

## 未来 3 种气候模式下的阔叶林森林空间结构优化

蒋雪冰<sup>1</sup>, 李建军<sup>2</sup>, 李娜<sup>2</sup>, 黄剑坚<sup>3\*</sup>

(1. 广东省岭南院勘察设计与有限公司, 广东 广州 510000; 2. 中南林业科技大学 计算机与信息工程学院, 湖南 长沙 410002;

3. 韩山师范学院 生物科学与食品工程学院, 广东 潮州 521041)

**摘要:** 全球气候变化对森林生态系统造成了重大影响, 构建气候模式下的阔叶林森林空间结构优化模型可应对气候变化, 同时进行林木数量上的恢复和保护。选择湖南省龙虎山林场 1 600 m<sup>2</sup> 的固定样地, 模拟林木在林分中的位置, 采用改进多族群 PSO 算法并结合气候敏感的树高-胸径的广义模型, 开展 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 气候情景下 15 a 后森林空间结构优化研究。结果表明, RCP2.6 气候情景下样地择伐 4 株树后效果最明显, 林分调整后的混交度、林层指数、开阔比数、大小比数以及林分均质性指数均增加, 竞争指数、角尺度以及空间密度指数均下降, 其中竞争指数和开阔比数变化最大, 为 -26.877% 和 28.148%; RCP4.5 气候情景下该样地择伐 8 株树后效果最明显, 林分调整后的混交度、林层指数、开阔比数、大小比数、均质性指数等均增加, 竞争指数、角尺度以及空间密度指数均下降, 其中开阔比数和均质性指数的变化最大, 为 21.43% 和 38.01%; RCP8.5 气候情景下该样地择伐 7 株树后林分优化为最佳状态, 林分调整后的混交度、林层指数、开阔比数、大小比数、均质性指数均增加, 竞争指数、角尺度以及空间密度指数均下降, 其中竞争指数和均质性指数的变化最大, 为 -10.34% 和 29.23%。分析发现, 3 种气候情景下调整后的林分结构皆优于调整前, 林分的生长在 RCP2.6 气候情景下较为敏感。

**关键词:** 森林空间结构; 阔叶林; 气候变化; 气候模式

**中图分类号:** S757

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-7461(2023)03-0162-07

### Spatial Structure Optimization of Broad-Leaved Forests Under Three Future Climate Scenarios

JIANG Xue-bing<sup>1</sup>, LI Jian-jun<sup>2</sup>, LI Na<sup>2</sup>, HUANG Jian-jian<sup>3\*</sup>

(1. Guangdong Lingnanyuan Exploration and Design Co. Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China;

2. School of Computer and Information Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410002, Hunan, China;

3. College of Life Science and Food Engineering, Hanchuan Normal University, Chaozhou 521041, Guangdong, China)

**Abstract:** Global climate change has a major impact on forest ecosystems. The objectives of this study were to construct a broad-leaved forest spatial optimization model under climate scenarios to cope the climate change, at the same time to restore and protect forest quantity. A 1 600 m<sup>2</sup> fixed plot in the Longhushan Forest Farm of Hunan Province was selected to conduct the experiment. The locations of the forest trees in the stand were simulated. Combined with the climate-sensitive tree height-diameter generalized model, the improved multi-swarm PSO algorithm was adopted to research forest spatial structure under the three future climates scenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) after 15 years. Cutting 4 trees in the sample plot had the best effect under the RCP2.6 climate scenario, and the mingling degree, stand layer index, openness comparison index, neighborhood comparison and homogeneity index increased after adjustment, while the competition index, uniform angle index, spatial density index decreased. The competition index and openness comparison index exhibited the most significant changes, which were -26.877% and 28.148%. Cut-

收稿日期: 2021-09-28 修回日期: 2022-09-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31570627); 国家自然科学基金青年基金项目(31500521)。

第一作者: 蒋雪冰。研究方向: 林业调查、森林经营规划和林业信息。E-mail: 1137957145@qq.com

\* 通信作者: 黄剑坚, 副教授, 博士。研究方向: 森林经理学。E-mail: 3668602@qq.com

ting 8 trees had the best effect under the RCP4.5 climate scenario, and the mingling degree, stand layer index, openness comparison index, neighborhood comparison and homogeneity index increased after adjustment, while competition index, uniform angle index, spatial density index decreased. The openness comparison index and homogeneity index had the greatest changes, which were 21.43% and 38.01%, respectively. Cutting 7 trees had the best effect under the RCP8.5 climate scenario, and the mingling degree, stand layer index, openness comparison index, neighborhood comparison and homogeneity index increased after adjustment, while competition index, uniform angle index, spatial density index decreased. The competition index and homogeneity index had the greatest changes, which were -10.34% and 29.23%, respectively. The adjusted forest stand structure is better than before under the three climate scenarios, The stand growth is more sensitive under the RCP2.6 climate scenario.

