doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.044

基于方格网法的树冠体积测算方法*

何　诚[1]　张思玉[1]　Matteo Convertino[2]　周爱民[1]　洪芳霞[3]

(1.南京森林警察学院林火研究中心,南京 210023;2.明尼苏达大学双城分校环境研究所,明尼苏达州 55108;
3.江西科技师范大学旅游学院,南昌 330013)

摘要:提出了一种基于方格网法测算树冠体积的方法。研究利用免棱镜全站仪获取树冠点云数据,建立树冠表面特征点的坐标方格网,根据方格网法计算土方量的原理来求算树冠体积,通过传统经典模型人工方法、三维激光量测法与本文算法,分别计算实验区域研究对象的体积,将结果进行对比分析,本研究提出的算法平均相对误差为4.13%,平均准确度为95.97%,且在置信度0.05下树冠体积的计算值与实测值之间的差异性为不显著,结果完全满足计算精度,其计算耗时只有传统人工量测法的1/3,成本为三维激光扫描的2%,降低了成本且提高了效率。

关键词:树冠体积　全站仪　点云数据　方格网法　测算方法

中图分类号:S758;TP391.41　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2014)12-0308-08

引言

树冠直接体现树木的健康,与其本身的生长、发育、繁殖有着密切的关系;树冠的体积还能反映出环境的适应程度和树木本身适应能力(适应力)、树木群体间的竞争系数和健壮度,树冠体积是明确这些数量关系的前提;树冠体积也是农药和肥料精准施用的重要参考因素;果树的树冠体积是果产预估等果园精细管理的参考因素;树冠体积更是森林生物量估算、三维森林测算和林木生长监测的重要测量因子。但因为树种、地形、气候等多方面的因素导致树冠的结构复杂,树冠外形各异,难以精准获取树高、冠幅和树冠投影面积等因子[1-6]。

传统森林计测具有技术粗放、精度不高、砍伐等破坏性强和获取数据工作量大等缺点,满足不了当今时代对森林资源量测的高效性和准确性等要求。精准无损地获取树冠体积数据尤其显得重要,因为树冠体积的精准获取是把握林木各种生态效益的前提[7]。树冠是有边际的几何体,其表面可以量测。但树种、环境等因素导致树冠各不相同,即使同个地点的同一树种,不同林木之间的树冠形状也存在差异,所以简单的使用几何图形来代替树冠形状是不合适的。传统的手工量测方法是,使用米尺、测高器等测量工具,获取冠高、冠幅等因子,代入该树种的经验几何形状体积求算公式来获取树冠体积,因仪器精度的限制,导致获取树冠因子精度不高,再加上经验求算公式的精度低,所以传统获取树冠体积的精度稳定性很差[8]。

三维激光扫描仪运用到树冠测量的研究上,可以构建出树木的空间形状,国内外也做了大量的相关研究[9-19]。目前通过三维激光扫描仪获取树冠体积的求算方法存在如下问题:① 三维激光扫描仪的价格在人民币100万元左右,大多运用在林业科研上,就林场推广应用而言,价格相对昂贵,针对林场工人来说,操作相对繁琐。② 获取的激光点云数据庞大,对处理数据的计算机配置要求高,在处理过程中,耗时费力,自动化程度不高。

为了实现单木因子树冠体积高精度低成本无损测量,同时避免从大量树冠点云数据中提取树冠表面特征点的难题,本文提出一种基于方格网法测算树冠体积的方法。采用免棱镜全站仪获取树冠的三维空间点阵数据,建立树冠表面的坐标方格网,方格网的一边与等高线平行,大小根据冠幅确定,利用方格网法计算树冠体积。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

南京位于北纬31°14′~32°37′,东经118°22′~

收稿日期:2014-08-29　修回日期:2014-09-26

*中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(LGZD201401)、中国博士后科学基金资助项目(2014M561092)、国家自然科学基金资助项目(30671696、41371001)和林业科学技术推广资助项目(201419)

作者简介:何诚,讲师,博士后,主要从事森林精准计测技术、森林灾害监测与预警研究,E-mail:hech_eng@163.com

通讯作者:张思玉,教授,主要从事林火生态研究,E-mail:siyu85878817@163.com

119°14′,全市平面位置呈正南北向,南北最大直线距离 140 余 km,东西最大直线距离为 80 余 km,总面积达 6 515.74 km^2。

研究区域属亚热带季风气候,雨量充沛,年降水 1 200 mm,四季分明,年平均温度 15.4℃,年极端气温最高 39.7℃,最低 -13.1℃,年平均降水量 1 106 mm。春季风和日丽;梅雨时节,又阴雨绵绵;夏季炎热;秋天干燥凉爽;冬季寒冷、干燥。

