

DOI: 10.20103/j.stxb.202301160112

莫永俊, 曹小玉, 赵文菲, 谢政铝, 孙亚萍, 袁达, 张泽莲, 吴树萍, 王萌蕾. 基于结构方程模型的杉木林分结构多样性评价. 生态学报, 2024, 44(2): 745-756.

Mo Y J, Cao X Y, Zhao W F, Xie Z C, Sun Y P, Yuan D, Zhang Z L, Wu S P, Wang M L. Evaluation of stand structure diversity of *Cunninghamia lanceolata* forest based on structural equation modeling. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 745-756.

基于结构方程模型的杉木林分结构多样性评价

莫永俊¹, 曹小玉^{1,2,*}, 赵文菲¹, 谢政铝¹, 孙亚萍¹, 袁 达¹, 张泽莲¹, 吴树萍¹, 王萌蕾¹

¹ 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004

² 南方森林资源经营与监测国家林业与草原局重点实验室, 长沙 410004

摘要:综合评价杉木林分结构多样性, 可为提高林分结构多样性和精准制定森林经营措施提供理论依据。以湖南省平江县福寿林场的杉木林为研究对象, 利用 4 株邻近木构建林分空间结构单元, 选取表征林分树种组成多样性的全混交度、Simpson 多样性指数与 Shannon-Wiener 指数, 表征林木大小分化多样性的大小变异系数、大小分化度均值指数与交角竞争指数和表征林木空间分布多样性的角尺度、林层指数与空间密度指数等 9 个指标, 构建林分结构多样性评价结构方程模型, 并确定各指标权重, 对林分结构多样性进行综合评价。结果表明: (1) 林分结构多样性评价结构方程模型的卡方自由度比值 χ^2/df 为 1.409, 介于 1—3 之间, 比较适配指数(CFI)、常规拟合指数(NFI)、增值适配指数(TLI)和拟合优度指数(GFI)的值分别为 0.985、0.953、0.978 和 0.931, 均大于 0.9, 近似误差均方根(RMSEA)为 0.048, 小于 0.05, 各指数的拟合效果良好, 模型的适配度较好, 满足研究的需要; (2) 3 个内生潜在变量林分树种组成多样性、林木大小分化多样性和林木空间分布多样性的权重分别为 0.3518、0.3201 和 0.3281, 对外生潜在变量林分结构多样性的影响大致一样, Shannon-Wiener 指数是影响林分树种组成多样性的关键因素, 交角竞争指数是影响林木大小分化多样性的关键因素, 林层指数是影响林木空间分布多样性的最重要因素; (3) 研究区 3 个龄组杉木林分结构多样性的综合得分分别为 0.3364、0.4396 和 0.4588, 评价等级处于 II、III 等级, 林分结构多样性较低, 未达到理想的状态。评价结果较客观地表征了研究区杉木林分结构多样性的现状, 表明利用结构方程模型来评价林分结构多样性是科学、可行的, 可为林分结构多样性评价提供一个全新的思路。

关键词:杉木林; 林分结构多样性; 指标权重; 结构方程模型

Evaluation of stand structure diversity of *Cunninghamia lanceolata* forest based on structural equation modeling

MO Yongjun¹, CAO Xiaoyu^{1,2,*}, ZHAO Wenfei¹, XIE Zhengchang¹, SUN Yaping¹, YUAN Da¹, ZHANG Zelian¹, WU Shuping¹, WANG Menglei¹

¹ College of Forestry, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China

² Key Laboratory of Management and Testing of Forest Resources in Southern China, National Forestry and Grassland Administration, Changsha 410004, China

Abstract: The stand structure diversity of *Cunninghamia lanceolata* forest was comprehensively evaluated, in order to provide the theoretical basis for improving the stand structure diversity and accurately formulating forest management measures. Taking the *Cunninghamia lanceolata* forest in Fushou experimental forest farm of Pingjiang county, Hunan

基金项目:湖南省自然科学基金面上项目(2023JJ30991);“十二五”国家科技支撑计划专题项目(2012BAD22B0505);湖南省教育厅重点科学研究项目(19A518)

收稿日期:2023-01-16; 网络出版日期:2023-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: exy7723@aliyun.com

Province as the research object, the stand spatial structure unit was constructed by four adjacent trees. Nine indexes were selected, including complete mingling degree, Simpson diversity index and Shannon-Wiener index in characterizing the stand tree species composition diversity, size coefficient of variation, mean size differentiation index and angle competition index in characterizing the tree size differentiation diversity, and uniform angle index, storey index and spatial density index in characterizing the tree spatial distribution diversity, to construct a structural equation model for the evaluation of stand structure diversity and determine the weight of each index for a comprehensive evaluation of stand structure diversity. The results showed that: (1) For the structural equation model of stand structure diversity evaluation, the Chi-square degree of freedom (χ^2/df) was 1.409, which was between 1—3. The values of CFI, NFI, TLI and GFI were 0.985, 0.953, 0.978 and 0.931, which were greater than 0.9, respectively, and the RMSEA was 0.048, which was less than 0.05. All indexes were well fitted, the fitness of the model was good, and the research requirements were satisfied. (2) The weights of the three endogenous latent variables stand tree species composition diversity, tree size differentiation diversity and tree spatial distribution diversity were 0.3518, 0.3201 and 0.3281, respectively, with approximately the same effect on the exogenous latent variable stand structure diversity. The Shannon-Wiener index was the key factor affecting the stand tree species composition diversity. Angle competition index was the key factor affecting the tree size differentiation diversity. The storey index was the most important factor affecting the tree spatial distribution diversity. (3) The comprehensive scores of the stand structure diversity of *Cunninghamia lanceolata* forests in the three age groups in the study area were 0.3364, 0.4396 and 0.4588, respectively, which were evaluated in the grade II and III. The stand structure diversity was low and did not reach the ideal state. In this paper, the evaluation results objectively characterized the current status of the stand structure diversity of *Cunninghamia lanceolata* forest in the study area, showing that it was scientific and feasible to apply the structural equation model to evaluate the stand structure diversity, it is hoped to provide a new idea for the evaluation of the stand structure diversity.

