

黔中天龙山喀斯特次生林林分空间结构的量化与分析

胡刚^{1,2}, 张忠华^{1,2}, 程安云^{3,4}, 刘立斌^{3,4}, 吴洋洋^{3,4}, 倪健^{3,4,5,*}

(1. 广西师范学院 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001; 2. 广西师范学院 广西西江流域生态环境与一体化发展协同创新中心, 南宁 530001; 3. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 4. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100; 5. 浙江师范大学 化学与生命科学学院, 浙江 金华 321004)

摘要: 评估林分的空间结构可为研究森林现状与生长发育过程提供重要信息。在林分的动态过程监测和指导植被的恢复与重建等方面具有重要研究意义。本文利用混交度、大小比数、角尺度3个空间结构指数, 分析了黔中普定县天龙山喀斯特次生林2 hm² 森林固定样地的林分空间结构特征。结果表明, 天龙山喀斯特常绿阔叶混交林的混交度、大小比数和角尺度分别为0.737、0.498和0.516, 表明林分中林木种间处于高度混交状态, 树木胸径的大小分化程度差异较小, 并且树木处于轻度聚集分布状态。研究结果可为西南喀斯特地区天然次生林的空间结构优化以及植被的恢复与重建措施的制定提供参考。

关键词: 喀斯特; 次生林; 林分空间结构; 天龙山

中图分类号: Q94 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2017)01-0025-07 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2017.01.004

林分的空间结构是树木的空间格局及其属性在空间上的排列方式, 与树木的生长、林分的稳定性以及林分的改造和经营密切相关^[1-2]。林分的结构决定其功能, 维持林分结构的最佳状态是持续发挥森林生态系统多种功能的基本前提^[3]。掌握林分的空间结构特征, 有助于优化和调控其空间结构, 为模拟森林结构的动态变化、可持续发挥森林生态系统的多种功能以及指导植被的恢复与重建等方面具有重要意义。

林分空间结构包括树木种内和种间的空间关系, 主要表现为树种空间隔离程度、树木相对优势程度和空间分布格局。近年来, 一系列以相邻树木间的空间关系为基础的结构指数被广泛应用于量化和分析林分的空间结构^[3-5]。例如, 用于量化树木空间混交和隔离程度的混交度指数、量化树木相对大小分化程度的大小比数、量化树木水平空间分布的角尺度等。欧洲林学学者基于林分空间结构分析, 通过运用择伐等方法调控林分结构, 将生态效益低下的针叶纯林转变为生态功能多样的针阔

混交林^[6-7]。此外, 林分空间结构量化在树木生长、林分动态和森林演替的时空模拟方面提供重要的分析手段^[8-9]。由于林分空间结构研究的重要性, 有学者比较和解析了多尺度、多指数的林分空间结构分析方法, 对运用这些指数进行林分结构分析提出了诸多建议^[4]。我国学者在相关研究方面取得了丰硕成果, 例如, 惠刚盈等^[2,10-12]较早运用和优化了混交度、大小比数和角尺度等指数, 并对针阔混交林等林分类型进行空间结构分析, 提出了以空间结构优化为目标的森林经营理念; 汤孟平等^[3]利用基于GIS的森林空间结构分析方法, 评价了天目山常绿阔叶林和毛竹林的空间结构特征, 同时提出了基于空间结构指数的森林结构优化调控模型。迄今为止, 基于相邻木空间关系的林分结构分析主要针对国内外温带针阔混交林开展了较为丰富的研究, 为自然林和人工林的抚育、管理和经营以及以优化林分空间结构为基础的森林经营方案设计等提供了重要的科学依据。然而, 对于其他森林类型, 包括亚热带的喀斯特森林、南亚热带的人工林

收稿日期: 2016-10-08; 改回日期: 2016-11-18

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CB956704); 国家自然科学基金项目(31300351、31560132); 广西自然科学基金项目(2013GXNSFBA019085、2015GXNSFAA139086)。

