

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240169

帽儿山天然硬阔叶林发育阶段划分及林分结构特征

张凌峰 刘兆刚 董灵波

(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 150040)

摘要:【目的】分析帽儿山硬阔叶林发育阶段及林分结构特征, 明确不同阶段的林分指标变化, 为天然次生林的生长预测及多功能可持续经营提供科学依据。【方法】以黑龙江省帽儿山实验林场的天然硬阔叶林为研究对象, 利用 TWINSpan 双向指示种分类法、种间联结-聚类分析法和判别分析法对硬阔叶林发育阶段进行划分; 从年龄结构、直径结构和物种多样性等方面选取林分指标, 分析不同发育阶段的林分结构特征; 通过熵权法-AHP 法, 结合林木稳定性、目的树种多样性指数、Simpson 多样性指数等 11 个参数, 构建阶段划分综合指数。【结果】帽儿山天然硬阔叶林的生长发育过程可划分为建群阶段、竞争生长阶段和近自然林阶段。在不同发育阶段, 年龄结构呈增长型, 直径结构总体呈反“J”型, 物种组成丰富且保持相对稳定。基于划分的 3 个发育阶段, 结合选取的 11 个参数, 划分了综合指数划分发育阶段的范围。【结论】TWINSpan 双向指示种分类法能有效划分帽儿山天然硬阔叶林的发育阶段, 并揭示不同阶段的年龄结构、直径结构和物种多样性特征, 为该研究区域制定针对性的经营措施提供了参考依据。

关键词: 发育阶段划分; TWINSpan; 种间联结; 判别分析; 林分结构特征

中图分类号: S758.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2025)02-0010-13

引文格式: 张凌峰, 刘兆刚, 董灵波. 帽儿山天然硬阔叶林发育阶段划分及林分结构特征 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(2): 10-22. Zhang Lingfeng, Liu Zhaogang, Dong Lingbo. Development stage division and stand structure characteristics of natural hard broadleaved forest in Maor Mountain, Heilongjiang Province of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(2): 10-22.

Development stage division and stand structure characteristics of natural hard broadleaved forest in Maor Mountain, Heilongjiang Province of northeastern China

Zhang Lingfeng Liu Zhaogang Dong Lingbo

(School of Forestry, Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] This paper analyzes the development stages and stand structure characteristics of hard broadleaved forest in Maor Mountain, Heilongjiang Province of northeastern China, identifies stand index changes at different stages, and provides scientific basis for the growth prediction and multifunctional sustainable management of natural secondary forests. [Method] Taking the natural hard broadleaved forest of Maor Mountain Experimental Forest Farm in Heilongjiang Province as the research object, we used TWINSpan bidirectional indicator species analysis method, interspecific linkage cluster analysis method, and discriminant analysis method to divide the development stages of hard broadleaved forests; selected different forest stand indicators from the aspects of age structure, diameter structure and tree species diversity, and analyzed the structural characteristics of stands at different developmental stages; and 11 parameters, including forest stability, target tree species diversity index and Simpson diversity index, were

收稿日期: 2024-05-30 修回日期: 2024-06-19

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD2200502)。

第一作者: 张凌峰。主要研究方向: 森林可持续经营。Email: 15904559787@163.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号。

责任作者: 刘兆刚, 博士, 教授。主要研究方向: 森林可持续经营。Email: lzg19700602@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

combined through entropy weight method-AHP method, and a phased composite index was constructed. [Result] The development process of natural hard broadleaved forest in Maor Mountain can be divided into group establishment stage, competition growth stage and near natural forest stage. At different stages, the age structure shows an increasing pattern, while the diameter structure generally shows an anti J-shaped pattern and the species composition is rich and relatively stable. Based on the three developmental stages, combined with the selected 11 parameters, the range of developmental stages divided by composite index F was given. [Conclusion] The TWINSpan classification method can effectively divide the developmental stages of natural hard broadleaved forests in Maor Mountain, and reveal the characteristics of their age structure, diameter structure, and species diversity at different stages. It provides a reference for the development targeted management measures in the study area.

Key words: developmental stage division; TWINSpan; interspecific association; discriminant analysis; stand structure characteristics

天然林在树种组成和林分结构方面复杂多样,林分的生长动态与竞争关系也相对复杂。随着森林可持续经营理论的逐步深化,天然林的可持续经营问题受到了广泛关注^[1-2]。在森林生长过程中,随着林分的不断发育,林分的结构特征与树木的生长等均会发生不同程度的变化。因此,将林分的生长发育过程划分为不同的阶段,有利于制定科学合理且具有针对性的经营措施。

国内外学者在林分发育阶段划分方面已开展了广泛的研究。例如:Podlaski^[3]以树龄分布、林分垂直结构和蓄积生长趋势的变化作为划分森林发育阶段的主要标准,将冷杉(*Abies fabri*)-山毛榉(*Fagus longipetiolata*)近天然林划分为 4 个阶段;Kral 等^[4]根据林分不同径阶活立木和枯死木的胸径分布,基于监督计算机分类的方法结合人工神经网络,将林分划分为生长、优化、分化和稳定 4 个阶段;陆元昌等^[5]、李婷婷等^[6]通过逐步判别分析,将林分划分为森林建群阶段、竞争生长阶段、质量选择阶段、近自然林阶段和恒续林阶段;贾珂等^[7]采用 TWINSpan 分类法,将温带森林的发育阶段划分为 7 类;龚直文^[8]利用种间联结测定法,结合主成分分析与最优分割法,将长白山退化云冷杉林的生长发育划分为 5 个阶段。通过对不同研究者提出的森林发育阶段划分方案进行梳理,我们可以发现尽管具体的划分因子和标准有所不同,但总体上反映了森林生长发育的一般规律。

林分结构的研究是森林可持续经营的基础,它直接影响森林生态系统的功能和多样性。因此,深入了解林分结构特征对于实现森林的多功能可持续经营具有重要意义^[9-11]。结构决定功能是系统论中的重要法则,森林作为陆地最大的生态系统同样要遵循这一法则^[12]。然而,森林生态系统复杂开放,其结构的复杂性归结于林分结构的多样性,为揭示这

种复杂的关系,国内外学者从不同方面对林分结构进行了大量研究^[13-14]。周梦丽等^[15]从树种组成、林分直径分布、择伐周期与转换期长度等方面对异龄林经营进行了研究。描述林分内树木生长状况,能够对林木现状有一定的认识,从而便于调整林业结构,促进林木发挥自身价值,实现森林生态发展的可持续。

本研究旨在通过综合分析帽儿山天然硬阔叶林的生长发育阶段及不同阶段下的林分结构特征,为加速次生林发育的正向演替进程、制定合理有效的经营措施提供参考,并为该类型次生林的恢复、保护以及林分结构的调整提供理论依据,从而促进森林的多功能与可持续发展。

1 研究区概况

研究区域为东北林业大学帽儿山实验林场,位于黑龙江省尚志市的西北部,地处哈尔滨市东南部,属长白山系张广才岭西坡的余脉。地理坐标范围为 127°29' ~ 127°44' E, 45°14' ~ 45°29' N, 海拔高度多为 200 ~ 600 m, 地形为低山丘陵缓坡。林场总面积为 26 496 hm²。帽儿山处于温带湿润地区,该区属于大陆性季风气候,年平均气温为 2.8 °C,年平均降水量约为 720 mm。该林场为典型的天然次生林,乔木树种丰富,主要有红松(*Pinus koraiensis*)、云杉(*Picea asperata*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、落叶松(*Larix olgensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)和黄檗(*Phellodendron amurense*)等。

