

金子山国有林场 4 种典型林分空间结构综合评价

袁梓馨, 郭秋菊, 艾训儒, 姚 兰, 朱 江, 王 蕾, 向 钦

(湖北民族大学生物资源保护与利用湖北省重点实验室, 湖北恩施 445000)

摘要: 【目的】综合评价湖北省金子山国有林场 4 种林分的空间结构, 确定影响该区域林分结构的主要因素, 为精准提升区域森林可持续经营水平和森林质量提供理论基础。【方法】基于常绿落叶阔叶混交天然林、杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林、柳杉 *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* 人工林和鹅掌楸 *Liriodendron chinense* 人工林实测样地数据, 选取角尺度、大小比数、混交度和密集度等林分空间结构指标, 应用单位圆综合评价体系对 4 种典型林分进行综合评价。【结果】不同林分中随机木个体的占比均为最高, 不同大小比数等级林木比例整体上接近。常绿落叶阔叶混交天然林中林木整体呈现随机分布(角尺度均值为 0.492), 林分混交良好(混交度均值为 0.747), 但优势不明显(大小比数均值为 0.497), 林冠连续覆盖(密集度均值为 0.941), 资源利用率高。其他人工林分也呈现随机分布(角尺度均值为 0.505~0.514)或轻微聚集分布(角尺度为均值 0.529)的趋势, 混交程度均较低。有部分林木表现出一定优势, 在杉木林中最为明显。3 种人工林中鹅掌楸人工林林木处于很密集(密集度均值为 0.768)的状态, 而杉木(密集度均值为 0.557)和柳杉(密集度均值为 0.563)人工林林分处于较密集状态, 林木还有一定生长空间。空间结构综合评价指数显示: 常绿落叶阔叶混交天然林(0.600)林分状态优于杉木林(0.583)、柳杉林(0.521)和鹅掌楸林(0.487)。【结论】同一区域不同起源的林分结构存在差异, 常绿落叶阔叶混交天然林的空间结构优于杉木、柳杉和鹅掌楸人工林。图 2 表 6 参 37

关键词: 金子山国有林场; 林分空间结构; 结构参数; 单位圆法; 综合评价

中图分类号: S758 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)05-0928-11

Comprehensive evaluation of spatial structure of four typical forest stands in Jinzishan state-owned forest farm

YUAN Zixin, GUO Qiuju, AI Xunru, YAO Lan, ZHU Jiang, WANG Lei, XIANG Qin

(Key Laboratory of Biological Resources Conservation and Utilization of Hubei Province, Hubei Minzu University, Enshi 445000, Hubei, China)

Abstract: [Objective] The objective is to comprehensively evaluate the spatial structure of four forest types in Jinzishan state-owned forest farm in Hubei Province, and determine the main factors affecting the forest stand structure in the region, so as to provide a theoretical basis for improving sustainable forest management level and forest quality. [Method] Based on the measured plot data of evergreen deciduous broad-leaved mixed natural forest, *Cunninghamia lanceolata* plantation, *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* plantation and *Liriodendron chinense* plantation, forest spatial structure indicators such as uniform angle index, neighborhood comparison, mingling degree, and crowding degree were selected, and the unit circle comprehensive evaluation system was applied to comprehensively evaluate the four typical forest types. [Result] The proportion of random individual trees in different types was the highest, and the proportion of trees in different neighborhood comparison degrees was similar on the whole. The overall distribution of trees in the evergreen deciduous

收稿日期: 2024-02-01; 修回日期: 2024-05-21

基金项目: 国家重点研发-政府间国际科技创新合作重点专项(2023YFE0112805)

作者简介: 袁梓馨(ORCID: 0009-0006-1362-1377), 从事森林可持续经营研究。E-mail: 894878623@qq.com。通信作者: 郭秋菊(ORCID: 0000-0002-2567-1156), 副教授, 博士, 从事森林经营与管理研究。E-mail: 724185298@qq.com

broad-leaved mixed natural forest was random [average value of uniform angle index (\bar{W})=0.492], and the stand was well mixed [average value of mingling degree (\bar{M})=0.747], but the growth advantage of trees was not obvious [average value of neighborhood comparison (\bar{U})=0.497], the canopy was continuously covered [average value of crowding degree (\bar{C})=0.941], and the resource utilization rate was high. Other plantations also showed a trend of random distribution (\bar{W} =0.505–0.514) or slight cluster distribution (\bar{W} =0.529), and the degree of mixing was low. Some trees showed certain advantages, especially in *Cunninghamia lanceolata* forests. Among the three types of plantations, the trees in *L. chinense* plantations were in a very dense state (\bar{C} =0.768), while the stands of *Cunninghamia lanceolata* (\bar{C} =0.557) and *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* (\bar{C} =0.563) plantations were in a relatively dense state, and there was still some growth space for trees. The comprehensive evaluation index of spatial structure showed that the state of evergreen deciduous broad-leaved mixed natural forest (0.600) was better than that of *Cunninghamia lanceolata* (0.583), *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* (0.521) and *L. chinense* plantations (0.487). [Conclusion] There are differences in stand structure of different origins in the same region, and the spatial structure of evergreen deciduous broad-leaved mixed natural forest is better than that of *Cunninghamia lanceolata*, *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* and *L. chinense* plantations. [Ch, 2 fig. 6 tab. 37 ref.]

Key words: Jinzishan state-owned forest farm; stand spatial structure; structure indicators; unit circle method; comprehensive evaluation

森林对维护全球生物多样性和生态平衡至关重要，森林结构在很大程度上决定了森林的稳定性^[1-3]。稳定的森林生态系统具有较高的多样性水平、丰富的林分结构、较强的碳汇能力和林木副产品生产能力。中国森林中有大面积的天然次生林和人工纯林，存在生长退化、稳定性差、结构简单、树种单一等问题。这样的林分结构显示出对森林进行保护与经营的必要性和紧迫性^[4-5]。林分结构指标是分析与经营森林生态系统的重要因子，进行森林结构化经营是稳定森林生态系统的有效途径。因此，无论是天然林还是人工林的经营都应主攻结构，强调创建或维护最佳的森林空间结构^[6]。应用基于相邻木空间关系的林分空间结构描述方法为森林结构化经营提供了科学基础。然而，林分空间结构参数之间既是相互独立，又是相互联系、相互制约的有机整体，只有将各个独立的林分空间结构参数整合成一个能反映结构优劣的综合指数，才能对林分空间结构状态进行整体的表达。林分状态单位圆法为综合评价林分空间结构提供了新方法^[7]。