第一作者简介: 胡刚(1981-), 男, 博士, 讲师, 从事植物生态学研究。E-mail: ahhugang@gmail.com。

* 通讯作者: 倪健(1968-), 男, 博士, 教授, 从事全球变化生态学和植被生态学研究。E-mail: nijian@vip.skleg.cn。

等林型,至今鲜见有相关研究报道。

喀斯特地貌区占据了全世界 14.8%的土地面积,我国西南地区的喀斯特景观面积达到 510 000 km²,占土地面积的 5.8%^[13]。喀斯特植被为典型的非地带性植被类型,由于生境脆弱,水土资源少且流失快,当干扰的强度、频度和持续时间超过一定的阈值时,群落极易发生逆向演替。近几十年来,人类活动的强烈干扰在很大程度上直接导致了喀斯特森林植被严重退化,出现了大面积分布的灌丛和草丛,甚至导致“寸草不生”的石漠化现象^[14]。因此,现存的喀斯特森林植被承载着预防石漠化、涵养水源、生物多样性保护、碳库等多项生态功能。近年来,国内学者针对西南喀斯特地区的植物群落组成与结构^[15]、物种多样性维持^[16]、群落演替^[14]、生态系统功能^[17]和植被恢复与重建^[18]等方面开展了一系列探索性研究工作,并取得了诸多可喜的成果,为认识、保护和恢复喀斯特植被奠定了重要的科学基础和依据。

位于北亚热带的贵州省普定县境内残存有典型的喀斯特次生常绿落叶阔叶混交林,为开展区域性喀斯特植物种群、群落和生态系统等层面的生态学研究提供了为数不多的珍贵“样本”。针对该植被类型,有学者在植物物种组成^[19]、植物功能性状^[20]和生物量结构^[21]等方面开展过积极的研究工作,而对于林分空间结构分析至今未见有报道。本文以普定县天龙山的次生常绿落叶阔叶混交林为研究对象,以 2 hm²(100 m×200 m)森林固定样地的群落学调查为数据来源,采用林学研究中常用的树木混交度、大小比数和角尺度 3 种空间结构指数进行林分空间结构的量化与分析,以期对喀斯特植被的抚育管理与恢复重建提供科学指导。

1 研究区概况

天龙山位于贵州普定县马官镇下坝村,地理坐标 26°14′40″N,105°45′45″E,海拔约 1 550 m,该山处于典型的高原型喀斯特地貌类型之中,土壤类型为黑色石灰土,土层浅薄,地面平均岩石裸露为 44.7%,土被不连续,山体极为陡峭,平均坡度为 31°。该地区属北亚热带季风湿润性气候,季风交替明显,全年气候温和,雨量充沛,日照少,无霜期长。年平均气温为 15.1℃,极端最高温 34.7℃,极端最低温 -11.1℃,无霜期达 289 d,雨量充沛,年平均降水量 1 390 mm^[20]。

由于天龙山长期以来有佛教寺庙存在且为村寨风水山,故森林植被保存相对较好,是具有代表性的北亚热带喀斯特次生常绿落叶阔叶混交林,林分平均高度 7 m,郁闭度约 0.75,以化香树(*Platycarya strobilacea*)、窄叶石栎(*Lithocarpus confinis*)、滇鼠刺(*Itea yunnanensis*)和安顺润楠(*Machilus cavaleriei*)等为林分优势种,常见乔木树种还有云贵鹅耳枥(*Carpinus pubescens*)、短萼海桐(*Pittosporum brevicalyx*)、猫乳(*Rhamnella franguloides*)等。灌木层以异叶鼠李(*Rhamnus heterophylla*)、倒卵叶旌节花(*Stachyurus obovatus*)、刺异叶花椒(*Zanthoxylum ovalifolium* var. *spinifolium*)、薄叶鼠李(*Rhamnus leptophylla*)等为主;草本层有大披针薹草(*Carex lanceolata*)、矛叶荩草(*Arthraxon lanceolatus*)、阔叶山麦冬(*Liriope platyphylla*)、十字薹草(*Carex cruciata*)、野雉尾金粉蕨(*Onychium japonicum*)和对马耳蕨(*Polystichum tsus-simense*)等。藤本植物主要有香花鸡血藤(*Millettia dielsiana*)、藤黄檀(*Dalbergia hancei*)、长柄地锦(*Parthenocissus feddei*)和常春藤(*Hedera nepalensis* var. *sinensis*)等。