2 研究方法

2.1 样地选取

研究数据来源于 2020—2022 年在帽儿山实验林场所设的 40 块固定样地(地理坐标范围为 127°33' ~

127°38'E, 45°20' ~ 45°24'N)。样地面积为 50 m × 50 m, 所有样地均被划分为 5 m × 5 m 相邻格网进行调查。乔木层调查样地内每木检尺因子, 包括测定树种、胸径(cm)、树高(m)、冠幅(m)、坐标、活枝高(m)等。各样地平均树高最大值为 18.41 m, 最小值为 11.48 m, 平均值为 14.91 m; 平均胸径最大值为 34.6 cm, 最小值为 13.6 cm, 平均值为 19.7 cm; 林分平均年龄最大值为 72 年, 最小值为 28 年, 平均值为 48 年; 林分密度平均值为 838 株/hm²; 每公顷蓄积平均值为 119.97 m³/hm²; 各样地海拔在 303 ~ 542 m 之间。样地点分布情况如图 1 所示。



图 1 样地点分布区域图

Fig. 1 Distribution area map of sample sites

2.2 发育阶段划分方法

本文采用了 TWINSpan 双向指示种分类法、种间联结-聚类分析法、判别分析法 3 种发育阶段划分方法, 基于固定样地数据对森林生长发育阶段与结构动态变化特征及其规律进行对比分析。

2.2.1 TWINSpan 双向指示种分类法

TWINSpan 双向指示种分类法是在指示种分析的基础上进行改进和扩展的一种分类方法, 通过排序和等级划分, 可以同时完成样方和种类分类, 并充分考虑物种多度的变化, 从而提高分类结果的准确性^[16-17]。因此, 本研究采用 TWINSpan 双向指示种分类方法进行初步分类, 并比较分析各初始类别

在林分生长(包括活立木、枯死木指标及林分定期生长量)、生物多样性和林分结构(直径分布等)方面的差异性。具体步骤包括: 确定用于指示种分析的树种; 以样地各树种的公顷蓄积量为指标, 形成原始数据矩阵; 采用 R 软件 twinspanR 包, 设置分类数等参数, 形成初始分类。根据 TWINSpan 法初始分类结果, 从林分直径分布、树种多样性和林分生长指标等方面, 分析判断硬阔叶林的生长发育阶段。

2.2.2 种间联结-聚类分析法

成对物种间联结性 χ^2 检验的测定原理是, 通过比较群落调查中两种物种都存在、单一物种存在、两种物种均不存在的样方数的实际值与假设两种群独立随机分布的理论值之间的差异^[18], 并选择一个统计量检验差异是否显著, 来确定两个种群间的联结性。通常检验联结性的统计量为 χ^2 。

$$\chi^2 = \frac{(ad - bc)^2 n}{(a+b)(a+c)(b+d)(c+d)} \quad (1)$$

χ^2 值可能出现偏差, 应用 Yates 的连续性校正系数来校正。其公式为

$$\chi^2 = \frac{(|ad - bc| - 0.5n)^2 n}{(a+b)(a+c)(b+d)(c+d)} \quad (2)$$

式中: n 为取样总数, a 为两个种都出现的样方数, b 为种 A 出现但种 B 不出现的样方数, c 为种 B 出现但种 A 不出现的样方数, d 为两个种都不出现的样方数。当 $ad \geq bc$ 时为正联结, $ad < bc$ 则为负联结。若 $\chi^2 < 3.841$ ($P > 0.05$), 则表示种对独立分布; 若 $3.841 < \chi^2 < 6.635$ ($0.01 < P < 0.05$), 则表示种对联结显著, 若 $\chi^2 > 6.635$ ($P < 0.01$), 则表示种对联结极显著。再采用联结系数(adjacency coefficient, AC)^[19-20]、共同出现百分率(percentage, PC)^[21-22]、Ochiai 指数(OI)^[23]和 Dice 指数(DI)指标, 进一步检测关联程度。

$$AC = \frac{(ad - bc)}{(a+d)(b+d)} \quad ad \geq bc \quad (3)$$

$$AC = \frac{(ad - bc)}{(a+b)(a+c)} \quad bc > ad \text{ 且 } d \geq a \quad (4)$$

$$AC = \frac{(ad - bc)}{(b+d)(d+c)} \quad bc > ad \text{ 且 } d < a \quad (5)$$

$$PC = \frac{a}{a+b+c} \quad (6)$$

$$OI = \frac{a}{\sqrt{(a+b)(a+c)}} \quad (7)$$

$$DI = \frac{2a}{2a+b+c} \quad (8)$$

根据对硬阔叶林样地中的树种重要值(importance value, IV), 将数据转化为 [0, 1] 的元数据矩阵, 进行系统聚类分析, 结合种间关联程度、

Pearson 相关系数以及 Spearman 秩相关系数将样地划分为不同的生长发育阶段。树种重要值表达式为

$$IV = \frac{R_A + R_F + R_D}{3} \quad (9)$$

式中: R_A 表示某一物种在群落中的相对多度; R_F 表示某一物种在群落中的相对频度; R_D 表示某一物种在群落中的相对优势度。

2.2.3 判别分析法

本文根据发育演替阶段特征的定性描述, 以林分年龄将样地进行初始划分, 而后选择平均胸径、平均树高、公顷蓄积量、公顷断面积、硬阔比等林分指标, 采用逐步判别分析建立 Fisher 判别^[24]函数, 其公式如下

$$Y_1 = c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_p X_p \quad (10)$$

式中: 确定系数 c_1 、 c_2 、 \dots 、 c_p 的准则在于组间差距达到最大, 同时使组内差距达到最小; p 代表选取的树种。

Fisher 判别随着总体个数的增加, 建立的判别式也会增加, 但每个判别式的有效性是有区别的, 为了减少计算量和保证判别的正确率, 只需要选择对判别有效性最大的判别式即可。最终综合判别分析林分特征确定硬阔叶林的生长发育阶段。

2.3 林分结构特征分析

2.3.1 年龄结构

本研究利用生长锥钻取木芯计数年轮获取林分年龄, 以林分平均直径、加权平均高选取树种组成最大的优势树种, 用其平均年龄代表天然林的平均年龄(\bar{A})^[25-27]。相关表达方式如下

$$\bar{A} = \frac{\sum_{l=1}^m A_l}{m} \quad (11)$$

式中: m 为查定年龄的林木株数, A_l 为第 l 株林木的年龄($l=1, 2, \dots, m$)。

2.3.2 直径结构

评价林分直径结构常用 q 值法。一般认为异龄林的 q 值在 1.2 ~ 1.7 区间内, 则说明其株数分布是合理的^[28-29]。径阶多样性和株数可用径阶的反“J”型分布来表示, 用负指数分布来表示异龄林株数按径阶的分布^[30], 其表达式如下

$$N = K e^{-tD} \quad (12)$$

式中: N 为每个径阶的林木株数, D 为径阶, t 、 K 是表示直径分布特征的常数。将 q 值法与负指数分布联系起来, 得到 q 值分布表达式^[8]为

$$q = e^{kh} \quad (13)$$

式中: q 为相邻径阶株数之比, k 为负指数分布的结

构常数, h 为径阶距。 q 值越小, 直径分布曲线越平缓; q 值越大, 曲线越陡峭。

2.3.3 物种多样性

物种多样性是评估生态系统功能与结构关系的重要指标, 反映了所有生命个体与非生物环境间各种复杂的关系, 同时也是林分结构最根本的表现形式, 是进行森林生态学过程研究的基础^[31-32]。目前量化物种多样性的指标有很多, 计算方法与表达的意义也各有不同^[33]。本文选用 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Inverse.Simpson 多样性指数 5 个指数对不同发育阶段下的物种多样性进行了分析。相关指标计算见表 1。

2.4 阶段划分综合指数的构建

对于发育阶段划分的研究, 较多是从单一层面考虑, 如林分年龄、平均胸径、蓄积生长量等指标, 不能全面体现林分发育的特点^[6-8]。不同的林分特征指标能够反映不同的林分信息, 如平均胸径、平均树高和蓄积量能够直接反映林木个体生长状况, 树种组成、目的树种优势度和多样性指数可以突出显示目的树种的变化趋势, 大径材比和林木稳定性可以反映林分的质量和健康状况, 混交度、密集度、直径分布、物种多样性指数等能够从不同角度体现林木发育状况。

