北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

邻近木多样性与竞争对天然云冷杉林树木生长的影响

杜宇 杨华 贺丹妮 陈庆国 张晓红

Effects of neighboring tree diversity and competition on tree growth in natural spruce-fir forests

Du Yu, Yang Hua, He Danni, Chen Qingguo, Zhang Xiaohong

引用本文:
杜宇, 杨华, 贺丹妮, 陈庆国, 张晓红. 邻近木多样性与竞争对天然云冷杉林树木生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(8):111-121. doi: 10.12171/j.1000-1522.20230236
Du Yu, Yang Hua, He Danni, Chen Qingguo, Zhang Xiaohong. Effects of neighboring tree diversity and competition on tree growth in natural spruce-fir forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8):111-121. doi: 10.12171/j.1000-1522.20230236

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230236

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于邻近木的林分结构多样性研究

Study on forest structure diversity based on the neighbourhood trees

北京林业大学学报, 2020, 42(6): 52-58. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20190120

择伐后落叶松云冷杉林直径结构及生长的动态变化

Dynamic change of larch-spruce-fir mixed stand growth and structure after selective thinning

北京林业大学学报, 2018, 40(5): 55-62. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20170358

地形和竞争对典型阔叶红松林不同生长阶段树木胸径生长的影响

Influences of topography and competition on DBH growth in different growth stages in a typical mixed broadleaved-Korean pine forest, northeastern China

北京林业大学学报, 2017, 39(1): 9-19. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20160218

甘肃大野口青海云杉距离加权大小比竞争指数研究

Distance-weighted size ratio competition index in the forest of Picea crassifolia in Dayekou, Gansu Province of northwestern China

北京林业大学学报, 2017, 39(2): 40-48. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20160210

不同龄组长白落叶松种内及种间竞争研究

Intraspecific and interspecific competition of *Larix olgensis* plantations in different age groups

北京林业大学学报, 2018, 40(9): 33-44. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20180126

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

Effects of species diversity and structural diversity on productivity in different succession stages of typical natural forest in Changbai Mountains of northeastern China

北京林业大学学报, 2021, 43(12): 1-8. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210071

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230236

邻近木多样性与竞争对天然云冷杉林树木生长的影响

杜 宇[1] 杨 华[1] 贺丹妮[1] 陈庆国[2] 张晓红[3]
（1. 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083；2. 吉林省延边汪清国有林管理分局，吉林 汪清 133299；
3. 国家林业和草原局国际合作交流中心，北京 100714）

摘要:【目的】探究天然云冷杉林邻近木多样性、竞争强度对林木生长的影响，为云冷杉林结构化经营和管理提供科学依据。**【方法】**选取长白山天然云冷杉林 2015、2018 年两期固定样地调查数据，基于结构方程模型分析邻近木多样性、竞争与树木生长的关系。**【结果】**(1)研究区内天然云冷杉林的邻近木树种、径阶、树高多样性指数均集中在 1.04 处，3 个多样性指数整体上分布均匀，树种混交度高，林分结构复杂。(2)结构方程模型中，树种、径阶、树高 3 个邻近木多样性指数和竞争指数对材积生长量的总影响系数分别为−0.001、0.166、0.073 和−0.489，结果表明竞争是影响林木生长的关键因素。(3)径阶和树高多样性的增加对生长量均为正面影响，其中径阶多样性为直接影响，树高多样性为间接影响；树种多样性表现为直接的负面影响与间接的正面影响，总体为负面影响；此外，树种多样性的提高可以减少林木间的竞争强度，树高多样性的提高可能会导致林分结构的分化，进而促进林分中林木个体的生长。(4)研究区内林木的生长压力可能多来自于同径级林木，小径级林木生长状况较差且竞争压力较大，大中径级林木与之相反。**【结论】**择伐同径级或相近径级林木，同时提高林分内的径阶、树高多样性水平，可以降低林木竞争水平，促进林木个体生长，进而提高云冷杉林林分生产力。

关键词：森林管理；采伐；结构方程模型；邻近木多样性指数；竞争；林木生长
中图分类号：S791.14 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)08−0111−11
引文格式：杜宇，杨华，贺丹妮，等. 邻近木多样性与竞争对天然云冷杉林树木生长的影响［J］. 北京林业大学学报，2024，46(8)：111−121. Du Yu, Yang Hua, He Danni, et al. Effects of neighboring tree diversity and competition on tree growth in natural spruce-fir forests［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8): 111−121.

Effects of neighboring tree diversity and competition on tree growth in natural spruce-fir forests

Du Yu[1] Yang Hua[1] He Danni[1] Chen Qingguo[2] Zhang Xiaohong[3]
(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Wangqing Branch Bureau for National Forest Management, Yanbian 133299, Jilin, China;
3. International Cooperation Center of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China)

Abstract:［**Objective**］This study aimed to investigate the effects of neighboring tree diversity and forest competition intensity on the tree growth in natural spruce-fir forests, providing a scientific basis for the structure management of spruce-fir forests.［**Method**］Data from two fixed-sample surveys of a natural spruce-fir forest in Changbai Mountain of northeastern China in 2015 and 2018 were used to analyze the relationship between neighboring tree diversity, competition, and tree growth by a structural equation model.［**Result**］(1) The neighboring tree diversity indexes for species, diameter classes, and tree height of the natural spruce-fir forests in the study area were all around 1.04. It indicated an overall even distribution of these three indexes, high degree of species mixture, and complex stand structure. (2) The total impact coefficients for species, diameter-classe, tree-height neighboring tree diversity indexes and the competition index on volume increment in the model were −0.001, 0.166, 0.073 and −0.489, respectively. It indicated

收稿日期: 2023−09−18 **修回日期:** 2024−05−29
基金项目: 北京市科技计划项目(Z221100005222035)。
第一作者: 杜宇。主要研究方向：森林资源监测与评价。Email: 18660885836@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 杨华，博士，教授。主要研究方向：森林资源监测与评价。Email: huayang@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

that competition was the key factor affecting tree growth. (3) The increases in diameter-class and tree-height diversities both had positive effects on tree growth, with a direct effect of diameter-class diversity, and an indirect effect of tree-height diversity. The species diversity had a directly negative effect and an indirectly positive effect, exhibiting an overall negative effect. The increase of species diversity reduced competition intensity of trees in a stand, while the increase of tree-height diversity might lead to a differentiation of stand structure, which further promoted the growth of individual trees in a stand. (4) Growth pressure of trees in the research area may mainly come from trees of the same diameter-class. Small-diameter trees had poorer growth conditions and greater competition pressure, while large-diameter and medium-diameter trees were opposite. [**Conclusion**] Selective cutting of the trees within the same or similar diameter-classes, and improving the level of diameter-classe and tree-height diversity within a stand, can reduce the competition level, promote individual tree growth, and enhance the productivity of spruce-fir stands.