Key Words: *Cunninghamia lanceolata* forest; stand structure diversity; index weight; structural equation model

杉木作为我国南方主要的人工造林树种,种植面积广,且具有速生、丰产、适应能力强等优点^[1-2],但因栽培模式不当、经营管理措施不合理等,致使杉木林存在林分结构简单、树种结构单一,以及生物多样性丧失等问题,进而导致森林生态功能低下。林分结构是森林结构的基本单元,是森林经营管理与分析中的重要因子,也是森林经营措施实施的对象^[3],林分结构多样性与复杂性越高,林分的质量、稳定性与生物多样性越高,各功能越强。因此,对林分结构多样性进行科学合理的评价,可为制定和实施以提高杉木林林分结构多样性与复杂性为目的的科学经营与管理措施提供理论依据。

林分结构多样性是不同结构属性相对丰富程度和均匀性的基本度量,不但与群落内物种丰富程度和个体大小有关,而且与林分的垂直结构关系密切^[4-6]。目前,林分结构多样性越来越受到国内外学者的关注^[7-8],一些研究主要集中于林分结构多样性指标的探索、分类与总结^[9-11];林分结构多样性的定量描述与分析^[8,12];林分结构多样性特征与动态变化^[13-14];林木大小多样性的量化以及影响因子^[15-16]等方面,而关于林分结构多样性评价方面的研究相对较少。有学者认为,林分结构多样性可以细分为树种的多样性、林木大小的多样性和林木位置的多样性^[17]。现林分结构多样性评价虽取得一些进展^[7,18-19],但现有的林分结构多样性评价或描述很少同时顾及这三个方面。有关研究报道主要集中于选取林分空间结构指标进行林分空间结构评价方面,有学者采用乘法原理进行林分空间结构评价^[20],但因其未考虑不同评价指标对形成理想空间结构的贡献大小,可能致使评价结果产生偏差,由此,有学者应用熵权法^[21]和变异系数法^[22]等来确定指标权重,弥补了乘法不能确定权重的不足。刘玉平等^[23]引入微观经济学科布-道格拉斯(C-D)生产函数,构建了林分空间结构生产函数模型,进而对天然林和人工林林分空间结构进行评价;张连金等^[24]通过建立经营迫切性评价指数、确定评价标准来评价林分空间结构的不合理方面并提出针对性的调整措施。此外,还有学者采

用雷达图^[25]、单位圆^[26]和修正单位圆^[27]等方法进行林分空间结构评价。虽然这些方法取得了一定的进展,但主要集中在林分空间结构研究方面。鲜见有学者从树种的多样性、林木大小的多样性和林木位置的多样性三个方面选取相应的空间结构指标和非空间结构指标并采用结构方程模型来评价林分结构多样性,因此,从空间结构和非空间结构两个方面选取合适的评价指标并采用科学合理的评价方法来评价林分结构多样性,以使评价结果更全面、适用性更强,仍是摆在林学家面前的一项重要任务。

结构方程模型是一种模拟社会经济系统复杂关系的方法^[28]。结构方程模型不仅包含路径分析、多元回归和因子分析,而且还可同时分析多个因果关系,这是传统方法所不具备的^[29]。它在构建林分结构多样性评价指标和确定权重时,既可清楚呈现各参评指标间的相关程度,又可借助数据的内在联系充分地提取数据所包含的原始信息,还可有效解决指标多重共线的问题^[30-31]。基于此,本研究以湖南省平江县福寿林场的杉木林为研究对象,采用结构方程模型构建林分结构多样性评价指标并确定各评价指标权重,对研究区杉木林林分结构多样性进行综合评价,确定不同龄组杉木林林分结构多样性现状,以期为合理地确定林分结构多样性评价指标权重和科学评价林分结构多样性提供新思路,亦为科学精准地提高林分结构多样性与复杂性的经营管理措施的制定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区福寿林场(28°03′00″—28°32′30″N, 113°41′15″—113°45′00″E)位于湖南省平江县,林场面积约1275 hm²。地势南高北低,海拔为800—1573.2 m,山体上下部比较陡,中部较为平坦,平均坡度约为25°。林场气候类型为大陆性季风气候,年平均气温12.1℃,年最高和最低气温分别为30.4℃和-15℃,年降水量2100—2300 mm,日照丰富,有效积温达4547℃,无霜期217 d,年相对湿度约87%。林场内植被繁茂且类型丰富,主要有针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、针阔混交林、矮林和灌丛等。林场林地土壤层深厚肥沃,腐殖质较为丰富且阴湿多雾,适合多种树木生长。截至2016年调查时,幼龄林、中龄林和成熟林的林龄分别为9、17和27年。基于研究需要,在2013年对幼龄林和中龄林进行了抚育间伐和补植树种,其中,在幼龄林样地1、2和3补植了马褂木(*Liriodendron tulipifera*)和栎树(*Koelreuteria paniculata*);在中龄林样地7、10和12补植了马褂木、栎树和深山含笑(*Michelia maudiae*);此外,在近熟林(在2016年调查时已成为成熟林)样地15、16和18补植了红豆杉(*Taxus chinensis*)。

1.2 数据来源

在福寿林场科研实验基地划选了18块20 m×30 m的立地条件大致相同的样地(幼龄林、中龄林和成熟林各6块)。在每块样地中用相邻网格法划分出6个10 m×10 m调查单元,对小调查单元内的样木(胸径≥2.0 cm)挂牌编号。坐标原点为样地西南角,测量单元内的每株林木的坐标(x, y),记录每株林木的树种名称,同时也测量其胸径、树高、活枝下高、南北冠幅与东西冠幅等基本调查因子。本研究结构方程模型建模的原始数据来源于2015—2019年连续5年对18块样地的复测所得,并以2016年的复测数据为案例(样地基本情况见表1),对3个不同龄组的林分结构多样性进行评价。

1.3 研究方法

1.3.1 林分空间结构单元确定

本研究利用4株邻近木构建林分空间结构单元,为不影响相关林分结构指标的计算,采用缓冲区法来消除边缘效应,即在样地四周设置3 m的带状缓冲区以消除边界影响。

1.3.2 林分结构多样性指数计算

本研究采用反映树种隔离程度和多样性的全混交度、反映林分树种多样性的Simpson多样性指数和反映林分组成结构多样性的Shannon-Wiener指数来表征林分树种组成多样性^[11];用反映林木大小多样性的大小变异系数^[11]、反映林木大小分化程度的大小分化度均值指数^[15]和反映林木个体所承受竞争压力大小的交角

竞争指数^[32]来表征林木大小分化多样性;用反映林木空间分布格局的角尺度^[20]、反映林层多样性的林层指数^[20]和反映林木拥挤程度的空间密度指数^[33]来表征林木空间分布多样性。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic conditions of sample plots

