

doi:10.11707/j.1001-7488.20150513

# 三维扫描技术在获取杨树树冠结构特征参数上的应用\*

王宁宁<sup>1,2</sup> 尹文广<sup>3</sup> 黄秦军<sup>4</sup> 丁昌俊<sup>4</sup> 杨志岩<sup>5</sup> 苏晓华<sup>4</sup> 沈应柏<sup>1,2</sup>

(1. 北京林业大学生物科学与技术学院 北京 100083; 2. 北京林业大学林木育种国家工程实验室 北京 100083;  
3. 北京浩宇天地测绘科技发展有限公司 北京 100039; 4. 中国林业科学研究院林业研究所  
国家林业局林木培育重点实验室 北京 100091; 5. 辽宁省杨树研究所 盖州 115200)

**摘要:** 【目的】树冠结构影响光能截获能力从而直接影响生物量的积累。杨树冠形特征参数的研究能够为杨树优良品种的选育提供有力的选择依据,但是因为杨树的树型高达,树冠结构复杂,树冠结构特征参数难以直接观测。【方法】建立了利用三维扫描技术获取树冠结构特征参数的方法,并测量了高密度(2 m×3 m)人工林中 6 年生杨树 03-04-171 的冠形特征参数,包括不同生长单元早发枝和同期枝一级枝的枝长、分枝角度、方位角、枝条曲率及弯曲度。对直接测量(砍伐)与三维扫描方法测量的胸径、树高进行回归分析,检测三维扫描测量的精度。【结果】回归分析结果表明:胸径的回归系数分别为  $R^2 = 0.967\ 72$ , 显著值为  $P = 8.26 \times 10^{-13}$ , 树高回归系数为  $R^2 = 0.965\ 27$ , 显著值为  $P = 1.440\ 29 \times 10^{-12}$ 。结果说明三维扫描方法具有较高的测量精度,可以应用于树冠结构特征的测量。扫描参数结果显示,树冠上每一个生长单元的上部枝条长度较长,分枝角度较小,曲率较大,数量少,为早发枝;中下部枝条数量多,短而平直,为同期枝,这与已有的研究结果一致。【结论】三维扫描技术可以应用于树冠结构特征的研究。

**关键词:** 三维激光扫描; 杨树; 树冠结构; 枝长; 分枝角度; 方位角

中图分类号: S718.43 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2015)05-0108-09

## Application of 3D Scanner Technology to Analysis the Crown Architecture Parameters of Poplar Plantations

Wang Ningning<sup>1,2</sup> Yin Wenguang<sup>3</sup> Huang Qinjun<sup>4</sup> Ding Changjun<sup>4</sup> Yang Zhiyan<sup>5</sup> Su Xiaohua<sup>4</sup> Shen Yingbai<sup>1,2</sup>

(1. College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University Beijing 100083;  
2. National Engineering Laboratory for Tree Breeding, Beijing Forestry University Beijing 100083;  
3. Beijing Haoyu World Surveying and Mapping Developing, Limited Beijing 100039; 4. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration Research Institute of Forestry, CAF Beijing 100091;  
5. Liaoning Provincial Institute of Poplar Gaizhou 115200)

**Abstract:** 【Objectives】Crown architecture is one of important determinants of productivity and yield of plantations since it comprises branches and leaves orientation and distribution, thereby affecting canopy density, light interception and carbon assimilation. Identifying and quantifying the underlying factors contributing to crown architecture are therefore important for a better understanding and optimization of stand productivity. However, the measurement of crown architecture of a tree is difficulty and consuming. 【Method】To make the crown architecture measurement work easier, more precision and less consuming, a new method of obtaining architecture character parameters with 3D laser scanner was studied. To analyze precision of the method, the diameter at breast height (DBH) and height of poplar 03-04-171 ((*Populus deltoides* cl. '55/65' × *P. deltoides* cl. '2KEN8') × (*P. nigra* 'Brummen' × *P. nigra* 'Piccarolo')) in a 6-year-old forest planted in a stand density of 2 m×3 m were measured with direct (harvest) and scanner method. The crown architecture parameters (the primary branch length, branch angle, azimuth, branch

收稿日期: 2014-09-24; 修回日期: 2015-01-20。

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划: 超高产优质杨树速生材新品种选育(2012BAD01B03)。

\* 沈应柏为通讯作者。

curvature and ratio of branch bow to string of proleptic branch and sylleptic branch) were measured to analyze the feasibility of the new method. Regression analysis was used to compare the method of direct measurement (harvest) and indirect (3D laser scanner) measurement of the crown architecture parameters. 【Result】The results showed that the 3D laser scanner had a high precision (DBH:  $R^2 = 0.967\ 72$ ,  $P = 8.26 \times 10^{-13}$ ; Height:  $R^2 = 0.965\ 27$ ,  $P = 1.440\ 29 \times 10^{-12}$ ) in measuring the crown architecture parameters and could be used in crown architecture measurements. The scanned results showed that the primer branch length, branch angle and branch azimuth had a similar rhyme in each growth unit (the aboveground part that the temperate trees growth in one year) of the trunk, and the six-years-old tree had five growth unit. The branch was short in the bottom of the growth unit and longer in upper side of each growth unit. The branch angle in the lower and middle side of growth unit was larger than that in the upper side. The azimuth was larger in the middle part of growth unit, however smaller in lower and upper site of the growth unit. The proleptic branch distributed in upper side of each growth unit while the sylleptic branch distributed in middle and lower side. Proleptic branches accounted for 1/3 of the total number of crown branches. In conclusion, in each growth unit of stem, branches in the top of growth unit (proleptic branch) were longer and upstanding, while the branches in the middle of growth unit (sylleptic branch) were relatively short and had a large branch angle. The branches in the top of crown were short and erect, the branches in the middle crown had a larger angle in origin, and the lower branches had a lager azimuth. The ratio of bow and string branches was steady in all branches of the crown. 【Conduision】The obtained results through 3D laser scanner were consistent with other measured results, suggesting that the 3D laser scanner method could be used in measuring and analyzing crown structure.

