

# 福建三明市金丝湾森林公园米槠林分空间结构分析

项 佳<sup>1,2</sup>, 杨素萍<sup>1,2</sup>, 刘 健<sup>1,2\*</sup>, 余坤勇<sup>1,2</sup>, 张今朝<sup>1,2</sup>, 郑文英<sup>1,2</sup>, 曾 琪<sup>1,2</sup>

(1. 福建农林大学 林学院,福建 福州 350002;2. 3S 技术与资源环境优化利用福建省高校重点实验室,福建 福州 350002)

**摘要:**林分空间结构特征是识别森林林分健康与稳定的重要信息。在福建三明市金丝湾森林公园米槠林设置并调查 5 个的标准样地,采用角尺度、混交度、大小比数、开阔比和竞争指数 5 个空间结构参数分析该森林公园米槠林林分空间结构特征,并结合乘除法对各个空间参数进行多目标规划,参考人工林近自然化改造的目标和技术指标将其划分为 5 个等级。结果表明,三明金丝湾森林公园米槠林林分平均角尺度为 0.526,整体上呈现聚集分布状态;林分平均混交度为 0.478,接近中度混交;林分平均大小比为 0.516,各样地平均大小比数较为接近,处于中庸向劣势的过渡阶段;林分平均开阔比为 0.277,处于遮挡状态,林分生长空间不足;林分竞争指数为 4.383,林木竞争压力较大;林分空间结构评价等级 2 级及以下的占到 60%。总体来看,研究区林分空间结构参数中混交度、开阔比与理想米槠林林分取值标准相差较大,建议以提高林分树种混交度、增加林分开敞度为今后的重点调整方向。

**关键词:**金丝湾森林公园;米槠林;空间结构

**中图分类号:**S756      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2017)05-0230-07

## Spatial Structure Analysis of *Castanopsis carlesii* Stand in Jinsiwan Forest Park of Sanming, Fujian

XIANG Jia<sup>1,2</sup>, YANG Su-ping<sup>1,2</sup>, LIU Jian<sup>1,2\*</sup>, YU Kun-yong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin-zhao<sup>1,2</sup>,  
ZHENG Wen-ying<sup>1,2</sup>, ZENG Qi<sup>1,2</sup>

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. University Key Laboratory for Geomatics Technology and Optimize Resources Utilization in Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350002, China)

**Abstract:** The stand spatial structure is important information to identify the forest health and stability. Five standard sampling plots were set in Jinsiwan Forest Park in Sanming of Fujian Province to analyze the spatial structures of *Castanopsis carlesii* forest by adopting 5 relative indices, such as uniform angle index, mingling degree, neighborhood comparison, competition index and open comparison. Multi-objective programming of the spatial parameters was carried out by combining the multiplication and division method. The forest was divided into five levels according to the objectives and technical indexes of the near-naturalization reconstruction of plantations. The results showed that the average angle index of *C. carlesii* forest was 0.526, and the average mingling degree was 0.478, which was close to the moderate mingling degree. The average neighborhood comparison was 0.516. The mean open area ratio was 0.277, which was in the occlusion state, and the growth space of the stands was not enough. The stand competition index was 4.383, and the forest competition pressure was relatively keen. Forests with sub-spatial structure evaluation level 2 or below accounted for 60%. Generally, gaps in mingle degree and open degree to preferable and actual state were large, and therefore, the key adjusting aspect for the park was to increase stand mingle degree and openness.

收稿日期:2016-11-29 修回日期:2016-12-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41401385);福建省高校产学研合作项目(2015N5010);教育厅科技计划项目(JA14126)。

作者简介:项 佳,女,硕士研究生,研究方向:3S 技术应用及资源监测。E-mail:1278164158@qq.com

\* 通信作者:刘 健,男,博士,教授,研究方向:3S 技术应用、资源监测与林业可持续经营。E-mail:fjliujian@126.com

**Key words:** Jinsiwan Forest Park; *Castanopsis carlesii* forest; spatial structure

随着近自然森林经营的兴起,涉及林木空间关系的林分空间结构特征越来越成为林业研究的重点。林分空间结构是指树木在林地的分布格局及其属性在空间上的排列方式,表达树种、林木大小、分布等空间关系<sup>[1]</sup>,决定了树木之间的竞争优势及其空间生态位,是森林生长变化的驱动力<sup>[2-3]</sup>,被普遍认为比非空间结构更为重要。林分空间结构是对林分发展过程的综合反映,表征森林某一阶段的演替特征,发育、保护好的顶级群落特征的林分空间结构研究可以为相似类型森林的经营优化提供决策依据<sup>[4]</sup>,天然次生林的空间结构研究对天然次生林的人工近自然经营具有重要意义。