**Key words:** forest spatial structure; broad-leaved forest; climate change; climate scenario

全球气候变化对森林生态系统造成巨大的影响<sup>[1]</sup>。森林具有保持水土、固碳释氧、提供大量产品等功能,因此研究森林具有重要意义,森林较强的敏感性导致其容易受到气候变化的影响。研究者们通过建立长期气候变化下森林生产力和生长情况的过程生长模型<sup>[2-6]</sup>来预测林木的生长以及演替,探究气候变化对森林的影响。气候变化下的林木生长模型按建立方法大致可分为3种,其中的过程生长模型和传统的经验生长模型皆有自身的缺陷难以真正应用于森林经营<sup>[7-9]</sup>,结合气候变化下的林木生长模型和其他模型构成的混合模型开展森林经营是未来森林经营的发展趋势之一。

目前,森林空间结构的研究已较为成熟<sup>[10-14]</sup>。针对气候变化影响下的森林结构改善与多功能实现的经营目标,构建相应的优化模型尚存在不足,实际的森林经营需要选择一个合适的计算方法。该方法要求快速准确地获得最优解集,可应对问题非周期性变化,还需在解集收敛性、分布性、动态性预测性等方面作进一步研究,因此动态多目标算法则较为符合森林经营的需要。研究气候变化模式下的森林空间结构优化,构建一个生态健康稳定的森林经营体系应对气候变化,既要林木数量进行恢复和保护,又要及时评价和调整森林的空间结构。本研究以中国湖南省南洞庭湖赤山岛龙虎山林场样地的天然阔叶混交林为对象,根据气候变化下森林空间结构的实际情况,构建混合模型,求解 RCP 2.6、RCP4.5、RCP8.5 气候情景下森林空间结构多目标优化模型,开展3种气候情景下的林分结构仿真模拟,并验证模型可靠性,为森林经营者采取相应的经营措施应对气候变化提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

龙虎山林场位于湖南省沅江市南洞庭湖龙虎山

森林公园(112°15'8"—112°20'10"E, 28°61'24"—28°78'20"N),属于湿润大陆亚热带季风气候,年降水量 1 500 mm,年均温度 17.0 °C,1月最低温度 4.1~4.5 °C,7月最高温度 28.7~29.2 °C。在龙虎山林场 1 600 m<sup>2</sup> 采集固定样地数据,样地海拔 325~341 m,坡向北,坡度 18°主要树种有白栎(*Quercus fabri*)、青桐(*Cyclobalanopsis myrsinifolia*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*),调查株数分别为 6、68、16、10。

### 1.2 森林生长指标的测定与计算

森林空间结构指标的具体公式及计算方法参考文献[11]。

### 1.3 气候数据的获得及分析方法

从 ClimateAP 软件获得气候数,采用动态局部回归法和双线性差值法降尺度处理数据再开展分析。

### 1.4 基础模型选择

基础模型为 Chapman-Richards 方程<sup>[15]</sup>和林分生长模型<sup>[16]</sup>。

1.4.1 树高-胸径的广义模型 采用再参数化的方法来构建模型

$$H = 1.3 + (\beta_0 + \beta_1 \times B_{AL} + \beta_2 \times t) (1 - e^{-(\beta_3 + \beta_4 \times B_A)^D})^{\beta_5} \quad (1)$$

式中: $D$ 为样方林木胸径; $H$ 为样方树种高度; $B_{AL}$ 为比对树木断面积之和; $B_A$ 为林分断面积; $t$ 为样方林分年龄; $\beta_i$ 为模型参数。

1.4.2 其他广义模型

1)气候敏感的优势高生长模型

$$H_D = 1.3 + (\beta_6 + \beta_7 P_{PTJJA} + \beta_8 M_{WMT}) e^{-\beta_9 e} \quad (2)$$

式中: $M_{WMT}$ 为最热月平均温度; $P_{PTJJA}$ 为夏季降水。

2)地位指数 地位指数  $S_1$ ,基准年龄 20 a。

$$S_1 = 1.3 + (\beta_6 + \beta_7 P_{PTJJA} + \beta_8 M_{WMT}) e^{-\beta_9 e^{-(\beta_{10} + \beta_{11} M_{WMT}) \times 20}} \quad (3)$$

### 3) 气候敏感的断面积生长模型

$$B_A = e^{\beta_{12} + \frac{\beta_{13}}{t}} \left( \frac{N}{1\ 000} \right)^{\beta_{14} + \frac{\beta_{15}}{t}} S_1^{\beta_{16}} \quad (4)$$