龄组 Age groups	样地号 Plot codes	树种组成 Species composition	坡向 Slope aspect	坡度 Slope/(°)	坡位 Slope position	胸径范围 DBH range/cm	平均树高 Mean height/m	平均冠幅 Mean crown/m EW×NS
幼龄林 Young forest	1	7 杉 2 柳+栎-马-褂-日	西南	5	中	2.8—13.9	4.1	1.8×1.8
	2	5 杉 5 柳-马-褂-栎	西北	24	下	3.2—15.1	4.8	1.9×1.8
	3	7 柳 3 杉+栎-褂	西北	5	上	2.3—11.1	3.7	1.6×1.6
	4	5 杉 5 柳-马-褂-泡	西	25	上	2.2—14.6	4.2	1.6×1.6
	5	8 杉 2 柳-褂	西	26	中	3.6—11.5	4.0	1.7×1.7
	6	7 杉 3 柳+黄-马	西	4	下	3.8—11.7	4.1	0.9×1.0
中龄林 Middle aged forest	7	9 杉+深-栎-马-褂	东北	27	中	3.7—23.5	8.1	2.4×2.4
	8	9 杉+柳-栎-桃	东北	28	中	4.1—24	8.4	2.6×2.5
	9	9 杉+柳+黄-栎	东北	20	中	3.2—25.6	7.9	2.6×2.5
	10	9 杉+柳+深-栎-褂	西北	10	下	3.5—27	8.0	2.8×2.7
	11	10 杉+柳-栎-深-槲-樟	北	23	中	4.1—25.5	7.7	2.6×2.5
	12	9 杉+柳+栎-褂-深	北	30	上	2.7—26.2	7.9	2.4×2.3
成熟林 Mature forest	13	10 杉+桦	南	30	中	5.8—24	8.8	3.8×3.0
	14	10 杉+栎-马-槲	西	29	上	4.3—22.5	9.1	3.3×3.2
	15	10 杉-栎-槲-红	南	21	中	3.1—27.8	8.5	2.7×2.5
	16	10 杉-红	南	31	上	2.6—28.6	11.1	3.1×3.0
	17	10 杉-桦	南	19	下	5.6—32.5	11.5	3.1×3.0
	18	10 杉-红	南	32	下	2.3—26.2	10.3	3.0×2.9

杉:杉木 *Cunninghamia lanceolata*; 柳:柳杉 *Cryptomeria fortunei*; 栎:栎树 *Koelreuteria paniculate*; 马:马尾松 *Pinus massoniana*; 褂:马褂木 *Liriodendron tulipifera*; 日:日本晚樱 *Cerasus serrulata*; 泡:泡桐 *Paulownia fortunei*; 黄:黄山松 *Pinus taiwanensis*; 桃:野山桃 *Amygdalus davidiana*; 深:深山含笑 *Micheliamaudiae*; 槲:苦槲 *Melia azedarach*; 樟:苦槠 *Castanopsissclerophylla*; 桦:光皮桦 *Betula luminifera*; 栎:白栎 *Quercus fabri*; 红:红豆杉 *Taxus chinensis*; DBH:胸径 Diameter at breast height; EW:东西 East-west; NS:南北 North-south

1.3.3 林分结构多样性指标权重确定

利用结构方程模型确定林分结构多样性指标权重,结构方程模型是整合路径分析与多元方差分析等方法的因果关系模型,由测量模型(公式 1 和 2)和结构模型(公式 3)组成,测量模型又由观测变量和潜在变量两个部分组成^[34—35]。其中,测量模型表征潜在变量与观测变量之间的关系,结构模型表征潜在变量之间的因果关系^[35—36]。

$$X = A_x \xi + \delta \tag{1}$$

$$Y = A_y \eta + \varepsilon \tag{2}$$

$$\eta = B \eta + \Gamma \xi + \zeta \tag{3}$$

式中, X 为外生测量变量组成的向量, Y 为内生测量变量组成的向量; ξ 、 η 分别为外生潜在变量和内生潜在变量。 A_x 为 X 在 ξ 上的因子载荷矩阵; A_y 为 Y 在 η 上的因子载荷矩阵; δ 和 ε 分别为 X 、 Y 的测量误差。 B 为内生潜在变量之间的相关系数矩阵; Γ 为外生潜在变量对内生潜在变量的作用; ζ 为结构模型的残差项。

确定指标权重包括以下 5 个步骤:模型构建、模型假设、信度和效度检验、模型适配度检验、模型修正。

(1) 模型构建

将林分树种组成多样性、林木大小分化多样性和林木空间分布多样性 3 个要素作为林分结构多样性评价指标体系的准则层(即潜在变量),将全混交度、大小变异系数和角尺度等 9 个指标因子作为指标层(即观测

变量),依据林分结构多样性与潜在变量,潜在变量与观测变量间的传导机制,建立林分结构多样性评价的理论模型(如图 1)。

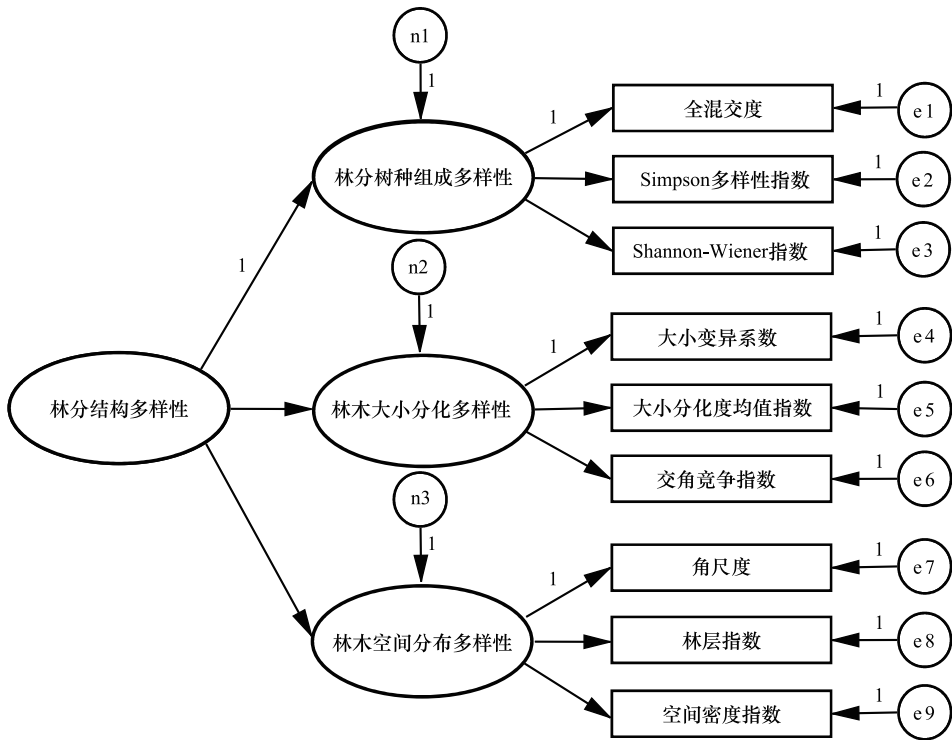


图 1 林分结构多样性评价理论模型

Fig.1 Theoretical model of stand structure diversity evaluation

n1: 林分树种组成多样性的标准化残差;n2: 林木大小分化多样性的标准化残差;n3: 林木空间分布多样性的标准化残差;e1: 全混交度的标准化残差;e2: Simpson 多样性指数的标准化残差;e3: Shannon-Wiener 指数的标准化残差;e4: 大小变异系数的标准化残差;e5: 大小分化度均值指数的标准化残差;e6: 交角竞争指数的标准化残差;e7: 角尺度的标准化残差;e8: 林层指数的标准化残差;e9: 空间密度指数的标准化残差;“1”: 在 AMOS 结构方程模型分析中,所有的内生潜在变量和观测变量均需增列一个误差变量,该误差变量的参数设定起始值定为 1;结构模型中需要有一个内生潜在变量的路径系数固定为 1,否则模型无法估计;测量模型中需要有一个观测变量的路径系数固定为 1,否则测量模型也无法估计

