

微分法三维激光点云数据单木三维绿量测定研究

李凤霞^{1,2}, 石 辉², 撒利伟¹, 冯晓刚¹, 李 萌¹

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 三维绿量是计量森林生态服务功能的最实质性因素, 然而现有方法计算单木三维绿量的精度和效率有待进一步提高。本文基于三维激光点云数据, 提出微分法计算单棵树三维绿量, 并把此方法与传统方法台体法、绿视率法的计算结果进行比较分析, 实验结果表明: 台体法计算的树冠体积最大, 绿视率法计算的三维绿量较大, 而本文提出的微分法具有较好的可靠性, 可快速、高效地估算单木三维绿量, 更符合树木的实际情况。把三维激光点云数据应用于单木三维绿量计算, 在精准农林业领域具有推广的应用价值。

关键词: 三维绿量; 三维激光扫描; 微分法; 绿视率; 台体

中图分类号: TU985

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)04-0530-06

3D green volume measurement of single tree using 3D laser point cloud data and differential method

LI Fengxia^{1,2}, SHI Hui², SA Liwei¹, FENG Xiaogang¹, LI Meng¹

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The 3D green volume is the most substantial factor for measuring forest ecological service function. However, by applying the existing methods to calculate the green volume of single tree, the accuracy and efficiency is further improved. In this paper, putting forward a new method—differential method, based on 3D laser point cloud data, 3D green volume is calculated. The method is compared with traditional ones, such as body, and green looking rate. The results show that body method is the biggest. The results of green looking rate method is bigger, and the differential method has good reliability and can be quickly and efficiently estimate the single tree's 3D green volume. What's more, the method is in line with the actual situation of trees. Finally, applying the 3D laser point cloud data in the accurate calculation of the single wood 3D green volume has application prospect in the field of precision agriculture and forestry.

Key words: 3D green volume; 3D laser scanning; differential method; green looking rate; body

近年来, 随着全球环境问题的日益突出, 人们已高度认识到加强绿地生态建设、改善城市生态环境质量的重要性, 许多国家已把城市绿化制定为城市可持续发展战略的一个重要内容。三维绿量, 也称为三维绿色生物量, 简称为绿量, 是指所有生长植物的茎叶所占据的空间体积, 一般用 m^3 来表示, 是城市绿化指标体系的第一立体指标^[1]。与绿化率等二维指标相比, 三维绿量突破了一定的局限性, 能更加准确地反映植物空间构成的合理性和生态效益水平^[2], 因此, 精准、合理地计算树木三维绿量对绿地生态效益的评估具有重要意义。三维绿量与二维绿量(叶面积指数 LAI)的不同获取方法如表 1 所示。

在绿量估算方面, 国外 Robert 等^[3]基于单脉冲机载雷达数据定量研究了城市绿量; Peper 等^[4]对美国加利福尼亚十二种行道树的绿量动态变化进行了研究。国内近年已有不少学者对绿量进行了相关研究^[5-16], 对我国城市绿地生态效益的定量研究起到了一定的促进作用。

应用三维激光扫描技术获取的三维数据, 可建立三维模型实现样木的三维可视化表达, 在模型上可直接量测单株树木的胸径、树高、冠幅及位置等信息, 这些信息正是计算三维绿量的关键因子。然而, 目前国内利用高精度三维激光点云数据定量研究树木三维绿量的报道较少, 且单木三维绿量计算模型具有鲜明的地域性特

收稿日期: 2016-08-29

修改稿日期: 2017-07-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51608419); 陕西省自然科学基金(2014JZ011); 陕西省教育厅专项基金(16JK1437)

第一作者: 李凤霞(1982—), 女, 讲师, 博士生, 主要从事环境遥感及 3S 方面的教学和研究。E-mail: lifengxiasky@163.com

点，仍需更多的城市树木案例，对树木三维绿量的准确性和科学性进一步研究。本文基于三维激光扫描仪获取的外业点云数据，提出应用微分法对数据进行内业处理，定量估算单棵树三

维绿量，并把该方法与台体法和绿视率法进行比较分析，旨在进一步提高单木三维绿量的计算精度及其数据处理效率，为精准农林业的定量研究提供实际参考。

表 1 三维绿量与二维绿量的获取方法比较

Tab. 1 Comparison of acquisition methods of two-dimension green volume and three-dimension green volume