2 研究方法

2.1 样地建立

为动态监测北亚热带的喀斯特次生林,于 2012 年使用全站仪在天龙山南坡建立 1 块 2 hm²(100 m×200 m)的森林固定样地,并将样地划分为 200 个 10 m×10 m 的样方,每个样方 4 角用 PVC 管标记。再将样方划分为 4 个 5 m×5 m 小样方,并以此小样方为基本测树单元,对所有胸径 DBH≥1 cm 的木本植物(包括乔木、灌木和藤本)个体进行挂牌编号。调查并记录每个小样方内挂牌植物的种名、个体相对坐标、胸径、树高、冠幅和生长状况等信息。同时,记录每个样方的海拔、坡度、坡向和岩石裸露率等环境指标。

2.2 数据分析

为分析天龙山次生林林分的空间结构特征,本研究中去除样地调查数据中的木本灌木和藤本植物后,采用混交度、大小比数和角尺度 3 种基于邻体树空间排列关系的结构指数对 22 种乔木树种和整个林分进行空间结构的量化与分析。

2.2.1 混交度

树木混交度(M_i)指参照树的邻体树中与参照树不属于同种的个体所占比例,是树木空间隔离程

度的体现,其公式为^[2]:

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (1)$$

式中 n 为参照树的总株数, v_{ij} 为离散性变量, 当参照树 i 与第 j 株邻体树非同种时 $v_{ij}=1$, 否则 $v_{ij}=0$ 。当考虑参照树周围的 4 株邻体树时, M_i 的取值有 5 种, 分别为 0.00、0.25、0.50、0.75 和 1.00。 M_i 取上述数值, 分别表示参照树 i 周围 4 株最近邻体树与参照树均为同种、3 株为同种、2 株为同种、1 株为同种和全部不为同种, 分别定性表征树木的混交程度为零度、弱度、中度、强度和极强度混交。

2.2.2 大小比数

大小比数 (U_i) 指胸径、树高或冠幅大于参照树的邻体树株数占全部邻体树的比例, 体现了树种间的大小分化程度, 其公式为^[2]:

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij} \quad (2)$$

式中 k_{ij} 为离散性变量, 如果邻体树 j 比参照树 i 小, $k_{ij}=0$, 否则 $k_{ij}=1$ 。当邻体树的数量设定为 4 时, U_i 取值有 5 种, 分别为 0.00、0.25、0.50、0.75 和 1.00。 U_i 取上述数值, 分别表示邻体树均比参照树小、1 株邻体树比参照树大、2 株邻体树比参照树大、3 株邻体树比参照树大以及 4 株邻体树均比参照树大, 分别定性表征树木的优势程度为优势、亚优势、中庸、劣势和绝对劣势。本研究选取胸径计测大小比数。

2.2.3 角尺度

角尺度 (W_i) 用于描述 n 株邻体树围绕参照树 i 的均匀性, 可用于分析树木的空间分布格局。任意 2 个邻接最近邻体树的夹角有两个, 小角设为 α , 把最近邻体树木均匀分布时的夹角设为标准角 α_0 , 则 W_i 被定义为 α 角小于标准角 α_0 的个数占所考察的 n 个夹角的比, 其公式为^[2]:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (3)$$

式中 n 为参照树的总株数, y_{ij} 为离散性变量, 当第 i 个 α 角小于标准角 α_0 时 $y_{ij}=1$, 否则 $y_{ij}=0$ 。当邻体树的数量设定为 4 时, W_i 同样取值有 5 种, 分别为 0.00、0.25、0.50、0.75 和 1.00。 W_i 取上述数值, 分别表示 4 个 α 角位于标准角 α_0 范围、1 个 α 角小于 α_0 、2 个 α 角小于 α_0 、3 个 α 角小于 α_0 和全部 4 个 α 角小于 α_0 , 可分别表征树木空间分布的均匀程度为高度均匀、均匀、随机、聚集和高度聚集。

如果选取位于样地边界处的树木为参照树, 会给上述空间结构分析结果带来误差。因此, 必须进行边缘校正, 即分析中去除样地边界附近的参照树^[4]。边缘校正的常用方法是在样地边界处设置一定距离的缓冲区, 本研究中设置 5 m 的缓冲区以消除边缘效应带来的数据分析误差。此外, 参照国内外相关研究的常规做法, 将参照树周围的最近邻体树数目设定为 4 株, 这样可更为合理地描述林分的空间结构特征^[4]。

