

# 高纺锤形苹果树三维重建和光照特性的评价

王菲<sup>1</sup>, 张社奇<sup>1</sup>, 李丙智<sup>2</sup>, 章兰芬<sup>1</sup>, 韩明玉<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 理学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**以 13 a 生“富士”树为试材,应用三维数字化仪和 Pleaf Digit 软件对高纺锤形“富士”的大、中、小冠层进行数字化,树体模型及光截获的计算均在 Vege STAR 软件中实现。光截获效率用 STAR 值来表征。实测的透光率与模型计算出的值无显著差异,表明基于三维数字化仪的重建模型可以用来进行冠层光照特性的评价,以对冠层结构进行量化与定性分析。结果表明:大、中、小冠层的光截获量依次增大,而 5 种枝条类型中,长营养枝的 STAR 值最大,果台枝最小;果实的 STAR 值与果台枝和短营养枝、长营养枝和短果台副梢的光截获量有关。由三维模型构建得出的 STAR 值可以作为评价冠层光截获的指标,为后期树体冠层内光合作用的研究及整形修剪提供了理论参考。

**关键词:**三维数字化;冠层结构;光截获;模型;STAR

**中图分类号:**S 661.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2012)06-0010-04

果树冠层内光截获的计算是决定果园产量与果实品质的重要因素。随着植物三维结构模型研究的发展,出现了辐射度模型和光线跟踪模型<sup>[1-2]</sup>。这类模型在对植物冠层进行三维描述和分析的基础上,能够模拟冠层内光的三维分布状况,但计算量和数据存储量太大,对计算机和数值计算水平要求高,目前难以实现其在果树上的实际应用。为了较容易实现冠层内光截获的计算,该试验在利用三维数字化仪获取数据并建立果树树体模型的基础上,进行了不同类型枝条和果实光截获的计算。

目前国内利用三维数字化仪建立了 1 a 生大田作物的模型<sup>[3-4]</sup>,在果树上利用 L-system 模拟了枝干模型<sup>[5]</sup>,而没有在叶片水平上构建。由于果树三维模型构建的复杂性,在利用三维数字化仪建立果树树体模型并进行冠层和果实水平光截获 STAR (Silhouette to total leaf area ratio),即太阳照射面的投影面积与总面积之比<sup>[6-7]</sup>的计算方面研究尚缺乏详细的报道。现通过建立的模型来评价冠层内的光照特性,以为整形修剪提高枝条光截获及保持果园连续优质丰产等技术措施提供理论依据。

**第一作者简介:**王菲(1986-),女,山东德州人,在读硕士,研究方向为果树的三维建模及光截获的评价。E-mail:wfhomework@126.com。

**责任作者:**张社奇(1964-),男,陕西扶风人,博士,教授,现主要从事果树分形方面的研究工作。E-mail:zhangsheqi@nwsuaf.edu.cn。

**基金项目:**农业部“948”资助项目(2011-Z24);国家苹果产业技术体系资助项目(CARS-28)。

**收稿日期:**2012-01-14

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验树品种为“富士”(Malus domestica Borkh cv. ‘Fuji’),1998 年定植,基础为“西府海棠”,矮化中间砧为 M. 26。树形采用高纺锤形,株行距为 2.5 m×3 m,南北行向,树势健壮。

### 1.2 试验地概况

试验于 2011 年 5~11 月在陕西省宝鸡市凤翔县苹果产业技术体系宝鸡苹果试验站苹果园内进行。果园地理位置为东经 107°23.969′,北纬 34°33.273′,海拔 829 m。供试果园有灌溉条件,土壤质地为壤土,肥力均匀,行内种植三叶草。

### 1.3 试验方法

**1.3.1 树体坐标的采集与树的选择** 选用美国 Polhemus 公司的 3 Space Fastrak 三维数字化仪(Fastrak 3 Space; Polhemus, Vermont, USA)<sup>[8]</sup>和 Pleaf Digit 软件<sup>[9]</sup>分别在枝条水平和叶片水平进行数字化获取树体的空间坐标,叶片重建需要建立异速生长关系<sup>[10-12]</sup>(表 1)。在 Fortran 语言编写的程序下建立三维模型。分别选择大、中、小冠层、树形一致的试验树 5 棵进行数字化,共 15 棵树。在测量前,要在每棵试验树基部定义 1 个坐标平面,通过坐标转换,使得每棵树的树干与地面的交点为坐标原点。定义正北为 X 轴正方向、正东为 Y 轴正方向、垂直向下为 Z 轴正方向,此方向与磁场产生器上的坐标方向一致。记录每个枝条顶部和底部的坐标,同时记录枝条类型,即有果果台枝(BF)、无果果台枝(BA)、长果台副梢(BL)、短果台副梢(BS)、长营养枝(VL)、短营养枝(VS)