**Key words:** 3D laser scanner; *Populous*; crown architecture; branch length; branch angle; branch azimuth

杨树 (*Populus*) 因适应性强、产量高、生长快、易繁殖等性状成为纸浆林和能源林的理想树种 (Dickmann *et al.*, 1996; Tuskan, 1998; Broeckx *et al.*, 2012; 黄秦军等, 2014)。树冠结构的形成是由其遗传因素和环境因素共同决定, 分析树冠结构能够获取遗传因素影响的生长过程和环境因素影响的树冠可塑性变化的信息 (Barthélémy *et al.*, 2007; 胡启鹏等, 2008)。树冠结构包括几何结构和拓扑结构, 几何结构是指树冠的组成部分及每个组成部分的大小和形状, 拓扑结构是指器官和器官之间的连接方式及器官在树冠中的位置, 几何结构描述环境因素对植物生长的影响, 而拓扑结构则描述碳分配问题 (Godin, 2000; Teobaldelli *et al.*, 2008)。处于营养生长阶段的杨树树冠结构参数主要包括枝条长度、分枝角度、方位角、枝条曲率及弯曲度 (Ceulemans *et al.*, 1990; Broeckx *et al.*, 2012)。

树冠能够影响叶片分布和叶面积指数从而影响光能的截获, 同时, 树冠还是碳同化的位置, 在生物量累积中起重要作用 (Ceulemans *et al.*, 1990; Barthelemy *et al.*, 2007; Broeckx *et al.*, 2012)。树冠结构决定了树木对光的截获和利用, 影响生物累积量 (Duursma *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2011), 是理想株型的重要组成部分。树冠特征参数的研究对林业生物产量的优化有重要意义和作用 (Ceulemans *et al.*, 1990)。树冠特征参数的获取可以优化林业栽

培管理技术, 并为优良品种的选育提供理论支撑。小型树冠结构参数容易获取, 而对于大型树木而言, 树冠结构信息的获取是耗费大量人力、财力、物力的工作, 有的信息如方位角等甚至难以通过直接测量获取。

激光三维扫描是通过测量有形物体表面的三维坐标数据获取点云从而重构物体表面特征的技术。该技术通过对目标物体进行扫描, 获取点云数据, 然后对点云数据进行预处理和重建优化, 从而实现被测物体的重建 (葛宝臻等, 2006)。三维扫描技术兴起于 20 世纪 50 年代的三维坐标测量机, 在 20 世纪 80 年代通过三维扫描仪机器视觉的研究获取长足的发展, 该技术已经可以详细获取被测物体的相关信息。目前, 该技术主要应用于医学仿生技术 (刘春军等, 2011; 蒋承安等, 2013; 焦培峰等, 2013)、人体 (林德静等, 2005; 王祺明等, 2007)、建筑 (余明等, 2004)、地形等的数字化与建模, 刑侦、作案工具及弹痕采集, 磨具设计与检测, 零部件形状及质量检测 (陆国栋等, 2005) 及工业在线检测等。

三维扫描技术在林业上的应用尚属少见, Teobaldelli 等 (2008) 检测了 Lidar 扫描技术测量精度, 并根据测量信息重构了林地中的树木的三维结构; Morgenroth 等 (2014) 用三维图像测量单株树的树高、胸径并估算材积量。而利用三维扫描技术在高密度栽植的林地的树冠结构信息研究上的应用尚

未见报道。本文尝试应用三维扫描技术,测量密度为 2 m × 3 m 的林地中 6 年生欧美杨无性系 03-04-171 [(*Populus deltoides* cl. '55/65' × *P. deltoides* cl. '2KEN8') × (*P. nigra* 'Brummen' × *P. nigra* 'Piccarolo')] 树冠结构,获取树冠结构参数,并用实测数据进行检测。目的在于建立快速、准确获取树木树冠复杂信息新技术以期为杨树优良品种选育和理想株型的研究提供新的技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况和试验材料

试验林地位于中国辽宁省锦州凌海市原种场(41°17' N, 121°36' E),海拔 17 m。试验林地 为 2007 年春季埋根造林,造林所用根为 1 年生苗木的根。林地占地 7.3 hm<sup>2</sup>,南北朝向,株距为 2 m,由东向西方向分布 4 个行距:3, 4, 5, 6 m,每个行距栽植 11 行,由北向南包括 3 个小区,作为生物学重复。每个小区均栽植 22 个无性系,每个无性系在小区内均为单一品种斑块状种植,3 个重复,重复 2 和重复 3 栽植方式完全相同,重复 1 在无性系栽植位置和栽植数量上进行了调整,但栽植的无性系及无性系数完全相同。林地四周栽植 2 行隔离行。

2013 年 3 月,芽萌动之前,选择株行距 2 m × 3 m 和 2 m × 5 m 的无性系 02-37-14 [(*P. deltoides* cv. 'Shanhaiguanensis' × *P. deltoides* cl. 'Harvard' (I-63/51)) × *P. nigra* 'Vereecken'] 和 03-04-171,每个无性系选择 5 株进行标记和观测。

用于树冠特征测量的无性系是在株行距 2 m × 3 m 种植的 03-04-171。在株行距 2 m × 3 m 的 3 个重复小区中,各选择 1 株 03-04-171 获取树冠结构信息。

### 1.2 测量方法

1.2.1 林地扫描 2013 年春,芽萌动之前,应用浩宇测绘公司提供的三维激光扫描仪(Faro Laser scanner focus<sup>3D</sup> 120, FARO technologies, Germany, <http://www.faroasia.com/products/laser-scanner/cn/>),对选择的目标树进行扫描。Faro 三维激光扫描仪水平扫描视野为 360°,垂直扫描视野为 300°,扫描距离为 0.6 ~ 330 m,扫描速度为 976 000 点·s<sup>-1</sup>,测距误差 ± 2 mm。

扫描前在目标树树干上做标记,以区别周围的树,辅助在软件中进行识别。扫描前,还需要对扫描场景进行标定(参考球),用于扫描后站点拼接(图 1 A)。试验中使用的标定目标为白色的球。参考球的作用是辅助扫描站点拼接以形成完整的三维空间