因此本研究从林分结构、林木生长、林分生产力和林分动态 4 个层面, 选取混交度、角尺度、直径分布、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数、大径材比、林木稳定性、目的树种优势度、目的树种多样性指数、平均胸径、平均树高等 11 个参数, 采用综合评价法建立阶段划分综合指数, 期望能够更全面地评估林分的整体生长状态, 为发育阶段的划分提供参考。各参数的权重利用熵权法-AHP 法^[34]来确定。

林木稳定性、目的树种优势度^[35]及目的树种多样性指数^[36]相关指标计算见表 2。

由于每个指标的单位、量纲等不同, 无法直接比较其好坏, 先采用极值法对原始统计数据进行标准化处理, 即对评价矩阵标准化, 得到标准化后的矩阵。由于指标中有正向、负向之分, 标准化处理如下所示。

$$A_{sj} = \frac{a_{sj} - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (14)$$

$$A_{sj} = \frac{a_{\max} - a_{sj}}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (15)$$

式中: 公式(14)为正向指标, 公式(15)为负向指标, a_{sj} 为第 s 个参数的第 j 项指标, A_{sj} 为对 a_{sj} 行标准化处理后的数值, a_{\max} 为 a_{sj} 中的最大值, a_{\min} 为 a_{sj} 中

表1 林分结构指标计算公式及说明

Tab. 1 Calculation formula and explanation of stand structure indicators

多样性指数	计算公式	说明	参考文献
Margalef丰富度指数(R)	$R = (S - 1) / \ln M$	R 越大, 林分中树种的丰富程度越高	[12]
Simpson多样性指数(L)	$L = 1 - \sum_{i=1}^S (p_i)^2$	L 越小, 林分中树种多样性越高	[7, 31-32]
Shannon-Wiener指数(H)	$H = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$, 其中 $p_i = N_i / M$	H 越大, 林分组成结构多样性越高	[6, 31-32]
Pielou均匀度指数(J)	$J = H / \ln S$	J 越大, 林分树种分配越均匀	[31-32]
Inverse Simpson多样性指数(Q)	$Q = \frac{1}{L}$	Q 值越高, 物种多样性越高	[31-32]

注: S 为树种数, M 为所有树种的个体总数, N_i 为树种 i 的个体总数, p_i 为第 i 个树种株数在林分树木总株数中所占百分比。下同。

表2 各参数指标计算公式及说明

Tab. 2 Calculation formula and explanation of various parameter indicators

参数	计算公式	说明	参考文献
林木稳定性(DH_r)	$DH_r = \frac{H_r}{D_r}$	DH_r 越小, 林木重心越低, 抵抗不利因素能力越强	[35]
目的树种优势度(D_{sp})	$D_{sp} = \sqrt{D_g(1 - \bar{U}_{sp})}$	D_{sp} 越大, 树种在群落中越重要	[35]
目的树种多样性指数(I_{SCD})	$I_{SCD} = S - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^S \left[\left(\frac{v_i}{v} - \frac{1}{S} \right)^2 + \left(\frac{N_i}{M} - \frac{1}{S} \right)^2 \right]$	I_{SCD} 越大, 树种多样性越高	[36]

注: H_r 为第 r 株林木的树高, D_r 为第 r 株林木的胸径, D_g 为相对显著度(用该树种的断面积占全部林木的比例来表示), \bar{U}_{sp} 为树种大小比数的均值, v 为森林总蓄积量, v_i 为森林中树种 i 的蓄积量。

的最小值。

确定指标标准化值(即指标层的评价值)后, 需要结合相应权重值进行计算, 得出不同层级的评价值。各指标评价标准和评价值见表3, 各参数指标信息熵(E_j)、参数权重(W_j)^[37]和阶段划分综合指数(F)

计算公式如下

$$E_j = -\frac{1}{\ln T} \sum_{s=1}^T \left[\frac{A_{sj}}{\sum_{s=1}^T A_{sj}} \ln \left(\frac{A_{sj}}{\sum_{s=1}^T A_{sj}} \right) \right] \quad (16)$$

$$W_j = \frac{1 - E_j}{T - \sum_{j=1}^T E_j} \quad (17)$$

$$F = \sum_{s=1}^T w_j x_s \quad (18)$$

式中: T 为参数的个数。

3 结果与分析

3.1 发育阶段划分

TWINSPAN双向指示种分类法、种间联结-聚类分析法、判别分析法3种方法得到的林分发育阶段划分结果大体一致, 林分生长指标(如平均树高、胸径、大径材等)随发育阶段的变化呈现出逐步增加的趋势(表4), 表明林分正处于逐渐成熟的动态变化过程中; 主要树种组成也随发育阶段的变化而有所差异(表5), 反映了群落结构的演替过程。

3.1.1 TWINSPAN双向指示种分类法划分

TWINSPAN法通过两次划分, 把40块硬阔叶林样地分为3类, 其中类型I包含10块样地, 类型II包含14块样地, 类型III包含16块样地。将水曲

表3 发育阶段评价指标体系

Tab. 3 Evaluation index system for developmental stages

评价指标	评价标准	赋值
	$q \in [1.2, 1.7]$	1
直径分布	多峰分布	0.5
	单峰分布	0
平均胸径	正向指标	[0, 1]
平均树高	正向指标	[0, 1]
角尺度	正向指标	[0, 1]
混交度	正向指标	[0, 1]
Simpson多样性指数	正向指标	[0, 1]
Pielou均匀度指数	正向指标	[0, 1]
大径材比(≥ 26 cm)	正向指标	[0, 1]
目的树种优势度	正向指标	[0, 1]
目的树种多样性指数	正向指标	[0, 1]
林木稳定性	逆向指标	[0, 1]

注: q 为相邻径阶株数之比。

表 4 不同分类结果中各阶段的主要林分指标

Tab. 4 Main stand indicators at different stages in varied classification results

方法	阶段	类型	平均胸径/cm	平均树高/m	公顷蓄积量/ (m ³ ·hm ⁻²)	公顷断面积/ (m ² ·hm ⁻²)	珍贵硬 阔比/%	Margalef 丰富度指数	Simpson 多样性指数	林层比	大径材 占比
TWINSpan 双向指示种 分类法	1	I	17.58	14.19	181.73	28.23	17.43	1.96	0.78	0.52	0.17
	2	II	19.58	14.96	168.90	25.67	33.92	1.97	0.77	0.49	0.23
	3	III	21.21	15.31	190.95	27.49	54.61	1.78	0.78	0.54	0.27
种间联结- 聚类分析法	1	II	17.64	14.36	188.93	28.10	28.33	1.85	0.80	0.53	0.16
	2	I	19.57	14.54	168.91	25.84	35.00	2.03	0.77	0.49	0.26
	3	III	21.43	15.60	185.19	27.28	48.13	1.80	0.76	0.53	0.25
判别分析法	1	II	18.10	14.21	181.04	28.07	22.73	1.90	0.77	0.51	0.20
	2	I	19.98	14.90	179.58	26.71	31.54	1.90	0.78	0.51	0.24
	3	III	20.65	15.40	181.94	26.60	54.38	1.87	0.78	0.54	0.24

注: 类型 I、II、III 表示不同方法划分的 3 个类别, 阶段 1~3 表示林分生长发育的 3 个正向演替阶段。

表 5 不同分类结果中各阶段的树种组成

Tab. 5 Composition of tree species at different stages in varied classification results

