

粤北冰雪损毁杉木林人工恢复及林分结构特征分析*

张 谦¹ 王明怀¹ 连辉明¹ 殷祚云¹ 彭华贵²
黄春华² 蔡燕灵¹ 何波祥¹ 陈一群¹ 曾令海¹

(1. 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520; 2. 广东省天井山林场, 广东 乳源 513200)

摘要 以粤北冰雪灾害损毁杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林套种阔叶树形成的混交林为对象, 采用标准地调查法, 研究人工干预形成针阔混交林的生长情况及其林分结构特征。结果表明, 经过 5 a 的人工修复, 已形成良好的杉木阔叶树混交林, 其中, 萌芽杉木平均胸径达到 4.41~5.48 cm, 木荷 (*Schima superba*)、黎蒴 (*Castanopsis fissa*)、火力楠 (*Michelia macclurei*)、深山含笑 (*Michelia maudiae*)、樟树 (*Cinnamomum camphora*) 平均胸径可分别达到 2.72, 6.03, 2.59, 1.75, 3.30 cm。在水平分布格局上, 9 个样地属随机分布, 6 个样地呈均匀分布, 无样地呈聚集分布; 树种混交度呈弱度、中度混交; 各阔叶树相对于杉木的种间竞争优劣顺序依次为黎蒴、木荷、樟树、火力楠、深山含笑。不同配置的阔叶树种所形成林分的空间结构特征没有明显差异。

关键词 杉木林; 冰雪灾害; 人工恢复; 乡土阔叶树; 空间结构

中图分类号: S718.54 文献标识号: A 文章编号: 1006-4427 (2015) 02-0028-08

Artificial Restoration of Chinese Fir Plantations Damaged by Heavy Snow and Ice Disaster and Stand Spatial Analysis in Northern Part of Guangdong Province

ZHANG Qian¹ WANG Minghuai¹ LIAN Huiming¹ YIN Zuoyun¹
PEN Huagui² HUANG Chunhua² CAI Yanling¹ HE Boxiang¹
CHEN Yiqun¹ ZENG Linghai¹

(1. Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China;

2. Tianjinshan Forest Farm, Ruyuan, Guangdong 513200, China)

Abstract Based on surveying typical sample plots of the mixed plantations of *Cunninghamia lanceolata* and broadleaf tree by artificial restoration from pure forest of *C. lanceolata* damaged by snow and ice disaster in northern Guangdong, the growth and stand structure characteristics of the mixed forest were analyzed. The results showed that

*基金项目: 国家科技支撑计划课题“南方集体林区生态公益林可持续经营技术研究示范”(2012BAD22B05)。

第一作者: 张谦 (1976-), 男, 副研究员, 主要从事森林培育研究, E-mail: zhangq7610@163.com。

通信作者: 曾令海 (1957-), 男, 研究员, 主要从事森林培育研究, E-mail: zlinghai@263.net。

five years later, superior mixed plantations were established. The diameter at breast height (DBH) of *C. lanceolata* ranged from 4.41 to 5.48 cm, and those of *Schima superba*, *Castanopsis fissa*, *Michelia macclurei*, *Minnamomum maudiae* and *Cinnamomum camphora* were 2.72, 6.03, 2.59, 1.75 and 3.30 cm, respectively. In terms of horizontal distribution, 9 sample plots were detected to be random distribution, 6 plots were homogenous distribution, but no plot was aggregated distribution. The mixed plantations displayed weak or middle level of mingling degree. Compared with *C. lanceolata*, the competitiveness order of interplanted broadleaf trees was *C. fissa* > *S. superba* > *C. camphora* > *M. macclurei* > *M. maudiae*. No significant deviation in spatial structure was detected among different deployments.