Key words: forestry management; logging; structural equation model; neighboring tree diversity index; competition; tree growth

天然林林分结构复杂，物种丰富，林分内树木的生长受到许多因素的影响，如光照、水分等，而个体间为争夺有限的资源所引起的竞争是影响树木生长的重要因素，研究表明林分内的单木生长会受到邻体竞争的影响，竞争强度与林木生长一般为负相关关系[1]。竞争指数是现有研究中衡量邻域间竞争强度大小的指标，主要分为与距离有关和与距离无关两类[2]。由于天然林林分结构相对复杂，与距离有关的竞争指数更能反映林木间的竞争关系[3]，由 Hegyi[4] 提出的简单竞争指数最常见，应用最广泛。

多样性对生态系统特性和功能的影响是生态学的一个重要研究课题，许多研究结果表明多样性与生产力密切相关。范秀华等[5]对天然林群落的物种和结构多样性与生产力之间的关系进行研究发现，物种多样化组合和结构优化有助于提升群落生产力。朱杰等[6]研究表明物种多样性和结构多样性分别与生物量呈负相关和正相关关系，而与生产力则分别呈正相关和负相关关系。一些研究认为林分多样性的变化可能会导致林木个体的生态位和竞争水平产生差异[7]，从而影响森林生产力。从不同尺度研究多样性与生产力关系是诸多学者一直以来关注的热点问题。在林分水平上，常选用香农（Shannon）多样性指数和辛普森（Simpson）指数来评价物种多样性，基尼（Gini）系数和胸径变异系数常被用于林分结构多样性的评价，但这些指数可以反映林分多样性指数的平均状态，不能反映林分内部的变化。

林分结构多样性可由物种多样性和大小多样性来表征，很大程度上由相邻木的空间关系所决定[8]。结构化经营是在对象木与其相邻木构建的空间结构单元内，通过比较对象木与邻近木之间的树种、大小分布等差异，并结合邻近木空间位置，计算树种与结构多样性[9]。用邻近木多样性指数表达空间结构单元多样性，揭示林分内部物种与结构的变化[10]，具有明显的生物学意义，并对林分精准经营、定量分析有重要意义。空间结构单元大小由邻近木的数量和位置决定，多样性指数的准确性一般会随空间结构单元大小的增大而变化，计算难度与分类复杂程度也随之增加[11]，且过大的空间结构单元会导致邻近木的数量增多，进而使得部分无关的林木参与多样性与竞争指数计算。在前人[11−12]的研究中空间结构单元常选 4～5 株邻近木，得到的结果较为可靠。

结构方程模型（structural equation model，SEM）是基于研究者的先验知识，预先设定系统内因子间的依赖关系，能模拟多个因子间复杂关系的复合统计分析模型[13]。SEM 对数据输入和参数化要求低，生成的路径图可以判别因子间相互关系的强度，并能对整体模型进行拟合和判断，反映自变量与因变量之间的直接和间接关系[14]。在多因子关系的研究方面，结构方程模型目前已得到广泛应用。舒树淼等[15]使用结构方程模型探究了云南松（*Pinus yunnanensis*）次生林林木大小多样性与立地条件、林分结构的关系，结果发现立地条件对林木大小多样性的影响除直接作用外还存在间接作用。

以往的研究主要集中在竞争或多样性单因素对树木生长的影响，同时考虑以上两类因素及其交互作用的研究较少。本文在空间结构单元尺度上，探究邻近木间竞争和多样性，以及两者的交互作用对材积生长量的影响，以期为天然云冷杉林择伐等经营生产活动提供理论依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省汪清县金沟岭林场（43°22′N，130°10′E），林场经营面积为 16 286 hm^2。林区地貌

属低山丘陵，海拔 550 ~ 1 200 m，属季风性气候，全年平均气温为 3.9 ℃，年降水量 600 ~ 700 mm，森林覆盖率达 98%，以天然云冷杉林为主。研究区植被属于长白山区系，乔木树种以鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)和红松(*Pinus koraiensis*)为主，其他树种有白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、色木槭(*Acer pictum*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、枫桦(*Betula costata*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、花楷槭(*Acer ukurunduense*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)等；主要灌木包括胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等；主要草本植物为薹草(*Carex tristachya*)和山芹菜(*Spuriopimpinella brachycarpa*)等。

1.2　数据来源

研究采用吉林汪清林业局金沟岭林场云冷杉林固定样地 2015 与 2018 年固定样地调查数据。样地位于 45 林班 14 小班，海拔 662 m，坡度 8º，坡向为东北坡，坡位中上，郁闭度 0.84，样地大小为 100 m × 100 m。记录胸径 ⩾ 5 cm 树木的树种名称、树高、胸径和冠幅，并以样地西南角为原点，东西方向为 x 轴，南北方向为 y 轴，采用相对坐标(x, y)的方式记录样地内乔木坐标。

调查结果(2018 年)如表 1 所示，样地内共有乔木树种 15 种，树种组成为 4 冷 2 云 1 红 1 青 1 枫 1 椴+白−色−花。林分平均胸径为 14.8 cm，平均树高为 11.2 m，株数密度为 1 290 株/hm^2。林分的优势树种臭冷杉、云杉(鱼鳞云杉、红皮云杉)和红松，共 703 株，占总株数的 54.5%。它们的平均胸径分别为 16.5、19.9 和 20.9 cm，平均树高分别为 11.5、12.1 和 12.0 m。

林分内林木株数总体上随径阶增大而减少，呈反“J”型曲线，符合异龄林直径分布规律；8 cm 径阶株数最多，而后随径阶增大株数开始减少，至 34 cm 径阶后趋于平缓；中小径阶占比较高，大径阶林木较少(图 1)。

1.3　研究方法

1.3.1　空间结构单元的确定

空间结构单元是对象木及其几个最邻近木共同组成的一个整体。空间结构单元内，树种、林木大小、间距等组成差异，可以反映林木竞争与多样性特征。白宇等[12]研究结果表明邻近木空间单元为 4 株(1 株对象木加 3 株邻近木)可以取得较高的物种多样性；Man 等[10]在安大略省东北部混交林的研究中也选择了 4 株树为邻近木空间结构单元，取得了较好的研究成果。本研究也将邻近木空间结构单元大小确定为 4 株树(图 2)。

表 1　林分树木生长状况

Tab. 1　Tree growth status in the stand

树种 Tree species	密度/(株·hm^{-2}) Density/(tree·ha^{-1})	平均胸径 Average DBH/cm	平均高 Average height/m	平均材积/(m^3·hm^{-2}) Average volume/(m^3·ha^{-1})	平均材积生长量/(m^3·hm^{-2}) Average volume increment/(m^3·ha^{-1})
臭冷杉 *Abies nephrolepis*	458	16.5	11.5	0.19	0.011
鱼鳞云杉 *Picea jezoensis* 红皮云杉 *Picea koraiensis*	150	19.9	12.1	0.29	0.015
红松 *Pinus koraiensis*	95	20.9	12.0	0.33	0.013
紫椴 *Tilia amurensis*	113	11.7	9.8	0.09	0.005
青楷槭 *Acer tegmentosum*	108	9.9	9.9	0.11	0.008
枫桦 *Betula costata*	155	10.8	11.3	0.07	0.006
白桦 *Betula platyphylla*	56	17.3	13.2	0.18	0.018
花楷槭 *Acer ukurunduense*	33	7.9	8.8	0.05	0.004
色木槭 *Acer pictum*	25	12.6	11.1	0.09	0.005
黄檗 *Phellodendron amurense*	4	15.2	11.8	0.11	0.011
青杨 *Populus cathayana*	3	15.6	12.5	0.14	0.042
水曲柳 *Fraxinus mandshurica*	2	7.0	7.1	0.02	0.001
蒙古栎 *Quercus mongolica*	1	10.2	8.8	0.04	0.006
春榆 *Ulmus japonica*	1	5.5	7.8	0.01	0.002
其他 Others	86	9.8	10.1	0.06	0.004
合计或均值 Total or average	1 290	14.8	11.2	0.17	0.010