方法	阶段	树种组成
TWINSpan 双向指示种 分类法	1	2 椴 2 栎 1 槭 1 白 1 水 1 黄 1 榆 1 枫 + 胡 - 山
	2	2 胡 2 榆 2 槭 1 椴 1 水 1 枫 1 黄 + 白 + 栎 - 黑 - 山
	3	2 胡 2 水 2 榆 1 椴 1 槭 1 黄 1 枫 - 白 - 山 - 栎
种间联结- 聚类分析法	1	2 椴 2 白 1 栎 1 水 1 胡 1 槭 1 榆 1 枫 + 黄 - 山
	2	2 椴 2 榆 2 槭 1 胡 1 黄 1 水 1 白 + 枫 + 栎 - 黑 - 山
	3	2 胡 2 水 2 榆 1 黄 1 椴 1 槭 1 枫 - 山 - 白 - 栎
判别分析法	1	2 椴 2 榆 2 槭 1 白 1 水 1 黄 1 栎 + 胡 + 枫 - 山
	2	2 椴 2 槭 1 枫 1 胡 1 水 1 黄 1 榆 1 栎 + 白 - 山
	3	3 胡 2 水 2 榆 1 黄 1 槭 1 椴 + 枫 + 山 - 白 - 黑 - 栎

注: 椴为椴树 *Tilia tuan*, 栎为蒙古栎 *Quercus mongolica*, 槭为五角槭 *Acer pictum*, 白为白桦 *Betula platyphylla*, 水为水曲柳 *Fraxinus mandshurica*, 黄为黄檗 *Phellodendron amurense*, 榆为榆树 *Ulmus pumila*, 枫为枫桦 *Betula costata*, 胡为胡桃楸 *Juglans mandshurica*, 山为山杨 *Populus davidiana*, 黑为黑桦 *Betula dahurica*。

柳、胡桃楸和黄檗三大珍贵硬阔叶树种作为一个整体, 划分结果中各类型的主要树种及蓄积比如表 6 所示。

从林分状态来看, 各类林分的平均胸径、平均树高、每公顷蓄积与断面积以及公顷株数等均有明显的变化。林分的平均胸径、平均树高大小排序均为: 类型 I < 类型 II < 类型 III; 每公顷蓄积、每公顷株数排序为: 类型 II < 类型 I < 类型 III。在类型 I 到类型 III 的发育过程中, 水曲柳、胡桃楸和黄檗等三大硬阔占比逐渐增大。由此推断, 类型 I 处于发育前期, 类型 III 属于发育后期。因此, 基于 TWINSpan 的树种组成、林分生长和结构的综合分析, 将 40 块硬阔叶林样地生长发育阶段依次划分为类型 I—类型 II—类型 III。

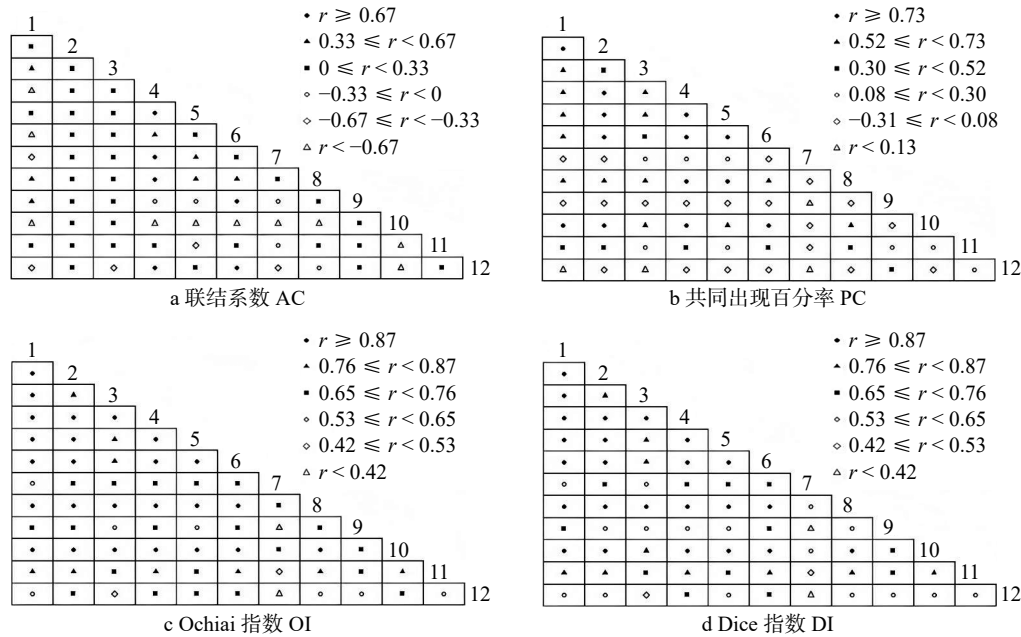
表 6 3 种类型下主要树种及蓄积比

Tab. 6 Main tree species and stocking ratio under three types

类型	主要树种	蓄积比/%
I (10 块样地)	水曲柳、胡桃楸、黄檗	17.43
	椴树	21.89
	五角槭	15.30
	蒙古栎	15.58
	白桦	14.83
II (14 块样地)	水曲柳、胡桃楸、黄檗	33.92
	五角槭	18.29
	榆树	17.95
III (16 块样地)	椴树	13.61
	水曲柳、胡桃楸、黄檗	54.61
	榆树	16.27
	五角槭	11.20
	椴树	8.43

3.1.2 种间联结-聚类分析法划分

硬阔叶林各样地主要树种联结系数矩阵如图 2 所示。从联结系数 AC 矩阵(图 2a)可以看出, 联结系数 AC 值介于 0.67 ~ 1.00(含值 0.67)的种对有 6 对, 占总对数的 9.1%, 如椴树-蒙古栎、五角槭-黄檗等, 即该种对间正联结程度比较高; AC 小于 -0.67 的种对有 10 对, 占总数的 15.2%, 如五角槭-白桦、白桦-水曲柳等, 测定结果说明这些种对之间呈现显著负相关。从共同出现百分率 PC 矩阵(图 2b)可知, PC 值大于 0.84 的种对有 19 对, 占总对数的 28.8%, 如白桦-山杨, 即该种对呈极显著联结; PC 值介于 0.45 ~ 0.58(含 0.45)之间的种对共有 23 对, 占总对数的 34.9%, 说明该种对间联结关系较为显著。



r 表示各联结系数的取值。

图2 硬阔叶林种间联结系数

Fig. 2 Interspecific association coefficients of hard broadleaved forest

从 Ochiai 指数(OI)矩阵(图 2c)可知, OI 值大于 0.87(含值 0.87)的种对有 25 对, 占总对数的 37.9%, 如白桦-椴树, 表明该种对间呈极显著联结关系; OI 值小于 0.42 的种对数的有 2 对, 占总对数的 3.0%, 如椴树-榆树, 表明种对间的联结关系呈微弱显著性。从 Dice 指数(DI)矩阵(图 2d)可以看出, 种对间总体呈现正联结, DI 值大于 0.87(含值 0.87)的种对有 24 对, 占总对数的 36.4%, 如白桦-山杨, 表明该种对呈极显著联结; DI 值介于 0.76~0.87(含值 0.76)之间的种对数有 10 对, 占总对数的 15.2%, 表明该种对间联结性较高。

根据硬阔叶林样地中树种重要值, 将数据转化为 [0, 1] 的二元数据矩阵, 进行综合聚类分析。结合种间关联程度、Pearson 相关系数、Spearman 秩相关系数将样地划分为 3 个不同类型。类型 I 共 13 块样地, 类型 II 共 11 块样地, 类型 III 共 16 块样地。各类型平均胸径及平均树高的大小排序为类型 II < 类型 I < 类型 III, 类型 II 中水曲柳、胡桃楸及黄檗三大硬阔占比最少, 类型 III 最大达到近 50%, 类型 I 居中。为了更准确反映出不同类型的关系, 综合以上聚类分析并结合种间联结性及林分指标, 将 40 块硬阔叶林样地发育阶段依次划分为类型 II—类型 I—类型 III。

3.1.3 判别分析法划分

依据样地的林分年龄和树种组成特征, 首先将 40 块样地划分为 3 种初始类型。采用判别分析方法, 利用树种重要值等指标, 对这 3 种已知的初始类

型进行了判别分类。结果表明, 判别分类的结果与初始已知类别总体趋于一致。各类型中平均胸径及平均树高的大小排序为类型 II < 类型 I < 类型 III, 类型 II 中水曲柳、胡桃楸与黄檗等三大硬阔占比最少为 22.73%, 类型 I 中占比 31.54%, 而类型 III 中占比最大超过 50%。综合分析, 将 40 块硬阔叶林样地生长发育阶段划分为类型 II—类型 I—类型 III。