金子山国有林场位于湖北省恩施土家族苗族自治州西南部。林场内有大面积的天然混交林，植被类型为典型的亚热带常绿落叶阔叶混交林，树冠层以高大的落叶树种为主，中层以常绿树种为主，沟谷和中坡地区有密集的低矮竹林。同时林场内有多种人工林，包括杉木 *Cunninghamia lanceolata*、柳杉 *Cryptomeria japonica* var. *sinensis*、鹅掌楸 *Liriodendron chinense* 等，这些具有重要的生态和经济价值^[8-10]。目前，众多学者采用结构参数的均值，一元分布或二元分布所形成的单水平、单层次或两水平形式量化描述林分空间结构特征^[11-15]，但关于天然林、人工林空间结构特征综合评价较少，且不同起源、不同优势树种组成的森林类型会形成不同的林分空间结构，这些空间结构的差异势必会影响森林发展与科学经营技术的制定。因此，本研究以湖北省金子山国有林场 4 种典型林分类型为研究对象，结合林分空间结构参数与单位圆法，构建林分空间结构综合评价指数，对不同林分类型的林分空间结构进行评价与比较，旨在明确各种森林类型的林分空间结构，为区域林分优化经营和森林质量精准提升提供科学指导。

1 研究区概况

研究区位于湖北省利川市金子山国有林场，中心位置地理坐标为 30°17'17"N，109°02'58"E，地处武陵山脉与巫山山脉结合部，属云贵高原向东北延伸部分。该区属典型的亚热带大陆性季风湿润气候，年平均气温为 12.7℃，年降水量为 1 350.0~1 600.0 mm，降水量季节分布不均匀，无霜期为 225.0~235.0 d，

夏季高温多雨，冬季温暖湿润，年均日照时数为1 250.0~1 350.0 h。该地区土壤类型在低海拔多为黄棕壤，随着海拔升高而逐渐变为棕壤。林场内植被资源丰富，主要有天然林和人工林两大植被类型，天然林为230.2 hm²，占有林地的28.66%；人工林为572.9 hm²，占有林地的71.34%。天然林植被类型属亚热带山地常绿落叶阔叶混交林，是恩施州国有林场中最具有代表性和保存面积最大的典型地带性植被；人工林树种包括杉木、柳杉、日本落叶松 *Larix kaempferi* 和少量鹅掌楸等。人工林造林树种较为单一。20世纪80年代前主要造林树种为杉木和柳杉纯林，20世纪90年代后造林树种多为日本落叶松纯林。因为日本落叶松纯林对涵养水源和保持土壤肥力均为不利，所以更新造林时选择杉木、柳杉、鹅掌楸作为主要造林树种。造林时，杉木采用苗高>30 cm，地径>0.5 cm的1年生实生苗；柳杉采用苗高>25 cm，地径>0.4 cm的1年生实生苗；鹅掌楸采用苗高≥120 cm，地径≥0.8 cm的2年生实生苗。在2013—2015年完成了对人工幼龄林的抚育和中龄林的抚育间伐任务。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

2019年11月底在湖北省利川市金子山国有林场中选取4种典型森林类型：常绿落叶阔叶混交林和杉木、柳杉、鹅掌楸3种人工林，在每种森林类型典型分布区域布设3个20 m×20 m永久固定监测样地，共计12个样地(表1)。用四分法将20 m×20 m的样地连续划分为4个10 m×10 m的样方，16个5 m×5 m的样块。以样块为基本调查单元，标定样地左下角为坐标原点，南北方向为y轴，东西方向为x轴，鉴别样地内所有胸径(D_{BH})≥5 cm的木本植物物种，并挂牌、刷漆，进行每木检尺，测量每株木本植物个体在5 m×5 m样方内的(x、y)相对坐标值。记录树种名、冠幅、胸径、树高等林木特征值，及海拔、坡位、坡向、坡度和样地中心点经纬度等生境因子。样地四周各划定2 m的缓冲区消除边缘效应，其余区域为核心区。缓冲区内林木仅作为相邻木，而核心区内 D_{BH} ≥5 cm的乔木可作为参照树和相邻木，计算林分空间结构参数。

表1 不同林分类型样地基本信息

Table 1 Basic information of plots different stand types

样地编号	林分起源	林分类型	北纬(N)	东经(E)	海拔/m	坡向	平均胸径/cm	平均树高/m	林分密度/(株·hm ⁻²)	林分龄组
1	天然林	常绿落叶阔叶混交林	30.292 3°	109.067 3°	1 468.0	东北	13.11	11.32	975	成熟林
2			30.292 1°	109.067 8°	1 481.8	东北	13.12	12.08	1 275	成熟林
3			30.291 8°	109.067 6°	1 484.8	东	13.00	10.05	1 200	成熟林
4	杉木林	杉木林	30.295 6°	109.064 9°	1 382.0	北	22.16	17.87	875	近熟林
5			30.295 5°	109.065 0°	1 394.0	北	18.68	15.65	1 150	近熟林
6			30.295 4°	109.065 2°	1 393.0	东北	16.09	13.15	1 300	近熟林
7	人工林	柳杉林	30.291 7°	109.069 3°	1 446.8	北	17.92	15.15	1 900	成熟林
8			30.286 5°	109.075 0°	1 382.0	北	16.57	14.95	2 975	成熟林
9			30.291 3°	109.062 1°	1 555.9	东北	24.72	20.00	650	成熟林
10	鹅掌楸林	鹅掌楸林	30.291 8°	109.064 6°	1 541.9	北	17.30	17.25	1 100	近熟林
11			30.291 6°	109.064 2°	1 534.8	西北	19.84	15.39	825	近熟林
12			30.290 9°	109.061 9°	1 560.7	东北	17.00	20.63	1 275	近熟林