1.2　试验平台

本次试验采用南方 NTS-3401 型免棱镜全站仪进行标准地野外测量,如图 1 所示,免棱镜全站仪是基于相位法原理,发出极为窄小的工业激光束,无需棱镜直接打至目标,利用目标物的漫反射返回信号,即可测量出该点的三维坐标、角度、距离等空间几何要素的高精度测量仪器。南方 NTS-3401 型免棱镜全站仪具有 3R 级可见激光,波长在 106 ~ 302.5 nm,仪器具有以下特点:① 精度高($3 \pm 2 \times 10^{-6}$) mm。② 范围大,测距范围最远可达 550 m,理想测距范围为 300 m 以内。③ 如图 2 所示,具有可见的红色激光斑以及很小的光束直径[20]。



图 1　南方 NTS-3401 型免棱镜全站仪

Fig. 1　South NTS-3401 non-prism total station

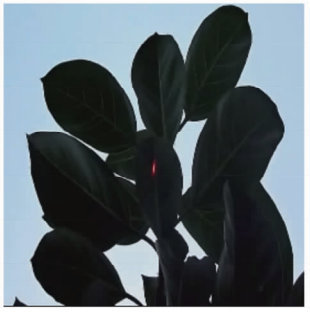


图 2　免棱镜全站仪获取树冠表面特征点示意图

Fig. 2　Picture of characteristic points of canopy surface obtained from non-prism total station

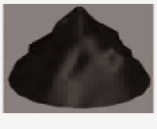
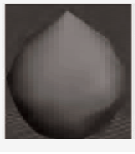
1.3　数据获取

1.3.1　传统量测树冠体积方法

传统获取树冠体积的方法是将冠形拟合成规则几何图形,依据体积计算公式求算树冠体积,根据 2013 年 7 月 ~11 月在南京地区各样地的调查、归纳和总结,列出主要树种形态及树冠三维模型,如表 1 所示。

表 1　南京地区主要树种形态及树冠三维模型

Tab. 1　Crown formation and 3D models of dominant tree species in Nanjing

冠形	冠形特征实例	树冠三维模型	几何体
不规则倒锥体或倒锥台			
不规则锥体或锥台			
不规则柱体			
不规则台体或倒台体			
不规则椭球体			

1.3.2 全站仪获取树冠表面特征点方法

(1)控制点布设:综合考虑树木大小、地形、通视情况等因素,在被测树木周围采用独立坐标系布设控制点,具体如下:在树木周围通视情况良好,适合架设仪器的位置布设一个点 A,并假设其一个三维坐标,在该点正北方向布设另一个点 B,使用全站仪量测两点距离,获取另一点的平面坐标,在 A 点架设仪器,后视 B 点,以支导线的形式根据树木大小和需要,在树木周围布设控制点,控制点精度控制在毫米级。

(2) 树冠表面特征点获取:各控制点上使用免棱镜全站仪,在树顶到树冠底部的东、南、西、北、东南、东北、西南、西北 8 个方向上,每隔相同的高度采集树冠表面的三维坐标。

1.4 内业处理

从 8 个方向获取树冠表面特征点的三维坐标,针对树冠点云数据,用圆滑曲线把相同高度采集的树冠表面的点连接起来,形成等高线,如图 3 所示。

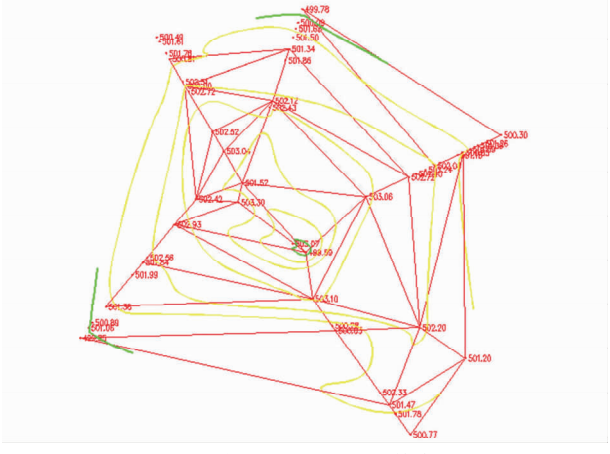


图 3 树冠表面特征点等高线

Fig. 3 Isohypse indicated by characteristic points of canopy surface

2 计算方法

2.1 经典树冠表面积体积计算模型

传统树冠体积的计算方法:以树冠的冠幅与冠高作为参数,模拟为规则几何体计算体积,人工采集树木特征因子,并根据每种模拟的几何体求解树冠体积,如表 2 所示,表中 x 为冠幅,y 为冠高。