Key words *Cunninghamia lanceolata*; snow and ice disaster; artificial restoration; native broadleaf tree; spatial structure

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 广泛分布于我国亚热带地区, 是我国南方最重要的栽培树种之一。据 2008 年统计, 全国杉木林面积达 $11.27 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全国有林地面积的 6.21%^[1]。自 1994 年广东省率先实行生态公益林、商品林分类经营管理以来^[2], 大面积的杉木用材纯林转为生态公益林。随着经营目标的转变, 原来杉木纯林在人工干预及自然力驱动下逐步转化成物种相对丰富的针阔混交林。杉木与阔叶树种混交有大量深入研究报告, 包括杉木混交树种选择、杉木林低产林改造技术, 杉阔混交林生物多样性、杉阔混交林水源涵养、土壤质量评价、生产力与生物量等研究^[3-16]。

林分结构是森林生态系统的主要属性之一。它决定了树木之间的竞争优势及其空间生态位, 在很大程度上决定了林分的稳定性、发展的可能性和经营空间的大小。合理的林分结构是充分发挥森林多种功能的基础。从 20 世纪 90 年代初开始, 林分结构的研究就成为了广大林学领域研究的热点及焦点^[17-20], 包括林分空间结构的水平分布格局、树种空间隔离程度、树种大小比数及林层比等, 但这些研究都集中于天然林或次生林。杉木林引入阔叶树形成针阔混交林的林分结构特征研究仍未见报道, 本文以粤北南岭地区天井山林场受 2008 年特大冰雪冻雨灾害损毁的杉木林套种阔叶树形成的混交林为对象, 开展人工促进植被恢复研究, 探讨人工干预形成针阔混交林的生长情况及其林分结构特征, 为杉木残次林及针叶纯林向针阔混交林转变的经营技术研究提供借鉴。

1 研究区概况

研究地点位于南岭中段南岭国家级自然保护区天井山林场, 位于 $112^{\circ}30' \sim 113^{\circ}15'E$, $24^{\circ}32' \sim 24^{\circ}46' N$, 海拔 670 ~ 720 m, 年均降雨量 2 800 mm, 年均气温 18.5 $^{\circ}C$, 极端高温 34.0 $^{\circ}C$, 极端低温度 -8 $^{\circ}C$ 。土壤为红壤土, 湿润肥沃。地带性植被为中亚热带常绿阔叶林。研究林地为 1986 年栽植的杉木林, 于 2008 年初遭遇特大冰雪灾害危害, 杉木大部分折断或倒伏。

2 研究方法

2.1 试验设置

2009 年 5 月, 对受灾严重的杉木残次林进行全面清理。首先保留原有健康杉木, 伐除断、残木, 清理伐木与枯木, 保留伐桩以备萌芽更新, 再根据林木保留情况对其它杂灌丛进行带状清理或星状清理。根据林场的生产经验, 选择木荷 (*Schima superba*)、黎蒴 (*Castanopsis fissa*)、深山含笑 (*Michelia maudiae*)、火力楠 (*M. macclurei*) 和樟树 (*Cinnamomum camphora*) 等乡土阔叶树种 1 a 生苗木对林分进行套种更新, 并分别采用了 4 个树种配置方式, 其中, 配置 1: 木荷、黎蒴; 配置 2: 深山含笑、火力楠; 配置 3: 黎蒴; 配置 4: 樟树。在人工恢复区之外, 还设置了对照区 (配置 5), 实行封育管护。植穴规格为 50 cm $\times$ 40 cm

× 30 cm, 种植密度为 900 ~ 1 200 株/hm², 每穴施 150 g 复合肥作基肥, 造林后的抚育管理按常规阔叶树造林标准实施。

2.2 调查方法

2014 年 1 月, 采用标准地调查法, 在 4 个树种配置区及对照区各划定 3 块 20 m × 20 m 的标准地, 采用罗盘仪和 Blume-Leiss 测高器进行每株定位及坡度测量, 并记录标准地坡向、坡位及土壤等立地条件因子。对胸径大于 1.0 cm 的乔木进行每木检尺, 并实测胸径、树高、活枝下高、冠幅等。

2.3 数据分析方法

2.3.1 树种组成数量特征 群落树种组成数量特征用相对多度及相对显著度测度^[21]。

2.3.2 空间结构特征研究 运用森林空间结构分析软件 Winkelmass 分析林分的水平结构, 主要计算的参数有角尺度 W_i , 混交度 M_i 和大小比数 U_i ^[17, 22-23]。在计算 3 类空间结构参数时, 对边缘林木采用 8 邻域平移法进行处理^[24]。

