

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.03.013

# 基于模拟退火算法的林分多目标经营 动态可视化模拟

沈康<sup>1</sup>, 杨廷栋<sup>1\*</sup>, 张怀清<sup>1</sup>, 张鸿<sup>2</sup>, 朱念福<sup>1</sup>, 刘华<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 中南林业科技大学, 湖南长沙 410004)

**摘要:** [目的] 基于模拟退火算法, 研究一种考虑林分结构健康状况和目标平均胸径的多目标森林经营方法, 同时结合单木生长方程, 基于 Unity3D 可视化引擎实现林分经营动态可视化模拟。[方法] 以湖南省攸县黄丰桥国有林场 5 块杉木人工纯林 2012—2017 年样地连年调查数据为数据源, 考虑林分分布状况、竞争程度、营养空间, 以平均角尺度、平均大小比、林分拥挤度 3 个结构参数建立空间结构函数。在此基础上, 以健康林分结构和平均胸径为经营目标, 以竞争指数为参考初步筛选出的间伐木组合排列的结果作为经营方案的集合, 通过模拟退火算法进行最优间伐经营方案解的选择。最后, 通过建立考虑 Hegyi 竞争指数的可变生长率的单木生长方程, 以结构分析-经营-生长三者不断迭代的方式并基于 Unity3D 渲染引擎实现林分经营动态可视化模拟。[结果] 通过对 5 号样地 (初始林分 230 株, 年龄 16 a, 平均胸径 20.21 cm) 以健康林分结构和 30 cm 林分平均胸径为经营目标进行经营动态可视化模拟, 结果表明林分年龄在 21、26、31 a 分别进行过间伐模拟, 当林分年龄 31 a 间伐后, 林分平均胸径达到 30.10 cm, 林分平均角尺度为 0.64, 林分拥挤度为 0.74, 林分结构接近健康水平。[结论] 本研究提出的基于模拟退火算法的林分多目标经营动态可视化模拟方法能够模拟在多目标经营需求下的林分动态, 并且形象直观, 可以进一步为林业科研和生产提供支持。

**关键词:** 空间结构函数; 模拟退火算法; 林分多目标经营; 单木生长方程; 动态可视化模拟

**中图分类号:** S750

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2020)03-0099-08

森林多目标经营优化的研究由来已久, 从传统数学模型到人工智能算法<sup>[1-4]</sup>, 主要侧重于在经营目标和约束条件的指导下寻找一种合适的最优解, 多为森林某一阶段的静态经营<sup>[5-7]</sup>。随着对森林经营认识的深入, 各国都意识到维护森林生态系统结构与多样性的重要性<sup>[8]</sup>, 并相继提出了保持森林生态结构的经营理念, 如德国的近自然经营和美国的生态系统管理, 近年来以惠刚盈等人的结构化森林经营成为国内外学者研究森林经营的热点<sup>[9-13]</sup>。以汤孟平、李建军、曹旭鹏等人为代表, 通过林分空间结构分析构建多目标林空间优化模型来进行森林空间结构调整<sup>[6-7, 9]</sup>, 但结构调整不是连续动态地调整。权兵、王灵霞、张敏等人将林分生长方程和抚育间伐相结合, 以林分密度为指标研究连续动态的

森林经营, 并设计了森林三维可视化系统<sup>[14-16]</sup>, 但是仅采用林分密度指标难以准确分析出林分的综合状况。另外有学者对连年调查样地研究发现可变生长率的生长方程在拟合单木生长方程方面有较大的优势<sup>[17-18]</sup>。因此, 本研究基于模拟退火算法、可变生长率的生长方程并结合结构化森林经营思想, 研究一种考虑林分结构健康状况和平均胸径的多目标森林经营动态模拟方法, 同时结合 Unity3D 可视化引擎, 实现林分经营动态可视化模拟。

## 1 实验区概况及数据采集

### 1.1 实验区概况

实验区设置在湖南省攸县黄丰桥国有林场, 林场地处 113°04′~113°43′E、26°43′~27°06′N 之间,

收稿日期: 2019-08-10 修回日期: 2019-10-10

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2017YFD0600905)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (CAFYBB2019SZ004)

\* 通讯作者: 杨廷栋. Email: yangtd@ifrit.ac.cn

最低海拔 115 m, 最高海拔 1 270 m。隶属于亚热带季风气候, 平均气温 17.8 ℃, 年降水量 1 410.8 mm, 森林覆盖率为 90.07%, 是湖南省重点杉木大径材推广示范基地。

## 1.2 数据采集方法

用常规的测树学方法对选择的样地进行每木检

尺和单木定位, 测量其胸径、树高、冠高、冠幅、活枝下高、生长情况以及树木的相对位置(x,y,z), 按照 1 年时间为间隔期, 采集了 2012—2017 年的连年调查数据, 总结其中地位指数相同的 5 块样地数据如表 1 所示:

表 1 样地调查数据

Table 1 Sample plot survey data

样地编号Sample ID	面积Area/(m×m)	年龄Age/a	株数Stem num	胸径DBH/cm	树高H/m	冠幅CW/m	枝下高UBH/m
1	60×60	17~22	533	7.1~15.9~35.6	4.3~11.4~23.8	0.45~3.17~3.8	1.2~6.14~13.6
2	50×80	24~29	363	13.3~23.48~38.3	8.4~17.0~29.5	1.3~3.82~4.2	1.7~11.13~19
3	50×50	11~16	310	5.9~15.2~30.6	5.3~11.6~19.8	0.85~3.03~4.0	2.5~6.22~13.1
4	50×80	10~15	953	3.2~12.12~26.8	3.2~9.6~17.8	0.5~2.5~3.8	1.3~5.65~13.7
5	50×50	16~21	231	10.5~21.21~34	6.7~14.97~19.9	1.6~3.8~7.5	2.6~8.1~14.2

注: a~b~c, a为最小值, b为平均值, c为最大值

Note: a~b~c, a is the minimum, b is the average and c is the maximum.

## 2 研究方法

### 2.1 空间结构函数构建

根据惠刚盈等人提出的结构化森林的经营思想, 健康的林分结构可以通过角尺度、大小比数、混交度、拥挤度 4 个结构参数加以描述, 分别代表了林分的分布状况、林分的竞争情况、林分种间的隔离程度、林木的营养空间大小, 根据前人的研究成果, 健康的林分结构在这 4 个参数中均可以用林分均值定量化来表示<sup>[11]</sup>。本研究以杉木人工纯林为研究对象, 考虑到人工纯林混交度为零, 所以剔除混交度参数, 建立空间结构函数, 公式如下, 当空间结构函数  $Q(g)$  越小, 林分结构越接近健康水平。

$$Q(g) = |\bar{W} - 0.5| + |\bar{C} - 0.9| + \frac{\bar{U}_a}{\bar{U}_{a-0}} \quad (1)$$

其中  $g$  为样地林木向量;  $\bar{W}$  为林分平均角尺度;  $\bar{U}_a$  为调整后的林木大小比数;  $\bar{U}_{a-0}$  为调整前的大小比数;  $\bar{C}$  为林分平均拥挤度。

### 2.2 基于模拟退火算法的最优间伐经营方案选择

通过空间结构函数来进行间伐木的判断, 按照惠刚盈等人提出的方法需要对每一株木的结构参数进行计算, 并且需要对模拟出的多种预间伐后的方案进行比较, 虽然这种穷举法可以得出经营的最优解, 但是, 一旦树木的数量较大, 计算起来可能会出现难以忍受的等待时间。考虑节省人力物力的条件下, 满足森林经营整体需求的次优解也是被允许的, 因此本研究设计了一种基于模拟退火算法

(SAA) 的最优间伐经营方案选择, 模拟退火算法是求解组合问题的主要方法之一, 它主要是基于 Monte-Carlo 迭代求解策略的一种随机寻优算法, 对于求解最优组合快速、稳定、有效<sup>[19-20]</sup>。基于 SAA 的最优间伐经营方案选择过程如下:

初始化温度  $T$ , 设置温度下降的速率  $r$  和临界值, 计算出未间伐经营条件下的空间结构函数的值为初始解  $ans$ 。根据竞争指数的比较, 建立间伐经营方案链表, 在某一温度下随机选取一个索引的间伐经营方案的空间结构函数作为新解  $tmp$ , 当  $\Delta=tmp-ans<0$  时, 接受  $tmp$ ; 当  $\Delta=tmp-ans>0$  时, 根据数据量设置该温度阶段的循环次数  $K=10$ 。当循环终止时, 按照  $\exp((tmp-ans)/T)$  的概率接受次优解  $tmp$  并且将温度下降为  $T=T*r$ , 当温度降到临界值时, 得到间伐经营方案的解趋向于全局最优解。

### 2.3 经营动态可视化模拟

采用了张雄清等人<sup>[17]</sup>的基于 Hegyi 竞争指数的可变生长率的单木生长方程作为林分的生长驱动方程, 结合基于模拟退火算法的最优间伐经营方案选择实现林分的生长与经营的动态交互, 并在动态的变化中满足经营者的需求。经营动态可视化模拟的过程如下:

①初始化林分场景。通过读取 Excel 数据表, 设杉木根部坐标为(x,y,z), 初始单木胸径为  $D_0$ , 树高为  $H_0$ , 冠幅为  $CW_0$ , 活枝下高为  $UBH_0$ , 则初始时林木的位置  $Tree\_Position=(x,y,z)$ , X-Z 平面缩放