图像。参考球放置完成后到扫描结束前,参考球不可移动,而且参考球的放置位置要明显,不要有遮挡。1 株树的扫描需要 3 ~ 5 个参考球。图 1 A 中绿色的球即为参考球,拼站前需要删除每一站中的错误球(图 1 A 中黄色和红色的球),错误球是软件将具有球状特征的部分场景错误地认作参考球造成。

扫描站点是指扫描时仪器放置的位置,进行站点拼接是指将围绕同一物体布置的扫描站点扫描到的数据进行整合获取扫描目标整体数据。站点拼接后获取的扫描目标整体文件包含了目标物体所有的结构信息。树木是一个圆柱体,从一个角度最多可以扫描一个圆柱体的三分之一到一半,所以,完成 1 株树的扫描最少需要 3 站(图 1B)。3 站分别从不同的角度进行扫描,保证站与站之间有观测角度的交叉,扫描完成后可以获取植株周围的完整信息。站点的架设要保证在每一站至少能看到 3 个参考球。在密度林地中进行扫描,架设还需要考虑树冠的遮挡,选择树冠交叉较少的方位架站,尽量避开树冠的垂直下方的位置。

1.2.2 树冠特征参数的获取 扫描完成后,应用仪器自带软件 SCENE (5.0, FARO technologies, Germany) 进行站点拼接,并将拼接后的场景中其他无性系和噪点删除,留下目标树。图 1A 即为 SCENE 中一站的场景,图 1B 为站点拼接完成后的林地场景。SCENE 中的删除操作是大范围的操作,根据目标树上的标识,粗略地进行删除。

将经 SCENE 拼接后的文件导入 Geomagic Studio (2012, 3D system, USA) 中,利用 Geomagic Studio 将目标树从周围的品系中分离出来,封装完毕后,可直接测量树高和冠幅。Geomagic Studio 分离目标树和相邻树冠时,通过调整视角,根据枝条走向分离交叉的树冠。测量胸径时,将坐标原点移动到地面处,沿 Z 轴在 1.3 m 高度处建立平面,测量平面面积,即得到胸高处面积,利用圆面积公式计算胸径。树高和胸径测量结束后,将目标文件导入 Geomagic Spark (2012, 3D system, USA) 中进行树冠结构信息的测量。

扫描数据获取后,根据枝条的长度,分枝角和方位角的规律结合实地观察记录,区分生长单元,早发枝和同期枝。林地中扫描结束后实测胸径(陈章水等, 2007; Wang *et al.*, 2014),伐倒测量树高。将实测数据与扫描获取的数据进行回归分析,估测三维扫描测量技术应用于树冠测量的精度。

1.2.3 树冠特征参数 试验中测量的树冠特征

参数如图 2 所示。图中  $L_b$  代表枝条长度,  $L_s$  代表枝条两端点间连线的长度,  $\alpha$  代表枝条分枝角,  $\beta$  代表枝条两端点间连线与主干的夹角,  $\delta$  代表主干上相邻 2 个枝条之间的角度, 即方位角。

其中,  $\alpha/\beta$  代表枝条曲率,  $L_b/L_s$  代表枝条弯曲程度。这些参数均为目前树冠结构研究中常涉及到的参数 (Ceulemans *et al.*, 1990; Broeckx *et al.*, 2012)。

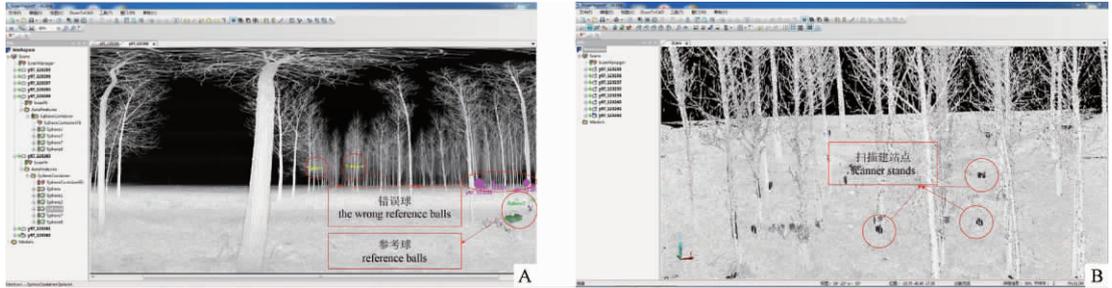


图 1 从扫描站点数据获取初始点云文件

Fig. 1 Built raw point cloud file from scanner data

(A) 一个扫描站点的场景及参考球; (B) 拼接后的初始点云文件和扫描站点分布

(A) The scene of each scanner stand and the reference ball used to piece together the data of each scanner stand; (B) The raw point cloud file after mosaic and the distribution of scanner stands

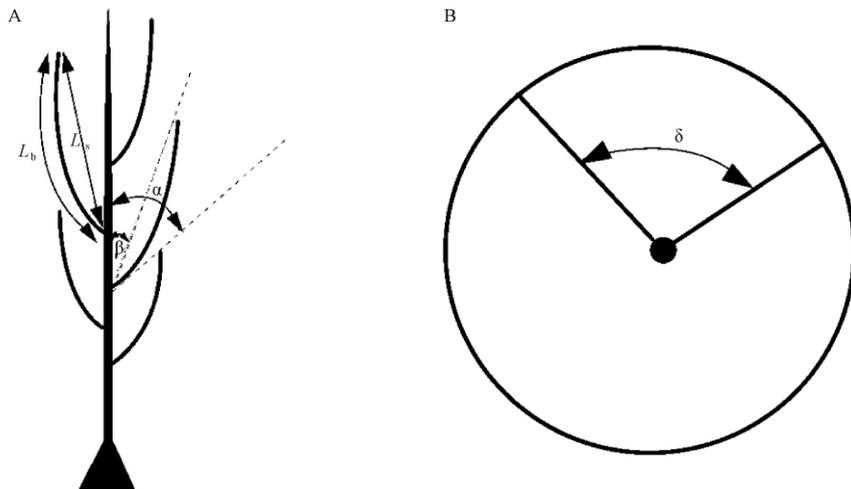


图 2 树冠结构特征参数

Fig. 2 Crown architecture parameters

A 图中  $L_b$  代表枝条长度,  $L_s$  代表枝条两端点间连线的长度,  $\alpha$  代表枝条分枝角,  $\beta$  代表枝条两端点间连线与主干的夹角; B 图为树冠俯视图,  $\delta$  代表主干上相邻 2 个枝条之间的角度, 即方位角。In figure A,  $L_b$ , branch length along the branch;  $L_s$ , branch length as a straight line between branch origination and branch termination;  $\alpha$ , branch angle of origination;  $\beta$ , branch angle of termination; figure B is the vertical view of crown,  $\delta$  is branch angle between two neighboring branches.