米槠(*Castanopsis carlesii*)是我国亚热带地区典型的地带性植被,木质优良,生长速度快,用途广泛,具有很高的经济价值<sup>[5]</sup>。当前国内关于米槠林的研究多集中于林下土壤、群落结构特征以及生物量等方面<sup>[6-8]</sup>,而关于米槠林林分空间结构的研究多限于角尺度、混交度和大小比数3个最常见参数的分析,如钟兆全<sup>[9]</sup>利用这3个参数研究得出闽北天然米槠种群的空间分布格局总体呈聚集分布;刘益曦<sup>[10]</sup>利用这3个林分空间结构参数对浙江泰顺天然米槠林进行了分析,表明天然米槠林是一个树种较丰富,呈现强度混交、分布不均匀的复杂森林群落。林分空间结构分析和评价能更全面地为次生米槠林的经营调整提供空间结构参数的量化依据,但目前针对人为干扰后自然演替而来的次生米槠林林分空间结构等级的分析和评价较少,因此,对米槠林林分空间结构进行系统的分析和评价具有重要意义。金丝湾森林公园米槠林位于城市近郊,地理位置特殊,在净化空气、涵养水源、保持水土等方面发挥重要作用。但由于靠近市区人为干扰较大,加之在早期以经济效益为主的传统森林经营模式下林分受到不同程度的破坏,导致局部林分质量相对较差,防护效益较低,林龄结构不合理,这些方面对于其生态效益的发挥有较大影响。为了合理地经营次生米槠林,更好地保护和发展常绿阔叶林,因此需要对金丝湾森林公园现有的次生林进行改造来改善林分组成和提升林分质量。本研究通过分析福建三明金丝湾森林公园米槠林分林分空间结构特征,了解次生米槠林的林分现状及成因,以期为该地区次生米槠林的更新抚育和结构优化提供调整方向。

## 1 研究区概况

金丝湾森林公园位于福建省三明市北部的梅列

区陈大国有林场,117°33'9"-117°37'19"E,26°18'32"-26°20'44"N,地处闽西武夷山脉中部的低山丘陵区,地势由西北向东南倾斜,海拔在189~698 m之间,属中亚热带季风气候,冬短夏长,水热条件丰富,年均温为19.7°C,年均降水量1586.2 mm,年平均无霜期多达326 d,年平均日照时数为1811.8 h。地带性土壤为酸性岩红壤、黄壤、棕黄壤等,pH值一般在4.5~4.9之间。研究区现有林分以封山育林后形成的天然次生常绿阔叶林为主,属于南岭东部山地的常绿槠类阔叶林,优势树种为米槠,主要伴生树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、木荷(*Schima superba*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)等,少量分布泡桐(*Paulownia*)、油茶(*Camellia oleifera*)、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)、罗浮柿(*Diospyros morrisiana*)。

## 2 研究方法

### 2.1 样地调查

于2015年10月在金丝湾森林公园核心区优势树种为米槠林区,采用罗盘仪闭合法,设置5块代表标准样地(25.82 m×25.82 m),依次编号1~5,对5个样地内的立木空间结构进行调查。测量样地内胸径>5 cm和树高>5 m的所有林木,记录林木的种类、胸径、树高、健康情况及坐标位置等信息。并记录每个样地海拔、坡位、坡向和郁闭度等因子,具体统计结果见表1。

### 2.2 林分结构测算与评价

2.2.1 林分空间参数的计算 为了消除处于林分边缘树木系统的影响,研究设置2 m的缓冲区,缓冲区内的林木只以相邻木作处理,采用n=4组成的空间结构单元来分析研究区米槠林的空间结构特征,选取角尺度(W<sub>i</sub>)、混交度(M<sub>i</sub>)、大小比数(U<sub>i</sub>)、开阔比(OP<sub>i</sub>)、竞争指数(CI<sub>i</sub>)等参数分别从林木空间分布、树种隔离程度、林木大小分化程度、林木透光程度和林木竞争程度5个方面加以描述。计算公式见表2。

2.2.2 林分空间结构评价 为了更加全面科学地描述研究区内林分空间结构特征,采用乘除法对金丝湾森林公园次生米槠林林分混交、竞争、林分分布格局等方面空间结构参数进行多目标规划,结合前人的经验,构造林分空间结构评价综合指数,并参考曹小玉<sup>[15]</sup>等人对林分空间结构评价等级的划分,将林分空间结构评价指数的值划分为5个等级(表3)。

$$L(g) = \frac{(1+M_i) \cdot (1+OP_i)}{(1+U_i) \cdot (1+CI_i) \cdot (1+|0.5-W_i|)} \quad (1)$$