系数  $Tree\_XZscale=D_0/D$  ( $D$  为原始模型的胸径大小,如图1所示),  $Y$  方向上的缩放系数为  $Tree\_Yscale=H_0/H$  ( $H$  为原始模型的树高大小)。

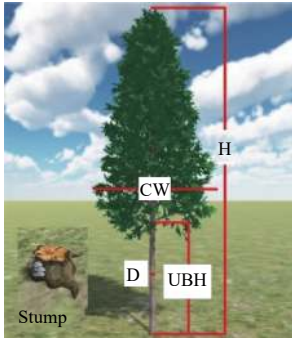


图1 初始杉木模型和树桩模型

Fig. 1 Initial Chinese fir model & stump model

②林分经营判断与最优经营方案选择。基于空间结构参数分析森林经营紧迫性,根据分析结果和经营者的实际考虑确定是否进行间伐。一旦确定进行间伐,首先通过竞争指数的比较初步筛选出预间伐木,建立间伐经营方案链表,然后基于模拟退火算法确定最优间伐经营方案,被确定为间伐木对象其间伐属性(Cut)设置为1,  $Tree\_Position=(x,y,z)$ ,  $x,y,z$  设置为无限远,并用Unity3D中Asset Store下载的树桩模型(如图1)替换树木原来的位置。

③林分生长动态变化。基于Unity3D关键帧技术,将树木的生长以一定的间隔化分为若干阶段,每一阶段用一个关键帧表示。在基于竞争指数的可变生长率的生长方程的模拟下,计算出第  $i$  关键帧的杉木胸径设为  $D_i$ , 树高设为  $H_i$ , 冠幅设为  $CW_i$ , 活枝下高设为  $UBH_i$ , 则此刻林木的位置  $Tree\_Position=(x,y,z)$ ,  $X-Z$  平面缩放系数  $Tree\_XZscale=D_i/D_{i-1}$  ( $i>1$ ),  $Y$  方向上的缩放系数为  $Tree\_Yscale=H_i/H_{i-1}$  ( $i>1$ )。

④以健康林分结构特征和目标林分胸径为经营目标作为停止条件,将步骤②和步骤③进行循环往复,直到满足经营目标为止。

## 3 结果与分析

### 3.1 林分经营紧迫性分析

根据惠刚盈等人提出的健康林分的判断标准<sup>[11]</sup>,将纯林林分是否间伐划分为4种情况:不经营、适当经营、需要经营、必须经营。将攸县黄丰桥国有林场5号样地数据导入,初始化渲染场景,

分析样地的空间结构特征如表2,经营紧迫性为适当经营,表明有其中一个指标不满足条件,由表2可以看出,平均角尺度不在  $[0.475\sim 0.517]$  的健康林分区间。

表2 初始林分结构参数分析结果

Table 2 Analysis results of initial stand structure parameters

结构参数 Structural parameters	数据 Data
每公顷株数 Number of plants per hectare	920
林分拥挤度 Stand crowding	0.996 7
平均角尺度 Average Angle Scale	0.637 4
平均胸径/cm Average diameter at breast height	20.208 1
蓄积量/( $m^3 \cdot hm^{-2}$ ) Accumulation	215.177 2
经营紧迫性 Managment urgency	适当经营

### 3.2 基于Hegyi竞争指数的可变生长率的单木生长方程拟合与检验

3.2.1 基于Hegyi竞争指数的可变生长率的单木生长方程拟合 通过改进张雄清等人的基于Hegyi竞争指数的可变生长率的单木生长方程,进行胸径生长拟合,参数方程如公式(2):

$$D(i,t+1) = D(i,t) + \text{Exp}(B1 + B2/At + B3 \cdot Cli) \quad (2)$$

$D(i,t+1)$ : 表示第  $i$  棵树在  $t+1$  年的胸径;  $D(i,t)$ : 表示第  $i$  棵树在  $t$  年的胸径;  $At$ : 表示林分的年龄;  $Cli$ : 表示第  $i$  棵树的Hegyi-Ci的竞争指数;  $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$  为参数。

对前4块样地的连年调查数据进行处理,剔除波动较大的异常值数据,然后通过ForStat2.2进行非线性拟合,拟合胸径的生长方程结果如表3所示,参数  $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$  取值的95%的置信区间上下限均没有跨越0,表明参数值可用;表4数据显示  $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$  三个参数的相关性较低,说明函数构造合理,故拟合出的胸径生长的方程。在得出胸径的生长方程后,通过线性回归分析可以得出胸径

表3 基于非线性拟合生长方程结果

Table 3 Fitting growth equation results based on nonlinear method

参数 Parameter	参数值 Value	渐近标准差 Asymptotic standard deviation	参数下线 Minimumvalue	参数上限 Maximumvalue
$B1$	-0.822 2	0.032 9	-0.885 6	-0.758 7
$B2$	15.209 5	0.438 9	14.349 3	16.069 8
$B3$	-1.970 2	0.064 1	-2.095 8	-1.844 6

