致的,这与本研究结论相吻合^[29]。从不同林分类型雷达图可以看出,白桦林健康木占比赋值为 0,这主要是由于白桦林处于演替的初期阶段,林木分化程度相对较高,林木较为密集,单木在水平方向上的生长受到限制,不利于抵御外界不利因素的侵害。随着森林演替的进展,白桦逐渐衰退,到演替后期兴安落叶松代替白桦成为群落中的主要树种,群落生长过程中物种的替代情况也是群落林分结构稳定的重要标志之一^[30]。

不同林分类型结构复杂性大小依次为兴安落

叶松-白桦混交林(0.45)>兴安落叶松林(0.37)>白桦林(0.31),林分结构复杂性处于中下等水平,这与魏红洋等^[31]对大兴安岭帽儿山地区的评价结果相似。兴安落叶松-白桦混交林的林分结构复杂性略优于其他两个林型,主要是树种中度混交且分配均匀,天然更新良好,林分的潜在生长趋势较好,能够抵御外界不利因素的侵袭,同时对于水、空气和阳光等生长必需因素利用得更加充分。为加快林分演替的正向进行,需对现有林分进行调整。根据木桶原理(短板理论)和利比希最小因子定律^[32-33]可知,最小因子往往决定林分整体的优劣。白桦林中混交度、大小比较、密集度等 54% 未达到 0.5 的标准指标要求,可采用结构化森林经营、树种混交,健康木是促进林分改变的关键,可对林分中的优势树种的最近几株相邻木进行结构调整,适当增加落叶松和其他乡土树种,使林分逐步向顶级群落过渡;改善林分的生态条件如清除地被物、松土和割灌等,以促使其向最优样地发展。兴安落叶松-白桦混交林中 15% 未达到 0.5 的指标要求,可采用结构化森林经营,增加伴生树种和其他乡土树种,以此增大混交比例;采用择伐调整林内树种的竞争关系,以促使其向最优样地发展。落叶松林中 23% 未达到 0.5 的指标要求,可采用结构化经营,增加白桦和其他乡土树种的比例,特别是增加阔叶树,可增强立地肥力,以促使其向最优样地发展。通过结构化森林经营,缓解资源利用和发展之间的矛盾,从而达到森林资源与环境协调发展的平衡状态。一次调整并不能完全改变林分的现有结构,循序渐进是必然的过程^[34-35]。

影响林分结构复杂性的因素有很多,本研究只从林分结构、林木多样性、林分活力、土壤状况 4 个方面对林分结构复杂性进行评价,客观地展现了目前大兴安岭地区的林分结构。以往的研究中,熵值-AHP 法将定量和定性指标结合,减少了层次分析法中人为因素的影响,使评价结果更加客观,常用于林分状态评价方面。但此法需要搜集大量资料,当影响因素较多时,会过于烦琐和复杂。综合指数法在评价指标体系的基础上,对各指标进行加权平均,构造综合指数对林分结构进行评价。这些方法对林分结构的描述多采用文字语言和表格的方式表达,形式较单一,虽然数据丰富但不能从多角度直观地展现信息^[36-37]。本研究利用的雷达图法,其优点在于无论指标有多少,均能直观地表示不同演替阶段林分结构指标状态的实际值与参照值的偏离程度,指标值处于平均状态(<0.5)以内

是不合理指标,又能做出整体性的评价,即各指标所围成的图形面积,具有直观、简洁和可操作性强的特点。林分结构的评价尚无统一的评价体系和方法,不同的评价指标和评价方法对森林结构的评价结果也不尽相同^[6,38],后续需合理有效地建立一套长期有效的森林检测体系和评价方法,进而更好地开展森林结构经营和保护工作。

4 结 论

1) 3个林型中,林分直径分布呈倒“J”形且株数分布合理;白桦林和兴安落叶松林的林木水平分布格局表现为随机分布,而兴安落叶松-白桦混交林表现为轻微均匀分布;林木大小分化程度在白桦林和兴安落叶松-白桦混交林都处于劣势,而兴安落叶松林属于中等状态;林分拥挤程度处于中等密集和比较密集;混交度、Simpson多样性指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数,均为兴安落叶松-白桦混交林有最大值;兴安落叶松林的林分蓄积量和健康木占比最大;天然更新数量、土壤有机质、土壤腐殖质层厚度在3个林型中变动不大。