式中:  $N$  为林分每公顷株数;  $B_A$  为林分每公顷断面积;  $t$  为林分年龄。

### 1.5 采用的算法与实验数据处理

本研究的时间尺度为 15 a, 采用改进的多族群粒子群算法开展多目标优化, 用线性递减公式计算惯性因子。本研究的粒子位置信息为林木位置信息, 粒子搜索维数为 2; 样地大小为 40 m × 40 m, 粒子位置范围 [0, 40]。设粒子的速度  $v_{\max} = x_{\max} - x_{\min}$ ,  $v_{\min} = -v_{\max}$ ; 近自然经营采伐量通常不超过林分内树木总数的 15%, 将粒子群的规模 ( $N$ ) 设为林木总数的 10%,  $N = 10$ , 将所有粒子均分为 3 个子群, 每个子群的粒子数分别为 3、3、4。

## 2 结果与分析

### 2.1 RCP2.6 情景下森林空间结构预测及优化模拟

初始状态下林分空间坐标模拟结果见图 1。RCP2.6 气候情景下林分调整措施见表 1, 经过调整后林分空间坐标见图 2。RCP2.6 气候情景下主要调整的树种编号为 8 号香樟、60 号青桐、18 号苦槠、20 号苦槠、94 号青桐、54 号青桐、2 号香樟、21 号苦槠、3 号香樟和 90 号青桐。通过模拟采伐, 林分调整后均质性指数变化曲线见图 3, 其他指标变化见图 4。均质性指数随着择伐树木的增加而不断上升, 择伐第 4 株树后, 均质性指数为临界高点后缓慢下降, 说明该样地择伐 4 株树后效果最为明显。随着采伐树种数量的增加, 竞争指数、角尺度以及空间密度指数均有所下降, 大小比数、混交度、开阔比数、林层指数均有所增加, 其中竞争指数和开阔比数的变化最大, 为 -26.877% 和 28.148%。可见, 通过模拟和相关指标分析, RCP2.6 气候情景下林分调整措施有效。

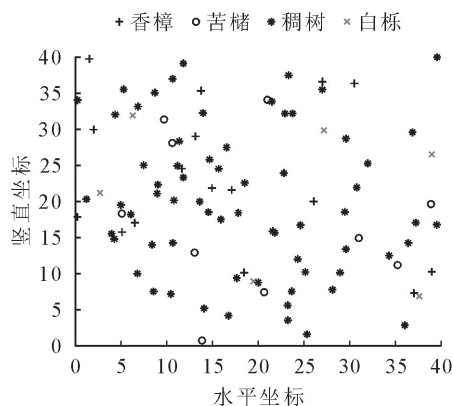


图 1 初始状态下林分空间坐标

Fig. 1 Spatial coordinate of stand in initial state

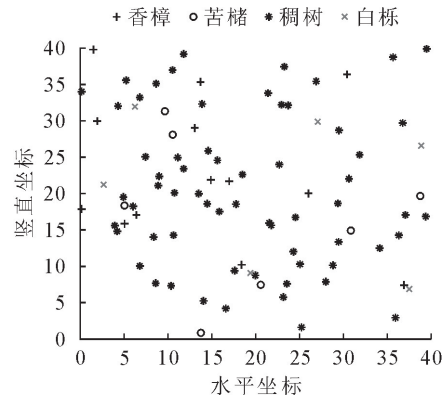


图 2 调整后的林分空间坐标

Fig. 2 Spatial coordinate of forest stand after adjustment

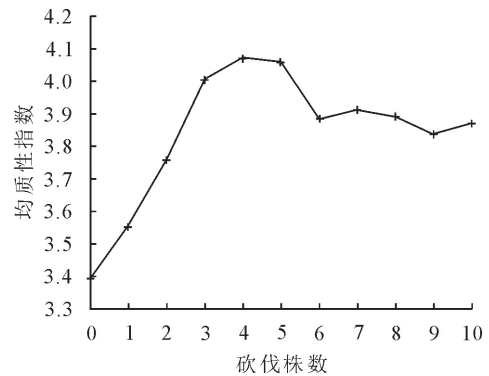


图 3 林分调整后均质性指数变化曲线

Fig. 3 Change curve of homogeneity index after stand adjustment

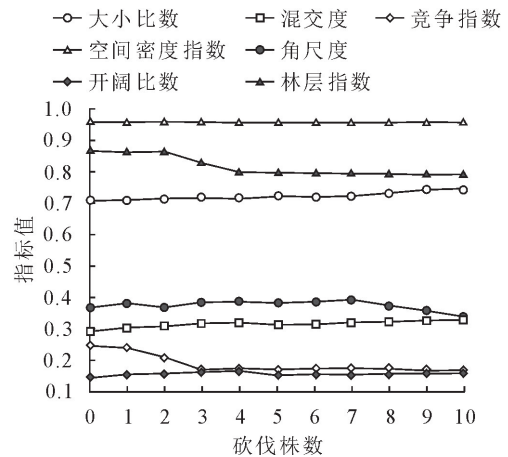


图 4 林分调整后的指标变化曲线

Fig. 4 Change curves of the indicators after stand adjustment

### 2.2 RCP4.5 情景下森林空间结构预测及优化模拟

RCP4.5 气候情景下主要采伐的树种编号为 3 号香樟、24 号苦槠、30 号青桐、83 号青桐、77 号青桐、10 号香樟、15 号香樟、91 号青桐、58 号青桐、27 号青桐, 具体树种的水平空间位置和调整原因等见表 2, 经过调整后林分空间坐标见图 5。调整后, 部分被采伐的树种还需补植适合的树种。通过模拟采伐, 林分调整后均质性指数变化曲线见图 6, 其他指标变化见图 7。均质性指数随着择伐树木数量的增