式中,  $L(g)$  表示林分空间结构的评价指数,  $M$ 、 $OP$ 、 $U$ 、 $CI$ 、 $W$  分别代表混交度、开阔比、大小比数、竞争指数和角尺度。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic situations of sampling plots

样地号	海拔 /m	坡位	坡向	密度 /(株·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 /cm	平均树高 /m	平均林龄 /a	郁闭度	灌木盖度 /%	草本盖度 /%
No. 1	278	上	南	1701	15.43	10.04	23	0.8	40.00	20.00
No. 2	285	上	北	1552	16.10	9.94	20	0.8	50.00	20.00
No. 3	210	下	东南	821	21.17	12.26	34	0.5	30.00	20.00
No. 4	260	中	东	1045	21.81	11.79	30	0.6	30.00	30.00
No. 5	290	上	东	1239	14.95	10.45	21	0.8	40.00	20.00

表 2 林分空间结构参数及其意义

Table 2 Stand spatial structure parameters and its meanings

空间参数	公式	备注
角尺度( $W_i$ )	$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_{ij}$	式中,当参照树 $i$ 与第 $j$ 株相邻木的夹角<标准角时, $Z_{ij}$ 为 1, 否则为 0; $W_i$ 取值可能为 0、0.25、0.5、0.75 和 1, 分别代表林木分布状态为绝对均匀、均匀、随机、不均匀和绝对不均匀 <sup>[11]</sup>
混交度( $M_i$ )	$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_{ij}$	式中,当参照树 $i$ 与第 $j$ 株相邻木为不同种时, $u_{ij}$ 为 1, 否则为 0; $n$ 为相邻木株数。 $M_i$ 的取值有 5 种: 0、0.25、0.5、0.75、1, 代表的林木混交程度分别是零度混交、弱度混交、中度混交、强度混交和极强度混交 <sup>[12]</sup>
大小比数( $U_i$ )	$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij}$	式中,如果参照树 $i$ 比第 $j$ 株相邻木小, $k_{ij}$ 为 1, 否则为 0。 $U_i$ 的取值状态有 5 种: 0、0.25、0.5、0.75、1, 分别代表林分大小的分化程度为优势、亚优势、中庸、劣势和绝对劣势 <sup>[13]</sup>
开阔比( $OP_i$ )	$OP_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{ij}$	式中, $t_{ij}$ 为开阔情况取值, 其定义为当参照树 $i$ 与相邻木 $j$ 的水平距离大于二者树高之差时(后者减前者), $t_{ij}=1$ , 否则为 0。 $OP_i$ 有 5 种取值 0、0.25、0.5、0.75 和 1, 对应的林木状态分别是完全遮挡、遮挡、中等开阔、开阔和非常开阔 <sup>[14]</sup>
竞争指数( $CI$ )	$CI_i = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i L_{ij}}$ $CI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CI_i$	式中, $CI_i$ 表示林木 $i$ 的单木点竞争指数, $CI$ 表示林分竞争指数, $d_j$ 为竞争木的胸径, $d_i$ 为参照树的胸径, $n$ 表示竞争木株数, $L_{ij}$ 代表竞争木 $j$ 和参照树 $i$ 之间的距离, $N$ 为林分内林木的总株数。 竞争指数越大, 林木受到相邻木给予的压力就越大, 在竞争中处于越不利的地位

表 3 米槠林林分空间结构评价等级划分

Table 3 Levels of stand spatial structure evaluation

评价指数值	特征描述	等级评价
$\leq 0.20$	实际林分空间结构参数与理想的取值标准相差较大, 树种混交程度低, 属于弱度混交或中度混交; 林木空间分布格局为非随机分布; 林木大小分化明显; 林木个体生长空间严重不足	1
$0.20 \sim 0.40$	少部分林分空间结果参数接近理想的取值标准, 树种混交程度较低, 属于中度混交或强度混交; 林木空间分布格局为非随机分布; 林木大小分化较明显; 林木个体生长空间不足	2
$0.40 \sim 0.60$	接近 1/2 左右的林分空间参数满足理想的取值标准, 树种混交程度良好, 属于强度混交; 林木空间分布格局接近随机分布; 林木大小分化较明显; 林木个体生长空间不足	3
$0.60 \sim 0.80$	大部分林分空间参数满足理想的取值标准, 树种的混交程度较高, 属于强度混交或极强度混交; 林木空间分布格局接近随机分布; 林木大小分化不明显; 林木个体生长空间较充足	4
$\geq 0.80$	林分空间结构参数基本满足理想的取值标准, 树种混交度高, 为强度混交或极强度混交; 林木空间分布格局为随机分布; 林木大小分化不明显; 林木个体生长空间充足	5