(1) 大小比数 U_i : 大小比数是用来描述林木的大小分化程度, 定义为参照树大于所考察 4 株相邻木数的比例, 其比较指标采用胸径、树高居多, 本文采用胸径指标。 U_i 的取值为 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 即参照树在该结构地块中处于优势、亚优势、中庸、劣势、绝对劣势。

$$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij} \dots\dots\dots (1)$$

式中: 如果参照树 i 比第 j 株相邻木大, $k_{ij}=0$; 否则 $k_{ij}=1$ 。

(2) 角尺度 W_i : 角尺度可描述相邻树木围绕参照树 i 的均匀性。 α 角取 2 个邻接最近的相邻木的小夹角, 取 4 棵相邻木时均匀分布的标准角 $\alpha_0=72^\circ$ 。角尺度被定义为 α 角小于标准角 α_0 的个数占 4 个夹角的比例。

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 Z_{ij} \dots\dots\dots (2)$$

式中: 当第 j 个 α 角大于标准角 α_0 时, $Z_{ij}=0$; 否则 $Z_{ij}=1$ 。角尺度均值 $\overline{W_i}$ 可用以判断林分中林木的分布格局。 $\overline{W_i}$ 值属于 [0.475, 0.517] 时为随机分布, $\overline{W_i} > 0.517$ 时为聚集分布, $\overline{W_i} < 0.475$ 时为均匀分布。

(3) 混交度 M_i : 混交度是用来描述混交林中树种空间隔离程度的指标。描述为参照树 i 的 4 株最近相邻木中与参照树不属于同种个体所占的比例。 M_i 的 5 种取值, 即 0, 0.25, 0.50, 0.75 或 1.00, 即零度、弱度、中度、强度、极强度混交。

$$M_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 V_{ij} \dots\dots\dots (3)$$

式中: 当参照树 i 与第 j 株相邻木同种时, $V_{ij}=0$; 否则 $V_{ij}=1$ 。

3 结果与分析

3.1 树种生长性状

各样地树种生长性状调查结果见表 1。配置 1 ~ 4 及对照杉木平均胸径分别为 5.41, 5.48, 4.41, 5.10, 5.18 cm; 配置 1 中木荷、黎蒴平均胸径 2.72, 6.03 cm; 配置 2 中火力楠、深山含笑平均胸径为 2.59, 1.75 cm; 配置 3 中黎蒴平均胸径 4.10 cm; 配置 4 中樟树平均胸径为 3.30 cm。各配置杉木平均胸径最小 4.41 cm, 最大 5.48 cm, 差异不大, 表明阔叶树的引入未干扰杉木的胸径生长。引入树种生长最快为配置 1 中的黎蒴, 平均胸径 6.03 cm, 生长相对较慢的是深山含笑, 平均胸径 1.75 cm。各配置样地树种径阶分布见图 1, 胸径小于 10 cm 的树木占 98.48%, 其余为少量杉木。