加而上升,择伐第 8 株树后,均质性指数上升到最高点,说明该样地择伐 8 株树后的调整效果最为明显。随着采伐树种数量的增加,混交度、林层指数、开阔比数、大小比数等皆增加,竞争指数、角尺度以及空

间密度指数均下降,其中开阔比数和均质性指数的变化最大,为 21.43% 和 38.01%。可见,通过模拟和相关指标分析,RCP4.5 气候情景下林分调整措施有效。

表 1 RCP2.6 气候情景下林分调整措施

Table 1 The stand adjustment measures under RCP2.6 climate scenario

编号	树种	水平空间位置	胸径/cm	树高/m	调整原因及经营措施
8	香樟	(17.88,21.61)	6.87	21.61	目标树已为成熟木,且不是保护树种,可将其采伐并补植有培育前景的幼树
60	青桐	(14.33,11.96)	6.13	11.96	竞争能力强,影响了周围林木的生长,可将其采伐并补植幼树
18	苦槠	(25.99,34.03)	6.18	34.03	挤压邻木,健康程度不高,所在区域林木稀疏,可将其采伐,同时补植香樟
20	苦槠	(13.04,12.95)	7.86	12.96	所在区域林木密度较大,可通过择伐邻木来调控林木密度
94	青桐	(23.24,3.62)	6.89	4.62	被邻近树木挤压,择伐目标树木缓解林木的竞争压力
54	青桐	(21.59,15.82)	6.24	20.13	目标树将枯死,可将其采伐并补植青桐幼树
2	香樟	(38.93,10.25)	9.76	13.73	生长优势明显,冠幅过大,影响了周围其他林木的生长,可将其采伐
21	苦槠	(35.37,11.16)	6.77	27.66	该目标树有枯死的倾向,呈现不健康之状,可将其采伐同时补植同类树种
3	香樟	(27.01,36.59)	5.98	28.18	被邻近树木挤压,择伐目标树木缓解林木的竞争压力
90	青桐	(1.20,20.32)	7.60	9.85	该目标树周围存在大面积林隙,可在林隙处补植香樟、青桐或其伴生树种,增加混交度

表 2 RCP4.5 气候情景下林分调整措施

Table 2 The stand adjustment measures under RCP4.5 climate scenario

编号	树种	水平空间位置	胸径/cm	树高/m	调整原因及经营措施
3	香樟	(27.01,36.59)	6.33	36.59	种内竞争激烈,目标树妨碍周围其他林木的生长,可将其采伐
24	苦槠	(7.12,18.30)	6.18	17.01	种间竞争激烈且周围存在较大林隙,砍伐后可补植香樟
30	青桐	(36.36,14.25)	8.81	39.66	生长优势明显,冠幅过大,影响了周围其他林木的生长,可将其采伐
83	青桐	(35.99,2.88)	6.90	18.30	目标树即将枯死,可将其采伐并补植青桐幼树
77	青桐	(23.78,32.13)	8.58	38.68	生长优势明显,冠幅过大,影响了周围其他林木的生长
10	香樟	(6.45,17.06)	7.54	14.25	该目标树呈现极其不健康之状,有枯死的倾向
15	香樟	(1.53,39.66)	6.96	24.97	所在区域林木密度较大,可通过择伐邻木来调控林木密度
91	青桐	(14.70,25.82)	6.17	32.13	种内竞争激烈,妨碍了周围其他林木的生长
58	青桐	(7.48,24.97)	9.68	28.80	目标树被邻木挤压,且健康状况亚于邻木
27	青桐	(35.73,38.68)	9.18	25.82	目标树为成熟木,且不是保护植物,可将其采伐并补植有培育前景的幼树