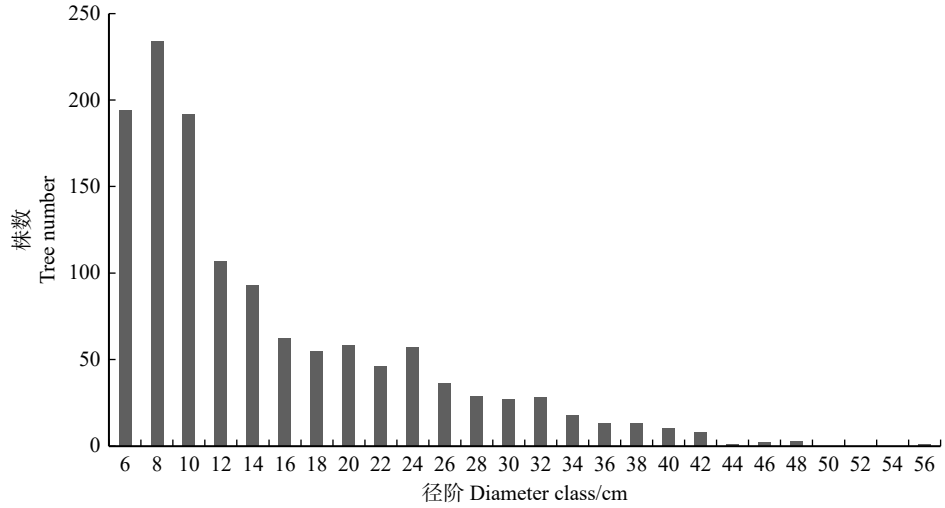
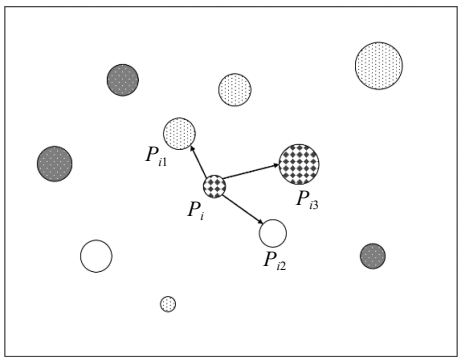


图 1 云冷杉林分直径分布

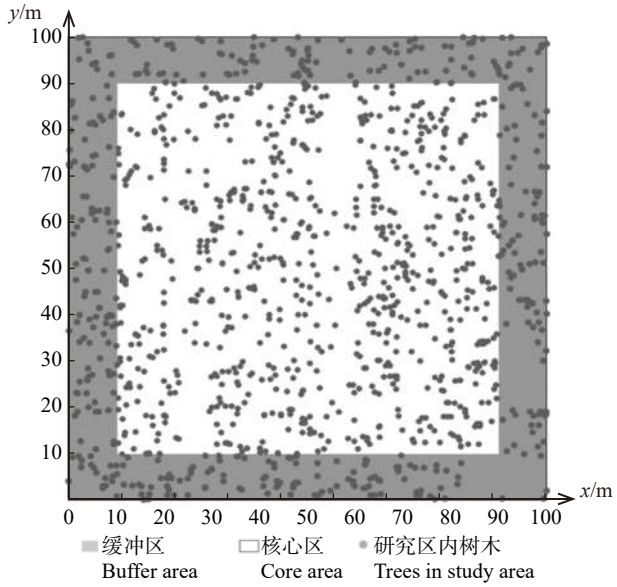
Fig. 1 Diameter distribution of spruce-fir stands



P_i为对象木，i 为对象木序号，P_{i1}、P_{i2}、P_{i3}为P_i的最邻近木。圆圈大小表示胸径，圆圈类型表示树种。P_i is the subject tree, i is an order number of subject tree, P_{i1}, P_{i2} and P_{i3} are the nearest neighbours. The size of circle is proportional to the size of trees, and circle type indicates tree species.

图 2 邻近木空间结构单元

Fig. 2 Spatial structural unit of neighboring trees



坐标以样地的西南角为原点，东西方向为 x 轴，南北方向为 y 轴。Taking the southwest corner of plot as origin, east-west direction as x-axis, and north-south direction as y-axis.

图 3 树木位置图

Fig. 3 Tree location map

1.3.2 边缘效应的消除

由于样地边缘可能会出现假邻近木或对象木，对研究结果产生一定影响，因此需消除边缘效应。经计算样地内所有空间结构单元的对象木与最邻近木的最大距离为 9.85 m，因此设置距样地边界 10 m 的缓冲区（图 3），缓冲区内所有林木不作为对象木。样地内核心区对象木共 646 株（不包括复测枯损的树木）。

1.3.3 多样性指数的计算

确定空间结构单元后，根据对象木与最邻近木的树种、径阶和树高的不同，计算树种多样性指数（H_s）、径阶多样性指数（H_d）和树高多样性指数（H_h）。以 H_s 为例，根据各树种混交强度的不同，代入公式（1）计算。

$$H_s = -\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{r} P_{ij}\ln P_{ij} \qquad (1)$$

式中：P_{ij}是第 i 个对象木及其 k 个最邻近木组成的空间结构单元内第 j 个树种所占的比例，r 是最邻近木树种的总数（$r \leqslant k+1$），n 为对象木株数。

本研究所选取空间结构单元大小为 4 株树，对象木与 3 株最邻近木树种相同则取值为 0，依次类推到 4 株树木的树种均不相同，所对应的树种多样性指数计算结果不断增大，分别为 0、0.56、0.69、1.04 和 1.39。

同理，分别按 2 cm 径阶距和 2 m 树高距对样地内树木的径阶、树高进行整化，则公式中的P_{ij}即为第 i 个对象木及其 k 个最邻近木组成的空间结构单元内第 j 个径阶或树高所占的比例，依次可以推导出径阶多样性指数（H_d）与树高多样性指数（H_h）。

1.3.4　竞争指数的计算

单木竞争指数是衡量林分内单木竞争情况的指数，一般利用胸径、树高、冠幅大小以及对象木与相邻木的距离来量化单木的竞争环境和对生长的影响[16]。将空间结构单元内的邻近木作为竞争木，选用简单竞争指数（competition index，CI）、树冠投影面积竞争指数（distance weighted crown cross-section index，BDC）[17]和树冠竞争指数（crown competition index，CCI）[18]来衡量林木所受竞争压力的大小，计算公式如表 2 所示。