3 结果与分析

3.1 树木的混交度

由表 1 可知, 天龙山喀斯特次生林处于零度 ($M_i=0$) 和弱度 ($M_i=0.25$) 混交水平的个体数很少, 处于中度 ($M_i=0.5$) 混交的个体占有较小比例, 多数个体处于强度 ($M_i=0.75$), 甚至极强度混交 ($M_i=1$) 水平。22 种乔木树种中, 除了窄叶石栎、云贵鹅耳枥和化香树的个体处于弱度以下混交水平 (约 15%) 外, 其他树种个体几乎均是处于中度混交

表 1 天龙山喀斯特次生林树种的混交度

Table 1 Mingling degrees of tree species in a karst secondary forest in Tianlong Mountain

树种	混交度 / %					
	0	0.25	0.5	0.75	1	\bar{M}
安顺润楠 <i>Machilus cavaleriei</i>	0.6	5.0	19.7	36.7	38.0	0.766
窄叶石栎 <i>Lithocarpus confinis</i>	2.9	11.3	23.6	36.1	26.1	0.678
朴树 <i>Celtis sinensis</i>	0.0	0.0	5.3	23.8	70.9	0.914
云贵鹅耳枥 <i>Carpinus pubescens</i>	2.4	10.1	21.3	32.7	33.5	0.712
滇鼠刺 <i>Itea yunnanensis</i>	2.0	5.9	14.5	35.7	41.9	0.774
山樱花 <i>Cerasus serrulata</i>	0.0	0.0	0.0	7.8	92.2	0.981
香叶树 <i>Lindera communis</i>	1.1	3.5	7.3	29.2	58.9	0.854
化香树 <i>Platycarya strobilacea</i>	4.8	16.6	25.8	29.9	22.8	0.624
枇杷 <i>Eriobotrya japonica</i>	0.0	0.0	0.0	35.2	64.8	0.912
山槐 <i>Albizia kalkora</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.000
小果润楠 <i>Machilus microcarpa</i>	0.0	0.0	0.0	19.0	81.0	0.953
短萼海桐 <i>Pittosporum brevicalyx</i>	0.0	1.4	5.9	27.5	65.2	0.891
刺楸 <i>Kalopanax septemlobus</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.000
猫乳 <i>Rhamnella franguloides</i>	0.0	0.0	1.8	13.3	85.0	0.958
猴樟 <i>Cinnamomum bodinieri</i>	0.0	0.0	0.0	15.4	84.6	0.961
川钓樟 <i>Lindera pulcherrima</i> var. <i>hemsleyana</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.000
大果冬青 <i>Ilex macrocarpa</i>	0.0	0.0	0.0	22.1	77.9	0.945
白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i>	0.0	0.0	6.4	10.6	83.0	0.941
香椿 <i>Toona sinensis</i>	0.0	0.0	0.0	15.5	84.5	0.961
野柿 <i>Diospyros kaki</i> var. <i>silvestris</i>	0.0	0.0	6.7	19.8	73.5	0.917
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.000
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.000

水平以上,包括安顺润楠、滇鼠刺、香叶树等优势或常见树种以及山槐、川钓樟和大果冬青等偶见树种个体。由树种个体的平均混交度指数也可看出,除了窄叶石栎和化香树的平均混交度指数处于中度和强度之间($\bar{M}=0.6$ 左右)外,大多数树种均是0.75以上。上述结果表明天龙山次生林树种个体的混交度水平很高,多数树种的周围邻体种不为同种。

天龙山次生林林分中,处于零度、弱度、中度、强度和极强度混交的株数分别占2.28%、8.75%、18.74%、32.39%和37.85%,平均混交度指数 \bar{M} 达到0.737(图1),表明处于强度和极强度混交的树种达到70%以上,导致林分整体上处于高度的混交水平。

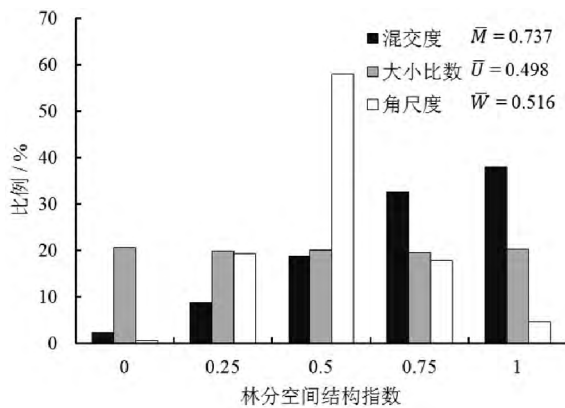


图1 天龙山喀斯特次生林林分的混交度、大小比数和角尺度频率分布

Fig.1 Frequency distribution of Mingling degree, Neighborhood comparison and uniform angle index of stand in a karst secondary forest in Tianlong Mountain