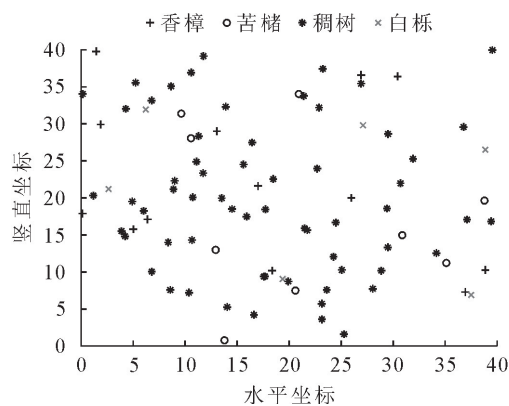


图 5 调整后的林分空间坐标

Fig. 5 Spatial coordinate of forest stand after adjustment

2.3 RCP8.5 情景下森林空间结构预测及优化模拟

RCP8.5 气候情景下主要采伐的树种编号为 2 号香樟、3 号香樟、96 号白栎、16 号香樟、8 号香樟、18 号苦槠、27 号青桐、50 号青桐、42 号青桐、72 号青桐,具体树种的水平空间位置和调整原因等见表 3,经过调整后林分空间坐标见图 8。通过模拟采伐

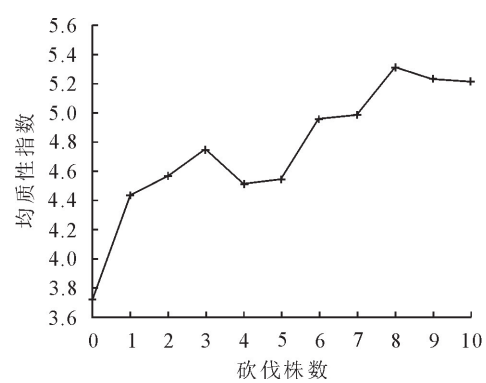


图 6 林分调整后均质性指数变化曲线

Fig. 6 Change curve of homogeneity index after stand adjustment 及相关的经营措施,林分调整后均质性指数变化曲线见图 9,其他指标变化见图 10。择伐第 1 株树,均质性指数增长速度最快,之后呈现折线上升,择伐第 7 株树指数达到最高峰,说明为林分优化最佳状态。随着采伐树种数量的增加,调整后的混交度、林层指数、开阔比数、大小比数较前皆为增加,竞争指数、角

尺度以及空间密度指数均有所下降,其中竞争指数和均质性指数的变化最大,为 $-10.34\%$ 和 $29.23\%$ 。可见,RCP8.5 气候情景下林分调整措施有效。

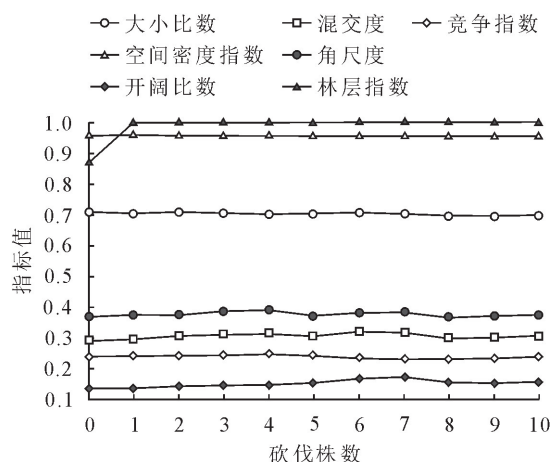


图 7 林分调整后的指标变化曲线

Fig. 7 Change curves of indicators after stand adjustment

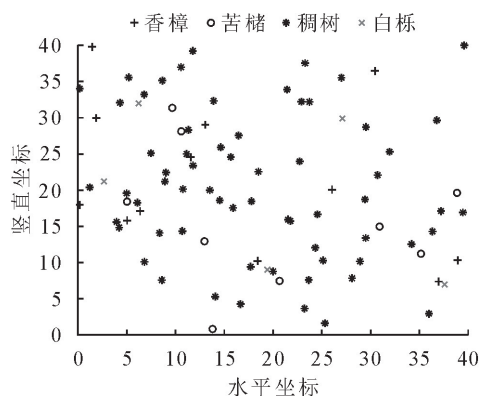


图 8 调整后的林分空间坐标

Fig. 8 Spatial coordinate of forest stand after adjustment

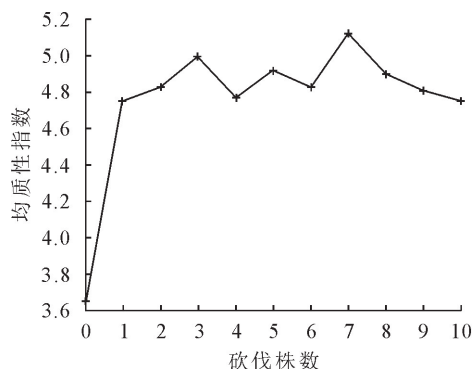


图 9 林分调整后均质性指数变化曲线

Fig. 9 Change curve of homogeneity index after stand adjustment

## 2.4 森林空间结构模拟优化效果评价

由表 4 可得,通过调控,RCP2.6 气候情景下各指标变化幅度大小依次排序为竞争指数、开阔比数、林层指数、林分均质性指数、角尺度、混交度、大小比数、空间密度指数,幅度值依次分别为 $-24\%$ 、 $21.43\%$ 、 $14.29\%$ 、 $-14.12\%$ 、 $-10.53\%$ 、 $6.67\%$ 、 $2.86\%$ 、