表 1 构建树所需要的异速生长关系

Table 1 Allometry relationships needed to reconstruct the trees

线性方程	无果果枝 Non fruit spur	有果果枝 Fruit spur	短果台副梢 Short fruit spur sideshoot	长果台副梢 Long fruit spur sideshoot	短营养枝 Short vegetative branches	长营养枝 Long vegetative branches
斜率 叶片数 $NL=f(\text{枝条长度})$	0	0	0.6399	0.3587	1.6133	0.3593
截距 $NL=f(\text{Length})$	4	4	5.1809	6.2443	4.9026	10.481
斜率 枝条叶面积 $SLA=f(\text{长度})$	6.118	6.118	30.749	9.7614	75.814	14.315
截距 $SLA=f(\text{Length})$	19.368	19.368	43.795	90.439	18.852	85.037
叶柄倾斜角的斜率	31.8902	31.8902	25.1442	42.1822	25.6785	42.2731
叶柄倾斜角的标准偏差	32.7741	32.7741	34.5326	26.2869	34.9263	26.5239
斜率 叶柄长度 $=f(\text{叶片长度})$	0.3971	0.3971	0.4644	0.2992	0.3871	0.3291
截距 叶柄长度 $=f(\text{length})$	0.3286	0.3286	0.1610	0.9794	0.6464	0.8371
斜率 叶面积 $LA=f(\text{leaf length})$	0.5214	0.5214	0.3919	0.4150	0.3992	0.4276
斜率 叶片宽度 $=f(\text{leaf length})$	0.7592	0.7592	0.5904	0.6278	0.6159	0.6369

和每个 BF 上的果实数目。临界值 5 cm 将当年生短枝条与长枝条区分开来<sup>[13]</sup>。果实重建成有果果台枝下的球体。所有试验树在果实摘袋后均不铺反光膜,果实采摘前不摘叶。

1.3.2 光量子探头测定透光率 利用 Licor 公司的 2 个 LS190 线性光量子探头在树干基部东、西、南、北 4 个方向分别测定透光率,水平方向间隔均为 20 cm,4 个方向均延伸到树冠边缘,计算树冠平均透光率。

1.3.3 STAR 值的计算 通过选择程序中的选项来分别计算不同类型的枝条和果实的 STAR 值。Option B 将 BF、BA、VL、VS、BL 和 BS 分别设为红色、绿色和蓝色,即三基色的组合为分别为(255、0、0)、(200、0、0)、(0、255、0)、(0、200、0)、(0、0、255)和(0、0、200),而果实附上黑色,即(0、0、0)。Option D 将所有的果实附上红色,将叶片附上黑色(图 1)。将生成的.vgx文件导入到 Vege STAR v. 4.0 中进行 STAR 值的计算,选项设置中均选择 2011 年 6 月 15 日的光照。

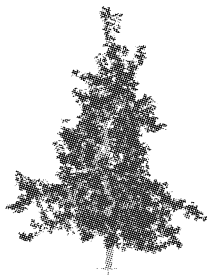


图 1 高纺锤形“富士”的三维重建模型

Fig. 1 Model of tall spindle shape of 'Fuji' apple

1.4 数据处理

在 Microsoft Excel 软件中进行数据整理,采用 SAS v. 8.0 软件中的 PROC ANOVA 进行方差分析,用 Duncan 新复极差法进行多重比较,利用 PROC CORR 进行了相关性分析,用 Sigma Plot v. 10.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 试验树的冠层结构和枝类组成