表4 参数的渐近相关系数

Table 4 Asymptotic correlation coefficient of parameters

参数 Parameter	B1	B2	B3
B1	1.000 0	-0.673 2	-0.355 4
B2	-0.673 2	1.000 0	-0.415 2
B3	-0.355 4	-0.415 2	1.000 0

与树高、冠幅以及树高与枝下高之间存在明显的线性关系，如图2所示，从图中可以看出D-H、D-

CW、H-UBH的 $R^2$ 分别是0.7908、0.5418、0.5786，表明胸径树高相关性较高，胸径冠幅和树高枝下高相关性较差一些。

$$D(i, t+1) = D(i, t) + \text{Exp}\left(-0.822 + 15.209 \frac{5}{At} - 1.9702 * C I i\right)$$

3.2.2 数据检验 选择5号样地的连年数据对上述单木生长方程结果进行验证，由图3可知胸径与树高估计值与实测值偏差较小，枝下高与冠幅的估计

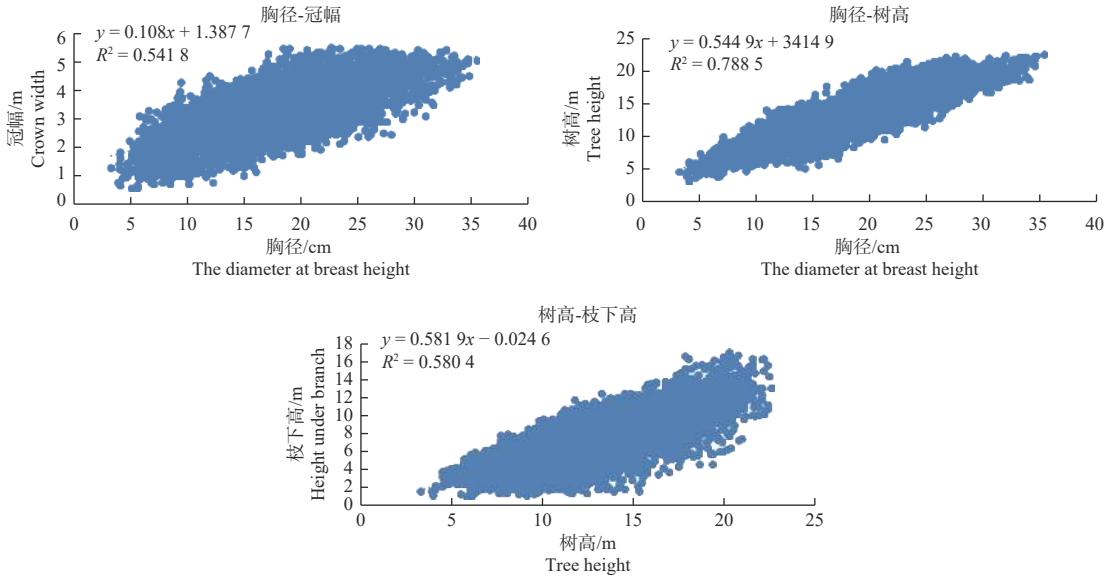


图2 3种树木因子线性回归结果(胸径-树高、胸径-冠幅、树高-枝下高)

Fig. 2 Linear regression results of three tree factors (DBH-HDBH-CW, H-UBH)