2.2 林分空间结构参数体系及均值计算

基于林分空间结构单元而建立的由4个空间结构参数构成的参数体系(表2)已成为分析林分结构不可分割的有机整体^[16-17]。角尺度分布反映的是林分中林木个体的分布格局，基于角尺度可将森林群落中的林木划分为3种结构体，依次对应5株树组成的随机体、均匀体和聚集体^[18-19]；大小比数分布反映林分中林木的分化程度^[20]；混交度分布则反映林分中不同树种的隔离程度^[21]；密集度分布反映林分中林木的树冠密集程度^[22]。对于任意1株参照树*i* ($i=1, 2, 3, \dots, N$)和它的4株最近相邻木*j* ($j=1, 2, 3, 4$)，其空间结构状态(ω_i)计算通式^[6]为：

表 2 林分空间结构参数体系

Table 2 Spatial structure parameters of forest stands

取值	林分空间结构参数				取值	林分空间结构参数			
	角尺度(W_i)	大小比数(U_i)	混交度(M_i)	密集度(C_i)		角尺度(W_i)	大小比数(U_i)	混交度(M_i)	密集度(C_i)
0.00	非常均匀	优势	零度混交	非常稀疏	0.75	聚集	劣势	高度混交	密集
0.25	均匀	亚优势	弱度混交	稀疏	1.00	非常聚集	绝对劣势	完全混交	非常密集
0.50	随机	中庸	中度混交	中等密集					

$$\omega_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 V_j。$$

其中： V_j 为离散型变量，取值为 0 或 1； ω_i 的 5 种可能取值分别为 0、0.25、0.50、0.75、1.00。

零元分布是以某一指标均值说明林分整体在某一方面的平均状态特征；一元分布以 5 个取值等级上的频率分布详细阐述林分单方面结构状态特征^[23-24]。本研究调查样地空间结构参数结果见表 3。通过计算 4 种不同林分类型的角尺度 (W_i)、大小比数 (U_i)、混交度 (M_i) 和密集度 (C_i) 均值 (分别记为 \bar{W} 、 \bar{U} 、 \bar{M} 、 \bar{C})，并且绘制一元分布图，可以反映林分水平分布格局、分化程度、混交程度和密集程度等特征。

表 3 各林分类型样地空间结构参数均值

Table 3 Spatial structure parameters of each stand type

样地编号	林分类型	林层类型	林分空间结构参数均值			
			\bar{W}	\bar{U}	\bar{M}	\bar{C}
1		复层	0.481±0.207	0.481±0.360	0.750±0.230	0.963±0.297
2	常绿落叶阔叶混交林	复层	0.455±0.181	0.509±0.350	0.741±0.231	0.912±0.296
3		复层	0.530±0.214	0.500±0.341	0.750±0.280	0.947±0.318
4		单层	0.478±0.167	0.457±0.396	0.000±0.000	0.533±0.295
5	杉木人工林	单层	0.491±0.173	0.420±0.367	0.473±0.322	0.347±0.283
6		单层	0.529±0.183	0.488±0.353	0.390±0.355	0.791±0.283
7		单层	0.506±0.175	0.466±0.360	0.023±0.073	0.615±0.211
8	柳杉人工林	单层	0.524±0.184	0.497±0.334	0.208±0.300	0.573±0.284
9		单层	0.482±0.249	0.321±0.331	0.161±0.210	0.500±0.392
10		单层	0.469±0.177	0.430±0.331	0.375±0.348	0.625±0.284
11	鹅掌楸人工林	复层	0.500±0.000	0.417±0.349	0.767±0.176	0.733±0.240
12		单层	0.592±0.269	0.559±0.356	0.138±0.251	0.901±0.137

2.3 结构参数正向化处理

林分空间结构参数角尺度、大小比数、混交度和密集度的均值分布区间均为 [0, 1]，所以不需要进行归一化处理，但除混交度外，其余参数均不为正向指标。为便于整合结构参数，对这 4 个结构参数进行标准化处理，使其成为正向指标 (表 4)。结构参数正向化处理方法参考惠刚盈等^[7]、魏红洋等^[25] 研究成果。

2.4 林分空间结构单位圆综合评价

惠刚盈等^[5,7] 的单位圆法和林分空间结构综合评价指数 (F_{SS}) 既能直观反映评估对象在各指标上的相对优劣程度，又能比对最优林分状态， π 值法则对评价对象作出整体性评价，故本研究采用此方法对林分空间结构进行综合评价。

$$F_{SS} = \frac{\sum_{k=1}^m \frac{\pi R_k^2}{m}}{\pi R^2} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m R_k^2。$$

其中： m 表示 4 个结构参数； R_k 表示第 k 个结构参数正向指标值； $R^2 = \sum_{k=1}^m R_k^2$ 。

表4 林分综合评价指标及赋值

结构参数均值	评价标准	赋值	参数意义
\bar{M}	正向指标	实测值	密度均值越大说明林分内树种空间隔离程度越高, 混交程度越好
\bar{W}	<0.475	实测值	角尺度均值为 [0.475, 0.517] 时, 随机分布; <0.475 时, 均匀分布, 不重新赋值; >0.517 时, 聚集分布, 赋值 0.500
	[0.475, 0.517]	1.000	
	>0.517	0.500	
\bar{U}	<0.470	1.000	大小比数均值 <0.470 时, 赋值 1.000; [0.470, 0.790] 时, 赋值 0.750; (0.490, 0.510) 时, 赋值 0.500; [0.510, 0.530] 时, 赋值 0.250; >0.530 时, 赋值 0
	[0.470, 0.490]	0.750	
	(0.490, 0.510)	0.500	
	[0.510, 0.530]	0.250	
\bar{C}	>0.530	0	密度均值 <0.125 时, 赋值 0; [0.125, 0.375] 时, 对于单层同龄林赋值 0.500, 复层异龄林赋值 0.250; [0.375, 0.625] 时, 对于单层同龄林赋值 0.750, 复层异龄林赋值 0.500; [0.625, 0.875] 时, 对于单层同龄林赋值 1.000, 复层异龄林赋值 0.750; >0.875 时, 对于单层同龄林赋值 0.250, 复层异龄林赋值 1.000
	<0.125	0	
	[0.125, 0.375]	0.500/0.250	
	[0.375, 0.625]	0.750/0.500	
	[0.625, 0.875]	1.000/0.750	
	>0.875	0.250/1.000	

