

# 森林景观模拟与构景因素控制试验

徐珍珍, 史久西\*, 格日乐图

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400)

**摘要:** [目的]通过构景因素控制试验,揭示林木胸径与密度对森林景观的影响规律,为林分密度调控提供参考。[方法]以枫香林为例,综合应用 PhotoShop、AutoCAD、SpeedTree 等软件,开展森林景观模拟;借助林业试验设计方法开展胸径、密度与景观美景度关系的两因素、单因素控制性试验。[结果](1)在设定的 10 个密度水平下,胸径变化对美景度(SBE)的影响总体不显著,景观优劣次序为 20 cm > 30 cm > 10 cm;但若取各胸径级前 3 个高分 SBE 比较,则优先次序为 30 cm > 20 cm > 10 cm;(2)密度对美景度的影响总体上为极显著,不同胸径级的美景度随密度变化均为先升后降趋势,以适中密度为最优,但随着树体的增大,峰值密度向左偏移,10 cm、20 cm、30 cm 的最佳密度分别为 1 389、833、389 株·hm<sup>-2</sup>。密度-美景度曲线拟合结果为二次曲线,函数形式分别为  $SBE_{10} = 3.435 + 0.005X_1 - 1.639E(-6)X_1^2 (R^2 = 0.719)$ 、 $SBE_{20} = 4.013 + 0.004X_2 - 1.677E(-6)X_2^2 (R^2 = 0.713)$ 、 $SBE_{30} = 6.355 + 0.001X_3 - 8.128E(-7)X_3^2 (R^2 = 0.728)$ ;(3)胸径与密度的交互效应对美景度有极显著影响,但同一密度、同属随机分布的不同模拟场景对美景度的影响不显著。[结论]组合应用多种软件进行森林景观模拟与评价取得了良好结果,方法可行;林分美学质量受胸径、密度两个因素的综合影响,随着胸径增大而提高,但不同胸径有不同的最佳配密匹配度。

**关键词:**森林景观模拟;控制试验;枫香;美景度;林分密度;胸径

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1001-1498(2017)02-0276-09

## Forest Landscape Simulation and Scenic Beauty Degree Influence Factors Control Experiment

XU Zhen-zhen, SHI Jiu-xi, GERI Le-tu

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] The experiment for constitutive factors controlling was designed to reveal the rules of influence of DBH and density on forest landscape and provide a reference value to density control. [Method] Taking *Liquidambar formosana* forest as an example, some software, like PhotoShop, AutoCAD, SpeedTree et al were used to carry out forest simulation. With the help of forest test design method, the two-factors and single-factor controlling tests about DBH, density and scenic beauty evaluation (SBE) were conducted. [Result] (1) Under preset density level, the DBH had no significant influence on SBE. The landscape pros was 20 cm > 30 cm > 10 cm; but if comparing the 3 best SBE values in each grade DBH, the priority was 30 cm > 20 cm > 10 cm. (2) The density had a very significant influence on SBE. The changes of SBE of different DBH followed a trend of increasing at initial and then descending. The moderate density showed the best. But with the increase of tree volume, the peak density deviated to the left. The best densities for 10 cm, 20 cm, and 30 cm were respectively 1 389, 833, and 389 plants/hm<sup>2</sup>. The density-SBE curve fitting resulted in a quadratic curve, the functional form are  $SBE_{10} = 3.435 + 0.005X_1 -$

收稿日期:2016-06-12

基金项目:国家林业公益性行业科研专项经费项目“美丽城镇森林景观的构建技术与示范(201404301)”。

作者简介:徐珍珍(1989—),女,吉林桦甸人,硕士研究生,主要从事森林景观评价研究。

\* 通讯作者:史久西,男,高级工程师,博士,主要从事城市林业研究。E-mail:shijiuxi@126.com。

1. 639E(-6)X<sub>1</sub><sup>2</sup>(R<sup>2</sup>=0.71), SBE<sub>20</sub>=4.013+0.004X<sub>2</sub>-1.677E(-6)X<sub>2</sub><sup>2</sup>(R<sup>2</sup>=0.713), SBE<sub>30</sub>=6.355+0.001X<sub>3</sub>-8.128E(-7)X<sub>3</sub><sup>2</sup>(R<sup>2</sup>=0.728). The interaction effect of DBH and density had a significant influence on SBE, but the repeated simulations of different aspects were not significant. [Conclusion] The method was feasible which achieved a better result by combining application of a variety of commercial software for simulation and evaluation of forest landscape. The Forest aesthetic quality is affected by the combination of two factors, DBH and density. The quality is development with the increasing of DBH, but different DBH has different best density to match.