$-2.06\%$ 。同理,RCP4.5 气候情景下各指标变化幅度大小依次排序为林分均质性指数、开阔比数、混交度、竞争指数、角尺度、林层指数、大小比数、空间密度指数,其中变化幅度数值最大为林分均质性指数 $38.01\%$ ,变化幅度数值最小为空间密度指数 $-1.04\%$ 。RCP8.5 气候情景下各指标变化幅度最大为林分均质性指数 $29.23\%$ ,变化幅度数值最小为空间密度指数 $-1.05\%$ 。3 种气候情景下林分各指标参数的变化幅度绝对值之和分别为:RCP2.6 气候情景 95.96、RCP4.5 气候情景 76.95、RCP8.5 气候情景 68.93。可见,该样地林分的生长在 RCP2.6 气候情景下各指标参数的变化幅度绝对值之和最大。综上所述,该样地林分的生长在 RCP2.6 气候情景下较为敏感,通过林分结构的调整,优化前后的指标变化显示林分结构趋向合理。

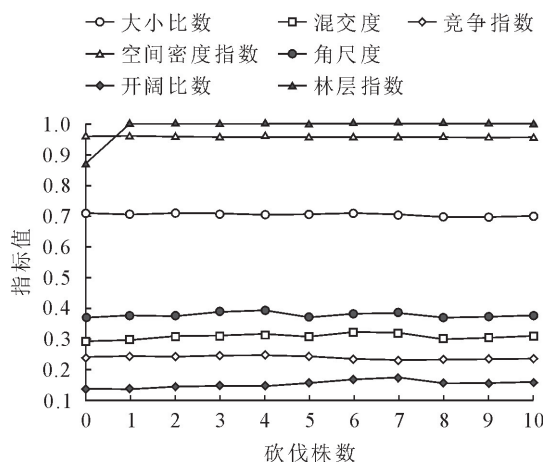


图 10 林分调整后的指标变化

Fig. 10 Change of indicators after stand adjustment

## 3 结论与讨论

RCP2.6 气候情景下,样地择伐 4 株树后林分达到优化最佳状态,随着择伐树种数量的增加,各指标产生相应的变化,其中竞争指数和开阔比数的变化幅度尤为明显。RCP4.5 气候情景下,样地择伐 8 株树后林分达到优化最佳状态,随着择伐树种数量的增加,各指标皆产生相应变化,其中开阔比数和均质性指数的变化尤为明显。RCP8.5 气候情景下,择伐第 7 株树林分达到优化最佳状态,随着采伐树种数量的增加,各指标有所变化,其中竞争指数和均质性指数的变化尤为明显。因此,3 种气候情景下的林分调整措施有效,调整后的林分结构皆优于调整前的林分结构。同时,通过 3 种气候情景下调控前后指标的平均变化分析,发现样地林分的生长在 RCP2.6 气候情景下较为敏感,各指标的变化趋势和幅度最大。

表 3 RCP8.5 气候情景下林分调整措施

Table 3 The stand adjustment measures under RCP8.5 climate scenario

编号	树种	水平空间位置	胸径/cm	树高/m	调整原因及经营措施
2	香樟	(38.93,10.26)	6.18	10.25	目标树竞争能力强,影响了周围林木的生长,可将其采伐并补植幼树
3	香樟	(27.01,26.59)	6.26	36.59	与邻木竞争激烈,邻木具有培育前景的林木,可择伐邻木改善林层结构
96	白栎	(38.95,26.54)	7.87	21.60	所在区域林木密度较大,可通过择伐邻木来调控林木密度
16	香樟	(1.99,29.92)	6.88	29.92	目标树健康程度差,周围存在大面积林隙,将其采伐,并在周围补植青桐
8	香樟	(17.08,21.60)	9.34	34.03	种间竞争激烈且周围存在较大林隙,砍伐后可补植香樟,提高该树种在林分中的竞争力
18	苦槠	(20.99,34.03)	11.08	36.67	被邻近树木挤压,且周围存在大面积林隙,可补植其伴生树种提高多样性
27	青桐	(35.73,38.68)	7.99	20.04	面临较激烈的种内竞争,砍伐后可补植伴生树,增强空间隔离
50	青桐	(23.21,5.63)	10.54	5.62	种内竞争激烈,生长状态不佳,采伐后在其周围补植樟树或苦槠,增加混交
42	青桐	(10.80,20.04)	8.23	26.54	目标树即将枯死,可将其采伐并补植青桐幼树
72	青桐	(10.47,7.23)	10.12	7.22	与邻木竞争激烈,而邻木是具有培育前景的林木,可择伐,以改善林层结构