3 结果与分析

3.1 不同林分类型零元分布特征

4种林分类型的结构参数均值(表5)表征了林分单方面的整体结构特征。从角尺度均值来看, 4种林分的角尺度均值(\bar{W})之间无显著性差异, 其中, 常绿落叶阔叶混交林、杉木人工林、柳杉人工林均值为 [0.492, 0.514], 整体呈随机分布, 鹅掌楸人工林整体呈轻微聚集分布。4种林分类型大小比数均值(\bar{U})结果无显著性差异, 常绿落叶阔叶混交林的林木整体处于中庸状态, 而杉木人工林、柳杉人工林与鹅掌楸人工林的林木处于相对优势状态。混交度均值(\bar{M})表明: 常绿落叶阔叶混交林与其他林分间存在极显著差异($P<0.01$), 该林分整体混交良好, 柳杉人工林中不同种的林木最少。杉木人工林和柳杉人工林密度均值(\bar{C})之间差异不显著, 其他林分密度均值间呈极显著差异($P<0.01$), 常绿落叶阔叶混交林林分密度达 0.941, 冠层连接紧密, 林木生长相互竞争激烈。杉木林密度最低, 冠层中度密集, 林木有一定生长空间。

表5 林分空间结构参数均值

林分类型	林分空间结构参数均值			
	\bar{W}	\bar{U}	\bar{M}	\bar{C}
常绿落叶阔叶混交林	0.492±0.202 a	0.497±0.346 a	0.747±0.247 a	0.941±0.332 a
杉木人工林	0.505±0.176 a	0.460±0.365 a	0.319±0.349 b	0.557±0.301 c
柳杉人工林	0.514±0.188 a	0.467±0.344 a	0.140±0.251 c	0.563±0.290 c
鹅掌楸人工林	0.529±0.216 a	0.485±0.348 a	0.338±0.359 b	0.768±0.027 b

说明: 不同字母表示同一参数在不同林分类型间差异极显著($P<0.01$)。

3.2 不同林分类型一元分布特征

由图1可知: 所有林分的角尺度一元分布都呈正态分布, 随机木个体的占比均为最高。杉木人工林中随机木数量占比最大, 达 60.64%; 鹅掌楸人工林中随机木占比最少, 为 47.06%; 均匀木占比最多的林分是常绿落叶阔叶混交林, 为 27.27%, 占比最少的是杉木人工林, 为 19.15%; 聚集木占比最多的是鹅掌楸林, 为 25.88%, 杉木林占比最少。

各林分大小比数等级林木比例整体上比较接近, 林分中不同优势度等级个体比例均接近 20%。但

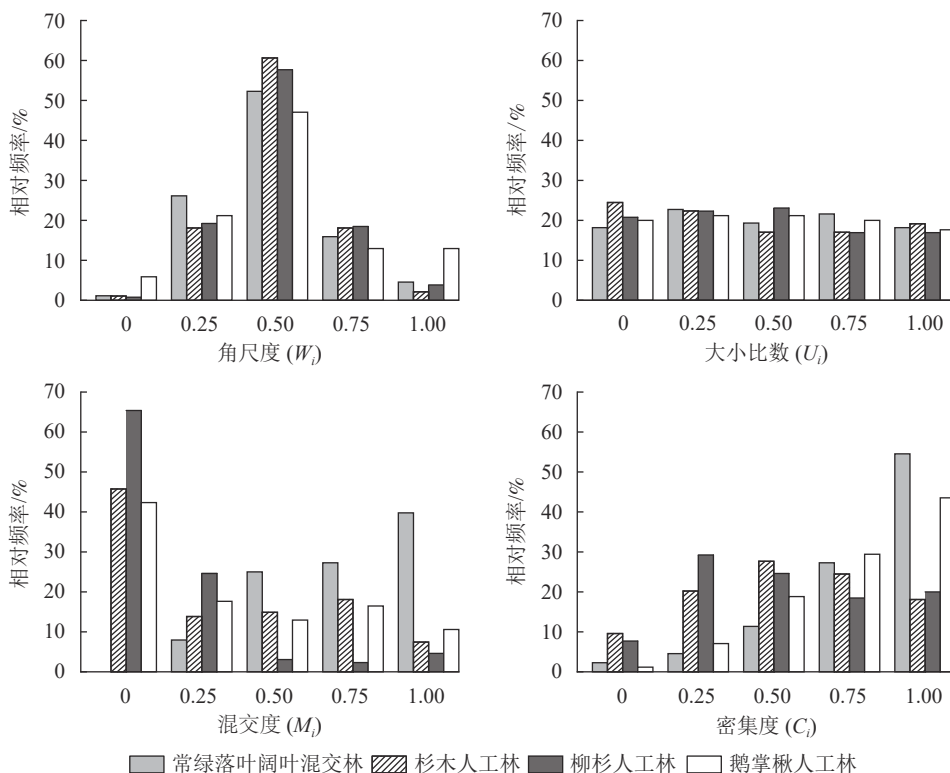


图 1 结构参数一元分布图

Figure 1 Unary distribution of structural parameters

5 种林分间存在一定差异，杉木人工林优势木 ($U_i=0.00$) 比例显著高于其他林分，达 24.47%，而杉木人工林的绝对劣势木 ($U_i=1.00$) 也拥有最高的占比。4 种林分类型中处于亚优势等级 ($U_i=0.25$) 的林木个体数量比例最为接近。

柳杉人工林中主要以目标树与 4 株同种伴生 ($M_i=0.00$, 65.38%) 和伴生有 1 种不同种林木 ($M_i=0.25$, 24.62%) 的林木为主，其余混交状况林木相对较少，说明林分整体混交程度低。柳杉人工林、鹅掌楸人工林和杉木人工林中同样也是以同种组成的空间结构单元为主，混交程度低的林木 ($M_i=0.00$ 、0.25) 分别占对应林分总株数的 90.00%、60.00% 和 59.57%，其余混交等级林木株数相对较少。常绿落叶阔叶混交林中 39.77% 的林木周围均为异种林木，混交较好林木 ($M_i=0.75$ 、1.00) 占总株数的 67.05%，林分混交度最高。

从林分整体密集度分布来看，常绿落叶阔叶混交林中林木处于非常密集 ($C_i=1.00$) 状态的林木比例最高，达 54.55%，其次是鹅掌楸人工林，这 2 种林分中处于很密集状态， $C_i=0.75$ 的林木占比分别达 27.27% 和 29.41%。在稀疏状态以下 ($C_i=0$ 、0.25) 的林木比例都很低，分别仅为 6.82% 和 8.24%。柳杉人工林中处于稀疏状态 ($C_i=0.25$) 的林木比例最高，达 29.23%。杉木人工林中处于非常密集 ($C_i=1.00$) 状态的林木比例最低，仅为 18.09%，而在非常稀疏 ($C_i=0.00$) 状态下的林木比例最高，为 9.57%。