表 2　单木竞争指数

Tab. 2　Individual tree competition index

指数 Index	公式 Formula	说明 Remark
Hegyi竞争指数[4] Hegyi competition index (CI)	$CI_i = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{D_j}{D_i}\cdot\frac{1}{D_{ij}}\right)$	D_i为对象木i胸径，D_j为邻近木j的胸径，D_{ij}为对象木与邻近木之间的距离，n为邻近木数量，$n=3$ D_i is DBH of subject tree i, D_j is DBH of neighbouring tree j, and D_{ij} is distance between subject tree and neighbouring tree, n is number of neighbouring tree, $n=3$
树冠投影面积竞争指数[17] Crown cross-sectional competition index (BDC)	$BDC_i = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{C_j}{C_i}\cdot\frac{1}{D_{ij}}\right)$	C_i是对象木的树冠投影面积，C_j为邻近木树冠投影面积 C_i is projected crown area of subject tree and C_j is projected crown area of neighbouring tree
树冠竞争指数[18] Crown competition index (CCI)	$CCI_i = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{H_j}{H_i}\cdot\frac{\overline{W_i}+\overline{W_j}-D_{ij}}{\overline{W_i}}\right)$	H_i为对象木树高，H_j为邻近木的树高，$\overline{W_i}$为对象木的平均冠幅半径，$\overline{W_j}$为邻近木的平均冠幅半径 H_i is height of subject tree, H_j is height of neighbouring tree, $\overline{W_i}$ is average crown radius of subject tree, $\overline{W_j}$ is average crown radius of neighbouring tree

1.3.5　结构方程模型构建与评价

根据前人[11−12]研究经验，结合研究区的林分特征和自然条件，将多样性指数与竞争指数作为林分结构参数，将各林木的胸高断面积生长量与材积生长量统一归为生长量指数。根据变量关系建立结构方程模型的理论模型。其中各树种材积生长量与胸高断面积生长量为期初（2015 年）与期末（2018 年）之差，采用《中国立木材积表》[19]中汪清林业局各树种的二元材积式计算材积。

选用克朗巴哈系数（Cronbach's alpha coefficient）法对各指标层数据进行信度检验，一般认为克朗巴哈系数 > 0.7 时信度良好[20]。采用 KMO（Kaiser-Meyer-Olkin）检验和 Bartlett 球形检验进行数据效度检验，当 KMO > 0.7 且 Bartlett 球形检验为 0 时效度良好；0.5 < KMO ≤ 0.7，效度可以接受[21]。

采用平均适配度指数 χ^2/df、均方根误差（root mean squared error，RMSE）和增值适配度指数规范拟合指数（normed fit index，NFI）、相对拟合指数（relative fit index，RFI）、非规范拟合指数（tucker-lewis coefficien，TLI）对模型适配度进行检验。一般认为 χ^2/df 介于 1 到 3 之间，RMSE 小于 0.05，NFI、RFI、TLI 均大于 0.9，模型适配度良好[22−23]。

各指数计算通过 R 3.6.2、Excel 2019 完成，数据处理与分析使用 SPSS 26.0、Amos 26.0 完成。

2　结果与分析

2.1　邻近木多样性指数与竞争指数的株数分布

3 种多样性指数数值变化趋势较为一致（图 4）。在径阶、树种、树高多样性指数为 0 时，株数分布最少，多样性指数为 1.04 处株数分布最多。3 种多样

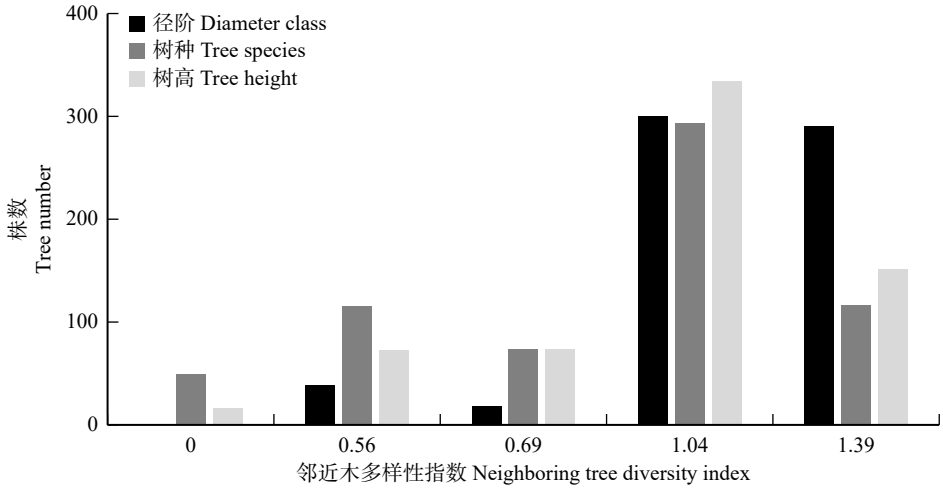


图 4　邻近木多样性指数的株数分布

Fig. 4　Plant number distribution of neighboring tree diversity index

性指数在取值为 1.04 与 1.39 时的累计株数分布数量均超过林分总株数的 60%，说明大部分空间结构单元内不同树木的树种、径阶、树高分布差异明显。但是树种多样性指数较其他两种多样性指数在取值为 0、0.56、0.69 时株数分布相对更多，而在取值为 1.39 时相对较少，说明相同树种的树木间可能存在一定的聚集情况，而树高与径阶分布则较为均匀，更加合理。整体而言，研究区内多样性水平较高，树种混交程度高，空间结构复杂，水平与垂直结构变异度大。

从各竞争指数的表现（表 3）来看，由于 CI 与 BDC 指数在计算过程中涉及对象木与邻近木的距离，而天然林中部分邻近木与对象木距离较近，因此出现最大值数值非常高[24]的情况。将 3 种竞争指数使用极差标准化法进行标准化后发现，所选 3 个竞争指数中 CCI 的结果偏大，且分布较为离散，BDC 与 CI 计算结果偏小，标准化后 CI 分布更为集中。

2.2 各径级林木邻近木多样性、竞争指数与生长情况

根据样地调查数据分析结果，林分的直径为反“J”型分布，根据《森林资源规划设计调查技术规程》（GB/T 26424—2010）对树木径阶进行分级，以 CI 作为衡量竞争强度的标准进行统计（表 4）。大径级林木的竞争指数显著低于小径级林木且生长量显著高于小径级林木，随树木径级的增大，其所承受的竞争强度不断变小且趋于稳定。各多样性指数呈现出缓慢增加的趋势，说明随着树木径级的增大，对象木周围的树种、径阶、树高分布逐渐变得复杂。随着树木径级的增大，树木的材积生长量表现为增加趋势，增长幅度也趋于稳定。中径级的树木材积生长率明显高于其他两个径级的树木，生长势头最好，大径级林木生长势头中等，而小径级林木生长势头表现最差。