运行 Fisher 判别分析时, 得到两个判别函数 (Y_1, Y_2) 如表 7 所示。Fisher 判别函数的特征值能反映判别式分类能力的大小(表 8)。第 1 个判别函数 (Y_1) 方差所占比例为 70.7%, 说明其能解释样本 70.7% 的信息; 第 2 个判别函数 (Y_2) 方差所占比例 29.3%, 联合两个判别函数, 所有样本均可以得到解释。当使用第 1 个判别模型无法实现样本类别的明确判断时, 可结合第 2 个判别式进行判断。

3.1.4 3 种分类方法结果对比

以上 3 种分类方法结果显示, 阶段 1 到阶段 3 的过程中, 不同方法下各项指标的变化总体趋于一致。随着森林的发育, 林分的平均胸径、平均树高、珍贵硬阔占比等指标逐渐变大, 同时喜光树种白桦的数量有明显减少的趋势, TWINSpan 法下的大径材占比, 相比其他两种方法, 有更明显的增加趋势。

对比不同方法划分的结果, 其中任意两种划分结果之间吻合系数结果如表 9 所示, 如 TWINSpan 双向指示种分类法与判别分析法的吻合系数计算结果为 $(7 + 9 + 13)/40 = 0.725$, 吻合系数越大, 说明两种方法的吻合性越高, TWINSpan 双向指示种分类

表 7 Fisher 判别函数

Tab. 7 Fisher discriminant functions

系数	Y_1	Y_2	系数	Y_1	Y_2
c_1	2.192	1.464	c_7	1.691	1.297
c_2	2.846	1.062	c_8	1.117	0.382
c_3	-0.254	0.289	c_9	2.347	0.612
c_4	2.282	1.125	c_{10}	1.552	0.735
c_5	1.754	0.062	c_{11}	1.168	0.387
c_6	2.395	1.090	c_{12}	1.261	1.327

注: $c_1 \sim c_{12}$ 分别对应于 $X_1 \sim X_{12}$ (胡桃楸、榆树、暴马丁香、五角槭、白牛槭、椴树、枫桦、黄檗、白桦、水曲柳、杨树和蒙古栎) 的系数。

表 8 判别函数特征值

Tab. 8 Eigenvalues of discriminant functions

函数	特征值	方差所占比例/%	累计比例/%	典型相关性
Y_1	7.533	70.7	70.7	0.592
Y_2	3.007	29.3	100.0	0.427

表 9 不同方法划分结果的吻合系数

Tab. 9 Anastomosis coefficients for the dividing results by different methods

方法	法1	法2	法3
法1	1		
法2	0.750	1	
法3	0.725	0.575	1

注: 法1、法2和法3分别为 TWINSpan 双向指示种分类法、种间联结-聚类分析法和判别分析法。

法与种间联结-聚类分析法的吻合性最高, 说明这两种方式对硬阔叶林生长发育阶段的划分结果较为一致。

通过比较 3 种方法, 综合考虑林分特征、树种多样性以及树种组成等林分指标, 结合林分的生长发育规律, 最终选用 TWINSpan 法对研究区域 40 块硬阔叶林样地进行划分, 分别是阶段 1(建群阶段)、阶段 2(竞争生长阶段)、阶段 3(近自然林阶段)。

3.2 林分结构特征分析

3.2.1 年龄结构

在不同发育阶段, 林分生长快慢及其生长量都会发生较大变化, 因此研究将林分年龄作为影响林分生长的林分结构因子。不同生长发育阶段下各样地林分年龄(图 3)均分布在幼龄林、中龄林与近熟林; 其中, 在建群阶段幼龄林分布较多, 竞争生长阶段的中龄林占比最高; 从建群阶段到近自然林阶段, 幼龄林分布呈现下降趋势, 近熟林数量总体上表现为增加趋势, 而中龄林分布表现为先增加后减少的趋势, 比较符合林分在生长过程中的自然更新机制和群落演替规律。

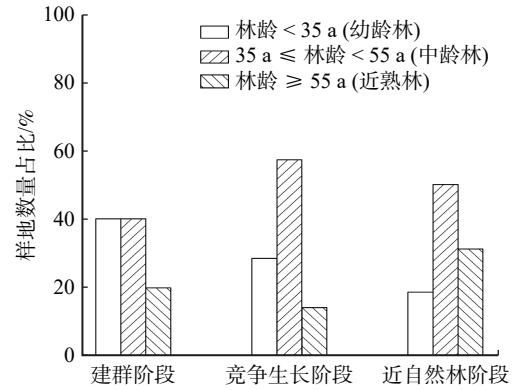


图 3 硬阔叶林不同生长发育阶段林分年龄分布

Fig. 3 Stand age distribution of hard broadleaved forests at different growth and development stages

综合分析不同阶段下的林分年龄, 得到年龄结构的大致分布范围: 建群阶段下, 林分中林木年龄 < 35 年的比例在 30% ~ 50% 之间, 竞争生长阶段中年龄分布在 35 ~ 55 年之内的林木比例已超过 55%, 近自然林阶段的林分, 年龄 > 55 年的林木占比大于 30%。

3.2.2 直径结构

由林分株数按径阶分布拟合结果(表 10)可知, 帽儿山天然硬阔叶林不同阶段下的直径结构拟合均良好, 在竞争生长阶段中 R^2 最高且更接近于 1, 说明此阶段中拟合效果相对更好。拟合结果显示: 近自然林阶段中林木株数随直径的增加而下降较快, 建群阶段中林木株数随直径的增加而下降较慢。比较参数 t 和 K 的值, 其在建群阶段与竞争生长阶段中相对更相近, 表明两个阶段中小树的密度较为接近。综合分析, 在 3 个阶段中, 竞争生长阶段中直径分布模型表现较好。

从径阶-株数分布状态(图 4)看, 在建群阶段, 小径阶 (< 14 cm) 林木分布更集中, 直径生长较快, 林分结构相对简单; 在竞争生长阶段, 直径生长逐步减缓, 林分结构开始复杂化; 在近自然林阶段, 直径生长趋于稳定。以竞争生长阶段为例, 硬阔叶林总体分布中 6 ~ 40 cm 径阶所占比重最大, 达到 97.3%, 其中小径阶 (< 14 cm) 林木比重占 52.25%、中径阶 (14 ~ 24 cm) 林木占 25.37%、大径阶 (26 ~ 36 cm) 林木占 17.32%; 林分内林木胸径大于 52 cm 的大径阶林木只占总株数的 0.96%, 说明林木株数随着径阶

表 10 负指数分布拟合结果

Tab. 10 Fitting results of negative exponential distribution

阶段	K	t	R^2	拟合函数
建群阶段	651.97	-0.109	0.911	$N = 651.97e^{0.109D}$
竞争生长阶段	751.45	-0.096	0.958	$N = 751.45e^{0.096D}$
近自然林阶段	527.95	-0.082	0.888	$N = 527.95e^{0.082D}$