3.3 林分结构状态综合评价

从表 6 可见：经过正向化处理后的 4 个结构参数范围更大，最大值可以达 1.00，最小值因结构参数不同而不同。角尺度最小值与处理前相同，出现在常绿落叶阔叶混交林中；大小比数最小值为 0；密集度最小值为 0.25，出现在鹅掌楸人工林中；混交度最小值为 0，出现在杉木人工林中。

将所调查样地正向化处理后的结构参数用单位圆展示，林分优劣程度则可以用 F_{SS} 和单位圆面积大小 ($S=\pi F_{SS}$) 直接评定 (图 2)。本研究中单位圆面积前 3 位样地依次是：鹅掌楸人工林 11 号样地 ($S=2.474$)，常绿落叶阔叶混交林 1 号样地 ($S=2.452$)，柳杉林人工林 9 号样地 ($S=2.032$)；面积最小的是鹅掌楸人工林 12 号样地 ($S=0.261$)，该样地内曾有过严重的人为砍伐，林木个体稀疏，结构遭到一定破坏。常绿落叶阔叶混交林 2、3 号样地及柳杉人工林 8 号样地的林木生长优势不明显；杉木人工林 4、5 号样地，柳杉人工林 7、9 号样地，鹅掌楸人工林 10、11 号样地的林分整体具有较好的生长势。常绿

表6 林分结构状态综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of stand structure status

样地编号	林分空间结构参数均值/正向处理结果				综合评价指数(F_{SS})	单位圆面积(S)
	\bar{W}/R_1	\bar{U}/R_2	\bar{M}/R_3	\bar{C}/R_4		
1	0.481/1.000	0.481/0.750	0.750/0.750	0.963/1.000	0.781	2.452
2	0.455/0.455	0.509/0.500	0.741/0.741	0.912/1.000	0.502	1.576
3	0.530/0.500	0.500/0.500	0.750/0.750	0.947/1.000	0.516	1.620
天然林	0.489	0.497	0.747	0.941	0.600	1.884
4	0.478/1.000	0.457/1.000	0/0	0.533/0.750	0.641	2.013
5	0.491/1.000	0.420/1.000	0.473/0.473	0.347/0.500	0.618	1.941
6	0.529/0.500	0.488/0.750	0.390/0.390	0.791/1.000	0.491	1.542
7	0.506/1.000	0.466/1.000	0.023/0.023	0.615/0.750	0.641	2.013
8	0.524/0.500	0.497/0.500	0.208/0.208	0.573/0.750	0.276	0.867
9	0.482/1.000	0.321/1.000	0.161/0.161	0.500/0.750	0.647	2.032
10	0.469/0.469	0.430/1.000	0.375/0.375	0.625/1.000	0.590	1.853
11	0.500/1.000	0.417/1.000	0.767/0.767	0.733/0.750	0.788	2.474
12	0.592/0.500	0.559/0.000	0.138/0.138	0.901/0.250	0.083	0.261
人工林	0.508	0.451	0.282	0.624	0.531	1.667

落叶阔叶混交林 1、2、3 号样地林木对空间利用很充分，而对于人工同龄林而言，杉木人工林 6 号样地及鹅掌楸人工林 10 号样地的林分中大部分林木空间被利用充分，但还有一定潜在可利用空间，有利于林木生长。各林分类型 F_{SS} 从大到小依次为常绿落叶阔叶混交林 (0.600)、杉木人工林 (0.583)、柳杉人工林 (0.521)、鹅掌楸人工林 (0.487)，表明常绿落叶阔叶混交林有较好的林分结构状态，综合评价效果优于其余 3 种林分类型。从林分起源来看，常绿落叶阔叶混交林的整体结构状态优于人工林。综合来看，常绿落叶阔叶混交林中林木树种组成丰富，混交程度明显高于各类型人工林，且林冠层连续覆盖，空间资源利用效率明显高于人工林。

4 讨论

4.1 不同林分类型零元及一元分布结构特征

群落的空间结构特征与群落的演替阶段密切相关。群落处于演替顶级阶段时，林分趋向于较高的混交等级，空间分布呈现随机格局，物种通过竞争占据着多样化的生态位，资源利用充分有效^[26-27]。本研究常绿落叶阔叶混交林、杉木人工林和柳杉人工林林木水平分布格局均为随机分布。鹅掌楸人工林整体呈轻微聚集分布，这可能是由于种源扩散限制植物种群早期易形成同种聚集的分布形式，亦或是人为干扰后树木死亡造成的较大林隙导致林分格局的转变，但随机分布是树木生长竞争、林分演替适应环境异质性的结果^[28]。研究发现：杉木人工林、柳杉人工林和鹅掌楸人工林林木虽处于相对优势状态，但林分混交度显著低于常绿落叶阔叶混交林，这也是人工造林树种单一、空间结构较简单的突出体现。张连金等^[29]对北京九龙山侧柏 *Platycladus orientalis* 人工林研究也发现：处于演替早期阶段的林分混交度低、大小分化不明显且呈均匀分布状态，与本研究结果类似。杉木人工林、柳杉人工林与鹅掌楸人工林密集程度均小于常绿落叶阔叶混交林，说明在常绿落叶阔叶混交天然林中林分整体对空间资源的利用很充分。鹅掌楸人工林由于冠幅较大，所以树木也处于相对拥挤状态，但还未充分利用空间资源。杉木、柳杉的自身特性是冠幅较小，部分样地的林木栽植密度较高，所以冠层连接较紧密，空间利用资源较为充分。林木对空间的利用是动态变化的。随着林分生长和演替变化，林木高度、各层林木数量和高度逐渐调整，垂直空间利用率也发生变化。在天然林生长过程中，林分空间结构和空间利用发生动态变化，达到一定密度范围后生长量受到抑制，在有限的空间内将逐渐被“合理布置”^[30]，因此在常绿落叶阔叶混交林中林木整体处于中庸状态，表明林木个体对空间资源的占有程度比较一致，处于健康稳定的生长过程中。