竞争指数变异系数大于 100% 的情况，可能是因为在结构稳定的天然云冷杉林中，林分结构复杂，不同林木受到的竞争压力本身差异偏高，且 CI 的计算涉及距离[24]，当树木距离非常近时，CI 的结果会出现非常高的情况，导致数据明显偏离均值。而小径级树木由于所受竞争压力不同，且树木年龄可能较小，生长能力差别较大，材积生长出现较大分化，变异系数超过 100% 也存在一定合理性。

2.3 邻近木多样性与竞争对生长的影响

2.3.1 结构方程模型的评价与修正

对各观测变量进行 Spearman 相关性分析（图 5），各竞争指数和径阶多样性指数与生长量显著相关，树种和树高多样性指数与生长量相关性不显著。表 5

表 3 各竞争指数的统计

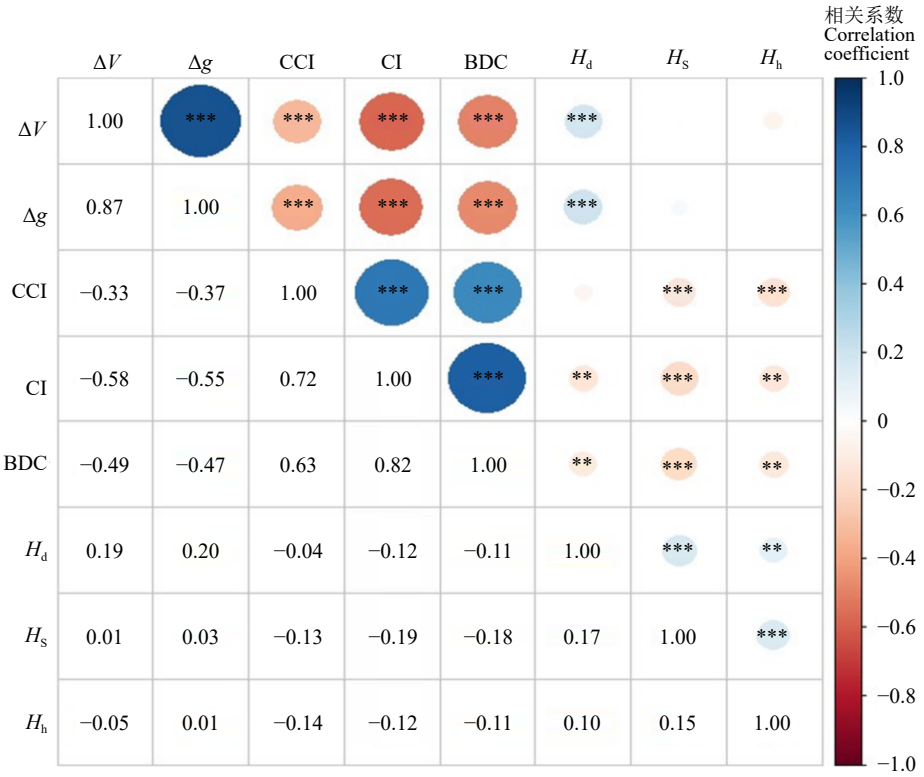
Tab. 3 Statistics of each competition index

竞争指数 Competition index	最小值 Min. value	最大值 Max. value	平均值 ± 标准误 Mean ± SE	标准差 SD	标准化后的平均值 ± 标准误 Standardized mean ± SE	标准化后的标准差 Standardized SD
CCI	0	11.321	2.965 ± 0.066	1.673	0.262 ± 0.006	0.148
BDC	0.055	221.545	9.382 ± 0.793	0.564	0.038 ± 0.004	0.091
CI	0.187	168.515	6.391 ± 0.544	13.825	0.038 ± 0.003	0.082

表 4 各径级邻近木多样性指数、竞争指数与生长量统计

Tab. 4 Diversity index, competition index, and growth statistics of neighboring trees at different diameter levels

径级 Diameter class	指标 Index	材积生长量 Volume increment/m^3	材积生长率 Volume growth rate	径阶多样性指数 Diameter-class diversity index	树种多样性指数 Species diversity index	树高多样性指数 Tree-height diversity index	竞争指数 Competition index
小径级 Small-diameter class（5 cm ≤ DBH < 13 cm）	均值 ± 标准误 Mean ± SE	0.009 ± 0.001	（4.592 ± 0.154）%	1.114 ± 0.015	0.873 ± 0.021	0.981 ± 0.013	9.016 ± 0.662
	标准差 Standard deviation	0.016	0.029	0.275	0.382	0.324	15.207
	变异系数 Coefficient of variation/%	177.778	63.181	24.686	43.757	33.028	168.680
中径级 Medium-diameter class（13 cm ≤ DBH < 25 cm）	均值 ± 标准误 Mean ± SE	0.041 ± 0.002	（6.046± 0.155）%	1.197 ± 0.016	0.884 ± 0.024	1.004 ± 0.020	2.864 ± 0.266
	标准差 Standard deviation	0.033	0.024	0.236	0.343	0.288	4.822
	变异系数 Coefficient of variation/%	80.488	39.670	19.716	38.801	28.685	168.390
大径级 Large-diameter class（DBH ≥ 25 cm）	均值 ± 标准误 Mean ± SE	0.081 ± 0.004	（5.379 ± 0.167）%	1.252 ± 0.034	0.921 ± 0.031	1.056 ± 0.024	1.064 ± 0.112
	标准差 Standard deviation	0.041	0.017	0.314	0.357	0.258	1.339
	变异系数 Coefficient of variation/%	50.617	31.604	25.080	38.762	24.432	125.820



ΔV. 材积生长量; Δg.胸高断面积生长量; H_d. 径阶多样性指数; H_s.树种多样性指数; H_h.树高多样性指数。 **代表在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, ***代表在 $P < 0.01$ 水平上显著相关。ΔV, volume increment; Δg, basal area increment; H_d, diameter class diversity index; H_s, tree species diversity index; H_h, tree height diversity index. ** represents significant correlation at $P < 0.05$ level, *** represents significant correlation at $P < 0.01$ level.