表 1 杉木林套种更新树种生长性状及分化程度

样地	树种	株数 /株	相对多度/ $\%$	胸高断面积 / cm^2	相对显著度 / $\%$	平均胸径/ cm	U_i	分化程度
1	杉木	73	77.6	2421.01	80.6	5.85	0.476	中庸
	木荷	12	12.8	221.40	7.4	3.22	0.792	劣态
	黎蒴	9	9.6	360.88	12.0	6.79	0.306	亚优势
3	杉木	29	46.8	1037.20	73.9	6.14	0.371	亚优势
	木荷	26	41.9	134.85	9.6	2.40	0.760	劣态
	黎蒴	7	11.3	231.98	16.5	6.04	0.286	亚优势
4	杉木	66	68.0	1407.45	78.7	4.60	0.466	中庸
	木荷	23	23.7	174.54	9.8	2.82	0.696	劣态
	黎蒴	8	8.3	206.72	11.5	5.18	0.313	亚优势
2	杉木	80	85.1	2461.96	97.0	5.88	0.447	中庸
	深山含笑	3	3.2	4.73	0.2	1.40	1.000	绝对劣态
	火力楠	11	11.7	70.25	2.8	2.62	0.818	劣态
5	杉木	75	75.8	2103.51	95.2	5.43	0.417	中庸
	深山含笑	14	14.1	51.91	2.4	1.89	0.804	劣态
	火力楠	10	10.1	53.12	2.4	2.47	0.925	绝对劣态
6	杉木	63	76.8	1462.13	96.3	5.03	0.421	中庸
	深山含笑	15	18.3	35.62	2.3	1.70	0.883	绝对劣态
	火力楠	4	4.9	20.91	1.4	2.45	0.813	劣态
7	杉木	62	81.6	1352.87	87.8	4.90	0.484	中庸
	黎蒴	14	18.4	188.39	12.2	3.64	0.625	中庸
8	杉木	54	61.4	982.44	57.2	4.48	0.528	中庸
	黎蒴	34	38.6	735.46	42.8	4.78	0.434	中庸
9	杉木	64	74.4	940.19	78.8	3.88	0.488	中庸
	黎蒴	22	25.6	253.59	21.2	3.36	0.625	中庸
10	杉木	54	66.7	1031.02	77.5	4.51	0.435	中庸
	樟树	27	33.3	300.15	22.5	3.46	0.676	劣态
11	杉木	53	65.4	1473.73	86.5	5.52	0.406	中庸
	樟树	28	34.6	230.44	13.5	2.94	0.732	劣态
12	杉木	21	42.0	553.39	62.5	5.59	0.333	亚优势
	樟树	29	58.0	331.75	37.5	3.50	0.655	劣态
13	杉木	43	100	1220.80	100	5.41	0.512	中庸
14	杉木	52	100	1326.89	100	5.11	0.495	中庸
15	杉木	28	100	673.38	100	4.98	0.473	中庸

注：“ U_i ”为大小比均值。

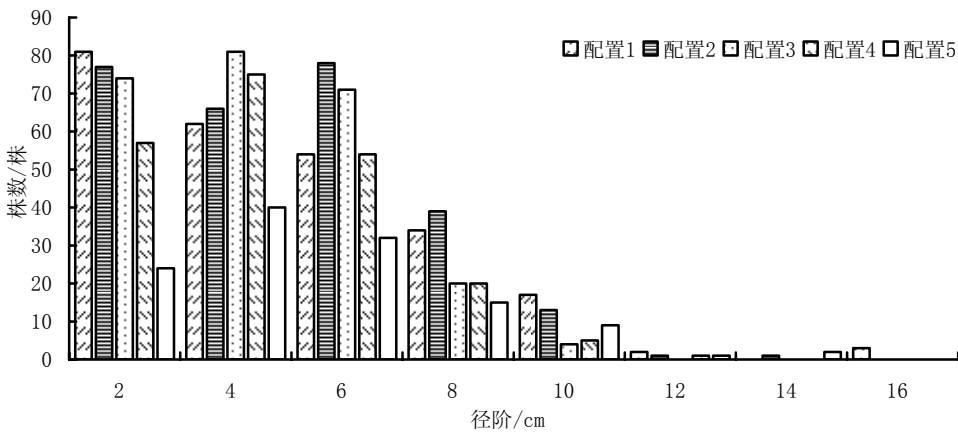


图 1 杉木林套种配置树种胸径分布

3.2 树种组成数量特征

各样地树种组成、相对多度及相对显著度见表 1。杉木相对多度在各样地中是最大的，其余引入树种相对多度差异较大。配置 1~4 及对照中，杉木株数分别为 168，218，180，128，123 株，引入阔叶树分别为 85，57，70，84，0 株。

杉木相对显著度在样地中均为最大，配置 1~4 所有树种胸高断面积之和分别为 6 196.02，6 264.13，4 452.95，3 920.48 cm²，均明显高于对照的 3 221.07 cm²。5 种配置中（对照为配置 5），杉木胸高断面积之和分别为 4 865.65，6 027.60，3 275.5，3 058.14，3 221.07 cm²。配置 1 木荷、黎蒴胸高断面积之和为 1 330.7 cm²；配置 2 火力楠、深山含笑胸高断面积之和为 236.54 cm²；配置 3 中黎蒴胸高断面积之和为 1 177.45 cm²；配置 4 中樟树胸高断面积之和为 862.34 cm²。