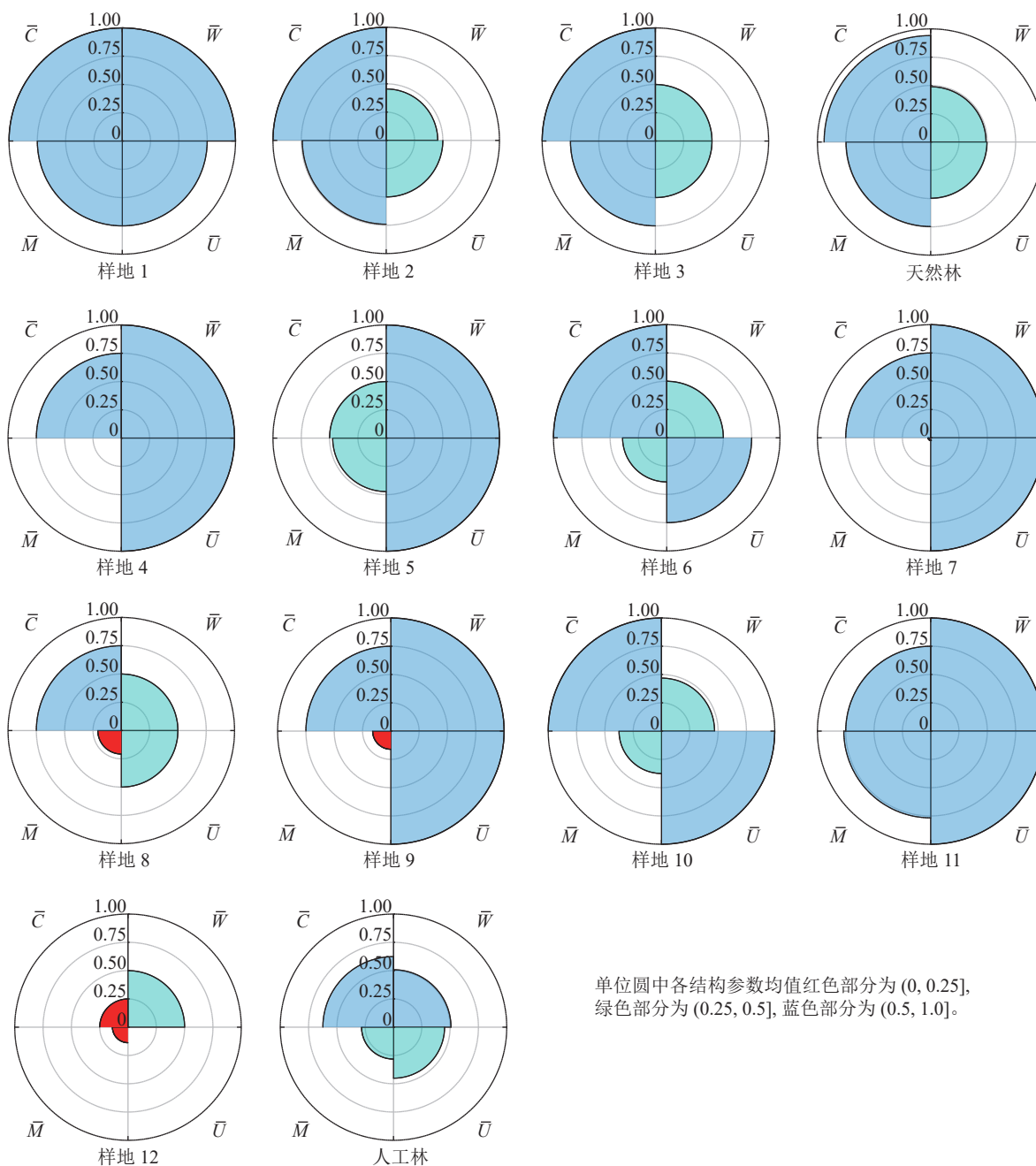


图 2 林分空间结构状态单位圆
Figure 2 Unit circle of forest stand spatial structure

4.2 不同林分类型结构状态综合评价

在以往的研究中，林分状态综合评价结果采用列表与文字表达，如层次分析法^[31]、随机森林、多目标决策法^[32]等基于统计学的综合评价法在定性或定量评价森林可持续性、经营措施、森林火灾等方面发挥了重要作用，但这些方法存在评价指标不够客观，评价方法主观性强，指标权重计算复杂等不足，最终导致评价结果缺乏直观可比性和决策可视化^[33]。本研究将调查样地的正向化处理结构参数用单位圆可视化表达，直观地展现了指标参数的数量关系与林分优劣程度。常陈豪等^[34]用林分状态单位圆分析比较了不同间伐强度对信阳市商城县黄柏山林场黄山松 *Pinus taiwanensis* 人工林林分状态的影响，客观呈现了间伐后各个林分的优劣程度。本研究中鹅掌楸人工林 11 号样地和常绿落叶阔叶混交林 1 号样地单位圆面积最大，各项指标参数相对饱满，林分结构状态良好，其余样地单位圆面积相对较小。结构参数的最小影响因子决定了整体的优劣^[35]。根据利比希最小因子定律可对部分林分提出结构优化建议。金子山国有林场中杉木人工林 (4 号样地)、柳杉人工林 (7、9 号样地) 结构状态相对良好，但混交度较差，是

林分健康稳定的短板,可适当补植乡土树种、珍贵阔叶树种,增加多样性;鹅掌楸人工林12号样地林分结构最差,树种组成单一,林木整体生长处于劣势,且呈现聚集、拥挤的生长状态,因此需要多措并举提升林分状态均衡性,包括调整林分密度、水平分布格局、单株择伐等。赵文菲等^[36]对湖南平江县芦头实验林场杉木公益林采用结构方程模型进行了林分空间结构综合评价,发现杉木公益林整体处于随机及近似随机分布状态,树种混交程度低,林分中等程度拥挤,透光率一般,与本研究结论相似。常绿落叶阔叶混交林表现出较好的林分结构状态,这主要是因为天然常绿落叶阔叶混交林物种繁多,组成复杂,林分层次丰富,对空间利用率高,林分结构稳定,在保持生态平衡、发挥森林功能效益方面要强于同龄纯林尤其是针叶林^[37]。综上所述,林分结构优化可参照单位圆各结构参数大小,依次制订经营策略,促进林分均衡发展。但本研究仅对林分结构状态评价进行了有限的研究,多指标体系的完善及权重分析需要不断探索和完善,需根据具体的评价对象选择合适的综合评价方法。此外,研究地点、样地质量、样地数量等因素的局限性,会对研究结果产生一定影响。