图 5　各观测变量 Spearman 相关性

Fig. 5　Spearman correlations for each observed variable

表 5　信度检验和效度检验结果

Tab. 5　Results of reliability and validity tests

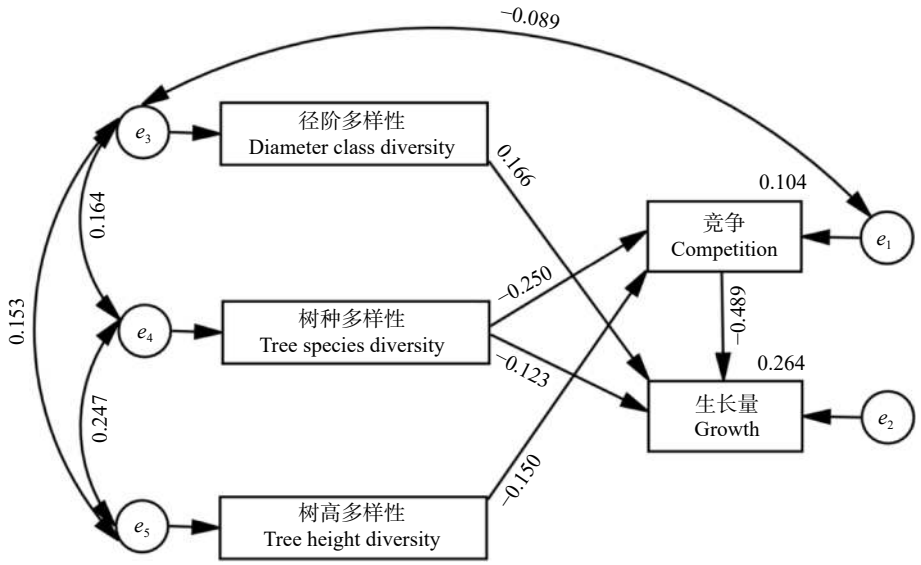
潜变量 Latent variable	显变量个数 Number of explicit variable	克朗巴哈系数 Cronbach's alpha coefficient	KMO检验 KMO test	Bartlett球形检验 Bartlett's sphericity test
多样性 Diversity	3	0.297	0.516	0
竞争 Competition	3	0.874	0.712	0
生长量 Growth	2	0.876	0.500	0

显示: 竞争指数表现良好, 克朗巴哈系数为 0.874, KMO 值为 0.712, Bartlett 球形检验结果为 0, 通过信度与效度检验。多样性因子的克朗巴哈系数为 0.297, KMO 值为 0.516, Bartlett 球形检验结果为 0, 虽然通过效度检验, 但未能通过信度检验, 可靠性不足, 考虑进行优化。生长量克朗巴哈系数为 0.876, KMO 值为 0.500, Bartlett 球形检验结果为 0, 通过信度检验, 但效度检验结果较差, 真实性不佳。将竞争因子与生长量因子分别通过主成分分析进行降维, 发现 CI 对竞争因子的解释率达 82.19%, 材积生长量对生长因子的解释率达 84.74%, 因此综合考虑后决定删除模型中的潜变量, 以 CI 代表竞争因子, 材积生长量代表生长量因子进行模型优化, 再根据模型拟合指数修正, 删除不显著的路径后, 最终模型路径图如图 6 所示。

修正后模型的 χ^2 显著性概率为 0.230, χ^2/df 为 1.442, RMSE 为 0.026, NFI、RFI 和 TLI 分别为为 0.996、0.958 和 0.987, 模型与观测数据适配, 综合评价模型整体拟合效果良好。

2.3.2　邻近木多样性与竞争对生长的影响

结合方程结果(图 6)与各指数路径间的效应(表 6)可以看出, 竞争与各多样性指数均对材积的生长产生影响, 模型内各路径系数均通过了显著性检验。竞争和树种多样性与材积生长呈现出负相关, 说明随着竞争的加剧及树种多样性的提高, 树木的生长量将会受到抑制。树高多样性和径阶多样性与树木的材积生长呈现正相关。从表 6 可知竞争对生长量的总影响系数为−0.489, 树种、径阶、树高



竞争与生长量右上角数字为其方差；箭头表示影响关系；箭头上的数据为相应的路径系数，e_1～e_5 分别为相应观察变量的测量误差。Numbers in the upper right corner of competition and growth quantities are their variance; arrows indicate influence relationships; data on the arrows are corresponding path coefficients; e_1 to e_5 are measurement errors of corresponding observed variables, respectively.

图 6 结构方程模型修正路径图

Fig. 6 Structural equation model correction path diagram

表 6 各指数路径间直接效应、间接效应和总效应及适配性

Tab. 6 Direct, indirect and total effects and fitness between index pathways

变量因果关系 Causality of variables	直接影响系数 Direct impact coefficient	间接影响系数 Indirect effect coefficient	总影响系数 Total impact coefficient	*P*值 *P* value
树种多样性→竞争 Tree species diversity→Competition	−0.250	0	−0.250	< 0.001
树高多样性→竞争 Tree height diversity→ Competition	−0.150	0	−0.150	< 0.001
竞争→生长量 Competition→Growth	−0.489	0	−0.489	< 0.001
径阶多样性→生长量 Diameter class diversity→Growth	0.166	0	0.166	< 0.001
树种多样性→生长量 Tree species diversity→Growth	−0.123	0.122	−0.001	< 0.001
树高多样性→生长量 Tree height diversity→Growth	0	0.073	0.073	< 0.001

注：“→”表示影响，箭头的指向代表一个因子对另一个因子的影响关系。Notes: “→” indicates impact, pointing of arrow represents the relationship of a factor to the influence of another factor.

多样性对生长量的总影响系数分别为−0.001、0.166、0.073。由此可知竞争对材积生长量的影响最大，树种、径阶与树高多样性影响则较小。径阶多样性对生长量的影响全部为直接影响，树高多样性对生长量全部为间接影响。树种多样性则二者都有，且影响效果相反，对生长量有直接负面影响，影响系数为–0.123，而在通过竞争后对生长量的影响表现为正面影响，影响系数为 0.122。

2.3.3 邻近木单元内不同径级邻近木竞争与生长状况

基于结构方程模型结果，竞争因子对树木材积生长的影响系数显著高于多样性因子，因此，根据空间结构单元内各邻近木径级大小统计不同径级对象木竞争与生长情况，结果如表 7 所示。随着对象木周围邻近木径级的增加，小径级林木所受竞争压力逐渐减少，生长量略有增加，但生长势头有所放缓；中径级林木在邻近木以小径级为主时各项表现最佳；而大径级林木在周围均为小径级林木时表现最好。研究区内小径级林木竞争压力较大，生长状况较差，而中、大径级林木所受竞争压力整体较小，生长状况良好。林木的生长压力可能多源于同径级竞争，林木的生长势头在周围以同径级林木为主时表现最佳。

3 讨 论

3.1 竞争对树木生长的影响

研究结果表明竞争与林木的材积生长呈显著的负相关关系，随着竞争强度的增加，林木材积生长逐渐变缓，与目前研究结论普遍一致。先前的研究中

表 7　不同径级对象木邻近木径级分布的竞争与生长状况

Tab. 7　Competition and growth status of neighbouring tree diameter distribution of subject trees of different diameter classes