由于数字化点树时,每个枝条均是按拓扑结构来进行的,数字化后的枝条数目为树体真实的枝条数,显著

性  $t$  检验显示人工统计与数字化结果在枝条数目上差异不显著(表 2)。由于果实重建为果台枝下的球体,因此,重建出果实的数目与统计出的果实数是相同的。根据表 1 的异速生长关系重建出的大、中、小冠层的叶片数目分别为 19 056、14 962 和 9 592 片,叶面积分别为 387 640.96、283 902.39 和 166 474.13  $\text{cm}^2$ ,与样本法测得的值无显著差异。由于果台枝枝条长度和叶片数量的关系中  $R^2$  低于 0.2,因此假定为无论果台枝多长,均着生相同数目的叶片,即  $N=4$ 。利用光量子探头测得的大、中、小冠层树干基部东、西、南、北 4 个方向透光率的平均值分别为 18.95%、20.15% 和 22.79%。模型计算出的透光率分别为 19.11%、20.26% 和 22.81%。因此,基于三维数字化仪构建出的模型真实可靠。

表 2 数字化树的树体结构与枝量

Table 2 Structural parameters and branch number of the digitized trees

冠层 Canopy	干径 Trunk diameter /cm	主枝 Main branch	当年生枝数目 No. of current year shoots						无果果枝 Non fruit spur
			长营养枝 Long vegetative branches	短营养枝 Short vegetative branches	长果台副梢 Long fruit spur sideshoot	短果台副梢 Short fruit spur sideshoot	有果果枝 Fruit spur		
* 大	19.4	28	227	1 568	103	327	261	256	
** 大	19.4	28	235	1 572	105	338	261	267	
* 中	12.3	27	147	1 165	72	388	179	330	
** 中	12.3	27	154	1 168	78	391	179	335	
* 小	9.6	26	48	598	65	385	166	302	
** 小	9.6	26	51	600	68	388	166	307	

注: \* 表示人工测定的结果, \*\* 表示数字化的结果。

Note: \* means results of artificial, \*\* means results of digital.

2.2 不同类型枝条的 STAR 值

由图 2 可知,大、中、小冠层的光截获量依次增大,STAR 值分别为 0.134、0.145 和 0.170。3 种冠层不同类型枝条的 STAR 值排序均为长营养枝>长果台副梢>短营养枝>短果台副梢>果台枝,其中长营养枝的 STAR 值为 0.188,果台枝的 STAR 值为 0.080。由表 1 可知,果台枝的枝量仅次于短营养枝的数目,而光截获量,即 STAR 值却最低。这可能与叶片的倾斜角度有关,其次是因为光线照射到果台枝上的面积太小。

2.3 不同类型的枝条和果实的 STAR 值的相关性分析

由表 3 可知,不同类型的枝条和果实间的 STAR 值

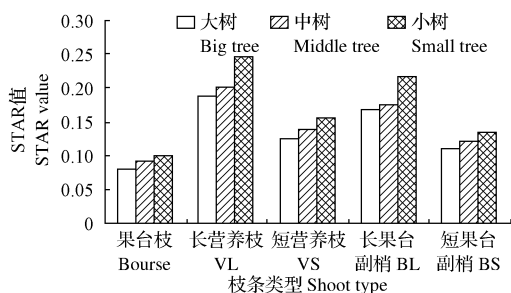


图2 3种冠层不同类型枝条的光截获

Fig. 2 The light interception of three kinds of different type of shoots

均呈正相关关系。果台枝与短营养枝(VS)和短果台副梢(BS)及果实的 STAR 值均达到极显著差异( $P < 0.01$ )水平。长营养枝(VL)和短营养枝(VS)、长果台副梢(BL)及果实的 STAR 值均达到显著差异水平( $P < 0.05$ ),而 VS 只与 BS 差异显著,与果实的 STAR 值差异达到显著。BL 与 BS 的差异达到显著。BS 与果实的 STAR 值达到显著。因此,为了提高果实的品质,需要提高果台枝和 VS、VL 和 BS 的光截获量。在保证树形特征的前提下,应减少 BL 的数量,并且应该控制徒长枝的数量。

表3 不同枝条类型与果实的相关性

Table 3 The correlation matrix of STAR value for different type of shoots and fruits