3.2 树木的大小比数

由基于胸径的大小比数计算结果可看出(表2),天龙山喀斯特次生林没有明显处于优势($U_i=0$)的树种,接近亚优势水平($U_i=0.25$)的树种包括窄叶石栎、云贵鹅耳枥和化香树等少部分林分的优势树种,接近中庸水平($U_i=0.5$)的树种个体占有较多比例,处于劣势($U_i=0.75$)和绝对劣势($U_i=0.1$)树种不多,仅包括盐肤木和短萼海桐等少数几种树种。

天龙山次生林林分中,处于优势、亚优势、中庸、劣势和绝对劣势的株数分别占20.5%、19.7%、20.0%、19.5%和20.2%,平均大小比数 \bar{U} 为0.498(图1),表明林分整体上处于中庸的优势水平,邻体树木间的胸径大小分化不明显。

表2 天龙山喀斯特次生林树种的大小比数
Table 2 Neighborhood comparisons of tree species in a karst secondary forest in Tianlong Mountain

树种	大小比数/%					
	0	0.25	0.5	0.75	1	\bar{U}
安顺润楠 <i>Machilus cavalieriei</i>	25.1	24.6	21.2	17.6	11.5	0.415
窄叶石栎 <i>Lithocarpus confinis</i>	24.4	23.4	16.9	18.9	16.4	0.318
朴树 <i>Celtis sinensis</i>	36.5	13.1	15.7	29.1	5.6	0.485
云贵鹅耳枥 <i>Carpinus pubescens</i>	25.7	23.7	24.1	20.6	6.0	0.319
滇鼠刺 <i>Itea yunnanensis</i>	14.3	28.4	23.6	9.1	24.6	0.413
山樱花 <i>Cerasus serrulata</i>	15.3	22.9	15.5	27.0	19.3	0.531
香叶树 <i>Lindera communis</i>	14.6	26.8	21.0	31.7	5.9	0.640
化香树 <i>Platycarya strobilacea</i>	28.5	23.6	19.8	15.4	12.8	0.269
枇杷 <i>Eriobotrya japonica</i>	18.8	20.7	24.9	23.3	12.4	0.474
山槐 <i>Albizia kalkora</i>	13.3	25.9	35.0	8.6	17.2	0.476
小果润楠 <i>Machilus microcarpa</i>	4.8	23.6	14.2	38.4	19.0	0.608
短萼海桐 <i>Pittosporum brevicalyx</i>	10.8	14.0	19.5	30.2	25.4	0.775
刺楸 <i>Kalopanax septemlobus</i>	33.2	0.0	0.0	0.0	66.8	0.668
猫乳 <i>Rhamnella franguloides</i>	14.4	19.7	22.6	21.3	22.0	0.542
猴樟 <i>Cinnamomum bodinieri</i>	13.5	11.6	15.4	22.9	36.5	0.643
川钓樟 <i>Lindera pulcherrima</i> var. <i>hemsleyana</i>	0.0	0.0	32.6	67.4	0.0	0.668
大果冬青 <i>Ilex macrocarpa</i>	22.1	13.9	25.1	13.9	25.0	0.515
白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i>	23.3	27.8	21.2	12.8	14.9	0.420
香椿 <i>Toona sinensis</i>	29.6	35.2	19.7	12.7	2.8	0.309
野柿 <i>Diospyros kaki</i> var. <i>silvestris</i>	26.8	13.3	20.0	26.7	13.3	0.466
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	0.0	24.4	25.0	50.6	0.0	0.686
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.000

3.3 树木的角尺度

由表3可知,22种树木个体中处于高度均匀分布($W_i=0$)和高度聚集($W_i=1$)的个体数很少,处于均匀($W_i=0.25$)和聚集($W_i=0.75$)分布频率基本相当,处于随机分布($W_i=0.5$)的个体比例多数超过了50%,说明样地内不均匀分布的单元远远多于均匀分布的单元。