邻近木径级分布 Diameter class distribution of neighboring tree	指标 Index	对象木径级 Diameter class of subject tree		
		小径级 Small-diameter class	中径级 Medium-diameter class	大径级 Large-diameter class
总体 Total	竞争 Competition	9.902 ± 0.938	2.572 ± 0.283	1.106 ± 0.131
	材积生长量 Volume increment/m^3	0.009 ± 0.001	0.041 ± 0.002	0.081 ± 0.004
	材积生长率 Volume growth rate/%	4.589 ± 0.151	6.049 ± 0.157	5.377 ± 0.181
全为小径级林木 All small class diameter tree	竞争 Competition	14.668 ± 2.665	2.391 ± 0.796	1.232 ± 0.386
	材积生长量 Volume increment/m^3	0.009 ± 0.001	0.041 ± 0.005	0.082 ± 0.074
	材积生长率 Volume growth rate/%	5.461 ± 0.388	6.109 ± 0.541	5.687 ± 0.345
小径级林木为主 Small diameter class tree predominant	竞争 Competition	10.484 ± 1.122	2.296 ± 0.003	1.025 ± 0.004
	材积生长量 Volume increment/m^3	0.009 ± 0.001	0.042 ± 0.003	0.081 ± 0.005
	材积生长率 Volume growth rate/%	4.827 ± 0.239	6.213 ± 0.259	5.277 ± 0.354
大径级林木为主 Large diameter class tree predominant	竞争 Competition	7.264 ± 0.946	3.136 ± 0.531	1.471 ± 0.038
	材积生长量 Volume increment/m^3	0.010 ± 0.002	0.038 ± 0.004	0.079 ± 0.011
	材积生长率 Volume growth rate/%	4.183 ± 0.219	5.877 ± 0.219	5.461 ± 0.235

关注点大多在于竞争或多样性单因素对树木个体生长发育的影响，本研究通过结构方程进一步发现，与多样性相比竞争对树木个体生长的影响更强，说明在本研究范围内，竞争是影响树木生长发育的最重要因素。

树木间的竞争强度随树木大小的增加而减弱并趋于稳定，大径级的树木所受竞争压力较小，材积生长量显著高于小径级树木。小径级树木的竞争压力可能主要来源于同径级树木，这可能是因为部分小径级林木分布较为集中，密度较大，而生长所需资源有限，从而抑制了树木生长。但部分靠近大径级林木的小径级树木生长较好，原因可能是研究区内的树种主要为鱼鳞云杉、红皮云杉、臭冷杉和红松，均为耐阴树种，幼树可以承受林下荫蔽的环境[25]。因此可以考虑对密度较高的小树进行择伐，将靠近大树的部分小树予以保留，从而降低小径级林木间的竞争压力，提高生产力。

在结构较为稳定的云冷杉天然林中，小径级林木数量占比较大，按固定范围选取竞争对象的方法有一定局限性，可能把无关的树木划分为竞争对象，而把距离较远的具有竞争效应的树木排除在外。以空间结构单元为基础计算竞争指数可以在一定程度克服这个缺点，因为该方法不仅考虑了树木间的相对位置，还在一定程度上真实反映小径级树木所受竞争压力的大小。

研究发现大中径级林木更容易受到大径级林木竞争的影响，可能是由于大径级树木所占生态位宽度较大，可利用的资源更多，竞争能力更强，生产力较强[26]，因此不易受小径级林木的影响，而主要与相同径级林木进行竞争。因此可以考虑将生长状况较差的大中径级树木伐除，减少竞争压力，提高林分生产力。

3.2　多样性对树木生长的影响

关于树种多样性与林木材积生长的关系，不同学者给出了不同的结论。Versace 等[27]的研究发现林分中物种多样性对林木材积的生长产生一定的积极影响，黄小荣[28]通过试验证明物种多样性与林木材积生长呈现出显著的正相关关系。本研究发现树种多样性对树木生长的影响分为两部分，直接影响为负面影响，影响系数为−0.123，间接影响效果则相反，影响系数为 0.122，总体上呈现出负相关，影响系数为−0.001，即树种多样性指数高可能会抑制树木材积的生长，但可以降低林分内林木的竞争水平。汪清等[29]的研究中发现，马尾松的竞争力随着混交比例的增加而减小，竞争压力主要来源于种群密度的制约和个体大小的差异。周文嵩[30]也证实了物种多样性的增加可以减少种间竞争，在林分以种间竞争为主时，增加物种多样性可以降低林分的竞争水平。物种多样性对竞争与林木生长的作用还可能是因为物种多样性增加具有部分补偿作用，这使得群落物种–生物量分布相对更加均匀，从而减少了物种间的相互竞争[31]。随着物种丰富度的增加，群落内高碳储量物种增多，种群内的生物量虽然获得了提高，但由于高碳储量的物种一般具有较低的生产力（如演替后期的耐阴物种），导致生产力降低[32]。

本研究发现林分径阶多样性指数对林木材积生

长呈现出显著的正相关关系，且全部为直接影响，影响系数为 0.166，意味着径阶多样性高可能会促进树木的生长。这可能是因为复杂的直径结构可以使树木在空间中形成多元配置，进而提高资源利用效率[33]。树高多样性对材积生长的影响全部为间接影响，影响系数为 0.073，树高分化通过减少物种间的相互竞争进而对林木生长产生促进作用。Hans 等[34]在分析大量林冠图后认为复杂的林冠结构可能会增加光的截留量，从而改善了林木个体对干扰的抵抗能力，进而提高了个体的生长发育水平。

多样性对林木生长的积极影响也可能是互补效应的结果[35]，有研究证实具有互补特性的混交林的生物量生产力超过了纯林生产力。随着多样性的增加，物种间的生态位分化或植物间的互利作用将提高资源利用效率，从而实现群落生物量的增加。

4 结　　论

本研究从空间结构单元尺度探究东北天然云冷杉林中竞争与多样性因子对林木生长的影响。竞争与林木生长呈现出显著负相关关系，且林木的生长压力多来自于同径级竞争，适当提高多样性水平可以缓解林分间林木的竞争强度或促进林分结构分化，在总体上对林木的生长产生正面的影响。因此，在天然林择伐经营时，若以增加林分蓄积为目的，可通过提高林分内的树种、径阶、树高多样性水平，优先择伐同径级或相近径级树木降低林木竞争水平，促进林木个体生长，以提高整体生产力。

参 考 文 献

[1] 董利虎, 李凤日, 贾炜玮. 林木竞争对红松人工林立木生物量影响及模型研究 [J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(6): 15−22.
Dong L H, Li F R, Jia W W. Effects of tree competition on biomass and biomass models of *Pinus koraiensis* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(6): 15−22.

[2] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华, 等. 基于交角的林木竞争指数 [J]. 林业科学, 2013, 49(6): 68−73.
Hui G Y, Hu Y B, Zhao Z H, et al. A forest competition index based on intersection angle[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(6): 68−73.

[3] 王妍, 杨华, 李艳丽, 等. 基于结构方程模型的林木竞争指标研究 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(4): 28−37.
Wang Y, Yang H, Li Y L, et al. Tree competition index based on the structural equation model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(4): 28−37.

[4] Hegyi F. A simulation model for managing jack-pine stands [M]//Fries J. Growth models for tree and stand simulation. Stockholm: Sweden Royal College of Forest, 1974: 74−90.

[5] 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.

[6] 朱杰, 吴安驰, 邹顺, 等. 南亚热带常绿阔叶林树木多样性与生物量和生产力的关联及其影响因素 [J]. 生物多样性, 2021, 29(11): 1435−1446.
Zhu J, Wu A C, Zou S, et al. Relationships between tree diversity and biomass/productivity and their influence factors in a lower subtropical evergreen broad-leaved forest[J]. Biodiversity Science, 2021, 29(11): 1435−1446.