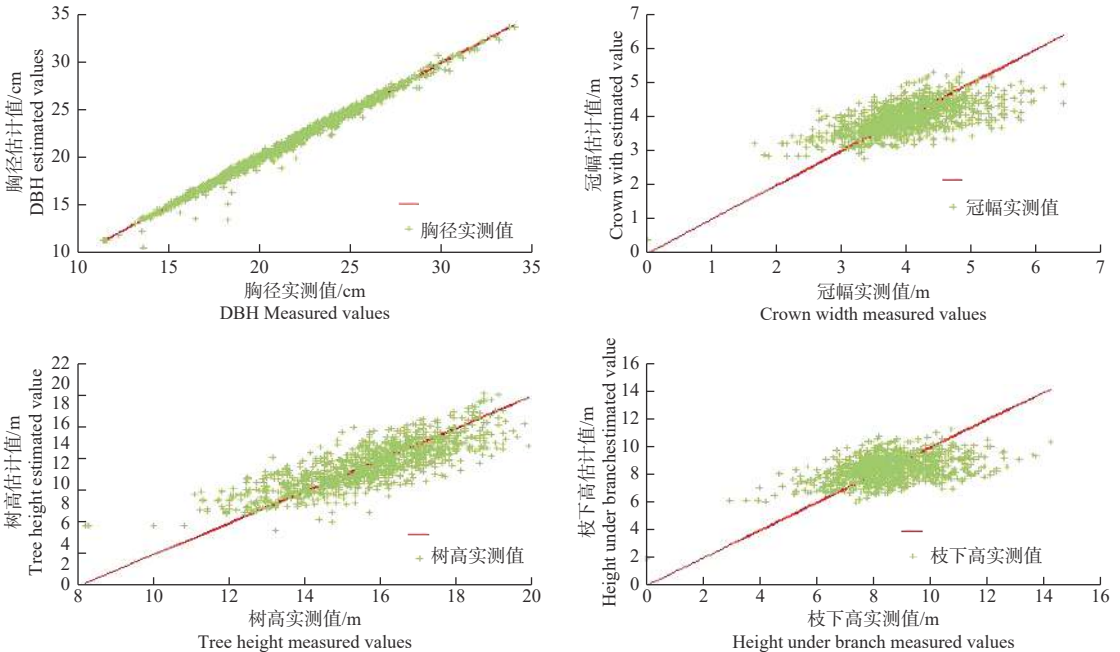


图3 4种树木因子拟合值与实测值比较

Fig. 3 Comparison of fitting value and measured value of four tree factor



值与实测值偏差较大,这一趋势与上面拟合的单木生长方程  $R^2$  的大小比较结果一致,虽然枝下高与冠幅的拟合结果与真实值有一定的差距,但总体上具有一定的相关性,因此基本满足生长拟合的要求。

### 3.3 基于模拟退火算法的最优间伐经营方案选择结果

根据间伐量不得大于生长量的原则,在竞争指数的比较中对采伐木进行初步的筛选,本研究根据样地实际情况,筛选出竞争指数较大的前 10% 作为预间伐木,然后对初步筛选后的间伐木进行组合排列,制定出所有经营方案的集合,通过模拟退火算法对所有间伐经营方案进行最优解的计算,得出最优采伐方案,同时对最优解与未间伐下的空间函数进行比较,以确定是否需要实施经营,由于初始林分 (16 a) 时林分经营紧迫性分析为适当经营 (如图 4 左), 所以对该样地进行连续 5 a 的生长模拟,再对生长后 (21 a) 的林分重新进行经营紧迫性分析,分析结果为需要经营 (如图 4 右), 因

此对其进行经营模拟。图 5 左为通过竞争指数初步筛选的间伐木结果,从图中可以看出初步筛选了 23 株预采伐木,图 5 右为基于模拟退火算法判断的最优间伐经营方案选择结果,实际间伐了 4 株树木。

### 3.4 经营动态可视化模拟过程

经营动态可视化模拟过程可以抽象成林分状态场景、林分结构与经营紧迫性分析、林分生长、间伐经营方案和经营目标 5 个模块,它们之间相互连接与迭代构成了林分动态生长与经营过程。如图 6 所示,林分状态场景用于模拟林分不同时期的三维渲染;林分结构与经营紧迫性分析用于分析不同时期林分结构的状况和经营紧迫性的等级,主要侧重于数字化的表达,从而判断林分是否生长还是间伐;林分生长通过生长率的变化模拟出下一年的生长量;间伐经营方案则是在分析结构与胸径的基础上以间伐树木控制林分的状态;在实施生长或者间伐后,判断经营目标,重新回到林分状态,如果满足经营要求停止活动,否则继续以上步骤。

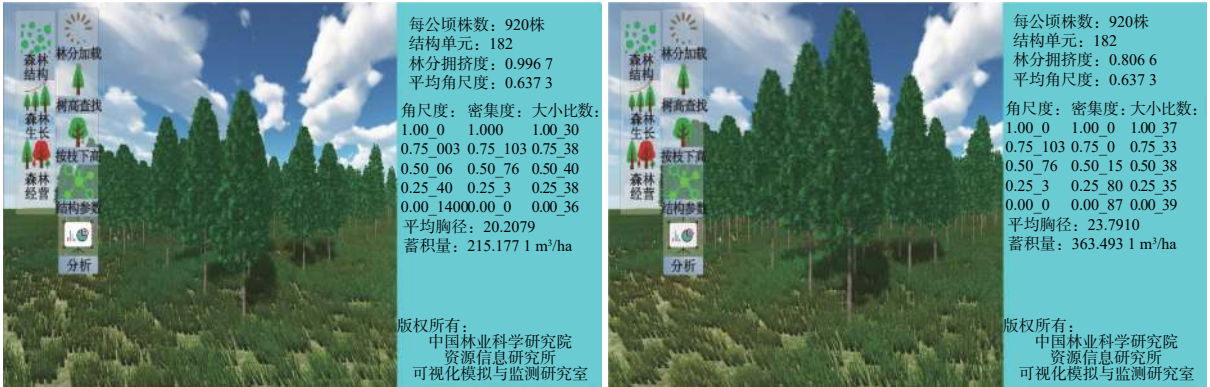


图 4 生长前 (左) 后 (右) 经营紧迫性分析

Fig. 4 Analysis of management urgency before (left) and after (right) growth



注: 红色小球表示预间伐木, 红色圆圈表示已间伐

Note: Red balls denote pre-thinning trees and red circles denote thinning trees.