### 3 结果与分析

#### 3.1 林分空间结构分析

3.1.1 角尺度分析 角尺度通常用于判断林木的水平分布格局。由图 1 可知, 角尺度为 0 或 1 的林木比例不超过 12%, 其中 3 块样地绝对均匀比例为 0, 这说明在林分中绝对不均匀和绝对均匀的结构单元出现都较少。各样地平均角尺度分别为 0.526、0.481、0.571、0.530 和 0.544, 按照角尺度的均值判别方法判断, 平均角尺度在 0.475~0.517 就为聚集

分布, 除样地 2 以外都为聚集分布, 表现出研究区林木水平分布格局总体上不够合理。样地中随机分布的林木比例最高, 分别为 0.59、0.57、0.55、0.57 和 0.63, 说明研究区林分中随机分布的林木比例大于非随机分布的林木。样地 1、样地 3、样地 5 不均匀分布的林木比例略高于均匀分布的比例, 2 号和 4 号样地刚好相反。总体上看, 角尺度分布呈现正态分布的特征, 右侧不均匀林木比例略大于均匀林木比例, 虽然 59% 林木呈随机分布, 林分整体分布格局表现为聚集分布, 但聚集程度较低。

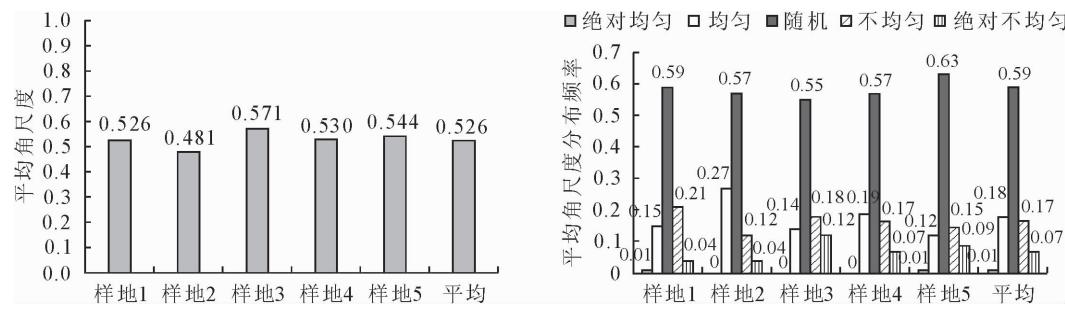


图1 各样地角尺度及分布频率

Fig. 1 The uniform angle index and its frequency distribution of stands

3.1.2 混交度分析 树种之间的空间隔离程度可以借助混交度分析。图2反映了5块样地的混交度平均值及其分布频率。各样地的混交度分别为0.521、0.578、0.219、0.440和0.522,中度混交和弱度混交比例较大。样地3混交度最低,属于弱度混交,其中处于零度混交的林木频率占到0.53,表明53%的林木近4株相邻木中都是同种树相伴,弱度混交的频率占0.24,表明24%的林木相邻木中仅有1株属不同种,原因可能是样地3同种林木间多呈聚集分布有关。样地2混交度最高,平均混交度为0.578,其中40%的林木处于极强度混交和强度混交,中度混交和弱度混交的林木频率各占30%,没有零度混交的林木,即样地2的空间结构单元中,至少存在2种以上的树木。样地1、样地4和样地5中处于极强度和强度混交的比例均在35%以上,处于零度混交的比例为14%、31%和18%,所以致使

样地平均混交度降到中度混交的程度上。与井冈山国家自然保护区<sup>[16]</sup>相比,林木空间分布和林木大小分化程度结构类似,但是混交度远低,这样的空间结构不利于平衡树种之间的协调关系,不利于维持群落的可持续发展。

3.1.3 大小比数分析 大小比数以胸径为比较指标,反映样地内参照树和相邻木个体之间的竞争关系。从图3可以看出,各样地平均大小比数分别为0.515、0.545、0.495、0.488、0.518,都接近中庸状态,其中样地1、样地2、样地3处于由中庸向劣势过渡的阶段,说明该米槠林的主要树种总体上大小分化存在着较大的差异。各样地都是两端的优势和劣势比例较大,林木处于中庸状态的比例在0.14~0.18,大小比呈现出两端稍高,中间稍低的分布状态,正是分布频率的两极分化才使平均大小比数接近中庸。