### 1.3 数据分析

对实体直接测量和扫描测量的胸径和树高做回归分析, 分析测量精确度。对树冠结构参数枝长、分枝角度、方位角、曲率及纸条弯曲度进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 差异显著性用 S-N-K 检验 ( $P < 0.05$ )。对枝条长度、分枝角度和枝条曲率进行相关分析, 计算 Pearson 相关系数。所有数据分析利用 SPSS17.0 (SPSS Inc., USA) 完成。

## 2 结果与分析

**2.1 直接测量和扫描测量精度比较** 图 3A 显示, 直接测量和扫描测量回归分析结果显示, 实测数据和 3D 扫描测量的胸径 ( $R^2 = 0.98, P < 0.01$ ) 和树高 ( $R^2 = 0.97, P < 0.01$ ) 呈现良好的直线回归关系。胸径和树高的实测数据和扫描测量数据的直线斜率分别为 0.949 78 和 0.984 74, 接近于 1, 截距分别为 0.002 99 和 0.237 99, 接近于 0, 是一条近似通过原

点的直线。精度分析结果表明,三维扫描测量值与

实测值有很高的拟合度。

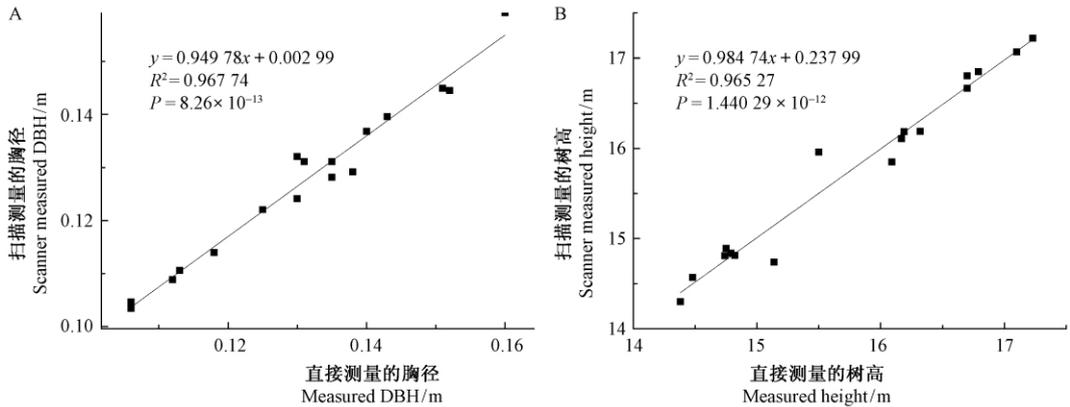


图3 直接测量和三维扫描测量的胸径和树高

Fig. 3 Comparison of direct (destructive) and indirect (terrestrial laser scanning)

(A) 直接测量胸径和三维测量胸径的回归分析; (B) 直接测量树高和间接测量树高的回归分析

Measurements of poplar stems (A) DBH and (B) height.

高度测量的截距稍大于胸径,原因在于高度的测量受外界环境影响较大。林中树木主干顶尖目标太小,而且上部容易晃动,造成高度测量误差较大。而胸径的测量部位是主干距离地面 1.3 m 处,在林中树木下部不容易晃动,所以测量精度主要受测量方式的影响:树干并非完全直立,与坐标系 Z 轴并非完全平行,测量时选择的平面垂直于 Z 轴,导致胸径测量产生误差。Feobaldelli 等(2008)同样认为 lidar 扫描的精度受距离和目标物体大小的影响。通过对测量精度分析可见通过激光扫描获取的冠形数据具有很高的可靠性和稳定性。此外,在野外进行三维扫描时应选择晴朗无风的天气,因为雾气会增加噪点,而风会导致树梢晃动从而影响扫描精度。

## 2.2 树冠结构参数分析

枝条长度、分枝角、方位角及枝条曲率在主干上呈现明显的生长节律(图 4A-D),一个节律即为主干上 1 年的枝条分布(Ceulemans *et al.*, 1990; Broeckx *et al.*, 2012)。因为最近 1 年生长的主干上没有侧枝或侧枝很小,所以图 4 中 6 年生的树干显示了 5 个生长节律。枝条弯曲程度( $L_b/L_s$ )在整个树干上稳定在 1.04 附近(图 4E)。枝条长度在每一年的生长中,主干上每一节中间和下部的枝条较短,从 40 cm ~ 2 m 不等,节上端的枝条较长,最长的 4.3 m(图 4A)。分枝角和方位角的分布规律相似,节中下部的枝条分枝角和方位角较大,分枝角最大的 80° 以上,方位角最大的是 89.4°;节上部枝条分枝角和方位角略小,上部枝条分枝角为 30° ~ 40°,方位角为 40° ~ 70°(图 4B,C)。枝条曲率是枝条起点分枝角和末端分枝角的比值( $\alpha/\beta$ ),说明枝条的