2.2 方格网法

该方法首先将树冠表面划分为若干方格(一般为边长 10 ~ 20 cm 的正方形),如图 4 所示,从实测数据网中用内插法求出每个方格角点的高程,并注记在相应方格顶点的右上方,设计标高定位树冠最低点高程,根据各点的设计标高与自然标高之差,求出零线位置,进而求出各方格的体积,所有方格的体积之和即为整个树冠的体积。

表 2 树冠模拟几何体体积计算公式

Tab. 2 Formula for calculating crown geometry-based volume

冠形	体积计算公式
卵形	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
圆锥形	$\frac{\pi x^2 y}{12}$
球形	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
半球形	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
球扇形	$\frac{\pi(2y^3 - y^2\sqrt{4y^2 - x^2})}{3}$

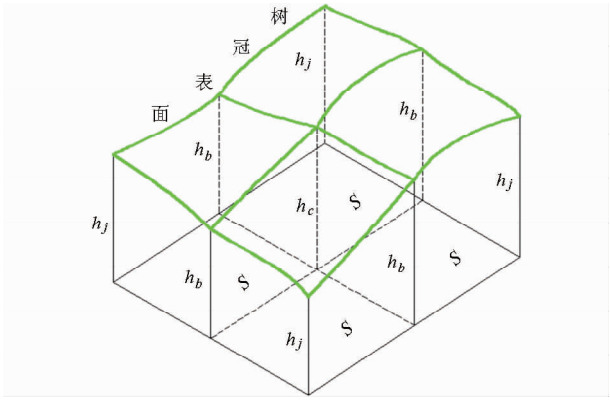


图 4 方格网法示意图

Fig. 4 Sketch of square grid-based method

使用全站仪获取树冠顶部点高程 H_1 和树冠底部点高程 H_2,则树冠高度 $h = H_1 - H_2$。在建立的等高线上绘制方格网,将图上方格边长设为 2 cm,这就将树冠的等高线分成若干份,用线性内插法求出各方格顶点的高程,并注记在相应顶点的右上方,将设计高程定为树冠最低高程点。如图 4 所示,各部分计算体积公式如下

$$V_j = \frac{hS}{4} \qquad V_b = \frac{hS}{2}$$

$$V_g = \frac{3}{4}hS \qquad V_z = hS$$

式中 V_j——角点体积 S——方格面积

h——树冠高度 V_b——边点体积

V_g——拐点体积 V_z——中心点体积

计算出各点的体积后,树冠的体积为各方格网的体积之和。

3 结果与分析

3.1 方格网法原理精度分析

方格网法是一种求算土方量的方法,首次将该方法运用到求算树冠体积上。该方法的量测误差受比例尺、等高距和树冠形状等因素的影响。设树冠

表面特征点高程中误差为 m_h，树冠设计高程为 h_d，树冠表面网顶点的高程为 h_w，根据设计高程和树冠表面特征点的高程可以计算出每个方格网顶点的高差，记为 h_i，即为

$$h_i = h_w - h_d \quad (i = 1,2,3,4,\cdots) \tag{1}$$

而

$$h_w = h_c \pm \frac{d_1}{d} h_0 \tag{2}$$

式中　d——内插点与相邻两条等高线正交时图上的线段长度

d_1——内插点到相邻两条等高线较短的垂直距离

h_0——树冠表面等高距

h_c——等高线上点高程

则特征点高程中误差 m_h 计算式为

$$m_h^2 = m_0^2 + \frac{d^2 + d_1^2}{d^4} h_0^2 m_d^2 \tag{3}$$

式中　m_0——等高线高程的中误差

m_d——内插等高线高程时图上长度量测的中误差

其中$\frac{d^2 + d_1^2}{d^4}$中，d_1 最大可达到 $0.5d$，则可得

$$m_h^2 = m_0^2 + \frac{1.5 h_0^2 m_d^2}{d^2} \tag{4}$$

则

$$m_h = \pm \sqrt{m_0^2 + \frac{1.5 h_0^2 m_d^2}{d^2}} \tag{5}$$

设树冠表面地形图比例尺 $1:M$，α 为平均地形坡度，由此可得

$$d = \frac{1\,000 h_0 \cot\alpha}{M}$$

将 d 代入式(5)整理可得

$$m_h = \sqrt{m_0^2 + 1.5 m_d^2 \left(\frac{M}{1\,000}\right)^2 \tan^2\alpha} \tag{6}$$