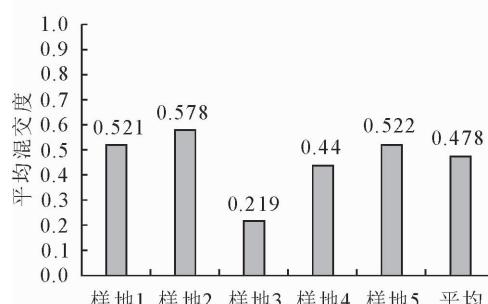


图2 各样地混交度及频率分布

Fig. 2 The frequency distribution of mingling degree of each standard plot

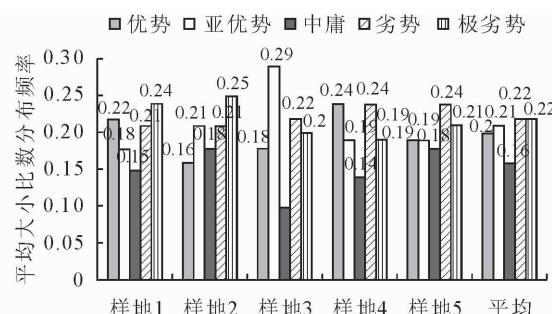
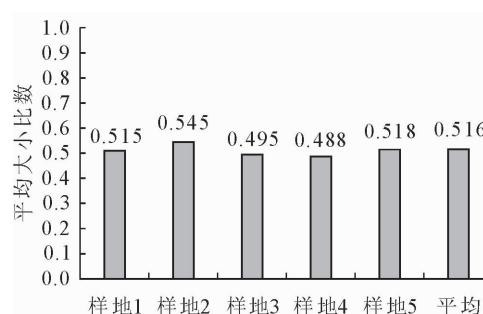


图3 各样地平均大小比数及分布频率

Fig. 3 The frequency distribution of neighborhood comparison of each standard plot

3.1.4 开阔比分析 开阔比表示林下光照受相邻木高度和密度的影响程度,通常用来描述林木个体生长空间大小。由图 4 可以看出,该次生米槠林开阔比的平均值为 0.277,5 个样地的平均开阔比全部属于遮挡、完全遮挡状态。从全林分的开阔比分布

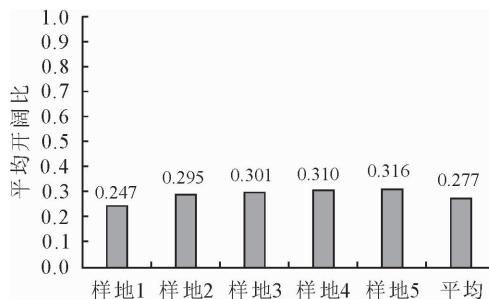


图 4 各样地平均开阔比及分布频率

Fig. 4 The frequency distribution of open ratio of each standard plot

3.1.5 竞争指数分析 竞争指数是指参照数承受相邻木的竞争压力。图 5 表明全林分平均竞争指数为 4.383,并分析了 5 个样地的平均竞争指数,分别为样地 5>样地 2>样地 3>样地 1>样地 4,按照竞争指数的定义,竞争指数越大,在竞争中越处于不利地位。从不同树种的竞争指数来看,林分主要树种竞争指数排序为木荷>罗浮柿>油茶>杉木>苦槠>米槠>泡桐>南酸枣>马尾松。马尾松竞争指数

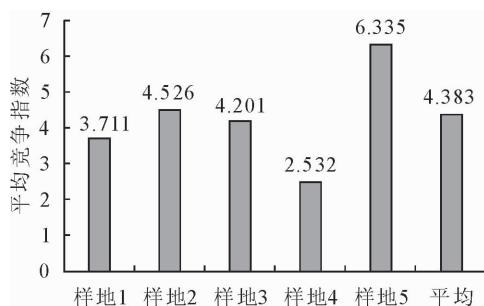


图 5 各样地及树种平均竞争指数

Fig. 5 The competition index of each standard plot and each tree species

### 3.2 林分空间结构评价

根据归一化后各林分评价指数值分布结果(图 6),样地 2、样地 3、和样地 5 林分空间结构评价指数值分别为 0.356、0.319 和 0.343,评价等级属于 2 级,说明只有少部分林分空间结果参数接近理想的取值标准,树种混交程度较低,属于弱度混交或中度混交状态,林分空间分布格局为聚集分布,大小分化差异明显,林分处于遮挡状态,竞争指数过大,个体树木竞争压力大。样地 1 和样地 4 评价等级属于 3 级,接近 1/2 左右的林分空间参数满足理想的取值标准,中度混交,大小比数呈中庸状态,属于聚集但