(2) 模型假设

在实证分析理论模型前,作出合乎理论与实际的假设,见表 2。

表 2 林分结构多样性评价结构方程模型假设

Table 2 Hypothesis of structural equation model of stand structure diversity evaluation

假设序号 Number	假设内容 Hypothetical contents
假设 1 Hypothesis 1	林分树种组成多样性对林分结构多样性有显著正向影响
假设 2 Hypothesis 2	林木大小分化多样性对林分结构多样性有显著正向影响
假设 3 Hypothesis 3	林木空间分布多样性对林分结构多样性有显著正向影响

(3) 信度和效度检验

本研究利用克朗巴哈系数(Cronbach's Alpha)做数据可靠性分析,此系数大于 0.8 则表示数据信度良好,数据信度可接受范围为 0.5—0.8 间;采用抽样适合性(KMO)检验对数据进行效度检验,且抽样适合性(KMO)检验值大于 0.7 适合进行因子分析。两者均在 SPSS 25.0 软件完成计算。

(4) 模型适配度检验

验证性因子分析是通过检验模型适配度来判断数据与模型的适配程度,以确定数据与假设的理论模型是否相符合。本研究选取卡方自由度比值(χ^2/df)、比较适配指数(CFI)、常规拟合指数(NFI)、增值适配指数(TLI)、近似误差均方根(RMSEA)和拟合优度指数(GFI)对模型进行适配度检验^[31,37]。一般而言, $1 < \chi^2/df < 3$ 表示模型适配度良好;CFI、NFI、TLI、GFI 大于 0.9,说明模型适配度良好^[38-39];RMSEA 值小于 0.05,说明模型适配度较为理想,RMSEA 取值介于 0.05—0.08 时,表示模型适配度合理。

(5) 模型修正

模型适配度检验通过后,若假设模型与实测数据不适配时,则需修正模型。修正模型,可通过增加或删减变量与修改路径,此外,还可依据 AMOS 输出的报表中所提供的修正指标(M.I.)指标的提示来修正^[38]。修正后的模型仍需重新做适配度检验,循环修正并检验,确保最终得到符合实际情况、与理论假设相贴切且具充分理论依据、强解释力和适配度较佳的模型。

1.4 林分结构多样性综合得分计算

在林分结构多样性 9 个指标中,全混交度、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 指数、大小变异系数、大小分化度均值指数、林层指数以取大为优,其中由于 Shannon-Wiener 指数取值为 $[0, \ln(S)]$ (S 为树种数,本研究中最大树种数为 6),故将其进行归一化处理(公式 4);空间密度指数和交角竞争指数以取小为优,故用 1 减去指标值,处理后的得分以取大为优;由于角尺度指标值越接近 0.5 越好,所以将其原始数据正向化处理,即先同时减去 0.5,再取绝对值,使所得数据的取值在 0—0.5 间,此时的角尺度以取小为优,其最优值为 0,紧接着再用 1 减去经过前面处理后所得的数据(公式 5),此时角尺度的得分以取大为优,最终将处理后的角尺度得分进行归一化处理(公式 4)。

$$A_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式中, A_i 为指标得分, x_i 为处理前的指标值, $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为数据组中的最大值和最小值。

$$W'_i = 1 - |W_i - 0.5| \quad (5)$$

式中, W'_i 为经过处理后的角尺度得分; W_i 为角尺度原始指标值。

林分结构多样性综合评分计算公式如下:

$$Z = \sum_{i=1}^n W_i A_i \quad (6)$$

式中, Z 为林分结构多样性综合得分; W_i 为各内生潜在变量的权重,且 $W_i \geq 0$, $\sum W_i = 1$; A_i 为各内生潜在变量的得分; n 为内生潜在变量个数。

将林分结构多样性综合评分以 0.2 为级距划分等级,评价等级划分标准如表 3 所示。

2 结果与分析

2.1 林分结构多样性评价结构方程模型

2.1.1 评价指标数据的信度和效度

评价指标数据的可靠性与因子分析结果(表 4)表明:3 个内生潜在变量林分树种组成多样性、林木大小分化多样性和林木空间分布多样性的克隆巴哈系数和抽样适合性(KMO)检验值均大于 0.7,说明数据皆通过信度和效度检验,信度和效度较好,适合构建林分结构多样性评价模型。

2.1.2 林分结构多样性评价结构方程模型适配度

模型的适配度检验结果显示卡方自由度比值 χ^2/df 的值为 1.409,介于 1—3;CFI 为 0.985,NFI 为 0.953,TLI 为 0.978,GFI 为 0.931,均大于 0.9;RMSEA 为 0.048,小于 0.05。软件 AMOS 27.0 运行结果表明,各拟合指标与适配参考值均相符合^[40-41],模型与观测数据的适配度较高,模型整体适配效果较好。模型的路径图见图 2。

由图 2 可知,潜在变量林分树种组成多样性、林木大小分化多样性和林木空间分布多样性 3 个要素的因子载荷(即标准化路径系数)分别为 0.89,0.81 和 0.83,满足潜在变量与林分结构多样性间存在正向因果关系的模型假设,即 3 个内生潜在变量皆是影响林分结构多样性的重要因素。观测变量全混交度、Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 指数在内生潜在变量林分树种组成多样性上的载荷分别为 0.87,0.89 和 0.96。观测变量大小变异系数、大小分化度均值指数和交角竞争指数在内生潜在变量林木大小分化多样性上的载荷分别为 0.82,0.86 和 0.93。观测变量角尺度、林层指数和空间密度指数在内生潜在变量林木空间分布多样性上的载荷分别为 0.84,0.88 和 0.74。3 个要素和 9 个观测变量的因子载荷均达到统计显著($P<0.05$)。