弯曲程度,值越大,弯曲程度越大,值越小,枝条越平直,若值小于 1,则说明枝条末端向地面方向弯曲。枝条曲率在节中下部较小,最小值 0.78,但观测的 3 株树所有枝条中,枝条曲率小于 1 的枝条占总数的 9.3%,节上部枝条曲率较大,最大值可达 3.558(图 4D)。Broeckx 等(2012)和 Ceulemans 等(1990)的实测数据均说明,主干每一年的生长单元中,中下部枝条分枝角度较大,上部枝条分枝角度较小。综合分析,每一节中,节上部枝条长而直立,中下部枝条短而横向伸展。枝条特征在主干上的分布呈现规律性。整体树冠观测结果表明,主干第 5 个节的枝条长度显著小于前 4 个节( $P < 0.05$ )(图 4A),而分枝角度在第 3 个节最大,第 2 和第 4 个节次之,第 1 和第 5 个节最小(图 4B),即树冠中部枝条的分枝角度较大,树冠上下部分枝角较小。第 1,2 节的方位角显著大于第 3 和第 4 节,第 5 节居于中间(图 4C)。枝条曲率和弯曲度在节与节之间没有显著差异。

图 5 是树冠中早发枝和同期枝在不同生长单元的参数比较。一个生长单元即主干上顶芽从萌发到休眠期间所生长的主干的一段上所包含的器官和组织。枝条数量结果(图 5A)显示,在每一个生长单元中,早发枝的数量远远小于同期枝。树冠中早发枝数量仅占总数的 31.5%。在不同的生长单元中,同期枝长度小于早发枝(图 5B)。Broeckx 等(2012)和 Ceulemans 等(1990)的实测结果均显示大部分杨树无性系的树冠中同期枝数量多于早发枝,但是 Broeckx 等(2012)观测到一个无性系,其早发枝数量多于同期枝,但较其他无性系生物量累积少,原因在于同期枝对早期树冠郁闭和生物量累积有重

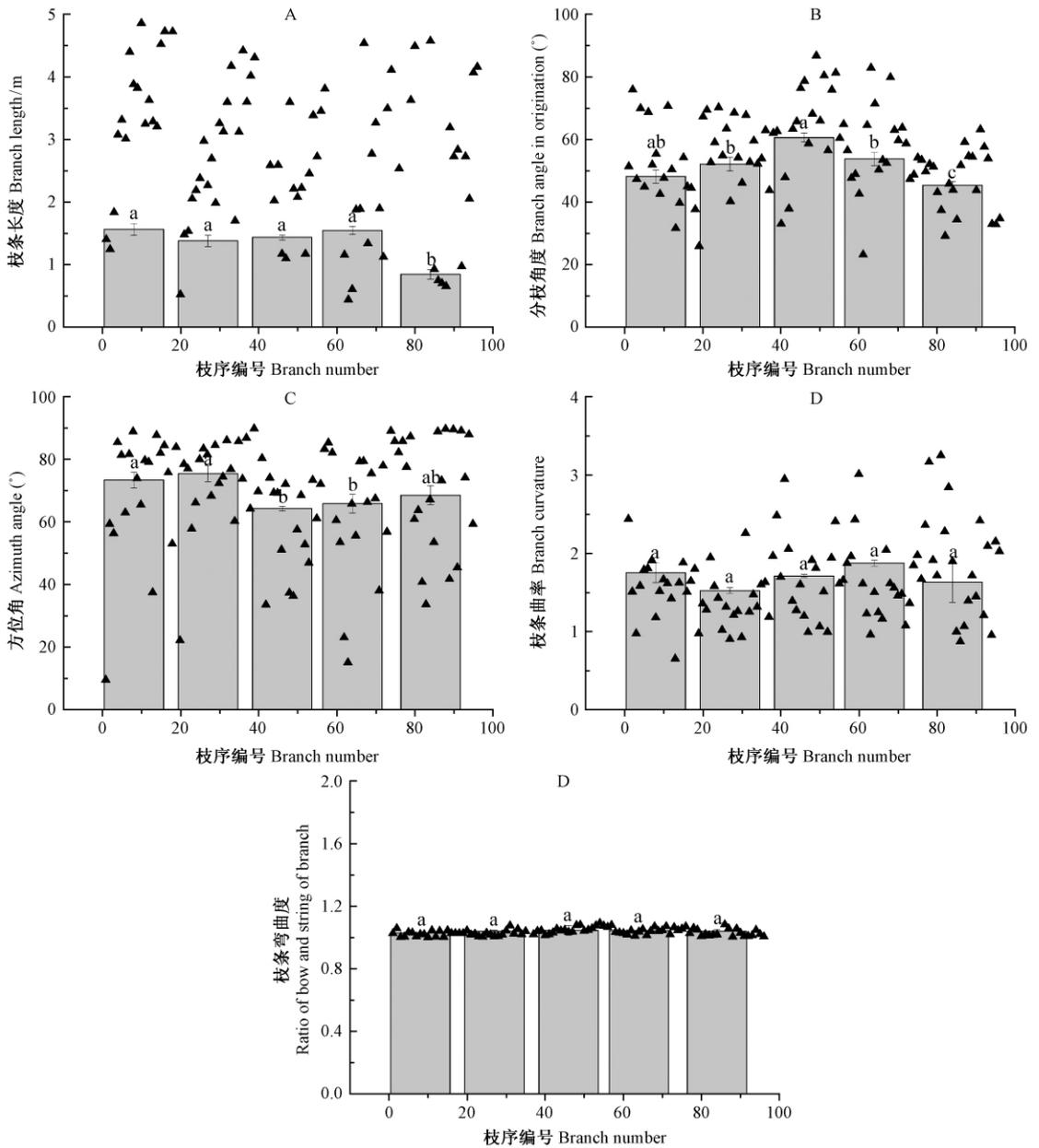


图 4 树冠特征参数

Fig. 4 Crown architecture parameters

横坐标是枝条在主干上的分布序号，从树冠最下部枝条记为 1，依次向上计数，直到最顶端的枝条。(A) 枝长；(B) 分枝角；(C) 方位角；(D) 曲率；(E) 枝条弓弦长度比(弯曲度)。

The abscissa is the serial number of branches distribution in the trunk, from the lower crown branches recorded as 1, in order to count up, until the top branches. (A) Branch length along the branch; (B) Branch angle of origin; (C) Branch angle between neighboring branches; (D) Branch curvature; (E) Ratio of bow and string of branch