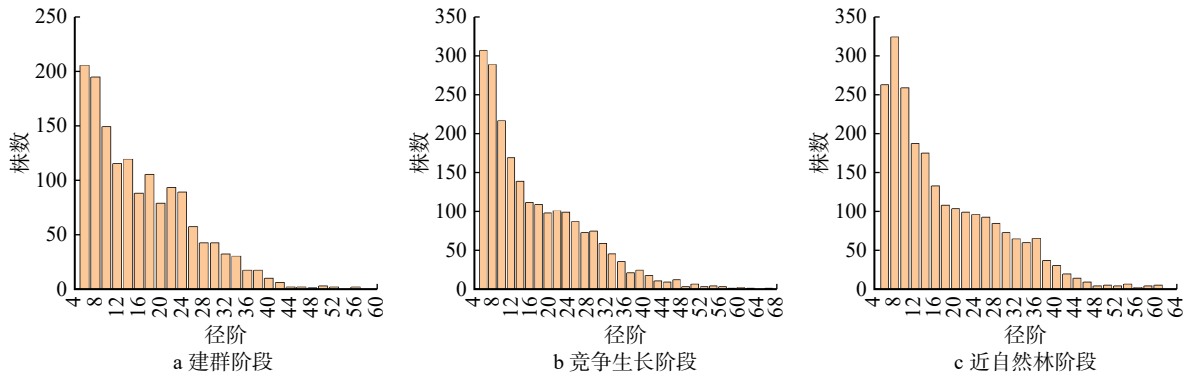


图4 不同生长发育阶段林分径阶-株数分布

Fig. 4 Distribution of diameter class and tree number in different growth and development stages of stand

的增加而逐步下降。结果表明3个发育阶段林分直径结构整体上呈反“J”型分布或左偏单峰山状,表现出明显的异龄林的特点,径阶株数分布及直径分布均较理想。

3.2.3 物种多样性

随着林分的生长发育,不同发育阶段下的物种多样性指数如图5所示。总体上,Shannon-Wiener指数等在各阶段下差异不显著,结合表4显示,在建群和生长阶段,林分处于更新和重建过程,物种组成较为复杂,物种丰富度相对较高。而进入近自然林阶段后,优势树种逐渐占据优势地位,某些物种数量下降,物种多样性有所降低,此时林分结构相对稳定,物种组成趋于单一。综合来看,多样性指数随林分发育阶段变化的动态特点,也反映了林分物种组成和群落结构随林分生长而不断调整的规律。

3.3 阶段划分综合指数

通过对选取的11个参数进行标准化处理和赋予适当权重,建立了一个综合评价指标,它能够反映林分在结构、生长、多样性和稳定性等多个层面的整体发育水平。由不同发育阶段下的各评价参数指标

所占权重(表11)可以看出,Simpson多样性指数、目的树种优势度、目的树种多样性指数、平均胸径及平均树高等5个指标所占比重相对较大,累计超过60%,由此推断以上5个指标对阶段划分综合指数F值的影响较大。

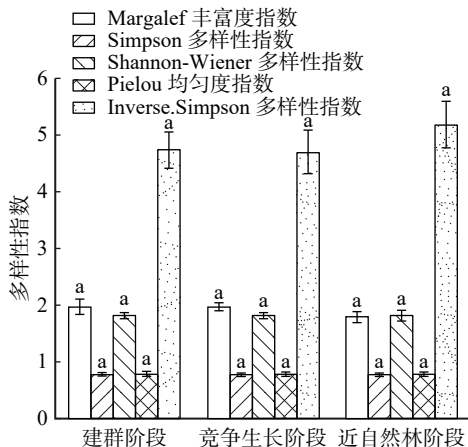
表11 各参数指标权重占比

Tab. 11 Weight proportion of each parameter indicator

参数	权重	参数	权重
混交度	0.056	林木稳定性	0.051
角尺度	0.060	目的树种优势度	0.111
q值	0.065	目的树种多样性指数	0.119
Simpson多样性指数	0.104	平均胸径	0.149
Pielou均匀度指数	0.066	平均树高	0.144
大径材比	0.075		

这种基于多项指标的综合评价方法,能够多方面的体现林分的生长发育状况。因此在TWINSpan分类法划分的3个阶段下,根据林分生长指标及特征,结合选取的11个评价参数以及研究区域样地林分生长状况,构建出划分生长发育阶段的综合指数F值的分布范围(表12)。

不同区域林分发育存在共性,综合指数的提出,可为其他区域的阶段划分研究提供一定的参考。其中包含的11个参数,混交度、角尺度、直径分布等能够反映林分的结构特征,大径材比和林木稳定性能反映林分的生产潜力和抗干扰能力,目的树种优势度和多样性指数能够反映主要经济树种的生长状



相同小写字母表示不同阶段下物种多样性之间的差异不显著($P > 0.05$)。

图5 不同生长发育阶段多样性指数

Fig. 5 Diversity index at different growth and development stages

表12 不同发育阶段综合指数

Tab. 12 Comprehensive index of different developmental stages

发育阶段	F值
建群阶段	< 0.35
竞争生长阶段	[0.35, 0.50)
近自然林阶段	≥ 0.50

况, 平均胸径和平均树高是林分生产力的重要体现, Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数等对于评估林分的稳定性和恢复力具有重要意义。这些参数在其他地区的应用, 应根据实际情况结合当地的气候、土壤、干扰历史等因素进行适当的调整和校正。

4 讨 论

4.1 林分发育阶段划分

TWINSpan 双向指示种分类法的优点在于不依赖林分年龄结构, 而是综合考虑样方和物种两个维度的数据, 能更全面反映林分结构特征, 通过 TWINSpan 法将林分划分为不同的发育阶段, 可以为后续的研究和管理决策提供一定参考。但该方法也存有一些不足之处, 如参数设定(如划分层次和分组数量)较依赖主观判断, 参数的变化会影响分类结果, 此外, 此方法无法直接输出层次图, 需要手动绘制, 增加了工作量。本文中 TWINSpan 法得到的分类结果与前人的研究结果^[17,38]相比大致符合, 通过比较前人的研究, 总结出当错分样本占比较大时, 需要人为调整才能得到更合理的结果^[7,38]。总体上, 虽然 TWINSpan 分类法存在局限性, 但仍能相对准确的划分林分的发育阶段, 为进一步探讨林分管理和保护提供重要参考依据。

种间联结-最优分割法是林分发育阶段划分中常用的方法之一^[39-40], 主要是依据林分内树种间的联结性进行划分, 能够较好地反映林分发育过程的变化趋势。该方法能够克服主观性的影响, 但其要以演替种组为前提, 因此在样本间的树种组成有较大的差异时应用才可能会有较好的结果。针对本研究区域树种组成差异较小的特点, 采用种间联结结合聚类分析的方法进行阶段划分, 规避了使用种间联结-最优分割法在树种组成方面可能存在的局限性。

判别分析法^[41-42]在发育阶段划分时的使用中, 通常以林分年龄作为初始依据进行分类^[6], 但获取天然异龄林的准确年龄数据往往比较困难, 需要大量的现场调查工作, 因此该方法更适用于同龄林或经过管理的次生林。本研究采用的 Fisher 判别分析法, 结果与李婷婷等^[6]的研究较为相近, 亦表现为平均胸径、大径材比等指标逐渐增大, 不同之处是林分密度呈先降低后升高的趋势。此方法操作相对简单, 思路更清晰直观, 本文利用此法进行两次划分, 同时从树种组成和林分特征两方面综合考虑, 划分结果也相对准确, 较符合林分生长的规律。

对于综合指数的构建, 通常考虑科学性和可操作性两条原则。而学者们对于发育阶段的划分, 往

往考虑的是林分蓄积量^[2]、平均胸径^[4]、树种组成^[7]等单一层面。本文选取的 11 个参数涵盖了林分的结构特征、生长特性、多样性和稳定性等多个层面, 能够全面反映林分的发育状况, 并描述林分的生长发育阶段特征。采用综合评价法将多个参数综合起来, 能够客观地反映林分的整体发育水平; 通过对其赋予权重, 体现了各参数在整体评价中的重要性, 同时, 熵权法-AHP 法赋予各指标权重减少了层次分析法中人为因素的影响。在综合指数范围下的 3 个发育阶段, 其不同阶段下的结构、生长等特征与实际观察较为相符。