STAR 值	果台枝 Bourse	长营养枝 VL	短营养枝 VS	长果台副梢 BL	短果台副梢 BS	果实 Fruit
果台枝 Bourse	1.00000					
长营养枝 (VL)	0.79538 0.0585	1.00000				
短营养枝 (VS)	0.94621 0.0043	0.90246 0.0138	1.00000			
长果台副梢 (BL)	0.80806 0.0517	0.86643 0.0256	0.76943 0.0736	1.00000		
短果台副梢 (BS)	0.94902 0.0038	0.68349 0.1344	0.81943 0.0460	0.85150 0.0314	1.00000	
果实 Fruit	0.96096 0.0023	0.88060 0.0205	0.97731 0.0008	0.79536 0.0585	0.87080 0.0240	1.00000

注:表中数值为相关系数,相关系数下为概率。

Note: Values in the table are mean correlation coefficient, Values bellowed correlation coefficient are mean probability.

### 3 结论与讨论

该研究中不同类型枝条与果实的 STAR 值的分析基于树体的三维模型。在模型的普适性方面,只要利用三维数字化仪获取了每个当年生枝条顶部和底部的坐

标,便可得到树体的冠层结构模型。根据研究目的就可以对树体进行任意地划分。如果想研究某个器官的特征,只需要将该器官附上颜色,其它不研究的器官部分的 R、G、B 设为 0、0、0 即可。基于三维虚拟模型的冠层内光截获的计算对三维测定技术具有很强的依赖性。从试验结果分析,果实的光截获量与果台枝和短营养枝、长营养枝和短果台副梢的光截获量有关。因此,利用 STAR 值对冠层内枝条和果实光截获的研究,既为果树冠层内光分布的分析提供了准确依据,也为整形修剪提供了理论指导。

### 参考文献

- [1] Chelle M, Andrieu B. The nested radiosity model for the distribution of light within plant canopies [J]. Ecological Modelling, 1998, 111: 75-91.
- [2] Chelle M, Andrieu B. Radiative models for architectural modeling [J]. Agronomie, 1999, 19: 225-240.
- [3] 马韞韬, 郭焱, 李保国. 应用三维数字化仪对玉米植株叶片方位分布的研究 [J]. 作物学报, 2006, 32(6): 791-798.
- [4] 郑邦友, 石利娟, 马韞韬, 等. 水稻冠层的田间原位三维数字化及虚拟层切法研究 [J]. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1181-1189.
- [5] 刘阁, 周国民, 胡林. 基于 L 系统的开心形苹果树枝干模型 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(16): 7795-7796, 7804.
- [6] Sinoquet H, Sonohat G, Potel A M, et al. Using virtual plants to estimate light distribution at intra-canopy scale in apple trees, Method presentation and assessment [J]. Acta Hort., 2008, 803: 225-234.
- [7] Saudreau M, Marquier A, Adam B, et al. Modelling fruit-temperature dynamics within apple tree crowns using virtual plants [D]. Annals of Botany, 2011: 1-10.
- [8] Sinoquet H, Rivet P. Measurement and visualisation of the architecture of an adult tree based on a three dimensional digitising device [J]. Trees: Structure and Function, 1997, 11: 265-270.
- [9] Doné s N, Adam B, Sinoquet H. PiafDigit-Software to drive a Polhemus Fastrak 3 SPACE 3D digitiser and for the acquisition of plant architecture [M]. Version 1.0. 2006, UMR PIAF INRA-UBP, Clermont-Ferrand.
- [10] Sinoquet H, Rivet P. Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device [J]. Trees, 1997, 11: 265-270.
- [11] Willaume M, Lauri P, Sinoquet H. Light interception in apple trees influenced by canopy architecture manipulation [J]. Trees, 2004, 18: 705-713.
- [12] Stephan J, Sinoquet H, Dones N, et al. Light interception and partitioning between shoots in apple cultivars influenced by training [J]. Tree Physiology, 2008, 28: 331-342.
- [13] Lauri P E, Kelner J J. Shoot type demography and dry matter partitioning: a morphometric approach in apple (*Malus domestica*) [J]. Canadian Journal of Botany, 2001, 79(11): 1270-1273.