天龙山次生林林分中,处于高度均匀、均匀、随机、聚集和高度聚集的株数分别占0.6%、19.2%、57.9%、17.7%和4.5%,平均角尺度 \bar{W} 为0.516(图1)。有研究认为,角尺度 $\bar{W}<0.475$ 时树木表现为均匀分布, $0.475\leq\bar{W}\leq 0.517$ 时为随机分布, $\bar{W}>0.517$ 时为聚集分布^[4]。依据此格局判定标准,天龙山次生林整体上表现为趋于聚集分布。22种树种中,部分树种的平均角尺度 $\bar{W}>0.517$ (表3)表现为聚集分布,如窄叶石栎、枇杷和猫乳等树种,而朴树、刺楸等表现为随机分布。

表 3 天龙山喀斯特次生林树种的角尺度
Table 3 Uniform angle indexes of tree species
in a karst secondary forest in Tianlong Mountain

树 种	角尺度/%					
	0	0.25	0.5	0.75	1	\bar{W}
安顺润楠 <i>Machilus cavaleriei</i>	0.7	19.4	57.3	18.1	4.5	0.516
窄叶石栎 <i>Lithocarpus confinis</i>	0.7	18.4	59.2	16.4	5.3	0.518
朴树 <i>Celtis sinensis</i>	0.3	22.5	57.5	13.7	5.9	0.506
云贵鹅耳枥 <i>Carpinus pubescens</i>	0.7	21.9	54.9	18.2	4.2	0.508
滇鼠刺 <i>Itea yunnanensis</i>	0.2	19.2	58.7	17.9	4.0	0.515
山樱花 <i>Cerasus serrulata</i>	0.0	34.7	30.7	26.9	7.7	0.519
香叶树 <i>Lindera communis</i>	0.2	20.4	57.5	18.0	3.9	0.512
化香树 <i>Platycarya strobilacea</i>	0.8	19.3	58.2	18.0	3.8	0.512
枇杷 <i>Eriobotrya japonica</i>	0.0	16.7	62.5	18.7	2.1	0.515
山槐 <i>Albizia kalkora</i>	0.0	13.0	56.3	26.4	4.3	0.555
小果润楠 <i>Machilus microcarpa</i>	0.0	9.5	71.5	19.1	0.0	0.524
短萼海桐 <i>Pittosporum brevicalyx</i>	0.4	20.6	53.8	20.2	5.1	0.522
刺楸 <i>Kalopanax septemlobus</i>	0.0	16.5	66.8	16.7	0.0	0.501
猫乳 <i>Rhamnella franguloides</i>	0.0	10.5	68.1	17.4	4.1	0.538
猴樟 <i>Cinnamomum bodinieri</i>	1.9	15.4	59.7	19.1	3.9	0.519
川 钓 樟 <i>Lindera pulcherrima</i> var. <i>hemsleyana</i>	0.0	67.4	32.6	0.0	0.0	0.332
大果冬青 <i>Ilex macrocarpa</i>	0.0	25.0	39.0	24.9	11.1	0.555
白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i>	4.3	12.8	59.5	17.0	6.4	0.521
香椿 <i>Toona sinensis</i>	1.4	22.6	43.6	23.9	8.5	0.539
野柿 <i>Diospyros kaki</i> var. <i>silvestris</i>	0.0	19.9	46.8	26.7	6.7	0.550
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	0.0	50.2	24.4	25.5	0.0	0.438
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.500

4 讨论和结论

4.1 树木的混交和优势程度

林分的空间结构特征与其处在的发育阶段密切相关,林分往成熟老林阶段发展,其空间结构越优且稳定性越高^[22-23]。处于早期阶段的林分表现出林木种间混交较低、大小分化不明显且呈现均匀分布状态,而处于成熟阶段的林分表现出林木种间高度混交、大小分化明显且呈随机分布状态^[23-24]。天龙山喀斯特常绿落叶阔叶混交林的混交度、大小比数和角尺度分别为 0.737、0.498 和 0.516,表明林分中林木种间处于高度混交状态、树木胸径的大小分化程度差异较小并且树木处于轻度聚集分布状态。因此,该森林类型为典型的次生中龄林,其空间结构总体上尚不稳定,其结构与原生顶极森林还有一定的差距。