4.2 林分结构特征

林分结构对森林功能的发展起着决定性的作用。不同生长发育阶段下林分年龄、直径及多样性等有着明显的变化。林分的年龄结构是判断种群生长情况和稳定性的重要指标, 其分布形状可以反映出种群的发展趋势。杨子铎^[43]对湖南栎类(*Quercus* spp.)天然林的研究结果表明不同林分类型林分的年龄分布存在显著差异。林分直径结构是林分结构中最重要和最基本的部分, 与林木的树高、材积等有着密切的关系, 是森林经营技术等的理论依据。杜志^[44]对长白山退化云冷杉林不同演替阶段的林分结构进行了研究, 研究结果得出云冷杉林的直径株数分布呈现反“J”型、双峰和多峰等不规则结构。生物多样性包含多层次或维度, 其中基于物种分类单元的物种多样性是量化生物多样性的基础指标。范秀华等^[45]的研究中表明, 物种多样性会对森林生物量和生产力方面起到作用。闫东锋等^[46]和高润梅等^[47]的研究中表明, 多样性较高的群落, 稳定性亦较高, 林分结构越复杂, 演替阶段越趋顶级。

本研究针对林分年龄、直径结构及物种多样性等 3 个方面对不同发育阶段下的林分结构特征进行了分析。结果表明: 该区域低龄级个体补充充足, 大树个体相对较少; 随着林分的生长发育, 新生个体数随着年龄的增加而减少, 年龄结构呈不规则金字塔型, 属于增长型结构; 随着时间的推移, 高龄级的个体数目会逐渐增加, 种间竞争会不断加强。本文采用负指数分布模型对不同发育阶段的林分直径进行分布模型计算, 并用 q 值进行检验。直径结构总体上呈反“J”型, 从计算结果看, 建群阶段中林分 q 值最大, 说明径级结构曲线比较陡峭, 以较小径材数量居多; 近自然林阶段中林分 q 值最小, 表明径级结构曲线相对比较平缓, 大径材数量分布相对广泛。而在 3 个不同阶段中, 多样性指数之间差异不显著, 结合 Margalef 丰富度指数来看, 随着林分的生长发育, 物种丰富度逐渐降低。以上关于林分结构的研

究结果与前人的研究结果^[43-44]相比大致符合,因此能够较为客观合理地对林分结构特征进行描述,较符合林分的生长发育规律。

5 结 论

本研究基于黑龙江省帽儿山实验林场 40 块天然硬阔叶林固定样地数据,分别运用 TWINSpan 双向指示种分类法、种间联结-聚类分析法以及判别分析法 3 种方法,将帽儿山天然硬阔叶林的生长发育划分为 3 个阶段。从林分特征、树种组成及多样性等林分指标考虑,并结合林分生长发育规律的综合分析,本研究认为 TWINSpan 双向指示种分类法能够更客观合理划分研究区域的生长发育阶段,并明确了帽儿山天然硬阔叶林的发育阶段为建群阶段-竞争生长阶段-近自然林阶段。基于划分的不同阶段,采用年龄结构、直径结构和物种多样性等林分结构指标,量化分析了天然硬阔叶林的林分结构特征,从整体上看,该研究区域以中龄林为主,年龄结构呈增长型;不同阶段下,径阶株数分布规律有所不同,直径结构总体上呈现反“J”型分布;随着林分的生长发育,丰富度指数减小,物种组成逐渐趋于稳定。

在此基础上,本文选取平均胸径、角尺度、林木稳定性和目的树种优势度等 11 个参数指标,构建了发育阶段划分的综合指数 F 值,结合林分特征指标及林分生长规律得到综合指数 F 值的分布范围。该方法能够客观、全面的评估林分的生长状况,为林分发育阶段的划分提供了新的思路和参考,这种基于多项指标的综合评价方法,有望广泛应用于不同树种、环境条件下的林分。

以上针对森林发育阶段划分的研究,有助于制定针对性的经营措施,促进对林分资源的合理利用和保护,实现生态、经济、社会效益的平衡;深入了解不同发育阶段的林分结构特征,为制定合理的经营目标和策略提供了实践基础,也为林业规划、林分管理等决策提供了参考依据。

参 考 文 献

- [1] 刘世荣, 马姜明, 缪宁. 中国天然林保护、生态恢复与可持续经营的理论与技术[J]. 生态学报, 2015, 35(1): 212-218.
Liu S R, Ma J M, Liao N. Achievements in natural forest protection, ecological restoration, and sustainable management in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 212-218.
- [2] 周梦丽. 天然云冷杉阔叶混交林发育阶段、优势高和竞争关系研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2022.
Zhou M L. Development stage, dominant height and competitive relationship of natural spruce-fir-broadleaf mixed forest[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2022.
- [3] Podlaski R. Suitability of the selected statistical distributions for

- fit-ting diameter data in distinguished development stages and phases of near-natural mixed forests in the Świętokrzyski National Park (Poland)[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 236(2-3): 393-402.
- [4] Král K, Vrška T, Hort L, et al. Developmental phases in a temperate natural spruce-fir-beech forest: determination by a supervised classification method[J]. European Journal of Forest Research, 2010, 129(3): 339-351.
- [5] 陆元昌, 雷相东, 洪玲霞, 等. 近自然森林经理计划技术体系研究[J]. 西南林学院学报, 2010, 30(1): 1-5.
Lu Y C, Lei X D, Hong L X, et al. A preliminary study on planning technical model for close-to-nature forest management[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2010, 30(1): 1-5.
- [6] 李婷婷, 陆元昌, 张显强, 等. 经营的马尾松森林类型发育演替阶段量化指标研究[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(3): 9-17.
Li T T, Lu Y C, Zhang X Q, et al. Quantitative indices to identify succession stages of managed *Pinus massoniana* forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(3): 9-17.
- [7] 贾珂, 王新杰, 和敬渊, 等. 基于 TWINSpan 分类的汪清县温带森林发育演替阶段分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(1): 179-186.
Jia K, Wang X J, He J Y, et al. Analyses of the development and succession stage of temperate forests in Wangqing Country based on TWINSpan[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 48(1): 179-186.
- [8] 龚直文. 长白山退化云冷杉林演替动态及恢复研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
Gong Z W. Dynamics of forest succession and restoration strategies for degraded spruce-fir forest in Changbai Mountain [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [9] 贾玮玮, 解希涛, 姜生伟, 等. 大兴安岭新林林业局 3 种林分类型天然更新幼苗幼树的空间分布格局[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 2813-2822.
Jia W W, Xie X T, Jiang S W, et al. Spatial distribution pattern of seedlings and saplings of three forest types by natural regeneration in Daxin'an Mountains Xinlin Forestry Bureau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(9): 2813-2822.
- [10] 胡雪凡, 张会儒, 周超凡, 等. 不同抚育间伐方式对蒙古栎次生林空间结构的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 137-147.
Hu X F, Zhang H R, Zhou C F, et al. Effects of different thinning patterns on the spatial structure of *Quercus mongolica* secondary forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 137-147.
- [11] 王智勇, 董希斌, 张甜, 等. 抚育间伐强度对落叶松天然次生林分结构及健康的影响[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(11): 1-7.
Wang Z Y, Dong X B, Zhang T, et al. Effects of different tending intensities on stand structure and health of *Larix gmelinii* natural secondary forest[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(11): 1-7.