而直线在不同比例尺和坡度条件下丈量的长度误差 $1.5 m_d^2 \left(\frac{M}{1\,000}\right)^2 \tan^2\alpha$ 远小于 m_0^2，所以 $m_h \approx m_0$。针对树冠表面特征点等高距通常设为 0.05 m，则

$$m_h = m_0 \approx \frac{1}{3} h = 0.017 \text{ m} \tag{7}$$

通过式(7)可得冠高对求算树冠体积的精度影响。

方格网法求算树冠体积时，通常是将树冠分成规则的矩形树冠方块，但在实际操作中是不可能的，存在误差是必然的，高程误差是影响树冠体积精度的一个重要因素，是计算树冠体积相对中误差的一个重要因子，现根据方格网计算树冠体积的公式，利用误差传播定理来推求树冠高度中误差。

用方格网法计算树冠体积时，由计算的每个小方格网的体积求得总体积。设小方格网的边长为 s，每个小方格为一个棱柱体，则其体积为

$$v = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4} s^2 \tag{8}$$

式中，h_i($i = 1,2,3,4$)认为其中误差相等，设其值为 m_h，则棱柱体的中误差为

$$m_v = \frac{s^2}{2} m_h \tag{9}$$

设树冠平均横截面积为 A，树冠体积为 V，则方格总数为 $n = \frac{A}{s^2}$，因为

$$V = v_1 + v_2 + \cdots + v_n \tag{10}$$

故

$$m_V^2 = m_{v_1}^2 + m_{v_2}^2 + \cdots + m_{v_n}^2 \tag{11}$$

设每个方格网体积中误差相等，则 $m_V = m_v \sqrt{n}$，所以

$$m_v = \frac{m_V}{\sqrt{n}} = \frac{m_V}{\sqrt{\frac{A}{s^2}}} = \frac{m_V}{\sqrt{A}} s \tag{12}$$

如果树冠的平均高度为 h_{ave}，则 $V = A h_{ave}$，再由式(9)、(12)即可得

$$m_h = \frac{2 m_V}{s^2 \sqrt{A}} s = \frac{A h_{ave}}{V} \frac{2}{s} \frac{m_V}{\sqrt{A}} \tag{13}$$

即

$$m_h = \frac{m_V}{V} \frac{2}{s} \sqrt{A} h_{ave} \tag{14}$$

式(14)推求中，根据误差的传播定理可以发现式(11)是不严密的。因为在计算树冠体积时，各个小方格网上点的高程不是使用一次，所以各个小方格网计算的树冠体积不是相互独立的，具有一定程度的相关性，不能把各个小方格网计算的树冠体积的中误差简单相加。

为了推求一个更加严密的树冠高度中误差的计算公式，设与一个方格相关的方格点(角点)，其高程的权为 1；与两个方格相关的方格点(边点)，设其高程的权为 2，与 4 个方格相关的方格点(中点)，设其高程的权为 4。则 h_{ave} 的一般式为

$$h_{ave} = \frac{\sum P_i h_i}{\sum P_i} \tag{15}$$

设整个方格网边长为 L，测量时产生的中误差为 m_L，$A = L^2 = n s^2$，根据误差传播定律，可得到 $m_A = 2 L m_L$，因 $L = \sqrt{n} s$，所以

$$m_A = 2 \sqrt{n} s m_L \tag{16}$$

$$V = A h_{ave} = n s^2 h_{ave} = A \sum (P_i h_i) \Big/ \sum P_i \tag{17}$$

根据误差传播定理可得

$$m_V^2 = h_{ave}^2 m_A^2 + A^2 \sum P_i^2 \Big/ \left(\sum P_i\right)^2 m_h^2 \tag{18}$$