表 3 林分结构多样性评价等级划分标准

Table 3 Classification standard of stand structure diversity evaluation

林分结构多样性综合得分 Comprehensive score value for stand structure diversity	林分特征描述 The description of stand feature	评价等级 Evaluation grade
(0,0.2]	林分结构多样性低。林分树种组成多样性低,树种的混交程度低,物种多样性低;林木大小分化多样性低,林木大小分化不明显;林木空间分布多样性低,林层结构简单,林木空间分布格局不均,为聚集分布	I
(0.2,0.4]	林分结构多样性较低。林分树种组成多样性较低,树种的混交程度较低,物种多样性较低;林木大小分化多样性较低,林木大小分化微明显;林木空间分布多样性较低,林层结构较简单,林木空间分布格局不均,为聚集分布	II
(0.4,0.6]	林分结构多样性一般。林分树种组成多样性一般,树种的混交程度中等,物种多样性一般;林木大小分化多样性一般,林木大小分化中等明显;林木空间分布多样性中等,林层结构较多样,林木空间分布格局一般,为均匀分布	III
(0.6,0.8]	林分结构多样性较高。林分树种组成多样性较高,树种混交程度较高,物种多样性较高;林木大小分化多样性较高,林木大小分化较明显;林木空间分布多样性较高,林层结构较为复杂多样,林木空间分布格局接近随机分布	IV
(0.8,1.0)	林分结构多样性高。林分树种组成多样性高,树种混交程度高,物种多样性高;林木大小分化多样性高,林木大小分化明显;林木空间分布多样性高,林层结构复杂多样,林木空间分布格局为随机分布,乔木分布均匀,小树聚集分布;林下天然更新好,光环境好,林分稳定性好	V

表 4 评价指标数据信度和效度检验统计量

Table 4 Evaluation index data reliability and validity test statistics

潜在变量 Potential variables	观测变量数 Number of observed variables	克朗巴哈系数 Cronbach's alpha	抽样适合性(KMO)检验 Kaiser-Meyer-Olkin
林分树种组成多样性 Stand tree species composition diversity	3	0.891	0.731
林木大小分化多样性 Tree size differentiation diversity	3	0.831	0.729
林木空间分布多样性 Tree spatial distribution diversity	3	0.842	0.713

2.1.3 林分结构多样性评价指标权重确定结果

基于上文所得的结构方程模型路径系数,林分结构多样性各指标权重经过归一化处理路径系数后确定,所得结果如表 5 所示。由此可知,林分树种组成多样性权重最大,为 0.3518,表明林分树种组成多样性是评价林分结构多样性的关键要素。林木大小分化多样性和林木空间分布多样性两个要素的权重分别为 0.3201 和 0.3281。在林分树种组成多样性要素中,Shannon-Wiener 指数所占的权重最高(0.3529),是影响林分树种多样性的关键因素,其次为 Simpson 多样性指数(0.3272),全混交度所占的权重最低(0.3199);在林木大小分化多样性要素中,交角竞争指数所占的权重最高(0.3563),大小分化度均值指数和大小变异系数所占的权重相差

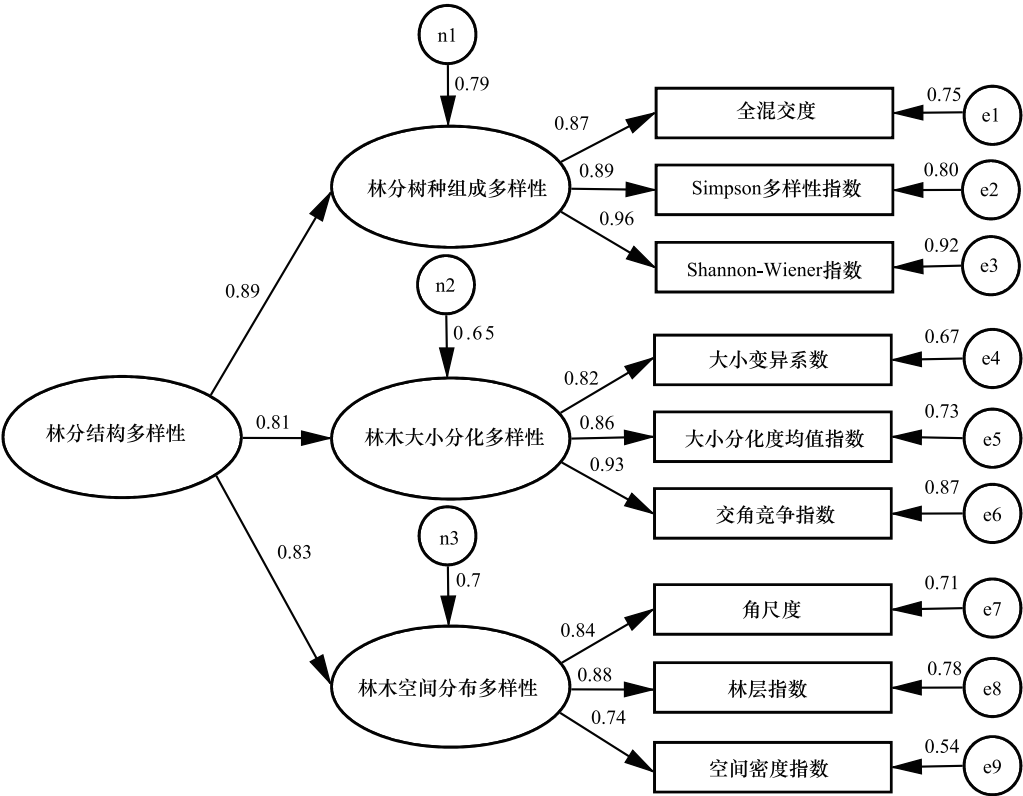


图 2 林分结构多样性结构方程模型路径图

Fig.2 Path map of structural equation model for stand structure diversity

不大,分别为 0.3295 和 0.3142,表明 3 个指标均对林木大小分化多样性产生重要影响;在林木空间分布多样性要素中,林层指数和角尺度的权重较大,分别为 0.3577 和 0.3415,空间密度指数所占的权重最低(0.3008)。

表 5 林分结构多样性指标权重计算结果

Table 5 Calculation results of stand diversity structure index weight

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	权重 Weight	指标层 Index layer	权重 Weight
林分结构多样性 Stand structure diversity	林分树种组成多样性	0.3518	全混交度	0.3199
			Simpson 多样性指数	0.3272
			Shannon-Wiener 指数	0.3529
	林木大小分化多样性	0.3201	大小变异系数	0.3142
			大小分化度均值指数	0.3295
			交角竞争指数	0.3563
	林木空间分布多样性	0.3281	角尺度	0.3415
			林层指数	0.3577
			空间密度指数	0.3008