图 5 间伐木判断 (左) 与间伐执行结果 (右)

Fig. 5 Judgment of thinning (left) and results of thinning execution (right)

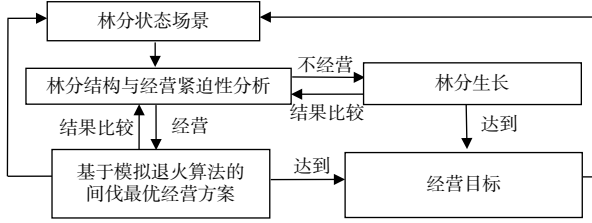


图6 经营动态过程

Fig. 6 Dynamic process of management

本研究以林分平均胸径达到 30 cm 和健康的林分结构为经营目标，对 5 号样地进行经营动态可视化模拟，模拟结果如图 7 所示。5 号样地初始林分场景时（如表 5 所示），林分平均年龄为 16 a，平

均胸径为 20.21 cm，平均角尺度为 0.64，即分布状态为团状分布，经营紧迫性为适当经营，所以对 5 号样地进行采取生长模拟。本研究将间伐间隔期设定为 5 a，模拟出 5 号样地 21 年生的林分状况，此时林分平均胸径为 23.79 cm，平均角尺度没有变化，因为没有对林分进行间伐模拟，林分树木相对位置没有发生变化，林分拥挤度为 0.81，表明林分平均冠幅变大，林分逐渐拥挤，经营紧迫性为需要经营，对林分进行间伐模拟，模拟结果为图 7 中上所示，间伐了其中的 4 株树木，间伐后重新对林分进行分析，结果表明林分经营紧迫性仍为需要经营，但间伐后如图 8 所示密集度分布向右偏移，表

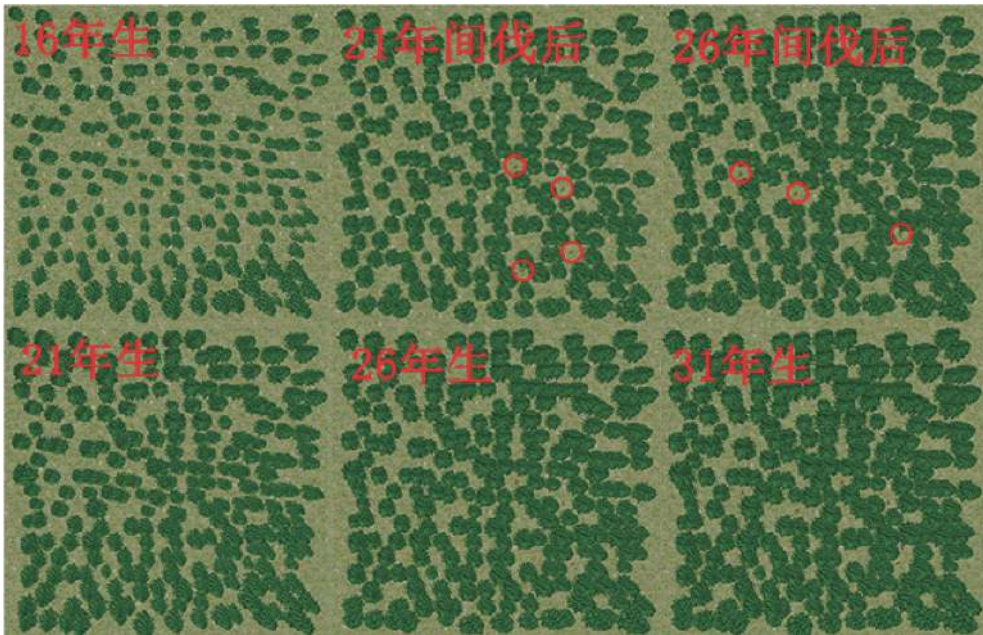


图7 经营动态可视化模拟过程

Fig. 7 Management dynamic visualization simulation process

表5 经营统计表

Table 5 Management statistics

林分年龄 Age	间伐状况 Thinning condition	经营紧迫性 Management urgency	平均胸径 Average diameter at breast height /cm	蓄积量 Accumulation /( $m^3 \cdot hm^{-2}$ )	平均角尺度 Average angle Scale	林分拥挤度 Stand crowding	SAA前函数取值 Function value before SAA	SAA后函数取值 Function Value after SAA
16	未间伐	适当经营	20.208 0	215.177 1	0.637 4	0.996 7		
21	未间伐	需要经营	23.791 0	363.493 1	0.637 4	0.806 6	1.247 8	
21	间伐	需要经营	23.886 2	360.335 5	0.644 7	0.843 9		1.234 8
26	未间伐	必须经营	27.006 9	500.899 8	0.644 7	0.779 5	1.262 3	
26	间伐	必须经营	27.139 9	495.342 1	0.645 1	0.786 9		1.259 2
31	未间伐	必须经营	30.025 3	653.283 9	0.645 1	0.725 9	1.313 2	
31	间伐	需要经营	30.095 9	648.260 7	0.640 3	0.744 7		1.310 7