2) 不同林分类型的综合结构复杂性大小依次表现为:兴安落叶松-白桦混交林(0.45) > 兴安落叶松林(0.37) > 白桦林(0.31),其中混交度、树种Simpson多样性指数、健康木占比等指标是制约林分复杂性水平的关键可控因素。因此,未来森林经营可通过补植或人工促进天然更新等方式,适当增加物种多样性;通过及时的抚育采伐淘汰不健康林木来调节林分结构和活力,从而促进森林群落的恢复和森林演替的正向进行。

参考文献(reference):

- [1] 杜志. 长白山退化云冷杉林不同演替阶段的林分结构研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013. DU Z. Study on stand structure of degraded spruce-fir forest in Changbai Mountain at different succession stages[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [2] 亢新刚. 森林经理学[M]. 4版. 北京: 中国林业出版社, 2011. KANG X G. Forest management[M]. 4th ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011.
- [3] ZENNER E K, HIBBS D E. A new method for modeling the heterogeneity of forest structure[J]. For Ecol Manag, 2000, 129(1/2/3): 75-87. DOI: 10.1016/S0378-1127(99)00140-1.
- [4] 赵中华, 惠刚盈. 林分结构多样性研究进展[J]. 林业科学, 2020, 56(9): 143-152. ZHAO Z H, HUI G Y. Advances in structural diversity of stand structure[J]. Sci Silvae Sin, 2020, 56(9): 143-152. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20200916.
- [5] FARDUSI M J, CASTALDI C, CHIANUCCI F, et al. A spatial-temporal dataset of forest mensuration for the analysis of tree species structure and diversity in semi-natural mixed floodplain forests[J]. Ann For Sci, 2018, 75(1): 11. DOI: 10.1007/s13595-018-0688-8.
- [6] 惠刚盈, 张弓乔, 赵中华, 等. 天然混交林最优林分状态的 π 值法则[J]. 林业科学, 2016, 52(5): 1-8. HUI G Y, ZHANG G Q, ZHAO Z H, et al. A new rule of π value of natural mixed forest optimal stand state[J]. Sci Silvae Sin, 2016, 52(5): 1-8. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20160501.
- [7] HUI G, ZHAO X H, ZHAO Z H, et al. Evaluating tree species spatial diversity based on neighborhood relationships[J]. For Sci, 2011, 57: 292-300. DOI: 10.1093/FORESTSCIENCE/57.4.292.
- [8] 闫淑英, 席青虎, 铁牛. 寒温带杜香兴安落叶松林分健康评价研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 53(6): 81-86. YAN S Y, XI Q H, TIE N. Forest health assessment of *Kedum-Larix gmelinii* in cold temperate zone[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2010, 53(6): 81-86. DOI: 10.3969/j.jssn.1000-2006.2010.06.018.
- [9] 董灵波, 刘兆刚, 马妍, 等. 天然林林分空间结构综合指数的研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1): 16-22. DONG L B, LIU Z G, MA Y, et al. A new composite index of stand spatial structure for natural forest[J]. J Beijing For Univ, 2013, 35(1): 16-22. DOI: 10.13332/j.1000-1522.2013.01.016.
- [10] 王烁, 韩大校, 王千雪, 等. 基于 π 值法的兴安落叶松天然混交林林分状态研究[J]. 温带林业研究, 2020, 3(2): 43-48, 59. WANG S, HAN D X, WANG Q X, et al. Stand status of natural mixed forest of *Larix gmelinii* based on π value method[J]. J Temp For Res, 2020, 3(2): 43-48, 59. DOI: 10.3969/j.jssn.2096-4900.2020.02.009.
- [11] 惠刚盈, 赵中华, 张弓乔. 基于林分状态的天然林经营措施优先性研究[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(1): 1-10. HUI G Y, ZHAO Z H, ZHANG G Q. Priority of management measures for natural forests based on the stand state[J]. J Beijing For Univ, 2016, 38(1): 1-10. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150358.
- [12] 张连金, 孙长忠, 赖光辉. 北京九龙山侧柏生态公益林空间结构分析与评价[J]. 林业科学研究, 2018, 31(4): 75-82. ZHANG L J, SUN C Z, LAI G H. Analysis and evaluation of stand spatial structure of *Platycladus orientalis* ecological forest in Jiulongshan of Beijing[J]. For Res, 2018, 31(4): 75-82. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2018.04.011.
- [13] 惠刚盈, VON GADOW K, 胡艳波, 等. 结构化森林经营[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 26-34. HUI G Y, VON GADOW K, HU Y B. Structure-based forest management[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007: 26-34.
- [14] 蔡小溪. 不同演替阶段针阔混交林森林健康评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015. CAI X X. Forest health assessment of coniferous and broad-leaved mixed forest in different succession stages[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [15] 惠刚盈, 赵中华, 袁士云. 森林经营模式评价方法: 以甘肃小陇山林区为例[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 114-120. HUI G Y, ZHAO Z H, YUAN S Y. Evaluation method of forest management models: a case study of Xiaolongshan forest area in Gansu Province[J]. Sci Silvae Sin, 2011, 47(11): 114-120. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20111118.
- [16] 赵中华, 惠刚盈. 基于林分状态特征的森林自然度评价: 以甘肃小陇山林区为例[J]. 林业科学, 2011, 47(12): 9-16. ZHAO Z H, HUI G Y. Forest naturalness evaluation method based on stand state characters: a case study of Gansu Xiaolongshan forests[J]. Sci Silvae Sin, 2011, 47(12): 9-16. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20111202.