3.3 林分结构特征

3.3.1 林木大小分化程度——大小比数 以胸径为比较指标的大小比数反映了单元内参照树与相邻木个体之间的竞争关系。树种平均大小比数反映了林分中各树种竞争优势的平均状态。 U_i 值越低，说明比参照树大的相邻木愈少^[17]。

各样地树种大小平均比值见表 1。配置 1 中杉木处于竞争亚优势或中庸，黎蒴处于竞争亚优势，木荷处于竞争劣势；配置 2 中杉木处于竞争中庸，火力楠、深山含笑处于竞争劣势或绝对劣势；配置 3 中杉木处于竞争中庸，黎蒴处于竞争亚优势；配置 4 中杉木处于竞争亚优势或中庸，樟树处于竞争劣势。

3.3.2 个体水平分布格局——角尺度 各样地角尺度及混交度分布频率计算结果见表 2。4 个配置及对照中共 9 个样地林木呈随机分布，分别是样地 1、4、5、8、11、12、13、14、15 共 9 个，其余为均匀分布样地，包括样地 2、3、6、7、9、10 共 6 个，无样地呈聚集分布。从林木个体分布格局看，林木个体多数处于随机分布，即 $W_i=0.5$ 的个体数在各样地都是最多的，其中仅有样地 8、9、10、13 共 4 个样地随机分布（ $W_i=0.5$ ）的个体数小于 50%，随机分布个体比例大于 50% 的有 11 个样地；除样地 11、13 外，样地处于均匀分布（ $W_i=0$ 或 $W_i=0.25$ ）的林木个体在所有样地内的比例均大于聚集分布（ $W_i=0.75$ 或 $W_i=1$ ）的林木个体的比例。

3.3.3 树种空间隔离程度——混交度 树种隔离程度指的是树种在群落中的空间配置，它是林分空间结构的重要组成部分，也是群落的树种混交状况的表达形式。杉木混交林树种隔离程度，对样地 13、14、15 是杉木纯林，为零度混交，样地 3、7 属弱度偏中度混交，其余 12 个样属中度混交，多数稍偏弱，样地 3、8 稍偏强度混交。由此可知，阔叶树种的引种明显提高了杉木林分的混交度。

表 2 杉木林套种样地角尺度及混交度分布频率及均值

样地	W_i							M_i						
	0	0.25	0.50	0.75	1.00	平均	分布格局	0	0.25	0.50	0.75	1.00	平均	隔离程度
1	0.011	0.234	0.564	0.181	0.011	0.487	随机	0.213	0.404	0.149	0.053	0.181	0.396	中度
3	0.000	0.340	0.596	0.064	0.000	0.431	均匀	0.383	0.415	0.053	0.032	0.117	0.271	弱度
4	0.000	0.194	0.629	0.177	0.000	0.496	随机	0.000	0.355	0.323	0.177	0.145	0.528	中度
2	0.021	0.309	0.557	0.113	0.000	0.441	均匀	0.134	0.278	0.278	0.155	0.155	0.479	中度
5	0.029	0.255	0.520	0.176	0.020	0.475	随机	0.137	0.441	0.167	0.127	0.127	0.417	中度
6	0.012	0.265	0.566	0.157	0.000	0.467	均匀	0.145	0.482	0.133	0.096	0.145	0.404	中度
7	0.026	0.308	0.526	0.128	0.013	0.449	均匀	0.397	0.372	0.090	0.051	0.090	0.266	弱度
8	0.022	0.242	0.484	0.242	0.011	0.495	随机	0.033	0.330	0.319	0.121	0.198	0.530	中度
9	0.045	0.398	0.466	0.091	0.000	0.401	均匀	0.182	0.364	0.193	0.125	0.136	0.418	中度
10	0.012	0.329	0.488	0.171	0.000	0.454	均匀	0.122	0.293	0.280	0.220	0.085	0.463	中度
11	0.000	0.220	0.537	0.244	0.000	0.506	随机	0.098	0.317	0.329	0.183	0.073	0.454	中度
12	0.019	0.192	0.596	0.173	0.019	0.495	随机	0.135	0.288	0.269	0.308	0.000	0.438	中度
13	0.047	0.140	0.581	0.233	0.000	0.500	随机	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	零度
14	0.000	0.288	0.442	0.231	0.038	0.505	随机	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	零度
15	0.000	0.214	0.679	0.036	0.071	0.491	随机	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	零度