林分的混交度水平与林分种类组成的丰富度、种内和种间的竞争关系、群落的干扰历史以及演替

阶段等密切相关^[25-26]。天龙山森林种类组成较为丰富,林分中以中小径级树木为主,林分密度较高,并且种内竞争较种间竞争更为激烈,导致生态位分化。因此,该林分总体上处于较强程度的混交水平。每种树种的混交度水平又与更新方式、繁殖策略、物种多度等有关,乔木上层的优势种和喜光的先锋树种的混交度水平高^[26],例如,化香树、云贵鹅耳枥等上层优势树种。而稀有种同种聚集的机会较少,相应的混交度水平较高,如刺楸、女贞和山槐等树种。就大小比数而言,天龙山次生林整体上处于中庸水平。22 种树种中,有相当部分的个体处于中庸乃至中庸以下水平,这一特点意味着树种间可能竞争激烈。由于天龙山次生林处于次生演替阶段,大小比数很好地验证了该演替阶段各个树种在垂直方向上的竞争情况和未来的发展趋势。

4.2 树木的空间分布格局

角尺度是描述邻体树木围绕参照树的均匀性指标,因此可以根据角尺度判断林木个体的空间分布格局^[11]。天龙山次生林林分总体上趋于轻度聚集格局。呈现聚集分布分树种有窄叶石栎、枇杷和猫乳等树种,随机分布有朴树、刺楸等,仅女贞表现为均匀分布。喀斯特的生境异质性极高,多数树种表现出生境偏好性,同时扩散限制也助推了种群聚集格局的形成^[27]。Zhang 等^[16]研究表明中亚热带喀斯特原生林树木主要呈现聚集分布为主。本研究中的北亚热带喀斯特次生林数树种和林分趋于聚集分布,但随机分布也占有较高比例。天龙山次生林中小径级林木集群特征明显,导致林分整体上呈现轻度聚集分布的格局。

4.3 对喀斯特植被抚育管理与恢复的启示

西南喀斯特植被恢复主要依靠自然演替和人工造林为主。由于喀斯特生境异质性强,岩石裸露率高、土层瘠薄且不连续、生态条件恶劣而导致造林技术、造林条件、造林成活率、生长抚育等各方面受诸多因子控制,人工林生长和管理存在较多难题^[14]。而喀斯特天然林经历自然演替,林木之间的空间关系复杂且多样,天然林的生态效益往往远高于物种组成和结构相对简单的人工林。因此,参照天然次生林的空间结构特性,适度调控不同树种的混交度、大小比数和角尺度,可为喀斯特地区人工林向天然林改造以及推进灌丛向区域性顶极植被方向恢复等生态重建和抚育措施提供科学指导。

合理的干扰森林空间结构可促进森林的发

育^[4]。对于通过封山育林方式自然演替的喀斯特灌丛和灌乔林以及现存的生态效益不高的喀斯特山地人工林(如黔中地区常见的滇柏林、桫欏林、刺槐林等)天然次生林是其植被恢复与重建的“模板”。在实践中为促进灌丛和灌乔林的尽快发育,可以通过适度去除先锋乔木树种附近的藤本和灌木植物来辅助和提升群落向次生林方向演替的进度。同时,也可参考成熟林树种的构成特点,通过间伐和择伐等手段适当提高演替后期树种的优势

度,可防止次生林出现退化,从而促进次生林的正向演替。人工调控林木个体的大小分化水平,通过抚育间伐,人工促进天然更新,为演替后期树种的幼树提供生长空间,逐步降低林分中非目的树种的中、小径木的比例,使林分径级分布趋于合理,促进林分发育。通过以上经营管理措施改善树种组成以及竞争关系,调整林分的混交水平、径级结构和分布格局,诱导演替早期植被和人工林向天然林的树种组成和结构特征发展。