[7] Forrester D I, Tang X L. Analysing the spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests and the effects of stand density using the 3-PG model[J]. Ecological Modelling, 2016, 319(9): 233−254.

[8] 惠刚盈. 基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究 [J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 1−9.
Hui G Y. Studies on the application of stand spatial structure parameters based on the relationship of neighbourhood trees[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35 (4): 1−9.

[9] Hui G Y, Zhao X H, Zhao Z H, et al. Evaluating tree species spatial diversity based on neighbourhood relationships[J]. Forest Science, 2011, 57(4): 292−300.

[10] Man R, Yang H. Construction of neighbourhood diversity indices with stem mapping data[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2015, 45(8): 1138−1142.

[11] Yang H, Man R. Assessing stand species and structural diversity at neighbourhood scale[J]. MethodsX, 2018(5): 141−148.

[12] 白宇, 杨华, 温静, 等. 基于邻近木的林分结构多样性研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(6): 52−58.
Bai Y, Yang H, Wen J, et al. Study on forest structure diversity based on the neighbourhood trees[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(6): 52−58.

[13] Laughlin D C, Abella S R, Covington W W, et al. Species richness and soil properties in *Pinus ponderosa* forests: a structural equation modeling analysis[J]. Journal of Vegetation Science, 2007, 18(2): 231−242.

[14] 王树力, 周健平. 基于结构方程模型的林分生长与影响因子耦合关系分析 [J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 7−12.
Wang S L, Zhou J P. Coupling relationship between stand growth and impacting factors based on structural equation model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(5): 7−12.

[15] 舒树淼, 赵洋毅, 段旭, 等. 基于结构方程模型的云南松次生林林木多样性影响因子 [J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(10): 63−67.
Shu S M, Zhao Y Y, Duan X, et al. Impact factors of forest diversity in Yunnan pine secondary forest based on structural equation model[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(10): 63−67.

[16] 孜来比·买木提名, 杨华, 赵广亮, 等. 单木竞争指标的研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 152−158.

Zilaibi·Mutiming, Yang H, Zhao G L, et al. A review on the competition Indices of individual trees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(6): 152−158.

[17] Biging G S, Dobbertin M. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees[J]. Forest Science, 1992, 38(3): 695−720.

[18] 张晔珵, 张怀清, 陈永富, 等. 基于树冠因子的林木竞争指数研究 [J]. 林业科学研究, 2016, 29(1): 80−84.
Zhang Y C, Zhang H Q, Chen Y F, et al. Study of tree competition index based on crown feature[J]. Forest Research, 2016, 29(1): 80−84.

[19] 刘琪璟. 中国立木材积表 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2017: 381.
Liu Q J. Tree volum tables of China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017: 381.

[20] Cronbach L. Coefficient alpha and the internal structure of tests[J]. Psychometrika, 1951, 16(3): 297−334.

[21] 王妍. 基于结构方程模型的林木竞争指标研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Wang Y, Tree competition index based on the structural equation model[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

[22] 董灵波, 田栋元, 陈莹, 等. 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林更新影响因素 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2763−2772.
Dong L B, Tian D Y, Chen Y, et al. Clarifying the factors affecting *Larix gmelinii* forest regeneration based on structural equation model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2763−2772.

[23] 曹小玉, 委霞, 赵文菲, 等. 基于结构方程模型的森林健康评价 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2635−2647.
Cao X Y, Wei X, Zhao W F, et al. Evaluation of forest health based on structural equation model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(8): 2635−2647.

[24] 李建军, 李际平, 刘素青, 等. 基于 Hegyi 改进模型的红树林空间结构竞争分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(12): 23−27.
Li J J, Li J P, Liu S Q, et al. The Mangrove spatial structure competitive analysis based on Hegyi improved model[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(12): 23−27.

[25] 闫旭, 张心艺, 李阳宁, 等. 复层林对闽楠幼树生长、叶片形态和光合特性的影响 [J]. 植物科学学报, 2022, 40(4): 553−564.
Yan X, Zhang X Y, Li Y N, et al. Effects of unevenly aged two-layer mixed forest on growth, leaf morphology, and photosynthetic characteristics of *Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang saplings[J]. Plant Science Journal, 2022, 40(4): 553−564.

[26] 董雪婷, 张静, 张志东, 等. 树种相互作用、林分密度和树木大小对华北落叶松生产力的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2722−2728.
Dong X T, Zhang J, Zhang Z D, et al. Effects of tree species interaction, stand density, and tree size on the productivity of *Larix principis-rupprechtii*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2722−2728.

[27] Versace S, Garfì V, Dalponte M, et al. Species interactions in pure and mixed-species stands of silver fir and European beech in Mediterranean mountains[J]. iForest, 2021, 14: 1−11.

[28] 黄小荣. 广西马尾松林植物功能多样性与生产力的关系 [J]. 生物多样性, 2018, 26(7): 690−700.
Huang X R. Relationship between plant functional diversity andproductivity of Pinus massoniana plantations in Guangxi[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(7): 690−700.

[29] 汪清, 潘萍, 欧阳勋志, 等. 马尾松–木荷不同比例混交林种内和种间竞争强度 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(1): 49−57.
Wang Q, Pan P, Ouyang X Z, et al. Intraspecific and interspecific competition intensity in mixed plantation with different proportion of *Pinus massoniana* and *Schima superba*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(1): 49−57.

[30] 周文嵩. 华北落叶松次生林种内、种间关系及影响机制研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
Zhou W S. Research on intraspecific and interspecific relationship and impact mechanism of *Larix principis-rupprechtii* in secondary forests[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.

[31] 邹顺, 周国逸, 张倩媚, 等. 1992—2015 年鼎湖山季风常绿阔叶林群落结构动态 [J]. 植物生态学报, 2018, 42(4): 442−452.
Zou S, Zhou G Y, Zhang Q M, et al. Long-term (1992–2015) dynamics of community composition and structure in a monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(4): 442−452.

[32] 吴初平, 韩文娟, 江波, 等. 浙江定海次生林内物种丰富度与生物量和生产力关系的环境依赖性 [J]. 生物多样性, 2018, 26(6): 545−553.
Wu C P, Han W J, Jiang B, et al. Relationships between species richness and biomass/productivity depend on environmental factors in secondary forests of Dinghai, Zhejiang[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(6): 545−553.

[33] 朱锦迪. 浙江省针阔混交林生产力及其结构研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
Zhu J D. Study on the productivity and structure of coniferous and broad-leaved mixed in Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2021.

[34] Hans P. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures[J]. Forest Ecology & Management, 2014, 327: 251−264.

[35] Nyfeler D, Huguenin-Elie O, Suter M, et al. Strong mixture effects among four species in fertilized agricultural grassland led to persistent and consistent transgressive overyielding[J]. Journal of Applied Ecology, 2009, 46(3): 683−691.

（责任编辑　范　娟　孟　瑶
责任编委　张会儒）