注：“ W_i ”为角尺度；“ M_i ”为混交度。

4 结论与讨论

粤北冰雪灾害损毁杉木林的修复一直是广东林业的重点研究领域之一,但可供借鉴的技术与经验不多,较为常见的有杉木+深山含笑混交林^[25]。其它针阔混交林有马尾松 (*Pinus massoniana*) +木荷混交林^[26],阔叶树混交林主要为多树种混交林^[27]。在生长量方面,10 a 生杉木+深山含笑混交林中杉木平均胸径为 8.5 ~ 8.7 cm,深山含笑胸径 6.2 ~ 6.5 cm; 7 a 生马尾松 C+木荷混交林中木荷平均胸径 2.47 cm; 3 a 生多树种混交林中火力楠、木荷、樟树、黎蒴平均胸径分别为 1.47, 1.46, 1.06, 2.73 cm。

本研究充分利用杉木萌芽力强的特性,采用人工促萌的方法促进杉木林自然恢复,同时通过引入乡土阔叶树,提高林分的混交度,改善林分的生态稳定性,提升林分质量,这在损毁杉木林修复技术层面是一次有益的尝试。

人工修复 5 年后,林木长势良好,各配置及对照杉木平均胸径为 4.41~5.48 cm,胸径年均生长约 1 cm,略高于吴长铨^[25]研究的杉木+深山含笑混交林。各配置中木荷、黎蒴、火力楠、深山含笑、樟树平均胸径为 2.72, 6.03, 2.59, 1.75, 4.10, 3.30 cm。深山含笑的胸径生长略低于杉木+深山含笑混交林,但木荷的生长量高于黄文超^[26]研究的马尾松+木荷混交林。由此可知,本研究中阔叶树与杉木混交生长表现良好,初步形成了良好的针阔混交林,促进了受损杉木林的恢复。

杉木相对多度与相对显著度在样地中均为最大,这与本试验林分起源有关,杉木为上世纪80年代人工种植的速生丰产林,密度较大且均匀,因2008年冰灾伐除后萌芽再加上引入阔叶树混交而成。因此,杉木株数多,配置1~4及对照中,杉木株数分别为168,218,180,128,123株,引入阔叶树分别为85,57,70,84,0株,且杉木生长较快,因此,杉木相对多度及相对显著度都大。

大小比数反映了树种个体在结构单元中的竞争状况和关系。本研究杉木萌芽林与引入阔叶树相比,杉木处于竞争亚优势和中庸状态,而引入阔叶树黎蒴处于竞争亚优势,其次是木荷、樟树处于竞争劣势,火力楠、深山含笑处于竞争劣势或绝对劣势。

就水平分布格局而言,本研究有9个样地呈随机分布,6个样地呈均匀分布,无样地呈聚集分布。这与其它天然林空间分布格局研究结果存在一定差异,天然林存在聚集分布和随机分布格局,如南方集体林区南酸枣(*Choerospondias axillaris*)次生林林分结构整体分布格局属聚集分布^[18],油松(*Pinus tabulaeformis*)天然林种群分布格局为随机分布^[20],天然阔叶红松(*P. koraiensis*)林空间分布格局^[19],红松林的格局分布为集群分布,未见均匀分布格局,本研究有部分样地呈现均分布格局,这与本试验林分为人工林有关,引入的阔叶树种植时在杉木林中空地相对均匀种植。

在混交度方面,本研究杉木+阔叶树混交林分呈弱度、中度混交,混交度与次生林林分相近,低于天然林,这与试验中引入的树种数量有关。本研究多为引入1~2种阔叶树,与杉木萌芽混交,使得林分树种组成相对单一,混交度较弱。而在天然林中,树种数量繁多,因此混交度较高,如南酸枣次生林林分结构整体上空间隔离程度属于中度偏弱混交^[18],油松天然林属弱度混交向中度混交的状态^[19]。