## Three-dimensional Reconstruction of Trees Trained to Tall Spindle Shape and Assessment of Light Characteristics

WANG Fei<sup>1</sup>, ZHANG She-qi<sup>1</sup>, LI Bing-zhi<sup>2</sup>, ZHANG Lan-fen<sup>1</sup>, HAN Ming-yu<sup>2</sup>

(1. College of Science, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Horticulture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

# 甜樱桃不同品种生长结果习性调查

魏国芹, 孙玉刚, 安 淼, 焦其庆

(山东省果树研究所, 山东 泰安 271000)

**摘 要:**以“红灯”、“布鲁克斯”、“红宝石”、“斯得拉”、“拉宾斯”、“先锋”6个甜樱桃主要栽培品种为试材,对树体生长状况、结果枝类组成、总芽数量、花芽数量、果实经济性状进行调查。结果表明:不同品种树高、冠径、干径存在差异;供试品种均以花束状果枝结果为主,“红宝石”、“斯得拉”、“拉宾斯”和“先锋”花束状果枝的比例分别为84.9%、83.3%、76.8%、83.3%,显著高于“红灯”和“布鲁克斯”;不同结果枝类总芽数量和花芽数量不同;“先锋”和“红灯”总芽数量及花芽数量均显著多于其它品种;果实经济性状因品种而异,“先锋”平均单果重较大,“布鲁克斯”和“红灯”可溶性固形物含量较高。

**关键词:**甜樱桃;生长习性;结果枝;果实性状

**中图分类号:**S 662.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2012)06-0013-03

甜樱桃(*Prunus avium* L.)为蔷薇科(Rosaceae)李属(*Prunus* L.)樱桃亚属(*Cerasus* Juss)乔木<sup>[1]</sup>,具有很高的营养价值和医药价值<sup>[2]</sup>。作为落叶果树中经济效益最高的树种之一,各地积极引种栽培,发展势头强劲。由于目前生产中栽培的品种较多,种植者对品种的生长结果习性及其品种间差异了解较少,容易造成管理不当,导致产量低、品质差等问题。该研究对当前甜樱桃主栽品种进行了生物学特性调查,旨在为栽培者选择合适的品种及科学管理提供科技支撑。

**第一作者简介:**魏国芹(1983-),女,山东曲阜人,硕士,研究实习员,现主要从事果树育种及栽培研究工作。E-mail:wgqymm@163.com。

**责任作者:**孙玉刚(1964-),男,山东诸城人,硕士,研究员,现主要从事果树育种及栽培研究工作。E-mail:sds129@126.com。

**基金项目:**公益性行业(农业)科研专项资助项目(200903019)。

**收稿日期:**2011-11-25

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为6年生甜樱桃品种“红灯”、“布鲁克斯”、“先锋”、“红宝石”、“拉宾斯”、“斯得拉”,砧木为“吉塞拉5号”,株行距3 m×4 m,主干疏层形整形,树体生长正常,坐果良好,管理水平一致。立地条件为壤土,透气性良好,肥力中等,pH 6.8~7.2。

### 1.2 试验方法

试验于2010~2011年在泰安市西苑园艺场进行。每品种选取5株开展调查,单株小区,5次重复,调查物候期、树高、干径、冠径,以主干疏层形第1层主枝为研究对象,测量第1层主枝单主枝平均长度、基部平均粗度、结果枝数量、结果枝枝类构成和单主枝总芽数量、花芽数量;果实成熟期在供试品种的树高1.5 m处的东、南、西、北方向随机采100个果实,测量果柄长、果实纵径、横径、平均单果重、最大单果重、可溶性固形物含量。

**Abstract:** Taking 13-year-old ‘Fuji’ trees as test materials, three-dimensional digitizer and Paf Digit software were used to digitize the large, middle and small canopy of trees trained to tall spindle shape. The tree model and computation of light interception, which was characterized as STAR were realized in the VegeSTAR software. Light transmittance derived from the model had no significant difference from what we measured. The constructed model could be used to assess the light characteristics. The test was to make quantitative and qualitative analysis of the canopy structure. The results showed that the STAR of VL were the largest and the bourse were that of the smallest in five type of shoots; the STAR of fruits related to light interception of bourse, VS, VL and BS. The STAR value could be used as an indicator to assess the canopy light interception, which provided a theory reference for the research on the photosynthetic and pruning and training in the later period.

**Key words:** 3D digitizer; canopy structure; light interception; model; STAR