**Keywords:** forest landscape simulation; control experiment; *Liquidambar formosana*; scenic beauty evaluation; forest density; diameter at breast height

迄今为止,对森林景观美学质量的研究多是以现实森林为对象,面对错综复杂的构景要素和环境条件,一般需要选择足够数量的典型样地,进行多指标综合分析<sup>[1]</sup>。借助景观模拟技术,有望对试验条件进行控制,以较少的典型样本来研究某些目标因子对景观质量的影响规律,同时有利于比较不同的景观预案,寻找最佳目标景观和相应的标准参数。

森林景观的模拟以植物建模和可视化为基础。自上世纪70年代以来,植物建模和可视化研究持续发展,研究的出发点大致可分为两类,一是从生物学研究的需求出发,采用一定的数字化模型模拟植物的形态、生长和群落发展<sup>[2-4]</sup>;二是从视觉模拟的角度出发,通过给定参数对植物的几何结构进行控制,生成几何表达<sup>[5]</sup>。与之相应,众多植被建模的专业软件被开发出来,然而,面向生物学研究的软件,可较好地解释生物学机理<sup>[6]</sup>,但人机交互能力弱,难以生成自然真实的几何模型。而面向视觉模拟的软件,视觉效果好,参数控制更为直接有效<sup>[7]</sup>,但其生物学含义不严格,且从几何到图像表达、从单体建模到群体场景组装,不同的软件都有针对性优化方向,很少集各种所长于一体。

目前,森林景观模拟已越来越多地应用于林业生产和研究实践,包括景观设计<sup>[8-9]</sup>、生长模拟<sup>[10-11]</sup>、群落演替<sup>[12]</sup>、经营管理决策<sup>[13-17]</sup>等领域,但在景观质量评价研究上还很少应用<sup>[18]</sup>,原因之一可能是以评价为目的的森林场景模拟,一方面要求真实的视觉效果,另一方面需要方便记录到树木与林分参数,而目前市面上还没有一款能够同时满足这些要求的软件产品。综合使用多种软件、插件<sup>[19-20]</sup>,发挥各自所长,是开展森林景观模拟与评价的一条可行途径。本文从一个枫香林密度调控与林相改造工程的实际需要出发,应用 PhotoShop、AutoCAD、SpeedTree<sup>[21]</sup>等图形学软件,进行森林场景

模拟,开展森林构景因子的控制性试验,以期为森林美学研究尝试一种新的方式,为工程实践提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 模拟景观概况

模拟的森林景观以小坞坑林区的枫香(*Liquidambar formosana* Hance)林为参考。小坞坑林区位于浙江省杭州市富阳区城郊,森林起源于伐薪迹地上发生的次生林和人工林,总面积70 hm<sup>2</sup>,其中枫香林比例较大,约占10%,其龄林、胸径及密度分布范围较广,长势与林相参差不齐。林区于2011年纳入了杭州市西郊森林公园后,开辟为城市游憩林,设置了步游道,提出了彩色化、珍贵化的森林景观改造方向。枫香被称为先锋顶极树种,存在于森林群落的各个演替阶段,是我国亚热带地区重要的秋色叶树种和优良的用材树种。为此小坞坑森林景观规划拟对现有枫香林进行抚育改造,并于步游道两侧山谷平地营建连片新林。从观赏角度,如何针对不同林龄与胸径提出最佳调控密度成为现实需要。

### 1.2 试验材料

以枫香为模拟对象,2016年夏季于小坞坑林区选择胸径为10 cm、20 cm、30 cm的自然、健康的枫香各5株,现场测量其胸径、树高、冠幅、枝下高、一级分枝角度与粗度等测树数据,为建模提供几何参数。

为将树皮、树叶等有机生命体的影像映射在树木干、枝、叶等几何模型表面,构成直观形象的实体,需准备贴图素材<sup>[22]</sup>。分胸径级(树龄)野外摄取枫香树干与一级分枝表皮照片若干,导入Photoshop;采集叶片若干,扫描导入Photoshop。从中各选取典型图像3张,制作带有Alpha通道的纹理贴图,再通过CrazyBump软件转换,导出法线贴图、高光贴图。

### 1.3 研究方法

1.3.1 森林场景构建流程 为实现视觉效果逼真、

树木与林分参数可测量的总体目标,采用多种软件综合应用方案,从中分别抽取一部分所需要的功能,通过数据和文件交换实现功能集成,流程(图1)和主要应用软件如下:(1)纹理贴图制作:Adobe Photo-

shop CC2014、CrazyBump1.2;(2)树木三维建模:SpeedTree Cinema v7.0.5、SpeedTree5.1;(3)森林景观场景平面布局:Random Coordinate、AutoCAD 2007、Sketchup 8.0;(4)森林场景合成:Lumion 6.0。