2.2 不同龄组的林分结构多样性评价结果

由表 6 可知不同龄组杉木林 3 个内生潜在变量综合得分和等级,其中,幼龄林、中龄林和成熟林的综合得分分别为 0.4588、0.4396 和 0.3364,3 个龄组林分结构多样性等级处于 II、III 等级,幼龄林和中龄林间无显著差异($P>0.05$),但成熟林与幼龄林和中龄林均存在显著差异性($P<0.05$)。就林分结构多样性 3 个内生潜在变量而言,成熟林的林分树种组成多样性显著低于幼龄林和中龄林($P<0.05$);中龄林的林木大小分化多样性

显著高于幼龄林和成熟林($P<0.05$);而林木空间分布多样性在不同龄组间差异不显著($P>0.05$)。综合而言,研究区不同龄组杉木林树种多样性与混交程度较低,林木大小分化不严重与林木径级结构变异小,林分水平空间结构和垂直空间结构异质性较低,林分结构多样性较低,未达到理想的状态。

表 6 林分结构多样性内生潜在变量及综合得分

Table 6 Latent variable value and comprehensive score of stand structure diversity

龄组 Age groups	林分树种组 成多样性 Stand tree species composition diversity	林木大小分 化多样性 Tree size differentiation diversity	林木空间分 布多样性 Tree spatial distribution diversity	综合得分 Comprehensive score	等级 Grade
幼龄林 Young forest	0.4926±0.06a	0.4634±0.09a	0.4181±0.09a	0.4588±0.02a	III
中龄林 Middle aged forest	0.3891±0.06b	0.5054±0.06b	0.4294±0.07a	0.4396±0.01a	III
成熟林 Mature forest	0.1460±0.03c	0.4737±0.07a	0.4065±0.08a	0.3364±0.05b	II

同列不同小写字母表示不同龄组间差异显著($P<0.05$)

3 讨论

林分结构是森林生态系统的一个重要内容,其结构的变异性是影响林分结构多样性、林分稳定性与生物多样性等的重要因素^[42]。目前,尽管有学者在林分结构研究中取得了一些成果,但是对林分结构多样性进行评价的研究成果鲜见报道。目前,虽然已有学者在林分结构多样性评价方面取得了一些成果,但是运用何种高效、全面的评价方法来评价林分结构多样性以及评价结果的客观性与普适性尚需进一步探究,故采取新思路评价林分结构多样性,探求更精确的、适用性更强的评价方法仍是现阶段一项富有挑战性的工作和研究重点^[11,43]。

科学合理的评价方法是客观评价林分结构多样性的基础。本研究采用结构方程模型确定指标权重并以林分为研究尺度对研究区 3 个龄组进行林分结构多样性评价。结果显示,3 个龄组杉木林林分结构多样性评价的综合得分处于 0.3364—0.4588 间,其评价等级处于 II、III 两个等级,即属于较差和一般的状态。究其根源,研究区的样地皆为杉木纯林、树种多样性与物种丰富度低、水平空间结构与垂直空间结构异质性低、林分天然更新能力与稳定性较差,未能形成复杂多样的林分结构。林分结构多样性评价指标权重结果显示:林分树种组成多样性是影响林分结构多样性的关键要素,因此,为提高林分树种组成多样性,应对密度过高的林分进行抚育间伐,调节林分的透光程度和物种丰富度,给林下物种提供充足的光照,促进林下混交树种的生长,亦在空隙较大的林地中补植异于主要树种的乡土阔叶树种,使林分树种混交程度以及物种丰富度得以提高^[44];为提高树种多样性和物种多样性,可通过引进外来树种、改善土壤性质并提高其养分含量和提高林分混交度等来实现^[45—47],从而利于提高 Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 指数,同时,树种多样性和物种多样性越高,林分内纵横交错与深浅不一的根系亦有效提高了土壤养分的归还与循环能力,极大地改善了林下物种生长的土壤条件,为众多物种的生长发育以及天然更新积攒了优异的自然条件^[48]。此外,结果显示,林木大小分化多样性和林木空间分布多样性所占权重相差不大,两者均是影响林分结构多样性的重要要素。反映林木受挤压和遮盖情况的交角竞争指数是影响林木大小分化多样性的关键因素,上面的遮盖影响林下物种的光合作用以及林分内的光、热、水的合理分配,侧方挤压影响林木树冠生长,进而影响林分物种丰富度。为提高林木大小分化多样性,应合理降低竞争强度,促进林内物种生长,提高物种多样性^[32];还应应对林分进行单株择伐,后补植适合立地生长的乡土阔叶树种,对林内更新的混交树种的保护和抚育,因为物种越丰富与树种多样性越高的林分直径大小多样性越高^[13];再者,随着林分中林木的生长发育以及天然更新,林分中林木的径级结构和年龄结构也会随之变化而变异^[10,49],利于提高林木大小分化多样性。对于林木空间分布多样性,林层指数对其影响最大,因其显著影响着林分的更新幼苗和物种多样性指数^[50—51],林冠各层的密度大小对林下的物种丰富度有显著影响^[52],促使林分复杂多样的垂直空间结构的形成;所占权重居第二的角尺度,

显著影响着林分的水平空间结构多样性,增加林分中的随机体、采用随机化经营是提高人工林稳定性的关键^[53],也是合理调节林木水平分布格局、使林分角尺度居于合理范围和提高林分水平空间结构多样性的重要途径。

指标权重大小影响林分结构多样性评价结果。结构方程模型为确定林分结构多样性评价指标权重提供了新思路,其为现有的赋权方法存在忽视指标间的关联性与指标自身的重要性和对指标原始数据提取不充分等问题进行了完善^[54]。结构方程模型是一种整合了因素分析与路径分析等的多变量统计方法,其基于已有的林分结构先验知识,预先设定各变量间、各变量与系统整体的依赖关系,克服多重线性的影响,既可以通过模型适配度检验对模型进行整体评价,还可以根据可测量的观测变量来估计不可直接观测的潜在变量^[55],从而反映林分结构多样性潜在变量与观测变量间的复杂关系,以确定林分结构多样性评价指标的权重,进而客观且全面地评价林分结构多样性的现状。从研究结果来看,林分结构多样性评价结构方程模型的卡方自由度比值(χ^2/df)的值为 1.409,介于 1—3;比较拟合指数(CFI)为 0.985,正规化拟合指数(NFI)为 0.953,非正规化拟合指数(TLI)为 0.978,拟合优度指数(GFI)为 0.931,均大于 0.9;近似误差均方根(RMSEA)为 0.048,小于 0.05,综合而言,各指数的拟合效果良好,模型的适配度较好,满足林分结构多样性评价的需要,为林分结构多样性评价提供了一种科学的新方法。