将式(16)代入式(18)可得

$$m_V^2 = h_{ave}^2 (2\sqrt{A} m_L)^2 + A^2 \sum P_i^2 \Big/ \Big(\sum P_i \Big)^2 m_h^2 \tag{19}$$

则树冠体积的相对中误差由式(17)和式(19)可得

$$\frac{m_V^2}{V^2} = \left(\frac{2}{\sqrt{A}} \right)^2 m_L^2 + \frac{\sum P_i^2 m_h^2}{\left(\sum P_i^2 \right)^2 h_{ave}^2} \tag{20}$$

所以

$$\sum P_i^2 = P_{bugle}^2 + P_{side}^2 + P_{centre}^2 = [2(2\sqrt{n} - 1)]^2 \tag{21}$$

$$\Big(\sum P_i \Big)^2 = (4n)^2 \tag{22}$$

将式(21)、(22)代入式(20)可得

$$\frac{m_V^2}{V^2} = \left(\frac{2}{\sqrt{A}} \right)^2 m_L^2 + \left[\frac{2(2\sqrt{n} - 1)}{4n} \right]^2 \frac{m_h^2}{h_{ave}^2} \tag{23}$$

$$m_h = \sqrt{\left[\frac{m_V^2}{V^2} - \left(\frac{2}{\sqrt{A}} \right)^2 m_L^2 \right] h_{ave}^2 \Big/ \left[\frac{2(2\sqrt{n} - 1)}{4n} \right]^2} \tag{24}$$

由于面积 A 一般是个比较大的数值,而 m_L 远远小于 A,所以,式(24)可以简化写为

$$m_h = \frac{m_V h_{ave}}{V} \Big/ \frac{2\sqrt{n} - 1}{2n} \tag{25}$$

因为 $A = ns^2$,所以 $n = \frac{A}{s^2}$,结果代入式(25)中即可得

$$m_h = \frac{m_V h_{ave}}{V} \Big/ \frac{2\sqrt{n} - 1}{2n} = \frac{m_V h_{ave}}{V} \Big/ \frac{2s\sqrt{A} - s^2}{2A} \tag{26}$$

3.2 试验结果

使用传统的经典模型人工测量方法[12]、数字高程模型法[9-10]和本文的方格网法,对 30 组树冠体积进行求算,并对其精度和效率进行比对分析,表 3 为 3 种方法求算树冠体积的结果。

通过作者以前试验发现,三维激光扫描仪获取树冠点云数据,使用数字高程模型法获取树冠体积的精度高达 96% 左右[9],接近真值,所以本文中以数字高程模型法作为真值来检测方格网法测算树冠体积的精度。

图 5 为经典模型法与方格网法求算树冠体积的真误差图,图 6 为经典模型法与方格网法求算树冠体积的准确度分析图。

由图 5 可得,经典模型求算树冠体积的方法与方格网求算树冠体积的方法相比,波动性较大,这是由于经典模型求算树冠体积的方法,将不规则的树冠形状拟合成相似的规则几何形状,对精度影响大;而方格网求算树冠体积的方法,原理上将不规则的树冠形状微分成大量规则形状,大大增加了树冠求

表 3 不同方法求算树冠体积

Tab. 3 Calculations of crown volume by different methods m^3

序号	经典模型法体积	数字高程模型法体积	方格网法体积
1	90.815	97.635	93.246
2	47.168	53.997	55.165
3	38.164	39.225	39.885
4	26.878	32.467	34.987
5	63.547	65.778	65.471
6	63.147	69.748	71.345
7	174.685	184.245	187.994
8	104.348	121.557	132.574
9	18.654	18.997	19.212
10	32.174	35.678	36.774
11	20.312	26.748	25.143
12	21.394	25.554	28.615
13	33.155	43.164	46.221
14	12.467	17.645	16.883
15	51.234	55.147	59.321
16	67.458	67.246	68.415
17	35.147	40.655	41.321
18	63.741	62.314	61.225
19	27.149	35.776	37.415
20	18.441	21.479	19.641
21	42.665	37.415	38.541
22	55.478	49.876	47.681
23	82.654	78.649	77.991
24	47.886	45.621	46.321
25	32.145	33.751	32.847
26	53.614	53.241	57.613
27	64.321	61.543	62.517
28	49.684	43.617	45.994
29	26.481	33.546	35.634
30	10.748	12.647	12.556