要贡献。图 5A 显示第 3 个和第 5 个生长单元的同期枝小于其他生长单元。树冠结构受遗传和环境因素共同决定 (Barthelemy *et al.*, 2007; 胡启鹏等, 2008), 环境不同, 同一无性系的树冠枝条总数、不同类型枝条数量及冠幅和叶面积系数均有很大差异。梁涛等 (2010) 证明, 2009 年锦州市 5—9 月降水量是历年同期降水量的二分之一, 日照时数多, 气温偏高, 导致土壤水分指标下降, 植被长势较往年同

期差。该研究中所观测杨树无性系栽植于 2007 年春, 第 3 个生长季是 2009 年, 所以第 3 个生长单元同期枝数量少是由于气候因素造成。而第 5 个生长单元同期枝数量少是由于主干在 2011 年形成, 只有 2012 年萌发的枝条。

枝条长度结果 (图 5B) 显示位于树冠中部的第 2, 3, 4 个生长单元的早发枝显著长于第一个生长单元 ( $P < 0.05$ ), 但 2, 3, 4 单元的同期枝长度则低于

第 1 个生长单元,由此说明,冠幅是跟树冠中部的同期枝长度有关。树冠上不同生长单元的早发枝分枝角和方位角没有差异,但第 3 个生长单元的同期枝分枝角度显著大于其他生长单元,而方位角则小于其他生长单元(图 5C,D)。分枝角和方位角的变化是与气候相关还是树冠结构的影响则需要继续分析。方位角在早发枝和同期枝之间没有表现出显著差异。枝条曲率结果(图 5E)显示,早发枝曲率大于

同期枝,且早发枝曲率在不同生长单元之间有显著差异( $P < 0.05$ ),而同期枝则差异不明显( $P > 0.05$ )。Broeckx 等(2012)和 Ceulemans 等(1990)的实测结果同样证明,早发枝的起点分枝角小于同期枝。Ceulemans 等(1990)对不同的 3 年生杨树无性系测量结果显示,第 1 年和第 2 年枝条的曲率在无性系之间表现出差异。

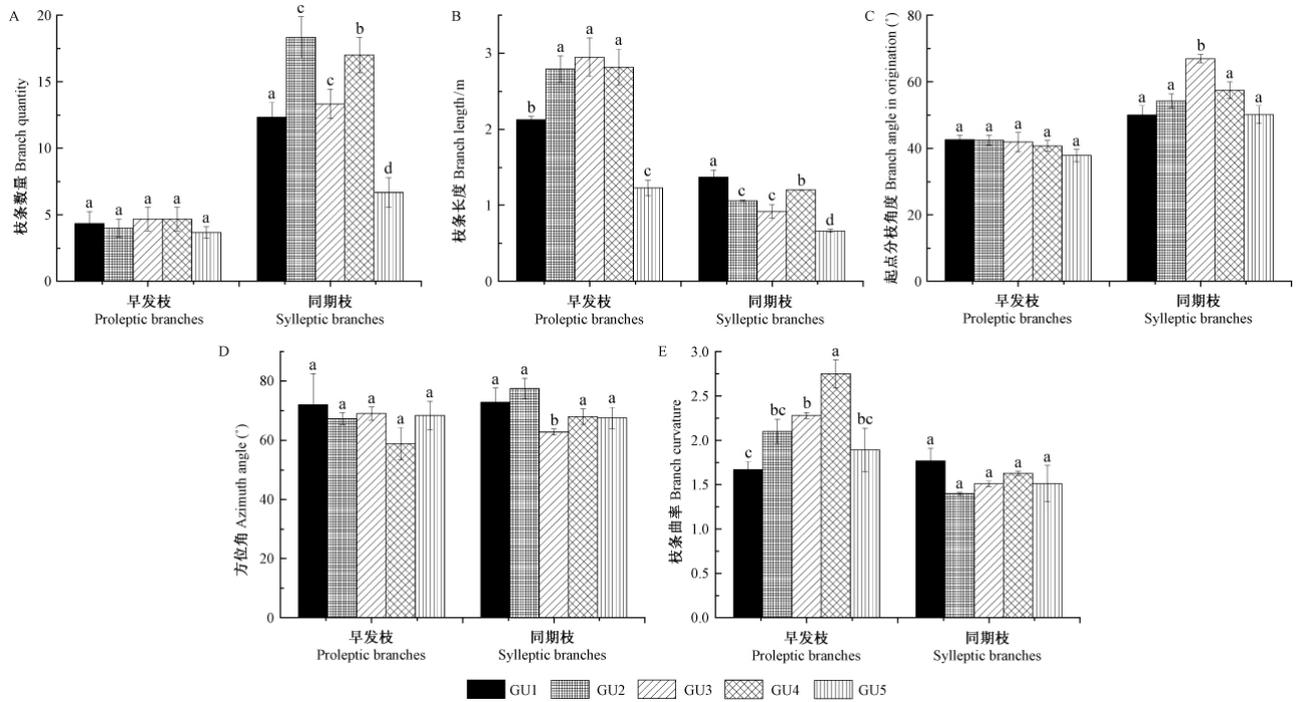


图 5 树冠中不同类型的枝条(早发枝和同期枝)在不同生长单元(GU)的参数  
Fig. 5 The parameters of proleptic branches and sylleptic branches in different growth unit (GU).