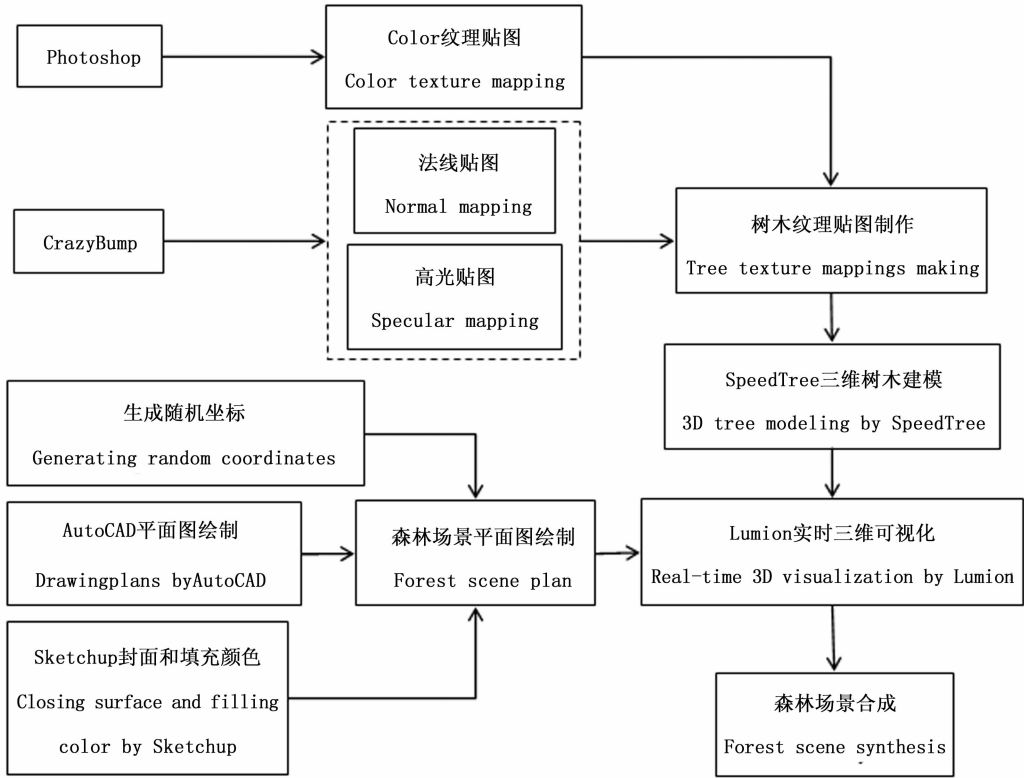


图1 场景模拟流程

Fig.1 Flow chart of Scenario simulation

1.3.2 树木三维建模 利用 SpeedTree 模型编辑器 (Speedtree modeler),通过人机交互进行树木参数化建模。建模从一个树木初始模型开始,确定树木的基本骨架;再编辑树木的主干、分枝参数,分枝级数为3级;最后添加叶片,调节其形状、大小以及方向等。

利用编译器 (Speedtree compiler),将材质贴图打包为包括材质和纹理参数信息、细节层次和布告板距离信息、风和碰撞体数据等的程序代码,生成SRT格式文件备用。

1.3.3 森林场景构建 模拟场景设为平坦地形,大小为60×60 m。林型设为枫香同龄纯林,种群分布采用自然界普遍存在的随机分布形式。为实现随机分布,并控制树木之间的合理间距,编写 Random Coordinate 自定义过程生成坐标点,据此绘制CAD平面分布图。

将CAD平面图通过Sketchup进行格式转换,导

入Lumion,布置树木模型;将Speedtree生成的SRT文件导入Lumion植物模型库,进行森林场景构建,最后导出JPG格式模拟结果图像。

1.3.4 控制试验 影响森林林内景观美学质量的主要因素<sup>[23]</sup>,其中树木胸径、林分密度等是十分重要的构景因子<sup>[24]</sup>。因此,本文以胸径与密度为例,参照随机区组设计,进行两因素、单因素控制试验。首先是保证其它构景要素与环境条件一致,即统一类型(静态景观)、地形(平坦)、场景大小(60×60 m)、林型(枫香同龄纯林)、分布(随机)及林下层(草)。然后分胸径(因素A)3个水平、密度(因素B)10个水平,共30个处理分别制作场景(表1),每个场景设3个固定视角摄取3张图片(即3个重复),以减少树木平面分布格局对视觉的影响,结果共得到模拟场景图片90个。

表1 胸径-密度控制试验设计

Table 1 Control experimental design of DBH-density control

| 密度/(株·hm <sup>-2</sup> )               |    | 78 | 222  | 389  | 556  | 833  | 1111 | 1389 | 1667 | 2222 | 2778 |       |
|----------------------------------------|----|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Density/<br>(Plants·hm <sup>-2</sup> ) |    | B1 | B2   | B3   | B4   | B5   | B6   | B7   | B8   | B9   | B10  |       |
| 胸径 DBH/cm                              | 10 | A1 | A1B1 | A1B2 | A1B3 | A1B4 | A1B5 | A1B6 | A1B7 | A1B8 | A1B9 | A1B10 |
|                                        | 20 | A2 | A2B1 | A2B2 | A2B3 | A2B4 | A2B5 | A2B6 | A2B7 | A2B8 | A2B9 | A2B10 |
|                                        | 30 | A3 | A3B1 | A3B2 | A3B3 | A3B4 | A3B5 | A3B6 | A3B7 | A3B8 | A3B9 | A3B10 |

注:试验共3个区组,表中所列为其中的一个。

Note: The test consisted of 3 blocks, one of which was listed in the table.