5 结论

本研究结果直观展现了现实林分状态的优劣以及各指标的好坏程度。从林分起源来看,金子山国有林场的天然林整体结构状态优于人工林。4种典型林分中常绿落叶阔叶混交林结构状态良好,林木随机分布,生长稳定,树种混交良好,树冠连续覆盖,空间利用充分,整体优于其余3种人工林。对人工林或结构较差的林分,如鹅掌楸人工林,大多混交度较低,林木呈微聚集分布,因此可适当抚育间伐,补植乡土树种,增加物种多样性,优化林分结构,促进人工林生态系统的健康稳定。对天然林林分应健全经营保护管理体系,可参照顶级演替的天然林林分结构,合理调整林分结构,以精准提升林分质量。

6 参考文献

- [1] AMPOORTER E, BARBARO L, JACTEL H, *et al.* Tree diversity is key for promoting the diversity and abundance of forest-associated taxa in Europe [J]. *Oikos*, 2020, **129**(2): 133 – 146.
- [2] FORRESTER D I, BAUHUS J. A review of processes behind diversity-productivity relationships in forests [J]. *Current Forestry Reports*, 2016, **2**(1): 45 – 61.
- [3] AUSSENAC R, BERGERON Y, GRAVEL D, *et al.* Interactions among trees: a key element in the stabilising effect of species diversity on forest growth [J]. *Functional Ecology*, 2019, **33**(2): 360 – 367.
- [4] 谢阳生, 孟京辉, 曾冀, 等. 马尾松人工纯林近自然化改造效果分析[J]. *林业科学研究*, 2023, **36**(2): 31 – 38.
XIE Yangsheng, MENG Jinghui, ZENG Ji, *et al.* Analysis on the effect of close-to-nature transformation of *Pinus massoniana* pure forest plantation [J]. *Forest Research*, 2023, **36**(2): 31 – 38.
- [5] 惠刚盈, 张弓乔, 赵中华, 等. 天然混交林最优林分状态的 π 值法则[J]. *林业科学*, 2016, **52**(5): 1 – 8.
HUI Gangying, ZHANG Gongqiao, ZHAO Zhonghua, *et al.* A new rule of π value of natural mixed forest optimal stand state [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, **52**(5): 1 – 8.
- [6] 惠刚盈, GADOW K V, 赵中华, 等. 结构化森林经营原理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016: 23 – 28.
HUI Gangying, GADOW K V, ZHAO Zhonghua, *et al.* *Principles of Structure-based Forest Management* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016: 23 – 28.
- [7] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波, 等. 基于结构参数均值的林分空间结构综合评价研究[J]. *林业科学研究*, 2023, **36**(2): 12 – 21.
HUI Gangying, ZHAO Zhonghua, HU Yanbo, *et al.* Comprehensive evaluation of forest spatial structure based on the mean values of structural parameters [J]. *Forest Research*, 2023, **36**(2): 12 – 21.
- [8] 杜超群, 吴昊, 袁慧, 等. 湖北主要造林树种生态区划研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2023, **43**(6): 1 – 7.
DU Chaoqun, WU Hao, YUAN Hui, *et al.* Study on ecological regionalization of main afforestation species in Hubei Province [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2023, **43**(6): 1 – 7.
- [9] 汤景明, 宋丛文, 戴均华, 等. 湖北省主要造林树种冰雪灾害调查[J]. *林业科学*, 2008, **44**(11): 2 – 10.
TANG Jingming, SONG Congwen, DAI Junhua, *et al.* Investigation on the frozen snow damage of main afforestation tree species in Hubei Province [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, **44**(11): 2 – 10.
- [10] 孙拥康, 汤景明, 王怡. 亚热带日本落叶松人工林枯落物及土壤层水文效应[J]. *北京林业大学学报*, 2021, **43**(8): 60 –