在所有配置中,引入的阔叶树种生长表现均优异,杉木生长也未受影响,表明伐除受损杉木,引入乡土阔叶树种,人工促进受损杉木林恢复是科学可行的,也符合森林演替中从针叶林向阔叶林过渡的针阔混交林阶段。杉木林由人工均匀栽植形成,引入阔叶树也是在杉木林中均匀栽植,因此各种杉木+阔叶树混交林分的空间结构特征没有明显差异。

参考文献

- [1] 国家林业局. 中国森林资源状况 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [2] 徐正春. 广东生态公益林体系建设的现状、问题与建议 [J]. 中南林业调查规划, 2001, 20 (增刊): 156-161.
- [3] 林远菊, 赵本虎, 张小平. 四川杉木混交造林树种选择研究 [J]. 四川林业科学, 1993, 14 (1): 26-31.
- [4] 严平勇. 杉木与阔叶树混交造林试验 [J]. 安徽农学通报, 2013, 19 (8): 183-191.
- [5] 邓绍林, 韦荣健, 蓝彩克, 等. 大面积杉木低产林改造综合技术 [J]. 广西林业科学, 1995, 24 (3): 117-119.
- [6] 陈存及, 陈新芳, 董建文, 等. 半天然杉阔混交林优势种群的增长规律 [J]. 热带亚热带植物学报, 2002, 10 (3): 253-257.
- [7] 洪长福. 不同杉木混交类型幼龄林水源涵养功能研究 [J]. 福建林学院学报, 1997, 17 (2): 184-188.
- [8] 郑兆飞. 桉木杉木混交林水源涵养能力研究 [J]. 西南林学院学报, 2008, 28 (3): 8-10.
- [9] 罗鑫华, 余伟盛, 吴小文, 等. 粤北杉阔混交林的生长表现与林地水源涵养特性 [J]. 广西林业科学, 2008, 37 (3): 119-122.
- [10] 黄宇, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 不同人工林生态系统林地土壤质量评价 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (12): 2199-2205.
- [11] 郑郁善, 黄宝龙. 福建含笑杉木混交林生物量和土壤肥力的研究 [J]. 南京林业大学学报, 1998, 22 (2): 49-52.
- [12] 熊皓波. 杉木人工复层林土壤理化性质变化的初步研究 [J]. 亚热带农业研究, 2004 (4): 283-286.
- [13] WANG Q K, WANG S L. Soil microbial properties and nutrients in pure and mixed Chinese fir plantations [J]. Journal of Forestry Research, 2008, 19 (2): 131-135.
- [14] 钱国钦. 枫香杉木混交林生产力及生态特性 [J]. 浙江林学院学报, 2000, 17 (3): 289-293.
- [15] 蒋家淡. 红锥杉木混交造林效果研究 [J]. 福建林学院学报, 2002, 22 (4): 329-333.
- [16] 谭绍满, 徐英宝, 陈红跃, 等. 杉木与阔叶树混交试验初报 [J]. 植物生态学报, 1995, 19 (2): 183-191.
- [17] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波. 结构化森林经营技术指南 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2010: 31-39.

- [18] 曾思齐, 李俊, 李东丽, 等. 南方集体林区南酸枣次生林林分结构研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32 (4): 1-6.
- [19] 王蕾, 张春雨, 赵秀海. 长白山阔叶红松林的空间分布格局 [J]. 林业科学, 2009, 45 (5): 54-59.
- [20] 刘文祯, 赵中华, 惠刚盈, 等. 小陇山油松天然林结构特征 [J]. 林业科学研究, 2011, 24 (4): 437-442.
- [21] 李俊清, 牛树奎. 森林生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 周红敏, 惠刚盈, 赵中华, 等. 林分空间结构分析中样地边界木的处理方法 [J]. 林业科学, 2009, 45 (2): 1-5.
- [25] 吴长铨. 萌芽更新杉木与深山含笑混交造林的效果分析 [J]. 江苏林业科技, 2013, 40 (4): 17-21.
- [26] 黄文超, 黄丽莉. 马尾松-木荷混交造林效果的调查研究 [J]. 林业科学研究, 2004, 17 (3): 316-320.
- [27] 罗敏, 覃冀, 蔡燕灵, 等. 11 个阔叶树种在粤西地区的早期生长表现 [J]. 广东林业科技, 2006, 22 (3): 69-71.