1.3.5 景观质量评价 以景观美景度(SBE)评判结果作为试验的观察值。考虑不同群体的审美态度具有一致性<sup>[25]</sup>,组织园林学、林学、生态学等专业的学生,每组人数大致相等,共160名参与评价,采用平均值法计算美景度值<sup>[26]</sup>。

根据不同的试验目标,采用不同的评价样本和记分方式:

胸径-密度两因素试验:为研究胸径、密度两个因素对景观质量的影响,寻找最佳组合,将90张图片全部混合进行比较评价。评价采用7分制<sup>[27]</sup>,操作时将全部照片排成活动展板,让评判人充分比较,按质量高低依次归为7档。

密度单因素试验:为揭示密度对景观质量的影响规律,将胸径因子作为背景值,即在同一胸径条件下,对10个不同密度的场景图片进行比较评价(表1),操作时同样制作活动展板,排序归档,但为计分

方便,采用10分制。该比较分3个胸径、3个重复共有9组。

1.3.6 统计分析 采用DPS7.05、SPSS19.0软件进行两因素方差分析、多重比较分析和单因素回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 枫香模拟效果

枫香为单轴分枝的大乔木,干形通直,在适生地区,树高可达30 m,胸径达1 m。枫香的形体受树冠形状、冠幅、分枝角度及枝干粗细的影响,幼树冠形为三角形,成熟时为圆卵形。树皮幼龄时为青绿色,质地光滑,成熟时灰褐色,呈方块状剥落。枫香的分枝级数随着树龄的增大而增加,但一般不超过4级;分枝角度随树龄的增大而增大,这主要是受自然重力作用的结果(表2)。

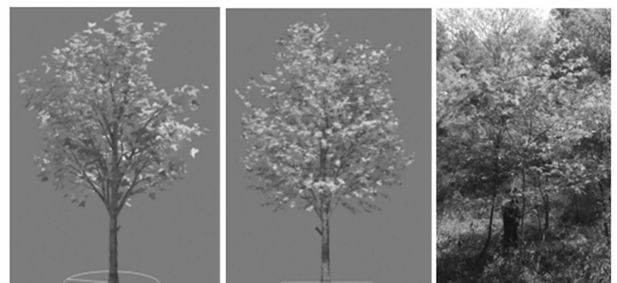
表2 枫香形态参数统计

Table 2 Liquidambar form parameter statistics

| 胸径<br>DBH/cm | 高度<br>Height/m | 枝下高<br>Under-branch<br>Height/m | 冠幅<br>Crown width/<br>(m × m) | 分枝级数<br>Branch grades | 一级树枝粗度<br>Degree of primary<br>branch/cm | 一级树枝着生角度<br>The angle of the first<br>level branch/(°) |
|--------------|----------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 10           | 5              | 1.5                             | 2 × 2                         | 2 ~ 3                 | 2.5                                      | 30                                                     |
| 20           | 12             | 4.5                             | 4.5 × 4.5                     | 3 ~ 4                 | 4                                        | 30 ~ 75                                                |
| 30           | 20             | 8                               | 7 × 7                         | 3 ~ 4                 | 8                                        | 60 ~ 90                                                |

树木的三维模型含有详细的形态参数,是实现树木测量的基本条件,但其视觉效果往往不如二维图像直接贴图。基于综合软件平台和实测形态参数的模拟结果显示,枫香三维模型与现实树木图片的效果十分接近,以10 cm胸径的为例,对比见图2。

以胸径20 cm,密度556株·hm<sup>-2</sup>的森林场景为例,随机平面分布格局及透视场景模拟结果如图3所示,模拟森林与枫香同龄纯林现实景观较为接近,基于模拟结果实施的景观质量评价工作进展顺利,表明模拟结果良好。



模拟结果

实景图

图2 胸径10 cm的枫香模型

Fig. 2 Liquidambar model of diameter at breast height 10 cm

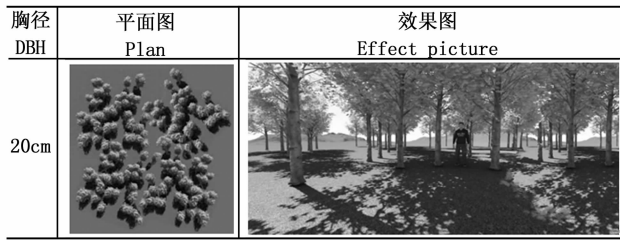


图3 密度为556株·hm<sup>-2</sup>的平面图及效果图  
Fig.3 The density of 556 plants·hm<sup>-2</sup> of the plan and the effect picture

## 2.2 两因素试验

2.2.1 胸径与密度因素对美景度的影响 园林、林学、生态学3组学生两轮评价的SBE均值分别为4.10(7分制)/5.49(10分制)、4.11/5.50、4.07/5.50,单因素方差分析结果显示3组学生差异不显著( $P=0.991/P=1.000$ ),以总体平均结果作为观测值可以满足分析要求。控制试验中,林分密度变化总是伴随着分布格局的变化,两者无法分离,因此,将格局变化设为重复区组,即从模拟场景的3个视角得到3种不同的布局效果,作为3个区组设置,但方差分析结果显示,区组间的差异不显著( $F=0.88$ ,对应的概率 $P=0.3563>0.0500$ ),表明在随机分布条件下,种群格局的微小变化对评价结果的影响不大(表3)。试验因素A(胸径)对美景度的影响也不显著( $F=3.0947$ , $P=0.0700$ ),而因素B(密度, $F=4.5456$ , $P=0.0031$ )、胸径与密度的交互效应A×B( $F=6.1298$ , $P=0.0000$ )对美景度的影响均达到极显著。

表3 胸径A与密度B因素对美景度影响的方差分析(随机模型)