(A) 枝条数量; (B) 枝条长度; (C) 枝条起点分枝角; (D) 方位角; (E) 枝条曲率

(A) Branch quantity; (B) Branch length along the branch; (C) Branch angle of origin; (D) Branch angle between neighboring branches; (E) Branch curvature

### 3 结论与讨论

三维扫描在树木中虽有少数应用,但关注点主要是三维重建(葛娟等,2013; Teobaldelli *et al.*, 2008; Morgenroth *et al.*, 2013)。Teobaldelli 等(2008)和 Morgenroth 等(2013)分别利用 lidar 技术和 3D 图像对树木进行扫描和测量,但两者主要关注三维结构的可视化及材积估算,并未关注树冠结构,而该试验利用三维扫描技术高精度的测量获得了详细的树冠结构信息。

精度比较结果(图 3)显示,实测数据和 3D 扫描测量的胸径和树高的回归直线为近似通过原点的直线,说明 3D 扫描测量具有很高的测量精度。Teobaldelli 等(2008)通过测量不同树高位置枝条

的长度检测了用 lidar 扫描的方法的精度,回归直线截距为 0.009,斜率为 1.002 9,  $R^2 = 0.93$ ,同样具有较高的测量精度。这些结果说明三维扫描具有很高的测量精度,可用于树冠结构的测量。

与传统测量(经纬仪)相比,三维扫描技术具有较高的测量效率,能够缩短外业时间,减少因季节变化等因素对测量的影响;此外,在高密度栽植的林地中,林冠郁闭后,枝条之间相互交叉,经纬仪测量难度较大。三维扫描技术与破坏性测量相比的优点显而易见,三维扫描可以不用对林地产生破坏,而且能够获取破坏性测量不易测量到的数据,如分枝角和方位角;此外,砍伐树木,造成树冠结构信息损失,而且砍伐树木会导致整个林地环境的变化,对后续试验或生产产生不可恢复的影响。Broeckx 等

(2012) 和 Ceulemans 等(1990) 用直接测量法分别测量了 2 年生和 3 年生的杨树树冠信息, 但均需要对样本进行砍伐, 导致连续 2 年的数据不是取自同一株树, 而三维扫描技术则不需要对样本进行破坏, 可持续观测同一株树的生长和树冠结构的变化。

三维扫描与其他测量方法相比最大的优点在于时效性。三维扫描技术能够快速记录(扫描一站用时 5 min) 某一时间内的林冠参数(尤其是大型树木的树冠), 而且不受白天和夜晚的限制。但应用三维扫描技术测量树冠结构参数要注意选择无风天气进行, 因为林木达到一定高度后, 树枝顶端晃动会影响扫描精度。

整体树冠中的枝条可以分为 2 类: 一类是上一年顶芽封顶之前就已经形成的, 侧芽经过休眠期后伸长而形成的枝, 叫做早发枝; 另一类是当年生长过程中由当年侧芽发育而来, 叫同期枝。Broeckx 等(2012) 和 Ceulemans 等(1990) 对杨树树冠破坏性采样观测结果显示, 早发枝位于每一节顶端, 长度较长, 同期枝位于每一节中下部, 长度较短。图 4 的结果显示 03-04-171 的树冠枝条有 2 种表现: 一种是位于每一节顶端的分枝角小、长度较大的枝条, 为早发枝; 另一类是位于节中部的分枝角较大、长度较短的枝条, 为同期枝。Broeckx 等(2012) 和 Ceulemans 等(1990) 实测的结果同样表明早发枝分枝角度小, 枝条长度大, 而同期枝分枝角度大, 枝条长度小, 笔者的观测结果与其实测结果一致, 这说明利用三维扫描技术观测和分析树冠结构具有很强的可靠性和精确度, 三维扫描技术能够精确地记录树冠结构。此外, 枝条长度、分枝角和方位角在年与年的轮生枝中具有节律性, 但枝条弯曲度并没有在枝条类别和枝条年龄上体现出任何差异。而且, 在每一个生长季产生的轮生枝中, 枝条长度、分枝角和方位角遵循一定的分布规律。在直接测量的研究中, 方位角在树冠中的分布规律均未见报道(Ceulemans *et al.*, 1990; Broeckx *et al.*, 2012)。

树冠结构参数在不同的无性系和生长环境中表现出差异(Ceulemans *et al.*, 1990; Broeckx *et al.*, 2012; Barthelemy *et al.*, 2007; 胡启鹏等, 2008), 通过比较不同亲本的无性系树冠结构参数, 可以辅助进行品种选择。此外, 在林分中, 树木的竞争主要表现在树冠对光的竞争能力(Novoplansky, 2009), 通过比较不同无性系在不同环境中的冠型参数, 有助于推动竞争机理的研究。其他环境因素如干旱、盐碱胁迫等也会对树冠的结构产生影响(Pierik *et al.*, 2014), 探索不同胁迫条件下树冠的结构变化, 有助