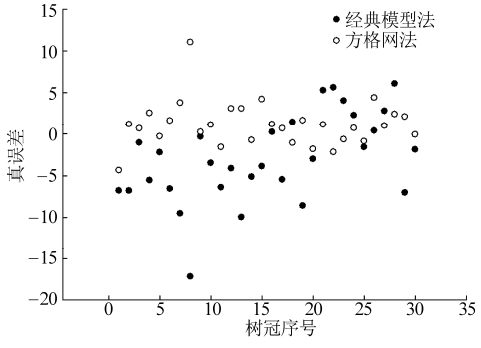


图 5 经典模型法与方格网法求算树冠体积的真误差图

Fig. 5 True error map for calculating crown volume by classical model and square grid-based method

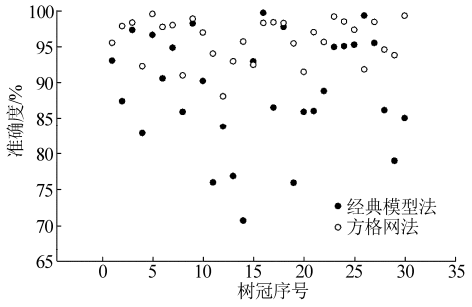


图 6　经典模型法与方格网法求算树冠体积的准确度

Fig. 6　Accuracy for calculating crown volume by classical model and square grid-based method

算精度。

由图 6 可得，方格网法求算树冠体积的准确度远远高于经典模型求算树冠体积的方法。方格网法求算树冠体积的平均准确度在 95% 左右，而经典模型求算树冠的方法平均准确度 85% 左右。

为验证方格网求算树冠体积方法的有效性，将该方法求算的体积作为实测值，将三维激光获取树冠点云数据，使用数字高程模型法求算树冠体积作为理论值进行了误差估测和置信度 0.05 下的置信椭圆概率检验来测算精度，检验结果如表 4 所示。

表 4　方格网法计算树冠体积的检验结果

Tab. 4　Test results of crown volume by square grid-based method

变量	平均误差/m^3	平均相对误差/%	平均绝对误差/m^3	平均准确度/%	F	显著性
数值	2.04	4.13	2.76	95.97	0.361 5	不显著

由表 4 可得，方格网法求算树冠体积的平均准确度为 95.97%，在置信度 0.05 下树冠体积的计算值与实测值之间的显著性为不显著，说明该方法的适用性优良。所以，本文研究的方格网求算树冠可以精准有效地对树冠体积进行测算。

针对 3 种不同求算树冠体积的测算方法所需的人力、物力、时间进行试验统计，如表 5 所示。

表 5　不同方法在求算树冠体积对比

Tab. 5　Comparison of crown volumes by different methods

方法	所需设备	设备价格/元	每棵树所需时间/min	平均准确度/%
数字高程模型法	三维激光扫描仪	1×10^6	60	96.85*
方格网法	全站仪	2 000	10	95.97
经典模型法	米尺、测高器	100	30	85.00

注：* 表示引自文献[9]。

由表 5 可以看出，使用三维激光扫描仪获取树冠点云数据，使用数字高程模型法求算树冠体积的精度最高，但设备价格昂贵，需要人民币 100 万左右，且操作繁琐，所耗时间长，推广应用难度大[21]；而传统经典模型测算树冠体积的方法，在 3 种求算树冠体积的方法相比较而言，所需经费最低，所耗时间最短，操作简便，但精度低下，量测结果离散性大，稳定性差，不符合当今社会对森林精准测量的要求；方格网求算树冠体积的方法，采用精准测量仪器全站仪，该方法的特点是仪器价格相对便宜、获取数据精度高且操作简便、并能对采集数据进行数字化保存，该方法获取树冠体积的平均准确度高达 95.97%，验证了方格网求算树冠体积方法的快速性和优越性，既能够昂贵价格设备、仪器操作繁琐等方面的问题，又大大提高树冠体积的计算精度和速度。

4　结束语

提出了一种基于方格网求算树冠体积的方法，该方法源于土木工程中土方量的计算思想，通过使用高精度全站仪获取树冠表面特征点三维坐标，然后生成等高线，使用方格网法对树冠进行分割，最后使用方格网法公式求算出树冠的体积。通过理论分析和数据分析得出，方格网求算树冠体积的方法计算精度高，实用性良好。