注：SAA为模拟退火算法(Simulated annealing algorithm)简称  
Note: SAA is short for simulated annealing algorithm



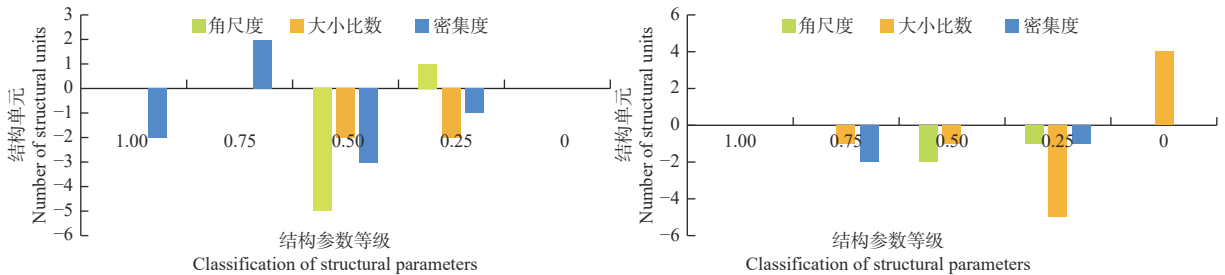


图8 经营前后结构参数等级差值分布(左21a,右26a)

Fig. 8 Distribution of structural parameter grades before and after management(left 21a, right 26a)

明拥挤程度有所下降,大小比数向左偏移,表明垂直竞争下降,所以经营仍然有效。由于平均胸径未达到目标,因此继续对林分进行生长模拟。在连续的生长模拟与间伐模拟后,当林分平均年龄模拟到31 a时,林分平均胸径达到30.02 cm,林分经营紧迫性为必须经营,表明仍需要对林分进行经营模拟,对林分进行间伐模拟后,经营紧迫性等级下降一级,间伐后平均胸径为30.10 cm,故结束此次林分模拟。

## 4 讨论

本研究以湖南省攸县黄丰桥国有林场5块长期固定样地为数据源,通过林分结构参数,建立了空间结构函数,并采用模拟退火算法进行间伐经营方案的最优选择,用以指导经营采伐;同时,研建了基于竞争指数的可变生长率的生长方程,得到了胸径与树高、胸径与冠幅、树高与枝下高之间具有相关性,且胸径与树高之间相关性最强;并基于Unity3D三维渲染引擎,模拟了林分动态经营采伐过程,效果形象逼真,运行流畅,但也存在一些不足之处。

1) 本研究模拟的为同龄纯林,未涉及混交异龄的经营,因此空间参数选择较少,对于混交度、开敞度等其他空间结构参数等没有引入,因此经营紧迫性划分等级较为粗放,另外没有考虑补植经营措施的影响,因此需要在以后的研究中进行深入。

2) 基于模拟退火算法的最优间伐经营方案选择与模拟退火温度的上下限以及下降速率有关,本研究考虑了计算机的性能,适当的降低了温度的上下限和提高了下降速率。另外,考虑到样地林木数量较少,故在竞争指数初步筛选间伐木时,仅选择了竞争指数较大的前10%的树木作为预间伐木,因此可能会出现间伐后的效果不是太明显,间伐结

果不一定是最优经营解的情况。

3) 对于可视化模拟大面积动态经营的能力还有所欠缺,主要包括两个方面的原因:一方面大面积树木的渲染需要消耗大量GPU性能,虽然可以通过层次细节(LOD)和射线碰撞检测进行缓解,但是问题依旧存在;另一方面前期的空间结构参数的计算以及组合经营方案集的遍历也会随着树木数量的上升,出现等待的情况,在以后的研究中仍需要研究有效的算法来进行组织。

## 5 结论

模拟退火算法是解决大量组合排列问题的有效方法之一,通过合理的构建目标函数,对于解决森林经营中存在的大量组合排列问题也同样具有很好的效果。本研究通过可视化的手段形象地描述了模拟退火算法在森林经营中应用的可行性,生动地展示了在多目标需求下的森林生长与经营的整个过程,对于进一步提高经营水平和经营的精细化程度具有一定的作用。