于解释胁迫对生长的影响。

## 参 考 文 献

- 陈章水, 张守攻, 齐力旺, 等. 2007. LY/T 1716 - 2007 杨树栽培技术规程. 1 - 52.
- (Chen Z S, Zhang S G, Qi L W, *et al.* 2007. LY/T 1716 - 2007 Technical regulations for cultivation of poplar. 1 - 52. [in Chinese])
- 葛宝臻, 卢波, 田庆国, 等. 2006. 激光三维扫描数据的表面重建. 计算机测量与控制, 14(10): 1366 - 1367, 1376.
- (Ge B Z, Lu B, Tian Q G, *et al.* 2006. Surface reconstruction's algorithm of data points based on laser scanning system. Computer Measurement & Control, 14(10): 1366 - 1367. [in Chinese])
- 葛娟, 李红, 张晓鹏, 等. 2013. 一个自适应的植物枝干重建方法. 系统仿真学报, 25(5): 855 - 860.
- (Ge J, Li H, Zhang X P, *et al.* 2013. Adaptive approach for reconstructing botanical branch structures. Journal of System Simulation, 25(5): 855 - 860. [in Chinese])
- 胡启鹏, 郭志华, 李春燕, 等. 2008. 植物表型可塑性对非生物环境因子的响应研究进展. 林业科学, 44(5): 136 - 142.
- (Hu Q P, Guo Z H, Li C Y, *et al.* 2008. Advance at phenotypic plasticity in plant responses to abiotic factors. Scientia Silvae Sinicae, 44(5): 136 - 142. [in Chinese])
- 黄秦军, 苏晓华, 王胜东, 等. 2014. 杨树新品种‘渤丰 1 号’杨和‘渤丰 2 号’杨的综合评价. 林业科学, 50(5): 75 - 81.
- (Huang Q J, Su X H, Wang S D, *et al.* Integrative evaluation of *Populus × euramericana* cl. ‘Bofeng 1’ and *Populus × euramericana* cl. ‘Bofeng 2’. Scientia Silvae Sinicae, 50(5): 75 - 81. [in Chinese])
- 蒋承安, 李青峰, 刘凯. 2013. 术前三维扫描及三维模拟在鼻整形术中的应用. 组织工程与重建外科杂志, 9(4): 204 - 207.
- (Jiang C A, Li Q F, Liu K. 2013. Pre-operation 3D scanning and simulation in nasal reconstruction. Journal of Tissue Engineering and Reconstructive Surgery, 9(4): 204 - 207. [in Chinese])
- 焦培峰, 刘阳, 毕振宇. 2013. 基于激光扫描与 CT 建立带牙根的三维数字化牙颌模型. 中国临床解剖学杂志, 31(4): 389 - 392.
- (Jiao P F, Liu Y, Bi Z Y. 2013. Three dimensional digitized dental model with root based on laser scanning and CT data. Chinese Journal of Clinical Anatomy, 31(4): 389 - 392. [in Chinese])
- 梁涛, 刘景利, 胡丹, 等. 2010. 2009 年锦州地区生态与农业气象监测与评估//中国气象学会. 第 27 届中国气象学会年会现代农业气象防灾减灾与粮食安全分会场论文集. 中国气象学会, 8: 330 - 337.
- (Liang T, Liu J L, Hu D, *et al.* 2010. Monitoring and evaluation of ecology and agricultural meteorology of 2009 in Jinzhou// The 27<sup>th</sup> session of the China Meteorological Society annual meeting of modern agricultural meteorological disaster prevention and mitigation and food security branch field collection. Chinese Meteorological Society, 8: 330 - 337. [in Chinese])
- 林德静, 孙晓东. 2005. 基于三维扫描的人体尺寸提取技术. 北京服装学院学报, 25(3): 36 - 41.
- (Lin D J, Sun X D. 2005. Technique of measurement extraction based

- on 3D human body scanning data. *Journal of Beijing Institute of Clothing Technology*, 25 (3) :36 -41. [in Chinese]]
- 刘春军, 栾 杰, 吉 恺, 等. 2011. 三维扫描技术测量隆乳术后乳房体积变化的研究. *中国美容医学*, 20 (9) : 1401 - 1403.
- (Liu C J, Luan J, Ji K, *et al.* 2011. Study on measuring breast volumetric change after augmentation mammoplasty using three dimensional scanning. *Chinese Journal of Aesthetic Medicine*, 20 (9) :1401 - 1403. [in Chinese])
- 陆国栋, 顾铭秋, 王 剑, 等. 2005. 基于脚部三维扫描的鞋楦建模方法研究. *机械*, 32 (4) : 13 - 15.
- (Lu G D, Gu M Q, Wang J, *et al.* 2005. Research of shoe-last modeling algorithm based on feet range scans. *Machinery*, 32 (4) : 13 - 15. [in Chinese])
- 王祺明. 2007. 服装产业应用三维人体扫描技术的研究. *绍兴文理学院学报:自然科学版*, 27 (10) :54 - 57.
- (Wang Q M. 2007. Appling 3D whole body scanner technology in apparel industry. *Journal of Shaoxing University*, 27 (10) :54 - 57. [in Chinese])
- 余 明, 丁 辰, 过静珺. 2004. 激光三维扫描技术用于古建筑测绘的研究. *测绘科学*, 29 (5) : 69 - 70, 65 - 66.
- (Yu M, Ding C, Guo J J. 2004. Research on mapping of ancient architecure based on laser 3-dimension sacnning technology. *Science of Surveying and Mapping*. 29 (5) : 69 - 70, 65 - 66. [in Chinese])
- Barthélémy D, Caraglio Y. 2007. Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Annals of Botany*, 99:375 - 407.
- Broeckx L S, Verlinden M S, Vangronsveld J, *et al.* 2012. Importance of crown architecture for leaf area index of different *Populus* genotypes in a high-density plantation. *Tree Physiology*, 32 (10) : 1214 - 1226.
- Ceulemans R, Stettler R, Hinckley T, *et al.* 1990. Crown architecture of *Populus* clones as determined by branch orientation and branch characteristics. *Tree Physiology*, 7 (1 - 4) : 157 - 167.
- Dickmann D I, Keathley D E. 1996. Linking physiology, molecular genetics, and the *Populus* ideotype // Stettler R F, Bradshaw H D, Heilman J P E, *et al.* *Biology of Populus and its implications for management and conservation*. NRC Research Press, Ottawa.
- Duursma R A, Mäkelä A. 2007. Summary models for light interception and light-use efficiency of non-homogeneous canopies. *Tree Physiology*, 27 (6) : 859 - 870.
- Godin C. 2000. Representing and encoding plant architecture: a review. *Annals of Forest Science*, 57: 413 - 438.
- Kim H S, Palmroth S, Therezien M, *et al.* 2011. Analysis of the sensitivity of absorbed light and incident light profile to various canopy architecture and stand conditions. *Tree Physiology*, 31 (1) : 30 - 47.
- Morgenroth J, Gomez C. 2014. Assessment of tree structure using a 3D image analysis technique—A proof of concept. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13 (1) : 198 - 203.
- Novoplansky A. 2009. Picking battles wisely: plant behaviour under competition. *Plant, cell & environment*, 32 (6) : 726 - 741.
- Pierik R, Testerink C. 2014. The art of being flexible: how to escape from shade, salt, and drought. *Plant Physiology*, 166 (1) : 5 - 22.
- Teobaldelli M, Puig A D, Zenone T, *et al.* 2008. Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR. *Functional Plant Biology*, 35 (10) : 1080 - 1090.
- Tuskan G A. 1998. Short-rotation woody crop supply systems in the United States: what do we know and what do we need to know?. *Biomass and Bioenergy*, 14 (4) : 307 - 315.
- Wang N, Huang Q, Sun J, *et al.* 2014. Shade tolerance plays an important role in biomass production of different poplar genotypes in a high-density plantation. *Forest Ecology and Management*, 331: 40 - 49.

(责任编辑 王艳娜)