参　考　文　献

1　何诚，冯仲科，袁进军，等. 高光谱遥感技术在生物多样性保护中的应用研究进展[J]，光谱学与光谱分析，2012，32(6)：1628－1632.
He Cheng, Feng Zhongke, Yuan Jinjun, et al. Advances in researches on hyper-spectral remote sensing biodiversity and conservation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(6): 1628－1632. (in Chinese)

2　陈军，李春平，关文彬，等. 林带小钻杨树冠的分维结构[J]. 林业科学，2006，46(12)：6－12.
Chen Jun, Li Chunping, Guan Wenbin, et al. Fractal characteristics of tree crown of *Populus xiaozhuanica* in shelterbelts[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 46(12): 6－12. (in Chinese)

3　Garber S M, Monserud R A, Maguire D A. Crown recession patterns inthree conifer species of the Northern Rocky mountains[J]. Forest Science, 2008, 54(6): 633－646.

4　郭浩，戈振扬，蒋海波，等. 基于体着色的植物构型三维重建和可视化模拟[J]. 农业工程学报，2010，26(10)：195－200.
Guo Hao, Ge Zhenyang, Jiang Haibo, et al. Three dimensional reconstruction and visual modeling of plant architecture based on voxel coloring[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 195－200. (in Chinese)

5 王万章,洪添胜,陆永超,等. 基于超声波传感器和 DGPS 的果树冠径检测[J]. 农业工程学报,2006,22(8):158 - 161.
Wang Wanzhang, Hong Tiansheng, Lu Yongchao, et al. Performance of tree canopy diameter measurement based on ultrasonic sensor and DGPS[J]. Transacters of the CSAE, 2006, 22(8): 158 - 161. (in Chinese)
6 李松,张建瓠,可欣荣,等. 果树三维外形轮廓的仿真与重建[J]. 华南农业大学学报,2009,30(1):94 - 98.
Li Song, Zhang Jianling, Ke Xinrong, et al. Simulation and reestablishment of the fruit-tree's three-dimensional profile surface[J]. Journal of South China Agricultural University, 2009, 30(1): 94 - 98. (in Chinese)
7 He Cheng, Feng Zhongke, Yuan Jinjun, et al. The research on forestry biomass based on 3D laser scanning technology[J]. Advanced Science Letters,2012, 17: 224 - 227.
8 冯仲科,罗旭,马钦彦,等.基于三维激光扫描成像系统的树冠生物量研究[J].北京林业大学学报,2007,29(增刊 2):52 - 56.
Feng Zhongke, Luo Xu, Ma Qinyan, et al. An estimation of tree canopy biomass based on 3D laser scanning imaging system[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(Supp. 2): 52 - 56. (in Chinese)
9 何诚,冯仲科,袁进军,等. 基于数字高程模型的树木三维体积测量[J]. 农业工程学报,2012,28(8):202 - 206.
He Cheng, Feng Zhongke, Yuan Jinjun, et al. Measuring tree three-dimensional volume based on digital elevation model[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(8):202 - 206. (in Chinese)
10 冯仲科,何诚. 一种基于高程等值线法量测树冠体积的方法:中国, ZL201110164615.4[P]. 2013 - 06 - 23.
11 巩垠熙, 何诚, 冯仲科,等. 基于改进 Delaunay 算法的树冠三维重构单木因子提取[J]. 农业机械学报,2013, 44(2):192 - 199.
Gong Yinxi, He Cheng, Feng Zhongke, et al. A study of amended delaunay algorithm for single tree factor extraction using 3-D crown modeling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):192 - 199. (in Chinese)
12 唐雪海. 北京市城六区三维绿量估算与分析研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011 .
13 范海英, 李畅, 赵军. 三维激光扫描系统在精准林业测量中的应用[J]. 测绘通报, 2010,56(2):29 - 31.
Fan Haiying, Li Chang, Zhao Jun. Engineering application of 3D laser scanning system in precision forestry survey[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010, 56(2):29 - 31. (in Chinese)
14 Richardson J J, Moskal L M, Kim S H. Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete return LIDAR[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6 - 7): 1152 - 1160.
15 Danson F M, Hetherington D. Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1):157 - 160.
16 Cote J F, Widlowski J L, Fournier R A, et al. The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 1067 - 1081.
17 Solanelles F, Escola A, Planas S, et al. An electronic control system for proportional pesticide application to the canopy volume in tree crops[C]//EFITA/WCCA Joint Congress on IT in Agriculture, 2005: 25 - 28.
18 Zaman Q U, Schumann A W, Hostler H K. Estimation of citrus fruit yield using ultrasonically-sensed tree size[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 39 - 44.
19 Zaman Q U, Salyani M. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 173 - 178.
20 何诚, 张思玉, 冯仲科. 一种电子经纬仪立木材积精准测算方法[J]. 测绘通报, 2014(6):116 - 119.
He Cheng, Zhang Siyu, Feng Zhongke. A fine estimation of standing tree volume based on electronic theodolite [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(6):116 - 119. (in Chinese)
21 王佳, 杨慧乔, 冯仲科. 基于三维激光扫描的树木三维绿量测定[J]. 农业机械学报, 2013,44(8):229 - 233.
Wang Jia, Yang Huiqiao, Feng Zhongke. Tridimensional green biomass measurement for trees using 3-D laser scanning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(8):229 - 233. (in Chinese)