二维绿量	特点	三维绿量	特点
(1)经验公式法		破坏性小、有局限性	(1)基于三维激光扫描系统(台
(2)光学测量法		精度较低	体法、绿视率法、树冠体积法)
获取方法(3)遥感反演法		适合大区域研究 LAI，且精度低	(2)基于遥感技术(平面量模拟
(4)直接测量法		破坏性大	立体量、立体量推算立体量)
(5)平面量推算平面量		野外调查少	(3)采用模拟方程测算绿量
			精度有待进一步提高

1 实验区域概况

本次研究选择西安市道路绿地、风景区绿地、文教区绿地范围内具有代表性的六个主要树种，阔叶树种包括国槐、法桐、大叶女贞、紫叶李，针叶树种包括雪松、柏树等，实验开展时间为 2015 年 7 月 2 日—7 月 16 日，基于徕卡 C10 型三维激光扫描仪进行外业点云数据的采集，测定其三维绿量，部分样本图像如图 1 所示。



图 1 样本图像

Fig. 1 Picture of sample wood

2 研究方法

2.1 外业数据采集

三维激光扫描技术，也称高清晰测量，通过记录被测物体表面大量的三维坐标和反射率信息，从而快速、准确地获取近距离静态物体的空间三

维模型，并可以对模型进行分析和处理。

普通的绿色植物具有天然的趋光特性，其绿量大部分分布在树冠的外包络面上，这是三维激光扫描仪可用于三维绿量测量的前提条件。本研究采用徕卡 C10 三维激光扫描仪直接扫描获取实验单木的点云数据，为了更加详细地获取单木点云数据，扫描分辨率设置为最高等级。外业测量中，为了获得整株树木完整的点云数据，测量中在满足外业采集的情况下，尽可能密集设站，测站架设及扫描标靶如图 2 所示。具体扫描时，在树冠下方偏外较短距离内设站，一方面考虑到扫描数据的密集性，另一方面扫描仪避开密集的遮挡以仰视的角度环绕植株扫描，从而保证外业数据的完整性。同时，对单棵树的扫描过程中，保证相邻两个测站有 3 个共同标靶，以确保后期点云数据的正确拼接。为了方便内业数据处理，在扫描单棵样本前，首先用数码相机对整个环境和目标树种进行拍照，并需要画出目标样本草图，以便为内业数据预处理提供参考。

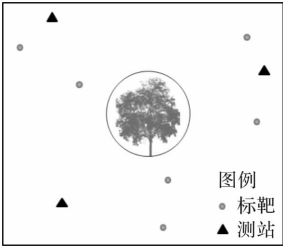


图 2 外业数据采集示意图

Fig. 2 Acquisition of field data

2.2 内业数据处理

利用徕卡的点云后处理软件 Cyclone 8.0 软件对外业采集数据进行预处理，首先将不同测站获

取的点云数据在初步除噪的基础上,采用基于标靶的拼接方式,进行不同测站点云数据的拼接,并基于拼接结果进行点云数据的除噪处理,以获得完整的单棵树木的点云数据.图3为拼接后去噪前的完整单棵树木的点云数据.基于处理后的点云数据,利用后处理软件 Cyclone8.0 及 Geomagic studio2013 进行三维点云数据的加载与模型构建,并基于构建的三维模型进行单棵树冠高、冠幅、胸径等参数的提取,进而获得单棵树木所需的所有几何参数.图4为构建的样木三维模型.为了能够更加高效地进行单木三维绿量计算,作者基于 Python 语言开发了单木树种三维绿量自动计算程序 STreeCaptureV1.0,该程序自动化程度高,计算方便快捷.

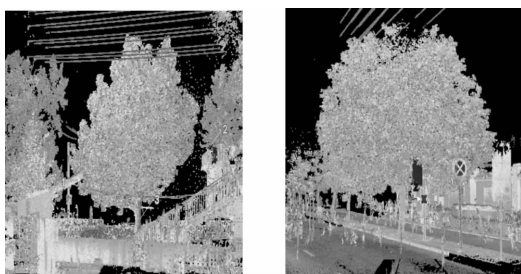


图3 拼接后去噪前的点云数据

Fig.3 Point cloud data before stitching



图4 样木三维模型

Fig.4 3D model of sample wood

2.2.1 台体法

所谓台体法,是利用三维激光点云数据提取测树因子,把单棵树的整个树冠看成是由若干个小圆台体构成,则树冠体积等于每个圆台的体积与顶端圆锥体的体积之和^[11],计算公式为

$$V = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n (S_{i-1} + S_i + \sqrt{S_{i-1}S_i})h_i + \frac{1}{3}S_n h_{n+1} \quad (1)$$

式中: V 是树冠体积; n 是分段数量; S_i 是树冠横断面积; h_i 是圆台高度.在本实验程序计算中,把圆台高度 h_i 设定为 100 mm,在三维点云数据中从数据的最低面开始,自下而上进行分割,直至分割完毕.