参 考 文 献

- [1] von Gadow K, Hui G. Modelling Forest Development [M]. Amsterdam: Kluwer Academic Publisher, 1999.
- [2] 惠刚盈, von Gadow K. 森林空间结构量化分析方法 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- [3] 汤孟平, 陈永刚, 徐文兵, 等. 森林空间结构分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [4] Pommerening A. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 224: 266-277.
- [5] 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): 1-8.
- [6] Aguirre O, Hui G Y, von Gadow K, et al. An analysis of spatial forest structure using neighborhood based variables [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 183: 137-145.
- [7] Kint V, Van Meirvenne M, Nachtergale L, et al. Spatial methods for quantifying forest stand structure development: A comparison between nearest neighbor indices and variogram analysis [J]. Forest Science, 2013, 49: 36-49.
- [8] Davies O, Pommerening A. The contribution of structural indices to the modelling of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) and birch (*Betula* spp.) crowns [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256: 68-77.
- [9] North M, Chen J Q, Oakley B, et al. Forest stand structure and pattern of old-growth western Hemlock/Douglas Fir and Mixed-conifer forests [J]. Forest Science, 2004, 50: 299-311.
- [10] 惠刚盈, von Gadow K, 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): 1-6.
- [11] 惠刚盈, von Gadow K, 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.
- [12] 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): 177-181.
- [13] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes and restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.
- [14] 文丽, 宋同清, 杜虎, 等. 中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制 [J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5822-5833.
- [15] Zhang Z H, Hu G, Zhu J D, et al. Stand structure, woody species richness and composition of subtropical karst forests in Maolan, south-west China [J]. Journal of Tropical Forest Science 2012, 24: 498-506.
- [16] Zhang Z H, Hu G, Zhu J D, et al. Aggregated spatial distributions of species in a subtropical karst forest, southwestern China [J]. Journal of Plant Ecology, 2013, 6: 131-140.
- [17] Ni J, Luo D H, Xia J, et al. Vegetation in karst terrain of southwestern China allocates more biomass to roots [J]. Solid Earth, 2015, 6: 799-810.
- [18] 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 991-999.
- [19] 刘玉国, 刘长成, 魏雅芬, 等. 贵州省普定县不同植被演替阶段的物种组成与群落结构特征 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1009-1018.
- [20] 习新强, 赵玉杰, 刘玉国, 等. 黔中喀斯特山区植物功能性状的变异与关联 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1000-1008.
- [21] 刘长成, 魏雅芬, 刘玉国, 等. 贵州普定喀斯特次生林乔灌层地上生物量 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 698-705.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 周蔚, 杨华, 亢新刚, 等. 长白山云冷杉原始林径阶多样性及空间结构分析 [J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(2): 311-316.
- [25] Li Y F, Hui G Y, Zhao Z H, et al. The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural Korean pine broad-leaved forest [J]. Journal of Vegetation Science, 2012, 23(6): 1180-1190.
- [26] 夏富才, 赵秀海, 潘春芳, 等. 长白山阔叶红松林林分空间结构 [J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(4): 529-534.
- [27] 张忠华, 胡刚, 倪健. 茂兰喀斯特常绿阔叶混交林树种空间分布的分形特征 [J]. 生态学报, 2015, 35(24): 8221-8230.

Characterizing and Analyzing Stand Spatial Structure of a Northern Subtropical Karst Secondary Forest in Tianlong Mountain of Central Guizhou Province , China

HU Gang^{1 2} , ZHANG Zhonghua^{1 2} , CHENG Anyun^{3 4} ,
LIU Libin^{3 4} , WU Yangyang^{3 4} , NI Jian^{3 4 5}

(1. Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization of Ministry of Education , Guangxi Teachers Education University , Nanning 530001 , China; 2. Collaborative Innovation Center of the Ecological Environment and Integration Development in the Xijiang River Basin , Guangxi Teachers Education University , Nanning 530001 , China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry , Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550081 , China; 4. Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station , Chinese Academy of Sciences , Puding 562100 , China; 5. College of Chemistry and Life Sciences , Zhejiang Normal University , Jinhua 321004 , China)

Abstract: Evaluation of stand spatial structure can provide important information on present state , growth processes inside a forest , and will benefit monitoring the stand dynamic processes and guide the restoration and reconstruction of degraded vegetation. Based on the survey data of a 2 hm² forest plot in Tianlong Mountain in central Guizhou Province of China , and using the mingling degree , neighborhood comparison and uniform angle index , this paper characterized and analyzed the stand spatial structure of a northern subtropical karst secondary forest. Results showed that the average mingling degree , average neighborhood comparison and average uniform angle index was 0.737、0.498 and 0.516 , respectively , which indicated that the stand of secondary forest was in a state of intensive mingling , middle size difference and slight aggregate distribution. This finding could provide reference for taking management for optimizing spatial structure of natural secondary forest and for directing the restoration and reconstruction of vegetation in the karst area of south-west China.

Key words: karst; secondary forest; stand spatial structure; Tianlong Mountain