Table 3 Variance Analysis of the effect of diameter at breast height A and Density B on SBE(stochastic model)

| 变异来源<br>Source of variation | 平方和<br>Sum of squares | 自由度<br>Degrees of freedom | 均方<br>Mean square | F值<br>F value | P值<br>P value |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------|---------------|---------------|
| 区组间<br>Between blocks       | 0.114 4               | 2                         | 0.114 4           | 0.878 5       | 0.356 3       |
| A因素间<br>Between factor A    | 4.940 4               | 2                         | 2.470 2           | 3.094 7       | 0.070 0       |
| B因素间<br>Between factor B    | 32.655 2              | 9                         | 3.628 4           | 4.545 6       | 0.003 1       |
| A×B                         | 14.367 7              | 18                        | 0.798 2           | 6.129 8       | 0.000 0       |
| 误差<br>Error                 | 3.776 3               | 58                        | 0.130 2           |               |               |
| 总变异<br>Total variation      | 55.854 0              | 89                        |                   |               |               |

## 2.2.2 胸径与密度因素不同水平对美景度的影响

试验因素间Tukey多重比较结果显示,不同胸径(A)对美景度的影响不同,其中A2即胸径20cm的枫香林平均美景度最高,与其它径级的差异极显著;而A3、A1,即30cm和10cm胸径的美景度较低且差异不显著(表4)。此结果与“林分美学质量随胸径增大而提高”<sup>[28]</sup>的现有结论有所不同,这与试验中不同胸径级采取了同一套密度水平设置有关,适应两极、折中的密度范围更有利于中等胸径林分表现良好景观,说明胸径-美景度问题的研究也离不开密度,现有研究事实上以各自的最佳密度为前提。

表4 试验因素间Tukey多重比较

Table 4 Tukey multiple comparison between experiment factors

| 处理<br>Handling | 均值<br>Mean | 5%显著水平<br>5% significant level | 1%极显著水平<br>1% significant level |
|----------------|------------|--------------------------------|---------------------------------|
| A2             | 4.498 0    | a                              | A                               |
| A3             | 3.979 0    | b                              | B                               |
| A1             | 3.828 0    | b                              | B                               |
| B3             | 4.901 7    | a                              | A                               |
| B4             | 4.893 3    | a                              | A                               |
| B5             | 4.846 7    | a                              | A                               |
| B6             | 4.521 7    | a                              | AB                              |
| B7             | 4.498 3    | a                              | AB                              |
| B2             | 4.250 0    | ab                             | ABC                             |
| B9             | 3.785 0    | bc                             | BCD                             |
| B8             | 3.440 0    | cd                             | CDE                             |
| B10            | 3.058 3    | d                              | DE                              |
| B1             | 2.821 7    | d                              | E                               |

从密度(B)因素看,密度适中的B3、B4、B5为第一类,美景度最高,密度偏离中值的B6、B7、B2为第二类,美景度稍低,但这两类并无显著差异;处于两端,即密度过高或过低如B9、B8、B10、B1的效果最差,与第一类存在显著差异(表5)。

胸径-密度组合对美景度的影响计算结果见表5。不同组合的美学质量存在差异。其中A3B3、A2B5、A3B4的组合景观效果最佳,可推荐采用;其次是A3B2、A2B3、A2B7;景观效果最差的是A3B8、A3B10、A1B10,在实践中应避免出现。

从表5还可看出,较优组合有向胸径增大、密度居中方向集中的趋势,如按胸径级分别选取前3个最优组合A3B3、A3B4、A3B2, A2B5、A2B3、A2B7, A1B5、A1B4、A1B6,比较最大值与平均美景度值(图4),胸径30cm的美景度最高,胸径20cm的其次,胸径10cm的最差。胸径10cm到胸径20cm的美景度值变化大,而胸径20cm到30cm的美景度值

变化较小,可见胸径越大越有可能获得最佳景观效果,而且枫香林的胸径在试验范围内达到一定程度

后,趋于稳定,对美景度的影响平缓,与张荣<sup>[24]</sup>、李俊英等<sup>[29]</sup>的研究结果相似。

表5 胸径-密度组间 Tukey 多重比较  
Table 5 Tukey Multiple Comparisons Between DBH and Density

| 处理组合<br>Treatment combination | 美景度均值<br>Mean value of SBE | 处理组合<br>Treatment combination | 美景度均值<br>Mean value of SBE | 处理组合<br>Treatment combination | 美景度均值<br>Mean value of SBE |
|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| A3B3                          | 5.49A                      | A2B2                          | 4.54ABCDE                  | A2B10                         | 3.47BCDEFGH                |
| A2B5                          | 5.37A                      | A1B4                          | 4.54ABCDE                  | A1B10                         | 3.43CDEFGH                 |
| A3B4                          | 5.25A                      | A2B8                          | 4.47ABCDEF                 | A3B1                          | 3.32 DEFGH                 |
| A3B2                          | 5.18AB                     | A1B6                          | 4.46ABCDEF                 | A1B8                          | 3.29DEFGH                  |
| A2B3                          | 5.11ABC                    | A3B6                          | 4.46ABCDEF                 | A1B2                          | 3.04EFGH                   |
| A2B7                          | 5.00ABCD                   | A1B7                          | 4.39ABCDEF                 | A2B1                          | 2.97EFGH                   |
| A2B4                          | 4.90ABCD                   | A3B5                          | 4.36ABCDEF                 | A3B9                          | 2.79FGH                    |
| A1B5                          | 4.82ABCD                   | A1B3                          | 4.11ABCDEFG                | A3B8                          | 2.57GH                     |
| A2B6                          | 4.65ABCDE                  | A3B7                          | 4.11ABCDEFG                | A3B10                         | 2.29H                      |
| A2B9                          | 4.54ABCDE                  | A1B9                          | 4.04ABCDEFG                | A1B10                         | 2.18H                      |

注:各处理间比较 ABCDE 为 0.01 差异水平。

Note: The difference level of ABCDE between treatment comparison was 0.01.