频率可以看出,全林分处于完全遮挡和遮挡状态下的比例占到了 66%,开阔状态以上的林木比例仅有 15%,说明林分受遮挡情况较严重,林木的生长空间不充足。

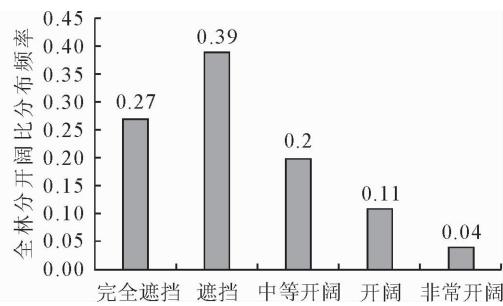


图 4 各样地平均开阔比及分布频率

Fig. 4 The frequency distribution of open ratio of each standard plot

最小,竞争力越大,这和马尾松胸径较大有关。作为林分主要树种的米槠,其竞争力也较小,属于林分优势树种。木荷竞争指数最大,在竞争中处于最不利的地位,这和木荷的林窗分布喜性有关,胸径不占竞争优势,相邻木相距较近,容易受到相邻木的压迫。杉木竞争指数也较大,可能主要与部分杉木呈聚集分布有关,外业调查中同样发现许多杉木处于濒死、枯死状态,长期林分演替过程中将逐渐被淘汰。

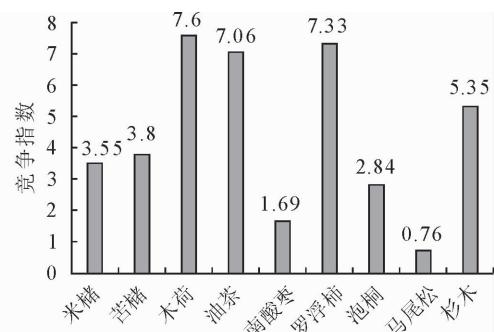


图 5 各样地及树种平均竞争指数

Fig. 5 The competition index of each standard plot and each tree species

偏随机的分布状态,竞争指数偏小,个体林木生长空间较充足。其中样地 4 评价指数为 0.482,在全林分中指数最高,这可能和样地 4 林分蓄积量大有关,且样地 4 属于聚集偏随机状态,树种混交度较低,米槠数量占总数比例较大,林分竞争主要是来自米槠林的种内竞争有关,竞争指数小,林木个体生长空间充足有很大关系。总体来看,5 个样地中 2 级及以下的占到 60%,4 级以上的为 0,说明金丝湾森林公园次生米槠林与理想的空间结构相差较大。林分空间结构评价等级较高的 4 号样地与游晓庆<sup>[17]</sup>等研究的闽楠天然次生林相比,树种混交度明显较差。

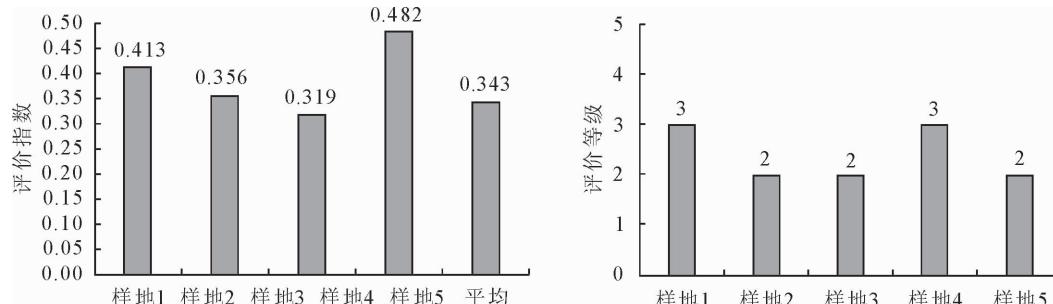


图6 空间结构评价指数和评价等级

Fig. 6 The index and level of stand spatial structure evaluation

## 4 结论与讨论

研究区为亚热带典型国有林场人为干扰后经长期封山育林形成的天然次生米槠林,其平均角尺度为0.526,整体上呈现聚集分布状态,树种水平分布格局不合理,这与闫淑君<sup>[18]</sup>、钟兆全<sup>[19]</sup>等对武夷山和闽北米槠林空间分布格局研究结论相一致;平均混交度为0.48,接近中度混交,远低于浙江泰顺天然米槠林( $M=0.75$ )<sup>[10]</sup>,可能和米槠为优势树种,生长速度快,具有较强的竞争优势,占据了林分中有有限的空间和资源,阻碍了其他树种的生长有关;平均大小比数为0.52,林木分化属于中庸向劣态过渡状态,大小比值在各阶段的分布频率呈现明显的凹型,表明林木胸径两极化分布,林木个体的生长容易受到相邻树种的影响和压迫,与孟楚<sup>[20]</sup>等关于福建三明马尾松天然林的大小比数研究结果类似,林分空间结构同样处于不稳定的状态;开阔比数越高,参照木越不会受到相邻木遮挡,生长空间更为充足,光环境状况更好,研究区平均开阔比为0.28,林木遮挡严重,虽相比三明市将乐林场常绿阔叶林<sup>[21]</sup>情况稍好,但林分中个体林木的生长能得到的空间和资源依旧不足,表明林分密度不合理是影响金丝湾森林公园米槠林稳定发展的重要因素;平均竞争指数为4.38,林分竞争压力较大,优势树种米槠竞争指数为3.55,以其密度和胸径占林分绝对优势而获得较好的竞争空间,符合汤孟平<sup>[22]</sup>对天目山常绿阔叶林空间结构研究中胸径越大,竞争指数越小的结论。因此可以根据这一特性,合理抚育研究区内已有树种,以调节林木竞争关系,例如对于竞争力强的马尾松,混交比例不宜过大,以免压抑其他主要树种;林分空间结构综合评价等级60%属于2级,100%属于3级及以下,说明经过几十年自然演替的金丝湾森林公园米槠林分空间结构距离理想的状态相差较远,需要人为辅助空间结构优化调整。总体来看,和福建其他地方的米槠天然林相比<sup>[23]</sup>,林分树种多样性明显不够,空间结构尚不理想,表现出处于较低的