- [12] 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.
- [13] Gadow K V, Zhang C Y, Wehenkel C, et al. Forest structure and diversity[M]. Berlin: Forest Structure and Diversity, 2012.
- [14] Wang T, Gao T, Zhang H, et al. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: atmospheric physics and atmospheric environment[J]. Science China (Earth Sciences), 2019, 62(12): 1903–1945.
- [15] 周梦丽. 天然林择伐强度和择伐周期的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
Zhou M L. Study on selective cutting intensity and cycle of natural forest[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [16] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
Zhang J T. Vegetation quantity ecology method[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 1995.
- [17] 张会儒, 汤孟平. 金沟岭林场混交林 TWINSpan 分类及演替序列分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2009, 33(1): 37–42.
Zhang H R, Tang M P. Classification and succession analysis of mixed forest in Jingouling Forest Farm using the TWINSpan method[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2009, 33(1): 37–42.
- [18] Smith G. Quantitative plant ecology[M]. 3rd ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1983: 105–128.
- [19] 王伯荪, 彭少麟. 南亚热带常绿阔叶林种间联结测定技术研究: I. 种间联结测式的探讨与修正[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1985, 9(4): 274–285.
Wang B S, Peng S L. Studies on the measuring techniques of interspecific association of lower-subtropical evergreen-broadleaved forests-- I. the exploration and the revision on the measuring formulas of interspecific association[J]. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica, 1985, 9(4): 274–285.
- [20] 郭志华, 卓正大, 陈洁, 等. 庐山常绿阔叶、落叶阔叶混交林乔木种群种间联结性研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(5): 424–432.
Guo Z H, Zhuo Z D, Chen J, et al. Interspecific association of trees in mixed evergreen and deciduous broadleaved forest in Lushan Mountain[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1997, 21(5): 424–432.
- [21] 张金屯, 焦蓉. 关帝山神尾沟森林群落木本物种间联结性与相关性研究[J]. 植物研究, 2003, 23(4): 458–463.
Zhang J T, Jiao R. Interspecific association between woody plants in shenweigou of Guandi Mountains, Shanxi Province[J]. Bulletin of Botanical Research, 2003, 23(4): 458–463.
- [22] 张倩媚, 陈北光, 周国逸. 鼎湖山主要林型优势树种间联结性的计算方法研究[J]. 华南农业大学学报, 2006, 27(1): 79–83.
Zhang Q M, Chen B G, Zhou G Y. Interspecific association of the dominant species in two typical communities in Dinghushan, South China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2006, 27(1): 79–83.
- [23] 刘翔宇, 何东, 田文斌, 等. 浙江普陀山岛森林木本植物的种间关联格局[J]. 植物生态学报, 2017, 41(12): 1219–1227.
Liu X Y, He D, Tian W B, et al. Patterns of species associations in woody plants in forest communities of Putuoshan Island, Zhejiang, China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2017, 41(12): 1219–1227.
- [24] Fisher R A. The use of multiple measurements in taxonomic problems[J]. Annals of Human Genetics, 1936, 7(2): 179–188.
- [25] Garet G, Raulier F, Pothier D, et al. Forest age class structures as indicators of sustainability in boreal forest: are we measuring them correctly?[J]. Ecological Indicators, 2012, 23: 202–210.
- [26] Lee W K, Gadow K V, Chung D J, et al. DBH growth model for *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* mixed forests in central Korea[J]. Ecological Modelling, 2004, 176(1–2): 187–200.
- [27] Waskiewicz J, Kenefic L, Weiskittel A, et al. Species mixture effects in northern red oak-eastern white pine stands in Maine, USA[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 298(3): 71–81.
- [28] Bin Y, Ye W H, Muller-Landau H C, et al. Unimodal tree size distributions possibly result from relatively strong conservatism in intermediate size classes[J]. PLoS One, 2012, 7(12): e52596.
- [29] 龚直文, 亢新刚, 顾丽, 等. 天然林林分结构研究方法综述[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(3): 434–443.
Gong Z W, Kang X G, Gu L, et al. Research methods on natural forest and structure: a review[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(3): 434–443.
- [30] Meyer H A. Structure, growth and drain in balanced uneven-aged forests[J]. Journal of Forestry, 1952, 50: 85–92.
- [31] 盘金文, 郭其强, 余大龙, 等. 不同林龄马尾松人工林优势种径级结构及物种多样性分析[J]. 西北植物学报, 2019, 39(4): 722–728.
Pan J W, Guo Q Q, Yu D L, et al. Analysis on diameter class structure of dominant species and species diversity of *Pinus massoniana* plantation at the different ages[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(4): 722–728.
- [32] 曹小玉, 李际平, 周永奇, 等. 杉木林林层指数及其与林下灌木物种多样性的关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 589–595.
Cao X Y, Li J P, Zhou Y Q, et al. Stand layer index and its relations with species diversity of understory shrubs of *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(3): 589–595.
- [33] Duffy J E, Godwin C M, Cardinale B J. Biodiversity effects in the wild are common and as strong as key drivers of productivity[J]. Nature, 2017, 549: 261–264.
- [34] 李泓莹, 董灵波, 刘兆刚. 基于系统动力学的帽儿山实验林场可持续发展水平预测[J]. 森林工程, 2023, 39(1): 11–20.
Li H Y, Dong L B, Liu Z G. Prediction of sustainable development level of Maershan Forest Farm based on system dynamics[J]. Forest Engineering, 2023, 39(1): 11–20.
- [35] 魏红洋. 帽儿山天然次生林主要林分类型结构化经营模式[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
Wei H Y. Structured management model of main forest types in

- Maor Mountain natural secondary forest [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.
- [36] 朱锦迪, 韦新良, 汤孟平, 等. 林分树种组成多样性指数的构建 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(2): 262–271.
- Zhu J D, Wei X L, Tang M P, et al. Construction of diversity index of tree species composition[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(2): 262–271.
- [37] 罗扬, 余光辉, 刘恩斌. 基于熵权重的喀斯特地区林业可持续发展评价方法 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2007, 31(1): 114–118.
- Luo Y, She G H, Liu E B. An appraisal method of the forestry sustainable development based on entropy weight[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2007, 31(1): 114–118.
- [38] 周梦丽, 雷相东, 国红, 等. 基于 TWINSpan 分类的天然云冷杉-阔叶混交林发育阶段划分 [J]. 林业科学研究, 2019, 32(3): 49–55.
- Zhou M L, Lei X D, Guo H, et al. Determining the development stage of natural spruce-fir-broadleaved mixed forest based on TWINSpan[J]. Forest Research, 2019, 32(3): 49–55.
- [39] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 等. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中不同恢复阶段的定量分析 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1695–1701.
- Ma J M, Liu S R, Shi Z M, et al. Quantitative analysis of different restoration stages during natural succession processes of subalpine dark brown coniferous forests in western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(8): 1695–1701.
- [40] 余树全. 浙江淳安天然次生林演替的定量研究 [J]. 林业科学, 2003, 39(1): 17–22.
- Yu S Q. The quantitative study on the secondary forest succession in Chun'an County, Zhejiang Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(1): 17–22.
- [41] Alonzo M, Roth K, Roberts D. Identifying santa barbara's urban tree species from AVIRIS imagery using canonical discriminant analysis[J]. Remote Sensing Letters, 2013, 4(5): 513–521.
- [42] Liao W Z, Pizurica A, Scheunders P, et al. Semisupervised local discriminant analysis for feature extraction in hyperspectral images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1): 184–198.
- [43] 杨子铎. 湖南栎类天然林分结构特征及其对林分生长的影响 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- Yang Z D. Structural characteristics of natural oak forests and their effects on forest growth in Hunan Province[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2023.
- [44] 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 during different succession stages in degraded spruce-fir forests of Changbai Mountains[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [45] 范秀华, 张宝权, 范春雨. 长白山典型天然林不同演替阶段物种多样性和结构多样性对生产力影响 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(12): 1–8.
- Fan X H, Zhang B Q, Fan C Y. Effects of species diversity and structural diversity on productivity in different succession stages of typical natural forest in Changbai Mountains of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(12): 1–8.
- [46] 闫东锋, 朱滢, 杨喜田. 宝天曼栎类天然林物种多样性与稳定性 [J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(4): 628–633.
- Yan D F, Zhu Y, Yang X T. Species diversity and stability of a natural *Quercus* forest in Baotianman, Henan Province[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2011, 28(4): 628–633.
- [47] 高润梅, 石晓东, 郭跃东. 山西文峪河上游河岸林群落稳定性评价 [J]. 植物生态学报, 2012, 36(6): 491–503.
- Gao R M, Shi X D, Guo Y D. Community stability evaluation of riparian forest of the upper reaches of Wenyuhe in Shanxi, China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2012, 36(6): 491–503.

(责任编辑 范娟
责任编辑 张会儒)