## 参考文献:

- [1] 张会儒. 森林经理学研究方法与实践[M].北京:中国林业出版社,2018.
- [2] 亢新刚. 森林经理学[M].北京:中国林业出版社,2013.
- [3] Diaz-Balteiro L, Romero C. Forest management optimisation models when carbon captured is considered: A goal programming approach[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 174(1-3): 447-457.
- [4] Pete B, Kevin B, Jacek P S, et al. Forest management and planning[M].United Kingdom:Academic Press, 2016
- [5] 邓超. 基于多功能经营的杉木生态公益林空间结构优化研究[D].长沙:中南林业科技大学,2016
- [6] 汤孟平,唐守正,雷相东,等. 林分择伐空间结构优化模型研究[J]. 林业科学,2004,40(5): 25-31.
- [7] 曹旭鹏,李建军,刘帅,等. 基于MO-GA的洞庭湖森林生态系统

- 经营的理想空间结构模型[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3136-3144.
- [8] Gadow K V, Zhang C Y, Wehenkel C, *et al.* Forest Structure and Diversity[M]. Contionous Cover Forestry: Springer Netherlands, 2012, 29-83
- [9] 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.
- [10] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华. 结构化森林经营研究进展[J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 85-93.
- [11] 惠刚盈, Klaus von Gadow. 结构化森林经营[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016
- [12] Aguirre O, Hui G Y, Gadow K V, *et al.* An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 183(1-3): 137-145.
- [13] Zhao Z H, Hui G Y, Hu Y B. Testing the significance of different tree spatial distribution patterns based on the uniform angle index[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2014, 44(11): 1419-1425.
- [14] 王灵霞. 杉木人工林生长模拟与经营管理三维可视化[D]. 福州: 福州大学, 2015
- [15] 权 兵. 基于虚拟森林环境的林分生长和经营模拟研究[D]. 福州: 福州大学, 2005
- [16] 张 敏, 张怀清, 陈永富. 杉木人工林抚育间伐可视化模拟技术研究[J]. 林业科学研究, 2009, 22(6): 813-818.
- [17] 张雄清, 雷渊才. 可变生长率法和固定生长率法在单木年生长预测中的比较研究[J]. 林业科学研究, 2009, 22(6): 824-828.
- [18] Sijia Li, Huaiqing Zhang, Yongliang Li, *et al.* Three-Dimensional visualization simulation of chinese Fir stand growth based on Unity 3d[C]. ICMCCE 2018 Conference, 530-534
- [19] 董灵波, 刘兆刚. 基于森林空间规划问题的模拟退火算法参数敏感性研究[J]. 林业科学研究, 2018, 31(4): 9-17.
- [20] 董灵波, 孙云霞, 刘兆刚. 基于模拟退火算法的森林空间经营规划[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(1): 133-140.

## Dynamic Visual Simulation of Stand Multi-objective Management Based on Simulated Annealing Algorithm

SHEN Kang<sup>1</sup>, YANG Ting-dong<sup>1</sup>, ZHANG Huai-qing<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>2</sup>, ZHU Nian-Fu<sup>1</sup>, LIU Hua<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Central South University of Forestry Science and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

**Abstract:** [Objective] Based on simulated annealing algorithm, a multi-objective forest management method considering the health status of stand structure and average diameter of stand was studied. The individual tree growth equation was used to realize the dynamic visualization of the stand management based on the Unity3D visualization engine. [Method] Based on 2012-2017 survey data of 5 Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) sample stands located in Huangfengqiao State-owned Forest Farm of You County, Hunan Province, considering the distribution status, competition degree and nutrient space of the stand, the spatial structure function was established by three structural parameters: average angular scale, average size ratio and forest congestion degree. On the basis of spatial structure function, taking the healthy forest structure and the average diameter as management objectives, taking the results of a combinatorial permutation of thinned trees as the set of management planning with competition index as reference, the simulated annealing algorithm was used to select the optimal thinning management planning. Finally, by establishing a individual trees growth equation considering the variable growth rate of Hegyi competition index, the structural analysis-management-growth method was continuously iterated and the dynamic visualization of the forest management based on Unity3D rendering engine was realized. [Result] The dynamic visualization of the management dynamics was carried out on the plot 5 (initial stand of 230 trees, 16-years-old, average diameter 20.21 cm) with the healthy stand structure and average diameter of 30 cm as target. The stand was simulated thinned in the 21st, 26th, and 31st years. When the forest was 31 years old (after thinning), the average diameter reached 30.10 cm, the average angular scale of the forest was 0.65, and the forest congestion was 0.74, which showed a health level. [Conclusion] The dynamic visual simulation method of forest multi-objective management based on simulated annealing algorithm proposed in this paper can simulate forest dynamics and meet the multi-objective management demand. The image is intuitive, and can support research and production.

**Keywords:** spatial structure function; simulated annealing algorithm; forest multi-objective management; individual tree growth equation; dynamic visualization simulation