演替阶段的属性特征。

调整优化森林空间结构是进行林分空间结构分析的最终目的。人为干扰是影响森林生态系统平衡、演替和稳定的重要因素,相关研究<sup>[24]</sup>发现中度的人为干扰更有利于合理的林分空间结构构建,建议结合5个空间参数和林分空间结构综合指数,参照深圳市羊台山森林公园的健康林分构建经验<sup>[25]</sup>,制定以混交度为主要调整目标的林分空间结构调整方案,以异龄混交林为调整的方向,提高林分混交度,把混交度为0、0.25、0.5以下的林木作为主要调整对象,采取适当的补植和择伐措施,追求随机分布的水平分布格局,同时针对全林分遮挡严重的状态,可以通过适当疏伐、修枝的方式进行调整,提高米槠林的林分质量,促进其林分的顺利演替。未来可以在对现有林分结构调整优化的基础上,综合更多的空间和非空间结构参数寻求接近天然次生米槠林的标准林分,为更大范围内的次生米槠林的林分结构调整提供参考。

## 参考文献:

- [1] 赵洋毅,王克勤,陈奇伯,等.西南亚热带典型天然常绿阔叶林的空间结构特征[J].西北植物学报,2012,32(1):187-192.  
ZHAO Y Y, WANG K Q, CHEN Q B, et al. Spatial structural characteristics of typical natural evergreen Broad-leaved forest features of southwest subtropical area, China[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 32(1): 187-192. (in Chinese)
- [2] 袁士云,张宋智,刘文桢,等.小陇山辽东栎次生林的结构特征和物种多样性[J].林业科学,2010,46(5):27-34.  
YUAN S Y, ZHANG S Z, LIU W Z, et al. Tree species diversity and structure characteristic of secondary forests of Quercus liaotungensis on Xiaolongshan [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(5): 27-34. (in Chinese)
- [3] ARNE POMMERENING. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 224(3): 266-277.
- [4] ROZAS V. Structural heterogeneity and tree spatial patterns in an old-growth deciduous lowland forest in Cantabria, Northern Spain[J]. Plant Ecology, 2006, 185(1): 57-72.
- [5] 宋育红,阮训清,李家和.格氏栲自然保护区米槠群落物种多样性