表 4 3 种气候情景下调控前后指标的平均变化

Table 4 Average changes of indices before and after adjustment under three climatic scenarios

参数	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	优化前	优化后	变化幅度(%)	优化前	优化后	变化幅度(%)	优化前	优化后	变化幅度(%)
混交度	0.30	0.32	6.67	0.29	0.31	6.90	0.29	0.30	3.45
竞争指数	0.25	0.19	-24	0.24	0.23	-4.17	0.29	0.26	-10.34
角尺度	0.38	0.34	-10.53	0.39	0.38	-2.56	0.38	0.35	-7.89
林层指数	0.77	0.88	14.29	0.70	0.71	1.43	0.90	0.98	8.89
空间密度指数	0.97	0.95	-2.06	0.96	0.95	-1.04	0.95	0.94	-1.05
开阔比数	0.14	0.17	21.43	0.14	0.17	21.43	0.15	0.16	6.67
大小比数	0.70	0.72	2.86	0.71	0.72	1.41	0.71	0.72	1.41
林分均质性指数	3.40	3.88	14.12	3.71	5.12	38.01	3.66	4.73	29.23

本研究采用改进的多族群 PSO 算法开展未来 3 种气候情景下的南洞庭湖森林空间结构优化研究,结合实例,进一步通过调整样地林木的空间结构,阐述了不同气候情景下林木的经营调整措施。气候模式下的森林经营考虑了更多的气候因素影响,与传统的经营方式有所不同。气候变化对森林结构的影响极为复杂,选择适合的算法和适合的模型是开展气候模式下森林结构调整的关键。同时,有研究表明,气候对不同区域落叶松人工林生长的影响有差异<sup>[16]</sup>。本研究对象为天然阔叶混交林,与落叶松人工林有较大区别。天然阔叶混交林比落叶松人工林更为复杂,涉及树种较多。所采用的混合模型,相对水源涵养林空间优化模型<sup>[11]</sup>、杉木生态林林分间伐空间结构优化模型<sup>[10]</sup>,以及其他改进的相关模型<sup>[17]</sup>等有一定的优势,更适合未来 3 种气候模式下的天然阔叶混交林空间结构优化研究。目前,涉及多族群 PSO 算法的相关研究主要集中在工程和管理领域。而黄静<sup>[18]</sup>的研究表明该算法适用于森林空间结构优化。本研究结果显示,通过应用混合模型和改进的多族群 PSO 算法,取得了较为理想的结果,为气候影响下多树种森林结构优化的研究提供一定的参考。

如何在林分尺度和气候变化下开展森林经营,是森林经理研究的关注点之一。气候变化下森林经营目的主要为了调整森林结构适合于未来的气候变化。这与以水源涵养林健康的经营目的<sup>[10]</sup>、木材收获采伐的经营目的<sup>[11-13]</sup>等有较大区别。一般情况下,森林经营需要以森林功能分区划分经营小班<sup>[19]</sup>。气候变化下的森林经营目的亦需要划分经营小班开展经营,并更多考虑了系统外界环境因素的影响。不同的经营目的,需要调整的树种和位置必然不同。系统外界环境因素的影响,使森林经营的方式更为复杂。Dai 等<sup>[20]</sup>研究了江西省泰和县森林分布及森林地上生物量的变化,发现了未来气候变化将显著影响森林空间分布格局。另一位研究者发现了在不同气候情景下不同区域的落叶松人工林呈现出 2 种截然相反的生长趋势<sup>[16]</sup>。陈端吕等<sup>[21]</sup>提出了如何在森林景观“斑块耦合网络”视角下开展森林经营。上述研究主要从区域尺度以上开展,本研究主要从林分尺度开展,未来气候变化能够影响天然阔叶混交林的林分生长和林分结构。在分析前人研究的基础上,进一步通过林分均质性指数、开阔比数、混交度等指标,深入开展了天然阔叶混交林森林空间结构的模拟优化。研究结果表明 3 种气候情

景下的天然阔叶混交林林分结构调整各不相同,调整后的天然阔叶混交林林分结构皆优于调整前,促进了生长。森林经营的评价对森林经营至关重要<sup>[22]</sup>,通过效果评价指出了天然阔叶混交林样地林分的生长在 RCP2.6 气候情景下较为敏感,各指标的变化趋势最为明显,变化幅度之和的绝对值最大。同时,本研究具有可操作性,不同气候情景给出了不同的森林结构模拟优化操作,具有一定的实际意义。戎建涛等<sup>[23]</sup>指出,森林经营规划需要兼顾碳贮量和木材生产,本研究仅预测了未来 15 a 的森林结构优化,选择面积仅为 1 600 m<sup>2</sup>,未来研究需延长预测年限和增加样地数量及面积,兼顾考虑碳贮量和木材生产,进一步开展实际经营操作和验证,进一步改进算法和优化模型,从而得到更为合理的预测结果并减少运算量。