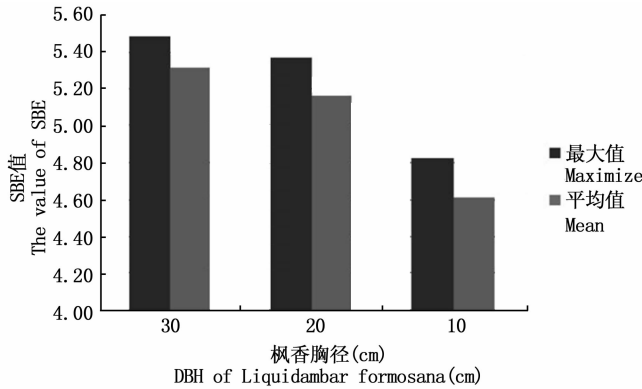


图4 不同径级前3个最佳景观的美景度

Fig.4 SBE of the first three best views of different diameters

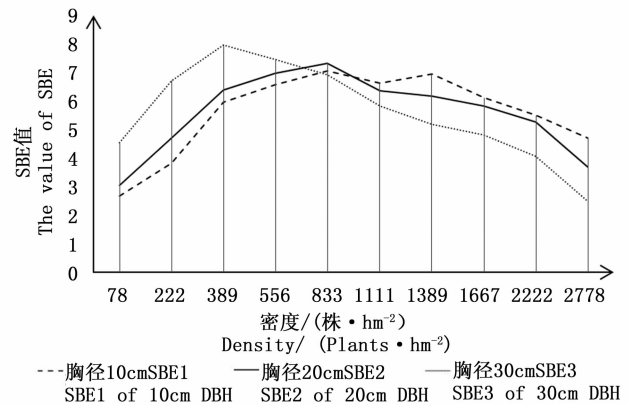


图5 3种胸径枫香林的美景度对比

Fig.5 The comparison chart of the SBE in three kinds of

DBH *L. formosana* forest

### 2.3 单因素试验

2.3.1 森林景观的密度效应 不同胸径枫香林的美景度-密度分布见图5。3个胸径级的美景度随密度变化趋势相似,均为先升高,到达一定值后再下降。但三者峰值出现的位置不同,总体上随着树体的增大,峰值密度向左偏移。以 SBE = 6 为基准线,胸径 10 cm 的枫香林峰值密度在 1 389 株·hm<sup>-2</sup>, 较佳密度在 389~1 667 株·hm<sup>-2</sup>; 20 cm 的峰值密度在 833 株·hm<sup>-2</sup>时,较佳密度在 360~1 389 株·hm<sup>-2</sup>; 30 cm 的峰值密度在 389 株·hm<sup>-2</sup>, 较佳范围在 186~833 株·hm<sup>-2</sup>, 这些可作为密度调控的参考依据。

总之,林分过稀,会产生空虚感,过密则会压缩透视距离,给人以压抑感;适中的密度最为舒适,有利于形成良好的空间结构,满足人们的游赏需求,与

前人的研究结果一致<sup>[30-32]</sup>。图6为大众评判筛选的最适密度森林景观。

2.3.2 密度-美景度关系 曲线以密度为自变量,美景度为因变量,进行单因素曲线拟合,结果以二次曲线为最优(图7)。曲线为开口向下的倒钟形,调整后决定系数  $R^2 > 0.700$ ,表明密度-美景度关系密切,经检验各方程差异均极显著 ( $P < 0.05$ ),故均具有统计学意义。方程为平坦地形枫香单层林相应胸径条件下的密度-美景度关系提供了一个预测工具。

### 3 讨论

(1) 应用 PhotoShop、AutoCAD、SpeedTree 等软件工具,有可能实现树木单体参数化建模和森林场



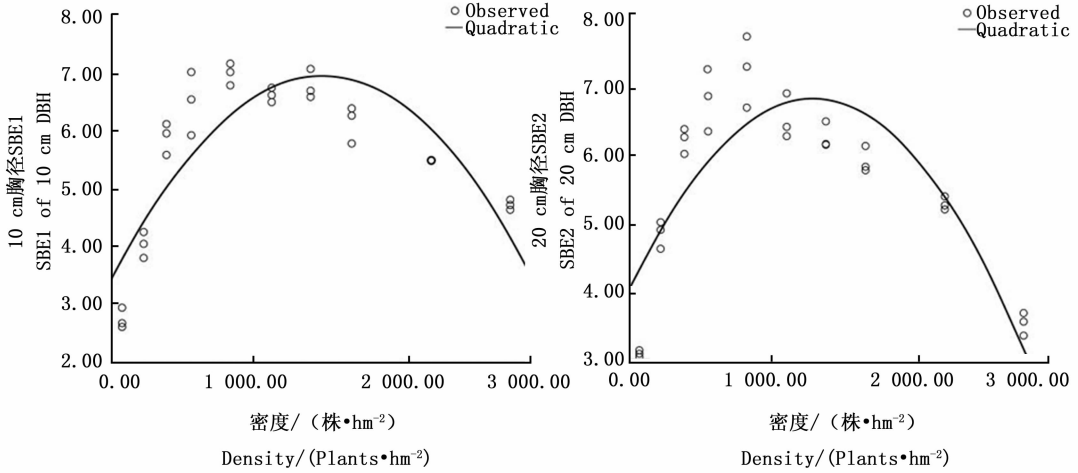
胸径10 cm, 1 389 株·hm<sup>-2</sup>  
10 cm DBH, 1 389 plants·hm<sup>-2</sup>