- 69.
- SUN Yongkang, TANG Jingming, WANG Yi. Hydrological effects of litter and soil layers of *Larix kaempferi* plantation in subtropical regions [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, **43**(8): 60 – 69.
- [11] 王志鸣, 郭秋菊, 艾训儒, 等. 恩施州不同海拔马尾松天然次生林林分结构特征研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2019, **39**(1): 114 – 122.
- WANG Zhiming, GUO Qiuju, AI Xunru, *et al.* Structure characteristics of *Pinus massoniana* natural secondary forest at different altitude of Enshi [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2019, **39**(1): 114 – 122.
- [12] 向钦, 郭秋菊, 艾训儒, 等. 林分空间结构与物种多样性随空间尺度变化的规律研究[J]. *林业科学研究*, 2022, **35**(3): 151 – 160.
- XIANG Qin, GUO Qiuju, AI Xunru, *et al.* Variations on stand spatial structure and species diversity in different spatial scales [J]. *Forest Research*, 2022, **35**(3): 151 – 160.
- [13] 薛卫星, 郭秋菊, 艾训儒, 等. 鄂西南天然林主要乔木树种物种组成及林分空间结构动态变化研究[J]. *西北植物学报*, 2021, **41**(6): 1051 – 1061.
- XUE Weixing, GUO Qiuju, AI Xunru, *et al.* Study on the dynamic changes of main tree species composition and stand spatial structure of natural forest in southwest Hubei [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(6): 1051 – 1061.
- [14] 向钦, 郭秋菊, 艾训儒, 等. 木林子天然林林分结构的时间动态变化特征[J]. *森林与环境学报*, 2022, **42**(6): 576 – 584.
- XIANG Qin, GUO Qiuju, AI Xunru, *et al.* Temporal dynamic characteristics of stand structure of natural forest in Mulinzhi Nature Reserve [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2022, **42**(6): 576 – 584.
- [15] 夏言, 谢杰东, 何开明, 等. 鄂西南鹅掌楸天然林林分结构特征[J]. *湖北林业科技*, 2023, **52**(2): 1 – 8.
- XIA Yan, XIE Jiedong, HE Kaiming, *et al.* Structural characteristics of *Liriodendron chinense* natural forest in southwest China [J]. *Hubei Forestry Science and Technology*, 2023, **52**(2): 1 – 8.
- [16] 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 Gangying. Studies on the application of stand spatial structure parameters based on the relationship of neighborhood trees [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, **35**(4): 1 – 9.
- [17] ZHANG Lianjin, HUI Gangying, HU Yanbo, *et al.* Spatial structural characteristics of forests dominated by *Pinus tabulaeformis* Carr. [J]. *PLoS One*, 2018, **13**(4): 1 – 13.
- [18] ZHANG Gongqiao, HUI Gangying, ZHAO Zhonghua, *et al.* Composition of basal area in natural forests based on the uniform angle index [J]. *Ecological Informatics*, 2018, **45**(3): 1 – 8.
- [19] 惠刚盈. 结构化森林经营理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- HUI Gangying. *Theory and Practice of Structure-based Forest Management* [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [20] 惠刚盈, GADOW K V, ALBERT M. 一个新的林分空间结构参数——大小比数[J]. *林业科学研究*, 1999, **12**(1): 4 – 9.
- HUI Gangying, GADOW K V, ALBERT M. A new parameter for stand spatial structure: neighbourhood comparison [J]. *Forest Research*, 1999, **12**(1): 4 – 9.
- [21] 惠刚盈, 胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究[J]. *林业科学研究*, 2001, **14**(1): 23 – 27.
- HUI Gangying, HU Yanbo. Measuring species spatial isolation in mixed forests [J]. *Forest Research*, 2001, **14**(1): 23 – 27.
- [22] 胡艳波, 惠刚盈. 基于相邻木关系的林木密集程度表达方式研究[J]. *北京林业大学学报*, 2015, **37**(9): 1 – 8.
- HU Yanbo, HUI Gangying. How to describe the crowding degree of trees based on the relationship of neighboring trees [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, **37**(9): 1 – 8.
- [23] 张岗岗, 刘瑞红, 惠刚盈, 等. 林分空间结构参数N元分布及其诠释——以小陇山锐齿栎天然混交林为例[J]. *北京林业大学学报*, 2019, **41**(4): 21 – 31.
- ZHANG Ganggang, LIU Ruihong, HUI Gangying, *et al.* N-variate distribution and its annotation on forest spatial structural parameters: a case study of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural mixed forest in Xiaolong Mountains, Gansu Province of northwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, **41**(4): 21 – 31.
- [24] 李远发. 林分空间结构参数二元分布的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- LI Yuanfa. *The Bivariate Distribution of Forest Stand Spatial Structural Parameters* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.

- [25] 魏红洋, 张一帆, 董灵波, 等. 帽儿山主要林分类型空间结构状态综合评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(10): 131 – 139.
WEI Hongyang, ZHANG Yifan, DONG Lingbo, *et al.* Comprehensive evaluation of spatial structure state for the main forest types in Maoershan Mountain [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(10): 131 – 139.
- [26] 袁星明, 朱宁华, 周光益, 等. 湘西喀斯特地区42年生湿地松-樟树人工混交林空间结构研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(4): 49 – 58.
YUAN Xingming, ZHU Ninghua, ZHOU Guangyi, *et al.* Spatial structure of the 42-year-old *Pinus elliottii*-*Cinnamomum camphora* mixed plantation in the karst area of western Hunan [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(4): 49 – 58.
- [27] 张会儒, 武纪成, 杨洪波, 等. 长白落叶松-云杉-冷杉混交林林分空间结构分析[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(3): 319 – 325.
ZHANG Huiru, WU Jicheng, YANG Hongbo, *et al.* Spatial structure of mixed larch-spruce-fir stands [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2009, 26(3): 319 – 325.
- [28] ARMESTO J J, MITCHELL J D, VILLAGRAN C. A comparison of spatial patterns of trees in some tropical and temperate forests [J]. *Biotropica*, 1986, 18(1): 1 – 11.
- [29] 张连金, 胡艳波, 赵中华, 等. 北京九龙山侧柏人工林空间结构多样性[J]. 生态学杂志, 2015, 34(1): 60 – 69.
ZHANG Lianjin, HU Yanbo, ZHAO Zhonghua, *et al.* Spatial structure diversity of *Platycladus orientalis* plantation in Beijing Jiulong Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(1): 60 – 69.
- [30] 玉宝. 兴安落叶松中幼龄天然林空间利用特征及影响因子[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(3): 407 – 415.
YU Bao. Characteristics and impact factors of space utilization of young and middle-aged natural *Larix gmelinii* forests [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2020, 37(3): 407 – 415.
- [31] MARIAN D, CIPRIAN P, MARIUS M. Benefit, cost and risk analysis on extending the forest roads network: a case study in Crasna Valley (Romania) [J]. *Annals of Forest Research*, 2015, 58(2): 333 – 345.
- [32] MENDOZA G A, PRABHU R. Multiple criteria decision making approaches to assessing forest sustainability using criteria and indicators: a case study [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 131(1/3): 107 – 126.
- [33] 张岗岗. 天然林结构解译及林分状态综合评价[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
ZHANG Ganggang. *Natural Forest Structure Interpretation and Forest State Comprehensive Evaluation* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020.
- [34] 常陈豪, 吕康婷, 周梦丽, 等. 间伐对黄山松人工林林分空间结构及稳定性的影响[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(6): 138 – 144.
CHANG Chenhao, LÜ Kangting, ZHOU Mengli, *et al.* Effects of thinning on the spatial structure and stability of *Pinus taiwanensis* plantations [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(6): 138 – 144.
- [35] HOOKER H D. Liebig's law of the minimum in relation to general biological problems [J]. *Science*, 1917, 46(1183): 197 – 204.
- [36] 赵文菲, 曹小玉, 谢政辑, 等. 基于结构方程模型的杉木公益林林分空间结构评价[J]. 林业科学, 2022, 58(8): 76 – 88.
ZHAO Wenfei, CAO Xiaoyu, XIE Zhengchang, *et al.* Evaluation of stand spatial structure of *Cunninghamia lanceolata* public welfare forest by using structural equation model [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(8): 76 – 88.
- [37] 唐守正, 刘世荣. 我国天然林保护与可持续经营[J]. 中国农业科技导报, 2000, 2(1): 42 – 46.
TANG Shouzheng, LIU Shirong. Conservation and sustainability of natural forests in China [J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2000, 2(1): 42 – 46.