#### 参考文献:

- [1] 赵宗慈,罗勇,黄建斌. 回顾 IPCC 30 年(1988—2018 年)[J]. 气候变化研究进展,2018,14(5):540-546.
- [2] JOHNSEN K, SAMUELSON L, TESKEY R, *et al.* Process models as tools in forestry research and management[J]. Forest Science, 2011, 47(1):2-8.
- [3] HUANG J, KINDERMAM G, GHOSH S. Empirical analysis of climate change impact on loblolly pine plantations in the southern United States[J]. Natural Resource Modeling, 2011, 24(4):445-476.
- [4] CRECENTE CAMPO F, JOSÉ JAVIER CORRAL-RIVAS, VARGAS LARRETA B, *et al.* Can random components explain differences in the height-diameter relationship in mixed uneven-aged stands[J]. Annals of Forest Science, 2014, 71(1):51-70.
- [5] ADAMEC Z, DRÁPELA K. Generalized additive models as an alternative approach to the modelling of the tree height-diameter relationship[J]. Journal of Forest Science, 2015, 61(6):235-243.
- [6] BOHORA S B, CAO Q V. Prediction of tree diameter growth using quantile regression and mixed-effects models[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 319:62-66.
- [7] 李登秋,居为民,郑光,等. 基于生态过程模型和森林清查数据的森林生长量估算对比研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(10):1647-1657.
- [8] 马莉燕,张怀清,李永亮,等. 基于单木过程模型的杉木林分生长模拟研究[J]. 林业科学研究, 2016, 28(4):551-556.
- [9] BONTEMPS J D, CHARRU A, BOURIAUD O. Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives[J]. Forestry, 2014, 87:109-128.
- [10] 委霞,曹小玉,李际平,等. 福寿林场天然次生林空间结构与评价[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5):146-151  
WEI X, CAO X Y, LI J P, *et al.* Analysis and evaluation of spatial structure of natural secondary forest in Fushou forest farm[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(5):146-151 (in Chinese)
- [11] 李建军,张会儒,刘帅,等. 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型[J]. 生态学报, 2013, 33(13):4031-4040.
- [12] 胡中洋,刘锐之,刘萍. 不同尺度天山云杉活立木空间结构分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2):153-159.  
HU Z Y, LIU R Z, LIU P. Spatial structure on *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* standing tree at different scales[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2):153-159. (in Chinese)
- [13] 张君钰,杨培华,李卫忠,等. 油松林分空间结构分析及评价指标构建[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5):166-172.  
ZHANG J Y, YANG P H, LI W Z, *et al.* Analysis of stand spatial structure and construction of evaluation index of *Pinus tabulaeformis* forest[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5):166-172. (in Chinese)
- [14] ZHOU A, JIN Y, ZHANG Q. A population prediction strategy for evolutionary dynamic multiobjective optimization[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 44(1):40-53.
- [15] LIU Z G, LI F R. The generalized chapman-richards function and applications to tree and stand growth[J]. Journal of Forestry Research, 2003(1):19-26, 93.
- [16] ZANG H, LEI X, ZENG W. Height-diameter equations for larch plantations in northern and northeastern China: a comparison of the mixed-effects, quantile regression and generalized additive models[J]. Forestry, 2016, 89(4):434-445.
- [17] 曹旭鹏. 基于改进 GAPSO 的森林空间结构多目标优化研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2014.
- [18] 黄静. 基于多族群 PSO 算法的森林空间动态多目标优化研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2017.
- [19] 王建军,孟京辉,葛方兴,等. 基于森林功能分区的经营小班划分研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(3):165-170.  
WANG J J, MENG J H, GE F X, *et al.* Division of small management classes based on forest functional zoning[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(3):165-170. (in Chinese)
- [20] DAI E F, WU Z, GE Q S, *et al.* Predicting the responses of forest distribution and aboveground biomass to climate change under RCP scenarios in southern China[J]. Global Change Biology, 2016, 22:3642-3661.
- [21] 陈端吕,李际平,陈哲夫. 森林景观“斑块耦合网络”视角下森林经营思考[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5):268-272.  
CHEN D L, LI J P, CHEN Z F. Forestry management in perspective of coupling network of landscape patches[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5):268-272. (in Chinese)
- [22] 李婷婷,陆元昌,姜俊,等. 马尾松人工林森林经营模式评价[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(1):164-171.  
LI T T, LU Y C, JIANG J, *et al.* Assessment of forest management model of *Pinus massoniana* plantation[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(1):164-171. (in Chinese)
- [23] 戎建涛,雷相东,张会儒,等. 兼顾碳贮量和木材生产目标的森林经营规划研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2):155-162.  
RONG J T, LEI X D, ZHANG H R, *et al.* Forest management planning incorporating values of timber and carbon[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(2):155-162. (in Chinese)