- [17] 谭三清,王湘衡,肖维,等.基于复杂网络的森林健康评价研究[J].中南林业科技大学学报,2015,35(8):13-16,22.TAN S Q,WANG X H,XIAO W, et al.Forest health assessment based on complex network[J].J Central South Univ For Technol,2015,35(8):13-16,22. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2015.08.003.
- [18] 曹小玉,李际平,封尧,等.杉木生态公益林林分空间结构分析及评价[J].林业科学,2015,51(7):37-48.CAO X Y,LI J P,FENG Y, et al. Analysis and evaluation of the stand spatial structure of *Cunninghamia lanceolata* ecological forest[J].Sci Silvae Sin, 2015, 51(7): 37-48. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20150705.
- [19] 孟宪宇.测树学[M].3版.北京:中国林业出版社,2006:73-82.MENG X Y. Dendrology[M].3rd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006:73-82.
- [20] 陈莹,董灵波,刘兆刚.帽儿山天然次生林主要林分类型最优树种组成[J].北京林业大学学报,2019,41(5):118-126. CHEN Y,DONG L B,LIU Z G. Optimal species composition for the main forest types of secondary forest in Maoershan Mountain, northeastern China[J].J Beijing For Univ, 2019, 41(5): 118-126. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20190013.
- [21] 胡艳波,惠刚盈.基于相邻木关系的林木密集程度表达方式研究[J].北京林业大学学报,2015,37(9):1-8.HU Y B,HUI G Y. How to describe the crowding degree of trees based on the relationship of neighboring trees[J].J Beijing For Univ, 2015, 37(9): 1-8. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150125.
- [22] 李俊清.森林生态学[M].2版.北京:高等教育出版社,2010:257-259.LI J Q. Forest ecology[M].2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2010:257-259.
- [23] 赵麟萱.大兴安岭天然落叶松林多功能经营模拟研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.ZHAO L X. Simulation study on multifunctional management of natural larch forest in Daxinganling[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.森林资源规划设计调查技术规程:GB/T 26424—2010[S].北京:中国标准出版社,2011. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical regulations for inventory for forest management planning and design: GB/T 26424—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [25] 全国土壤普查办公室.全国第二次土壤普查暂行技术规程[M].北京:农业出版社,1979. The Bureau of General Investigation for National Soil of China. The provisional technique criterion of general investigation for national soil of China[M]. Beijing: Agriculture Press, 1979.
- [26] 解运杰,刘凤飞,白建宏,等.基于GIS技术的黑龙江省典型土壤有效土层厚度调查研究[J].水土保持研究,2005,12(6):251-253. XIE Y J,LIU F F,BAI J H, et al. Investigations on typical effective thickness of soil layer of Heilongjiang Province based on GIS technology[J].Res Soil Water Conserv, 2005, 12(6): 251-253.
- [27] 惠刚盈, von GADOW K, 胡艳波.林分空间结构参数角尺度的标准角选择[J].林业科学研究,2004,17(6):687-692. HUI G Y, von GADOW K, HU Y B. The optimum standard angle of the uniform angle index[J].For Res, 2004, 17(6): 687-692. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1498.2004.06.001.
- [28] 殷鸣放,郑小贤,殷炜达.森林多功能评价与表达方法[J].东北林业大学学报,2012,40(6):23-25,47. YIN M F, ZHENG X X, YIN W D. Methods of evaluation and expression of multi-functions of forests[J].J Northeast For Univ, 2012, 40(6): 23-25, 47. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2012.06.036.