Algorithm of Crown Volume with Square Grid-based Method

He Cheng[1] Zhang Siyu[1] Matteo Convertino[2] Zhou Aimin[1] Hong Fangxia[3]
(1. *Forest Fire Research Center*, *Nanjing Forest Police College*, *Nanjing* 210023, *China*
2. *Institute on the Environment*, *University of Minnesota Twin-Cities*, *Minnesota* 55108, *USA*
3. *School of Tourism*, *Jiangxi Science & Technology Normal University*, *Nanchang* 330013, *China*)

Abstract: A new algorithm of crown volume based on a square grid method was presented, which was low in cost and high in efficiency and precision, and the normal errors in manual measurement of parameters can be reduced, such as total height, crown width, crown projected area, and so on. While the traditional assessments were not sufficient to provide accurate parameters owing to the irregular crown shapes, and three-dimensional laser was too expensive and fussy to afford. A numerical analysis of the

proposed algorithm was presented, along with a design procedure and experimental results. Comparison of obtained results from classical methods and three-dimensional laser measurement was made. The point cloud data were acquired by non-prism total station and a coordinate grid of canopy surface was built, and then the crown volume can be computed with a square grid-based method. Analysis of the parameters had been made with satisfactory precise and the results showed that the relative error of square grid method was 4.13% and the average accuracy was 95.75%. There was no significant difference between calculation value and actual measurement for crown volume under confidence level of 0.05. Moreover, compared to the traditional manual measurement, only one-third of time was consumed by square grid method, which costed 2% of those by three-dimensional laser scanning, therefore, the expenditure was extremely reduced and efficiency was increased.

Key words: Crown volume　Total station　Point cloud data　Square grid method　Algorithm

(上接第 202 页)

Effect of Trim on Jujube Transpiration in Loess Hilly Region

Wei Xinguang[1]　Chen Dianyu[1]　Liu Shouyang[2]　Wang Xin[1]　Gao Zhiyong[1]　Wang Youke[1,3]

(1. *College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi* 712100, *China*

2. *Unite of Modelling Agricultural and Hydrological Systems in the Mediterranean Environment, French National Institute of Agronomic Research (INRA), Avignon* 84914, *France*

3. *National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling, Shannxi* 712100, *China*)

Abstract: In order to alleviate the soil drying of the jujube forest in semiarid loess area, we took the gradient control on jujube tree specifications by pruning, using the TDP tree rod liquid flow monitoring system to monitor the jujube tree transpiration and CNC100 neutron moisture meter to monitor soil moisture. It was found that the pruning on jujube had a significant influence on the transpiration and water consumption at different time scales through the research for two consecutive years. Pruning can significantly reduce the tree transpiration in flowering period of fruit and fruit enlargement period of jujube, and reduce the consumption of soil moisture. Compared with the control treatments, the tree transpiration with mild, moderate and severe pruning of the whole growth period decreased by 31.7%, 52.0% and 68.6%, respectively. The relationship between tree transpiration and specifications were analyzed by linear and nonlinear analysis method, and then a mathematical model of natural precipitation and trim production target was built. The suitable target yield for the sustainable management of jujube forest in northern Shaanxi was 1.2×10^4 kg/hm^2, and the tree index for water-saving trim regulation was the crown and the new length. The new mode was formed that the production of jujube was determined by soil moisture and jujube specifications were determined by production.

Key words: Water-saving trim　Transpiration　Tree specification　Dried soil layer　Grey correlation