2.2.2 绿视率法

绿视率法计算三维绿量的思路是,以台体法计算的树冠体积为基础,乘以绿视率,即可求得单木三维绿量.计算绿视率时,本研究是把树冠看成一个台体,以台体的外边缘线为边界线计算绿视率,即以整个台体作为视野范围,采用计算机视角的办法,将三维激光点云数据围绕数据的重心轴线(Z 轴)旋转,每隔 36° 产生一个投影平面,共计十个投影面,在投影面上生成点云投影图像,以此投影图像计算不同视角绿视率,最后对不同视角绿视率加权平均求得单棵树的总绿视率.

绿视率,是指绿色在人的视野里所占据的比例^[11],不同视角绿视率计算公式为

$$P_i = \frac{S_g}{S_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_i 为不同视角绿视率; S_g 为视野里的绿色面积; S_t 为视野里的总面积.单木三维绿量等于树冠体积乘以单木的总绿视率,即

$$G = V \times P_t \quad (3)$$

其中,

$$P_t = \sum_{i=1}^n W_i \times P_i \quad (4)$$

式中: G 是单木三维绿量; V 是树冠体积; P_t 是单木的总绿视率; W_i 是第 i 个投影图像的权重; P_i 是第 i 个投影图像的绿视率.

2.2.3 微分法

本研究提出一种计算单木三维绿量的新方法——微分法,整个研究思路是:首先统计单木三维激光点云数据、即树冠的边界范围,获得点云数据在空间分布的 X , Y , Z 三个维度上的最大值和最小值,基于这些最值构建满足条件的最小包围体.再以固定的单元格长度(单元格长度大小通常根据被测单木对象的树叶长、宽的最小实测值确定)将边界长方体分割为小微分单元格,微分法空间微分单元格前视图如图5所示.设长方体的边界长宽高分别为 L , W , H ,微分单元格的边长为 d ,共有 M 个空间微分单元格,则

$$M = \frac{L \times W \times H}{d^3} \quad (5)$$

然后,将三维激光扫描的三维点云数据逐一放入相应的空间单元格中,如果某个单元格内有三维点云坐标,则该点标注为有效格网点,待所有三维点云坐标处理完毕后,得到有效格网点的总数 N ,则微分法计算单木三维绿量的模型为

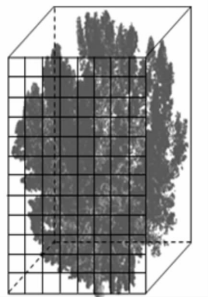


图 5 空间微分单元格前视示意图
Fig. 5 Forward-looking of differential cell

$$G=\frac{N}{M}\times V_{\text{box}} \tag{6}$$

式中： G 是单木三维绿量； N 是有效空间单元； M 是空间单元总数； V_{box} 是空间单元构成的最小外接

长方体的体积。

2.2.4 模型精度验证

为了对本文提出的微分法进行精度验证，笔者选取了一棵冠高约 2.4 m，胸径 0.132 m，冠幅 2.982 m 的大叶女贞，采用有损实际测量法进行三维绿量的精度验证。按照微分法其三维绿量计算结果为 0.386 m³。然后采用有损实际测量法将整棵树的叶子全部剥落，对其实际绿量进行累计测量，实际测量结果为 0.414 m³。实测测量值与微分法计算结果相比较大 0.028 m³，占比 6.8%。

由此可见，微分法具有较高的模拟精度，上述案例中与实际测量值误差小于 10%，满足模拟计算的精度要求。因此，笔者认为本文提出的微分法具有足够的精度，可用于树木三维绿量的计算。

表 2 基于三维激光扫描单木三维绿量计算结果比较

Tab. 2 Calculation results comparison of single wood 3D green volume based on 3D laser scanning