林分树种组成多样性、林木大小分化多样性和林木空间分布多样性对林分结构多样性与复杂性具有决定性影响,其评价是林分结构多样性现状的量化,能够确切反映林分结构的多样性与复杂性。实施间伐补植的经营措施后,混交树种的增加,提高了林分树种组成多样性;林木径级增加、大小差异变大,提高了林木大小分化多样性;林木的水平与垂直分布格局发生改变,一定程度上提高了林木空间分布多样性,杉木林林分结构多样性明显提高。此外,相比传统的统计方法,结构方程模型在解决生态系统耦合关系问题上具有强大能力和发挥着重要作用^[56],其可通过直接作用和间接作用描述系统复杂的相互关系,有效避免了一对一的直接关系研究,为科学全面地评价林分结构多样性提供了独特的新视角与新能力^[57]。研究表明,结构方程模型能从整体上直观地反映各评价指标间的关系强度与其对林分结构多样性的影响强度。近年来,生态学和林业领域中有不少学者利用结构方程模型对生态安全、林分空间结构与森林健康评价以及草地和湿地生态系统等方面^[33,58—60]进行了研究并且结果客观准确。但由于结构方程模型对样本量有严格要求,需要大量数据来构建模型,因此要对林分结构多样性变化情况进行长期监测,以累积大量的监测数据作为评价林分结构多样性的基础。

4 结论

研究区不同龄组杉木林树种多样性与混交程度较低,林木大小分化不严重与林木径级结构变异小,林分水平空间结构和垂直空间结构异质性较低,林分结构多样性较低,未达到理想的状态。结构方程模型进一步表明林分树种组成多样性是影响林分结构多样性的关键要素,权重几乎相等的林木大小分化多样性和林木空间分布多样性也是影响林分结构多样性的重要要素。因此,为改善研究区杉木林林分结构多样性的现状,应从林分树种组成多样性、林木大小分化多样性和林木空间分布多样性 3 个方面着手,采取相对应的经营措施,提高林分结构多样性与复杂性,促进林分稳定健康地发展、林分多种功能的充分发挥和森林的可持续经营与管理。研究区 3 个龄组的评价结果较客观地反映了林分结构多样性的现状,这说明利用结构方程模型来评价林分结构多样性是科学、可行的,可为林分结构多样性评价提供一个全新的思路。

参考文献(References):

- [1] 李婷婷, 陆元昌, 庞丽峰, 张显强, 王霞, 刘宪钊, 姜俊. 杉木人工林近自然经营的初步效果. 林业科学, 2014, 50(5): 90-100.
- [2] 舒韦维, 卢立华, 李华, 农友, 何日明, 陈海, 黄彪. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响. 生态学报, 2021, 41(11): 4521-4530.
- [3] O'Hara K L, Latham P A, Hessburg P, Smith B G. Technical commentary: a structural classification for inland northwest forest vegetation. Western

- Journal of Applied Forestry, 1996, 11(3): 97-102.
- [4] Buongiorno J, Dahir S, Lu H C, Lin C R. Tree size diversity and economic returns in uneven-aged forest stands. Forest Science, 1994, 40(1): 83-103.
- [5] Zhang Y, Chen H Y H, Reich P B. Forest productivity increases with evenness, species richness and trait variation: a global meta-analysis. Journal of Ecology, 2012, 100(3): 742-749.
- [6] Ali A. Forest stand structure and functioning: current knowledge and future challenges. Ecological Indicators, 2019, 98: 665-677.
- [7] Franklin J F, Spies T A, Van Pelt R, Carey A B, Thornburgh D A, Berg D R, Lindenmayer D B, Harmon M E, Keeton W S, Shaw D C, Bible K, Chen J Q. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. Forest Ecology and Management, 2002, 155(1/2/3): 399-423.
- [8] 张岗岗, 王洋, 刘艳萍, 范定臣. 黄河故道刺槐人工林结构多样性特征. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(12): 50-59.
- [9] 郑景明, 罗菊春. 长白山阔叶红松林结构多样性的初步研究. 生物多样性, 2003, 11(4): 295-302.
- [10] 雷相东, 唐守正. 林分结构多样性指标研究综述. 林业科学, 2002, 38(3): 140-146.
- [11] 赵中华, 惠刚盈. 林分结构多样性研究进展. 林业科学, 2020, 56(9): 143-152.
- [12] 陈亚南, 杨华, 马士友, 任玫玫. 长白山 2 种针阔混交林空间结构多样性研究. 北京林业大学学报, 2015, 37(12): 48-58.
- [13] 白宇, 杨华, 温静, 王全军. 基于邻近木的林分结构多样性研究. 北京林业大学学报, 2020, 42(6): 52-58.
- [14] 常荣涛. 栎类和阔叶混交林林分结构多样性的动态研究. 河南林业科技, 2014, 34(2): 8-12, 22.
- [15] 白超, 惠刚盈. 林木直径大小多样性量化测度指数的比较研究. 林业科学研究, 2016, 29(3): 340-347.
- [16] 李超, 闫妍宇, 胥辉, 徐婷婷, 张博, 魏安超, 孙雪莲, 熊河先, 石晓琳, 欧光龙. 思茅松天然林分直径大小多样性及环境解释. 东北林业大学学报, 2016, 44(11): 24-30.
- [17] Pommerening A. Approaches to quantifying forest structures. Forestry: an International Journal of Forest Research, 2002, 75(3): 305-324.
- [18] Staudhammer C L, LeMay V M. Introduction and evaluation of possible indices of stand structural diversity. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31(7): 1105-1115.
- [19] Zhao Z H, Hui G Y, Liu W Z, Hu Y B, Zhang G Q. A novel method for calculating stand structural diversity based on the relationship of adjacent trees. Forests, 2022, 13(2): 343.
- [20] 曹小玉, 李际平, 封尧, 胡园杰, 张彩彩, 房晓娜, 邓超. 杉木生态公益林林分空间结构分析及评价. 林业科学, 2015, 51(7): 37-48.
- [21] 黄维, 薛卫鹏, 陈周娟, 苏少峰, 陈佳卉, 李卫忠. 油松飞播林林分空间结构特征分析与评价. 森林与环境学报, 2022, 42(4): 425-433.
- [22] 张君钰, 杨培华, 李卫忠, 李显鲜, 郝红科. 油松林林分空间结构分析及评价指数构建. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 166-172.
- [23] 刘玉平, 杨志高, 李丹, 李建军, 吴鑫, 阙华斐, 杨卫民. 基于加权三角网的林分空间结构综合指数模型. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(9): 79-87.
- [24] 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及评价. 林业科学研究, 2018, 31(4): 75-82.
- [25] 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. 北京林业大学学报, 2016, 38(1): 1-10.
- [26] 魏红洋, 张一帆, 董灵波, 刘兆刚, 陈莹. 帽儿山主要林分类型空间结构状态综合评价. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(10): 131-139.
- [27] Zhang G G, Hui G Y, Zhang G Q, Hu Y B, Zhao Z H. A Novel Comprehensive Evaluation Method of Forest State Based on Unit Circle. Forests, 2018, 10(1): 5.
- [28] Laughlin D C, Abella S R, Covington W W, Grace J B. Species richness and soil properties in *Pinus ponderosa* forests: a structural equation modeling analysis. Journal of Vegetation Science, 2007, 18(2): 231-242.
- [29] Murray Alan T, Stephanie S. Spatial modeling in forest management and natural resource planning. Forest Science, 2000, 46(2): 153-156.
- [30] Jonsson M, Wardle D A. Structural equation modelling reveals plant-community drivers of carbon storage in boreal forest ecosystems. Biology Letters, 2010, 6(1): 116-119.
- [31] 温忠麟, 侯杰泰, 马什赫伯特. 结构方程模型检验: 拟合指数与卡方准则. 心理学报, 2004, 36(2): 186-194.
- [32] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华, 袁士云, 刘文桢. 基于交角的林木竞争指数. 林业科学, 2013, 49(6): 68-73.
- [33] 赵文菲, 曹小玉, 谢政钊, 庞一凡, 孙亚萍, 李际平, 莫永俊, 袁达. 基于结构方程模型的杉木公益林林分空间结构评价. 林业科学, 2022, 58(8): 76-88.
- [34] Carpenter P J, Scanlan T K, Simons J P, Lobel M. A test of the sport commitment model using structural equation modeling. Journal of Sport and Exercise Psychology, 1993, 15(2): 119-133.
- [35] Feist G J, Barron F X. Predicting creativity from early to late adulthood: intellect, potential, and personality. Journal of Research in Personality, 2003, 37(2): 62-88.
- [36] 吴兵福. 结构方程模型初步研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.