胸径20 cm, 833 株·hm<sup>-2</sup>  
20 cm DBH, 833 plants·hm<sup>-2</sup>

胸径30 cm, 389 株·hm<sup>-2</sup>  
30 cm DBH, 389 plants·hm<sup>-2</sup>

图6 最适密度森林景观

Fig.6 The optimum density of forest landscape

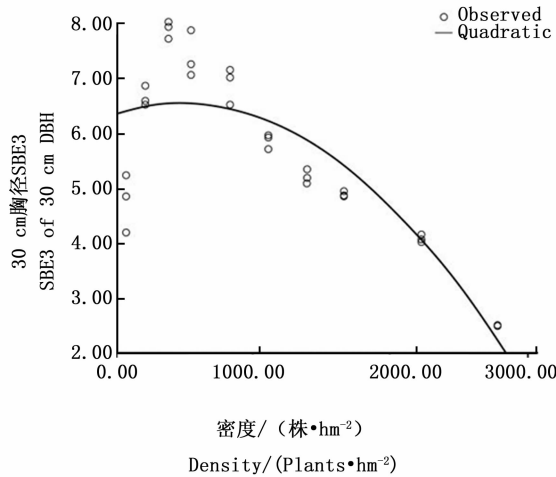


$R^2=0.719$

$SBE_{10}=3.435+0.005X_1-1.639E(-6)X_1^2$

$R^2=0.713$

$SBE_{20}=4.013+0.004X_2-1.677E(-6)X_2^2$



$R^2=0.728$

$SBE_{30}=6.355+0.001X_3-8.128E(-7)X_3^2$

图7 枫香林的单因素曲线拟合图

Fig.7 The single factor of curve fitting of *L. formosana* forest

景合成,将一些类似于农林田间试验的方法引入景观美学质量评价研究,并发现一些新现象。试验结

果显示,在设定的密度水平范围内,胸径变化对美景观度的影响总体不显著。但若取 10 cm、20 cm、30 cm

3个胸径级前3个最优场景合计,则无论是最大值,还是平均值,均为 $30\text{ cm} > 20\text{ cm} > 10\text{ cm}$ 。由此可见,“林分美学质量随胸径增大而提高”的结论是相对于各自最优场景而言的,这正是现有研究的通行做法。模拟则扩大了研究视野,将一些现实中鲜见或不存在的胸径-密度组合包含进来。

(2)密度对美景度的影响总体上为极显著,尤以适中的密度为最高,处于两端的最低,两者有极显著差异。即不同胸径级的美景度随密度变化均为先升后降趋势,但随着树体的增大,美景度峰值对应的密度向左偏移。密度-美景度拟合曲线为二次函数,拟合效果较好( $R^2 > 0.700$ ),但未达到更为理想的水平。原因可能是密度水平设置(样本)还不够多,林分胸径缺少适当变异或者环境条件过于理想,降低了景观的自然度进而影响评价结果。

(3)胸径与密度的交互效应对美景度有极显著影响,寻找两者的最优组合对指导工程实践具有指导性作用;同属随机分布的不同模拟场景对美景度的影响不显著,因此,模拟评价时为减少建模工作量,或可省略设置重复场景,但须保证林木种群分布的随机性。

(4)森林景观组成、结构、变化类型丰富,构景因素、环境条件复杂,研究目标多样,限于试验条件,也为突出目标因子,本文仅以一个单层、同龄(相同胸径)的枫香纯林夏季静态景观为例作了模拟与评价应用的初步尝试,对林分的胸径分布、垂直层次,色彩因素与季节变化等均作了简化,这与丰富多彩的现实森林是有差距的。将借鉴刘海等<sup>[33]</sup>利用自定义的树木编码实现非单一化森林场景的相关研究,开展下一步模拟工作,使森林景观更接近自然。

## 4 结论

组合应用多种商业软件模拟的森林景观,林分参数可测,视觉效果接近真实,基此开展的评价工作进展顺利,结果表现良好,模拟方法可行。

林分美学质量受胸径、密度两个因素的综合影响,随着胸径增大而提高,枫香林也一样,在营林实践中,应将培育大径材作为一条重要措施;但不同胸径有不同的最佳配密匹配度。对于枫香同龄单纯景观林,10 cm、20 cm、30 cm的最佳密度分别为1 389、833、389株·hm<sup>-2</sup>,此可作为林分密度分期调控的参考依据。