- [29] 郝文芳.陕北黄土丘陵区撂荒地恢复演替的生态学过程及机理研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010. HAO W F. Study on ecological process and mechanism of restoration and succession of abandoned land in loess hilly region of northern Shaanxi[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010.
- [30] 姜晓燕,梁林峰,毕润成,等.山西霍山植物群落谱系结构的空间格局[J].西北植物学报,2016,36(12):2505-2512. JIANG X Y, LIANG L F, BI R C, et al. Spatial pattern of phylogenetic structure of plant community in Shanxi Huoshan Mountain[J]. Acta Bot Boreali Occidentalia Sin, 2016, 36(12): 2505-2512. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2016.12.2505.
- [31] 魏红洋,张一帆,董灵波,等.帽儿山天然次生林主要林分类型结构化经营模式[J].中南林业科技大学学报,2021,41(10):131-139. WEI H Y, ZHAN Y F, DONG L B, et al. Comprehensive evaluation of spatial structure state for the main forest types in Maoershan Mountain[J].J Central South Univ For Technol, 2021, 41(10): 131-139. DOI: 10.27009/d.cnki.gdbl.2021.000693.
- [32] JR H H D. Liebig's law of the minimum in relation to general biological problems[J]. Science, 1917, 46(1183): 197-204. DOI: 10.1126/science.46.1183.197.
- [33] 张岗岗,惠刚盈.基于累加性和均衡性的林分质量综合评价方法[J].林业科学,2021,57(1):77-84. ZHANG G G, HUI G Y. Comprehensive evaluation method of forest quality based on the accumulation and homogeneity[J].Sci Silvae Sin, 2021, 57(1): 77-84. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20210108.
- [34] 黄剑峰,谭伟,柴宗政,等.黔中马尾松近熟林空间结构特征及其调控[J].浙江农林大学学报,2019,36(4):749-756. HUANG J F, TAN W, CHAI Z Z, et al. Spatial structure characteristics and regulation for the *Pinus massoniana* near-mature forest in the central Guizhou Province, China[J].J Zhejiang A&F Univ, 2019, 36(4): 749-756. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2019.04.015.
- [35] 惠刚盈,胡艳波,赵中华.结构化森林经营研究进展[J].林业科学研究,2018,31(1):85-93. HUI G Y, HU Y B, ZHAO Z H. Research progress of structure-based forest management[J].For Res, 2018, 31(1): 85-93. DOI: 10.13275/j.cnki.lyxyj.2018.01.011.
- [36] 鲁东民,王忠明,付贺龙.基于网络地理信息系统的林业资源统计数据可视化系统设计[J].世界林业研究,2017,30(3):46-51. LU D M, WANG Z M, FU H L. Design of forestry resources statistical data visualization system based on web GIS[J].World For Res, 2017, 30(3): 46-51. DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2017.0030.y.
- [37] 张岗岗.天然林结构解译及林分状态综合评价[D].北京:中国林业科学研究院,2020. ZHANG G G. Interpretation of natural forest structure and comprehensive evaluation of stand status[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020.
- [38] 张国祯,甘敬,朱建刚.北京山区森林健康的多尺度评价[J].林业科学,2011,47(6):143-151. ZHANG G Z, GAN J, ZHU J G. Multi-scale health assessment of forests in mountainous regions of Beijing[J].Sci Silvae Sin, 2011, 47(6): 143-151. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20110621.