- 性研究[J]. 三明学院学报, 2005, 22(4): 411-415.
- SONG Y H, RUAN X Q, LI J H. Studies on species diversity of *Castanopsis carlesii* community in nature reserve of *Castanopsis* Kawakamii[J]. Journal of Sanming University, 2005, 22(4): 411-415. (in Chinese)
- [6] 万菁娟, 郭剑芬, 刘小飞, 等. 杉木和米槠凋落叶 DOM 对土壤碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(24): 8148-8154.
- WAN J J, GUO J F, LIU X F, et al. Effects of dissolved organic matter from *Cunninghamia lanceolata* and *Castanopsis carlesii* leaf litter on soil C mineralization[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): 8148-8154. (in Chinese)
- [7] 钟兆全. 闽北米槠天然次生林乔木层群落竞争关系分析[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2016, 17(5): 674-678.
- ZHONG Z Q. Analysis of community competition for tree layer of *Castanopsis carlesii* natural secondary forests in Northern Fujian[J]. Journal of Beihua University: Natural Science, 2016, 17(5): 674-678. (in Chinese)
- [8] 胡砚秋, 李文斌, 崔佳玉, 等. 亚热带常绿阔叶林优势种个体及生物量的点格局分析[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1066-1072.
- HU Y Q, LI W B, CUI J Y, et al. Spatial point patterns of dominant species by individual trees and biomass in a subtropical evergreen broadleaved forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 1066-1072. (in Chinese)
- [9] 钟兆全. 闽北天然米槠种群空间分布格局研究[J]. 森林工程, 2015, 31(3): 31-34.
- ZHONG Z Q. Study on the spatial distribution pattern of natural *Castanopsis carlesii* population in Northern Fujian[J]. Forest Engineering, 2015, 31(3): 31-34. (in Chinese)
- [10] 刘益曦, 刁军. 浙江天然常绿阔叶林空间结构特征分析[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4): 155-159.
- LIU Y X, DIAO J. Spatial structural characteristics of natural evergreen Broad-leaved forest of Zhejiang[J]. The Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(4): 155-159. (in Chinese)
- [11] 惠刚盈, GADOW K V, ALBERT M. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数[J]. 林业科学, 1999, 35(1): 37-42.
- HUI G Y, GADOW K V, ALBERT M. The neighbourhood pattern—a new structure parameter for describing distribution of forest tree position[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(1): 37-42. (in Chinese)
- [12] 安慧君. 阔叶红松林空间结构研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003.
- [13] 惠刚盈. 一个新的林分空间结构参数——大小比数[J]. 林业科学, 1999, 12(1): 1-6.
- HUI G Y. A new parameter for stand spatial structure neighbourhood comparison[J]. Forest Research, 1999, 12(10): 1-6. (in Chinese)
- [14] 罗耀华, 陈庆诚, 张鹏云. 兴隆山阴暗针叶林空间格局及其利用光能的对策[J]. 生态学报, 1984, 4(1): 12-22.
- [15] 曹小玉, 李际平, 封尧, 等. 杉木生态公益林林分空间结构分析及评价[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 37-48.
- CAO X Y, LI J P, FENG Y, et al. Analysis and evaluation of the stand spatial structure of *cunninghamia lanceolata* ecological forest[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(7): 37-48. (in Chinese)
- [16] 诸葛刚, 哀建国, 徐炯安, 等. 大荫山米槠林的群落物种多样性研究[J]. 西部林业科学, 2008, 37(2): 34-39.
- [17] 游晓庆, 彭诗涛, 郭孝玉, 等. 闽楠天然次生林林分空间结构研究[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(4): 661-667.
- YOU X Q, PENG S T, GUO X Y, et al. A study on the spatial structure of natural secondary *Phoebe bournei* forest[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2016, 38(4): 661-667. (in Chinese)
- [18] 同淑君, 洪伟, 吴承桢. 武夷山米槠林优势种群的竞争格局及动态模拟[J]. 福建林学院学报, 2002, 22(1): 1-3.
- YAN S J, HONG W, WU C Z. Competitive pattern and dynamics simulation of dominant population in *Castanopsis carlesii* forest in Wuyishan Mountains[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2002, 22(1): 1-3. (in Chinese)
- [19] 钟兆全. 闽北米槠天然次生林乔木层群落竞争关系分析[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2016, 17(5): 674-678.
- ZHONG Z Q. Analysis of community competition for tree layer of *Castanopsis carlesii* natural secondary forests in Northern Fujian[J]. Journal of Beihua University: Natural Science, 2016, 17(5): 674-678. (in Chinese)
- [20] 孟楚, 郑小贤. 福建三明马尾松天然林空间结构特征研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 181-186.
- MENG C, ZHENG X X. Spatial structural characteristics of *Pinus massoniana* natural forest[J]. The Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 181-186. (in Chinese)
- [21] 赵娜, 郑小贤. 福建三明拟赤杨混交林的空间结构[J]. 东北林业大学学报, 2014(1): 23-26.
- ZHAO N, ZHENG X X. Spatial structure of *Alniphyllum fortunei* mixed forest in Sanming, Fujian Province[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014(1): 23-26. (in Chinese)
- [22] 方国景. 天目山常绿阔叶林空间结构研究[D]. 临安: 浙江林学院, 2008.
- [23] 唐万鹏, 潘磊, 崔鸿侠, 等. 三峡库区马尾松天然林林分结构特征分析[J]. 林业科学研究, 2015, 28(5): 681-685.
- TANG W P, PAN L, CUI H X, et al. Analysis on structure characteristics of *Pinus massoniana* natural forest in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Forest Research, 2015, 28(5): 681-685. (in Chinese)
- [24] 郑宇, 郑怀舟. 人为干扰对福建建瓯常绿阔叶林空间结构的影响[J]. 闽江学院学报, 2008, 29(5): 113-119.
- ZHENG Y, ZHENG H Z. Effects of human disturbance on the special structure of the evergreen broad-leaved forest in Jianou City of Fujian Province[J]. Journal of Minjiang University, 2008, 29(5): 113-119. (in Chinese)
- [25] 王海军, 黄钰辉, 曾令海, 等. 深圳市阳台山森林公园健康林分构建技术研究[J]. 广东林业科技, 2013, 29(3): 43-48.