## 参考文献:

- [1] 黄广远.北京市城区城市森林结构及景观美学评价研究[D].北京:北京林业大学,2012:6.
- [2] Pradal C, Boudon F, Nougier C, et al. PlantGL: a python-based geometric library for 3D plant modelling at different scales[J]. Graphical Models, 2009, 71(1):1-21.
- [3] Prusinkiewicz P. Art and science for life; designing and growing virtual plants with L-systems[J]. Acta Horticulturae, 2004, 630(630):15-28.
- [4] Godin C, Sinoquet H. Functional-structural plant modelling[J]. New Phytologist, 2005, 166(3):705-708.
- [5] 宋成芳.动态植物场景的建模与仿真研究[D].杭州:浙江大学,2007:10.
- [6] Prusinkiewicz P. Modeling of spatial structure and development of plants[J]. Scientia Horticulturae, 1998, 74(1-2):113-149.
- [7] Frédéric B, Przemyslaw P, Pavol F, et al. Interactive design of bonsai tree models[J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3):591-600.
- [8] 祝晓.虚拟现实技术辅助园林规划设计研究[D].南京:南京林业大学,2011:6.
- [9] 常禹,胡远满,布仁仓,等.景观可视化及其应用[J].生态学杂志,2008,27(8):1422-1429.
- [10] 焦祥,郑加强,张慧春,等.林木虚拟生长建模方法及建模工具研究综述和展望[J].浙江农林大学学报,2015,32(6):966-975.
- [11] 刘兆刚,李凤日.樟子松人工林树冠结构模型及三维图形可视化模拟[J].林业科学,2009,45(6):54-61.
- [12] 李永亮,鞠洪波,张怀清.基于林分特征的林木个体信息估算可视化模拟技术[J].林业科学,2013,49(7):99-105.
- [13] Meitner M, Gandy R, Nelson J. Application of texture mapping to generate and communicate the visual impacts of partial retention systems in boreal forests[J]. Forest Ecology & Management, 2006, 228(1):225-233.
- [14] 刘海,张怀清,鞠洪波.果子沟林场三维建模与可视化实现[J].林业科学研究,2016,29(1):74-79.
- [15] 李永亮,鞠洪波,张怀清.基于WF的杉木人工林交互式疏伐可视化模拟技术[J].林业科学研究,2014,27(3):329-334.
- [16] 董灵波,刘兆刚.樟子松人工林空间结构优化及可视化模拟[J].林业科学,2012,48(10):77-85.
- [17] Muys B, Hynynen J, Palahí M, et al. Simulation tools for decision support to adaptive forest management in Europe[J]. Forest Systems, 2011, 19(6):86-99.
- [18] 王超,翟明普,金莹杉,等.森林景观质量评价研究现状及趋势[J].世界林业研究,2006,19(6):18-22.
- [19] 刘颖,罗岱,黄心渊.基于OSG的Speedtree植物模型绘制研究[J].计算机工程与设计,2012,33(6):2406-2419.
- [20] 吴晓晖.SpeedTree与Virttools模型转换的研究与实现[D].北京:北京林业大学,2012:5.
- [21] 白志勇.基于SpeedTree的梅花可视化模型构建[D].北京:北京林业大学,2011:9.
- [22] Dischler J M, Maritaud K, Ghazanfarpour D. Coherent bump map



- recovery from a single texture image [C]. Micheal D. Proceedings of Graphics Interface, May 27 - 29, 2002, Calgary, Alberta, Canada: Canadian Human - Computer Communications Society, 2002: 201 - 208.
- [23] 陈 勇, 孙 冰. 深圳市城市森林林内景观的美景度评价[J]. 林业科学, 2014, 50(8): 39 - 44.
- [24] 张 荣, 翟明普, 阎海平. 国内外风景游憩林抚育研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(2): 19 - 113.
- [25] 宋 力, 何兴元, 徐文铎, 等. 城市森林景观美景度的测定[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 621 - 624.
- [26] Daniel T C, Vining J. Methodological issues in the assessment of landscape quality[J]. Forest Science, 1984, 30(4): 1084 - 1096.
- [27] 史久西, 董建文. 乡村绿地景观美学质量评价研究[J]. 中国城市林业, 2013, 11(3): 5 - 8.
- [28] 章志都, 徐程杨, 龚 岚. 基于 SBE 法的北京市郊野公园绿地结构质量评价技术[J]. 林业科学, 2011, 47(8): 53 - 60.
- [29] 李俊英, 闫红伟, 唐 强, 等. 沈阳森林植物群落结构与其林内景观美学质量关系研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 212 - 219.
- [30] 梅光义, 孙玉军. 基于 SBE 法的杉木风景游憩林的评价及经营技术[J]. 中南林业科技大学学报[J]. 2012, 32(8): 28 - 32.
- [31] 贾黎明, 李效文, 郝小飞. 基于 SBE 法的北京山区油松游憩林抚育技术原则[J]. 林业科学, 2007, 43(9): 144 - 149.
- [32] 欧阳勋志, 廖为明, 彭世揆. 天然阔叶林景观质量评价及其垂直结构优化技术[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1388 - 1392.
- [33] 刘 海, 张怀清, 莫登奎, 等. 基于信息编码的森林景观可视化模拟[J]. 林业科学研究, 2014, 27(2): 208 - 212.

(责任编辑: 金立新)