- [37] Steiger J H. Structural model evaluation and modification; an interval estimation approach. *Multivariate Behavioral Research*, 1990, 25(2): 173-180.
- [38] 王长义, 王大鹏, 赵晓雯, 方庆伟, 刘艳. 结构方程模型中拟合指数的运用与比较. *现代预防医学*, 2010, 37(1): 7-9.
- [39] 魏曦, 梁文俊, 毕华兴, 侯贵荣. 晋西黄土区油松林分结构与水土保持功能的多因子复合关系. *林业科学研究*, 2020, 33(3): 39-47.
- [40] 曹小玉, 委霞, 赵文菲, 李际平. 基于结构方程模型的森林健康评价. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2635-2647.
- [41] 曹小玉, 赵文菲, 李际平, 闫文德, 庞一凡, 孙亚萍, 谢政钊. 中亚热带几种典型森林土壤养分含量分析及综合评价. *生态学报*, 2022, 42(9): 3525-3535.
- [42] Uuttera J, Maltamo M. Impact of regeneration method on stand structure prior to first thinning. Comparative study North Karelia, Finland vs. Republic of Karelia, Russian Federation. *Silva Fennica*, 1995, 29(4): 267-285.
- [43] Li J J, Zhu K W, Liu S, Li D, Zhang G, Liu X, Yang W M. Introducing tree neighbouring relationship factors in forest pattern spatial analysis: weighted Delaunay triangulation method. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32(5): 1941-1951.
- [44] 张亚昊, 佃袁勇, 黄光体, 刘晓阳, 韩泽民, 菅永峰, 李源, 王熊. 不同演替阶段马尾松林分空间结构对物种多样性的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2357-2365.
- [45] 刘少冲, 陈立新, 段文标, 张超, 李少博, 李亦菲, 李少然, 梁薇薇. 影响不同林型天然红松混交林林隙更新的土壤特征因子. *生态学报*, 2017, 37(12): 4072-4083.
- [46] 朱光玉, 徐奇刚, 吕勇. 湖南栎类天然次生林林分空间结构对灌木物种多样性的影响. *生态学报*, 2018, 38(15): 5404-5412.
- [47] 方发之, 黎肇毅, 桂慧颖. 黎母山引进外来树种对森林群落物种多样性的影响. *西北林学院学报*, 2022, 37(5): 36-45.
- [48] Wan X H, Huang Z Q, He Z M, Yu Z P, Wang M H, Davis M R, Yang Y S. Soil C: N ratio is the major determinant of soil microbial community structure in subtropical coniferous and broadleaf forest plantations. *Plant and Soil*, 2015, 387(1): 103-116.
- [49] Lei X D, Wang W F, Peng C H. Relationships between stand growth and structural diversity in spruce-dominated forests in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39(10): 1835-1847.
- [50] 符婵娟, 刘艳红, 赵本元. 神农架巴山冷杉群落更新特点及影响因素. *生态学报*, 2009, 29(8): 4179-4186.
- [51] 黄萍, 刘艳红. 北京松山油松林分结构和地形对幼苗更新的影响. *生态学杂志*, 2018, 37(4): 1003-1009.
- [52] 楼一恺, 范忆, 戴其林, 王铮屹, 库伟鹏, 赵明水, 余树全. 天目山常绿落叶阔叶林群落垂直结构与群落整体物种多样性的关系. *生态学报*, 2021, 41(21): 8568-8577.
- [53] 惠刚盈, 赵中华, 张弓乔, 胡艳波. 基于角尺度的随机体在森林稳定性维持中的作用. *林业科学*, 2021, 57(2): 22-30.
- [54] 江荣生, 曾启鸿, 杨晓晶, 袁书琪. 古树名木旅游资源评价体系研究. *林业经济问题*, 2008, 28(6): 497-500.
- [55] Dănescu A, Albrecht A T, Bauhus J. Structural diversity promotes productivity of mixed, uneven-aged forests in southwestern Germany. *Oecologia*, 2016, 182(2): 319-333.
- [56] 舒树森, 赵洋毅, 段旭, 胡慧蓉, 熊好琴. 基于结构方程模型的云南松次生林林木多样性影响因子. *东北林业大学学报*, 2015, 43(10): 63-67.
- [57] 曹小玉, 李际平, 赵文菲, 委霞, 庞一凡. 基于结构方程模型分析林分空间结构对草本物种多样性的影响. *生态学报*, 2020, 40(24): 9164-9173.
- [58] 白江迪, 刘俊昌, 陈文汇. 基于结构方程模型分析森林生态安全的影响因素. *生态学报*, 2019, 39(8): 2842-2850.
- [59] Grace J B, Allain L, Allen C. Factors associated with plant species richness in a coastal tall-grass prairie. *Journal of Vegetation Science*, 2000, 11(3): 443-452.
- [60] Cherry J A, McKee K L, Grace J B. Elevated CO₂ enhances biological contributions to elevation change in coastal wetlands by offsetting stressors associated with sea-level rise. *Journal of Ecology*, 2009, 97(1): 67-77.