树 种	胸径/m	冠高/m	冠幅 (南北方向)/m	冠幅 (东西方向)/m	树冠 体积/m ³	三维绿 量 1 /m ³	三维绿 量 2/m ³
国 槐 1	0.321	9.097	11.217	11.432	359.969	21.625	3.334
国 槐 2	0.348	9.823	10.989	11.187	380.243	29.661	3.782
国 槐 3	0.339	9.236	10.999	11.223	360.295	26.881	3.524
国 槐 4	0.443	10.223	11.356	11.879	380.278	32.487	4.012
国 槐 5	0.457	10.443	11.217	11.578	388.756	35.246	4.161
侧 柏 1	0.356	8.378	5.877	6.017	83.573	4.533	1.851
侧 柏 2	0.371	8.539	5.992	5.823	91.246	6.521	1.993
侧 柏 3	0.388	8.523	5.976	6.278	91.112	5.889	1.887
侧 柏 4	0.399	8.997	6.312	6.554	95.247	7.663	2.216
侧 柏 5	0.387	8.446	5.231	5.511	83.112	4.214	1.672
法 桐 1	0.300	11.692	11.696	11.393	360.676	30.844	2.578
法 桐 2	0.570	12.731	15.890	16.189	1 364.274	289.060	3.376
法 桐 3	0.621	12.077	16.112	16.227	1 378.264	300.017	3.647
法 桐 4	0.601	12.557	15.778	16.118	1 365.279	295.201	3.512
法 桐 5	0.487	11.984	13.447	13.667	1 000.884	248.136	2.781
大叶女贞 1	0.146	3.642	4.310	4.284	2.000	1.696	0.413
大叶女贞 2	0.198	3.812	4.478	4.652	3.881	2.729	0.583
大叶女贞 3	0.188	3.771	4.348	4.359	3.667	2.578	0.498
大叶女贞 4	0.166	3.612	4.278	4.315	2.887	1.872	0.466
大叶女贞 5	0.150	3.663	4.412	4.523	3.667	1.779	0.427
紫叶李 1	0.112	4.665	3.917	3.831	2.000	0.822	0.226
紫叶李 2	0.118	4.887	4.087	4.159	3.251	1.226	0.337
紫叶李 3	0.119	4.996	4.125	4.018	3.338	1.246	0.351
紫叶李 4	0.122	5.012	4.212	4.118	3.568	1.327	0.387
紫叶李 5	0.125	5.110	4.998	4.885	3.789	1.515	0.401
雪 松 1	0.771	18.878	11.146	12.427	709.107	82.304	5.491
雪 松 2	0.783	19.157	12.889	13.146	813.279	94.239	5.820
雪 松 3	0.791	19.114	12.997	13.365	841.001	98.010	6.017
雪 松 4	0.795	19.201	13.378	13.755	860.123	100.210	6.214
雪 松 5	0.802	19.213	13.647	13.779	880.246	112.103	6.579

3 结果与分析

根据上述原理分别计算单棵树的树冠体积及三维绿量,设台体法计算的单木三维绿量记为树冠体积,绿视率法估算的单木三维绿量记为三维绿量1,微分法计算的单木三维绿量记为三维绿量2,计算结果如表2所示。

从表2可以看出,树冠体积>三维绿量1>三维绿量2,台体法计算的树冠体积最大,分析原因在于台体法计算时把树冠横断面看成是椭圆形或者圆形,与实际情况出入较大,即树冠横断面积的估测值大于其真值,另外,由于树冠内部有许多的空隙,所以此方法计算的树冠体积远大于实际值。台体法计算树冠体积时,按照设定的高度自下而上进行树冠横断面的分割。由表2可知,国槐的平均三维绿量1为29.180 m³,平均三维绿量2为3.763 m³;侧柏的平均三维绿量1为5.764 m³,平均三维绿量2为1.924 m³;法桐的平均三维绿量1为232.652 m³,平均三维绿量2为3.179 m³;大叶女贞的平均三维绿量1为2.131 m³,平均三

维绿量2为0.477 m³;紫叶李的平均三维绿量1为1.227 m³,平均三维绿量2为0.340 m³;雪松的平均三维绿量1为97.373 m³,平均三维绿量2为6.024 m³。可以发现,对于树冠大小比较接近的不同树种而言,阔叶树的三维绿量值大于针叶树,这与树木的事实相符。本研究树种中雪松的胸径、冠高冠幅均偏大,因此其三维绿量结果也较大。大叶女贞和紫叶李这两个树种的胸径和树冠偏小,所计算出的绿量结果也比较小,因此,三维绿量的大小不仅与不同树种的树叶特性有关,而且和树的胸径、冠高冠幅有直接关系,对同一树种而言,冠高冠幅越大,树冠三维绿量越大,胸径越小,三维绿量越小,即绿量大小与树的成长期有关。

绿视率法计算树木三维绿量,每隔36度生成的十个点云投影图像,如图6所示,十个投影图像加权平均求得单棵树总的绿视率,乘以台体法计算的树冠体积,所求得的三维绿量1仍然比真值偏大,主要原因是树叶之间间隙多,而且形态各异,计算的绿视率所反映的树木空间体积量有待进一步提高精度。

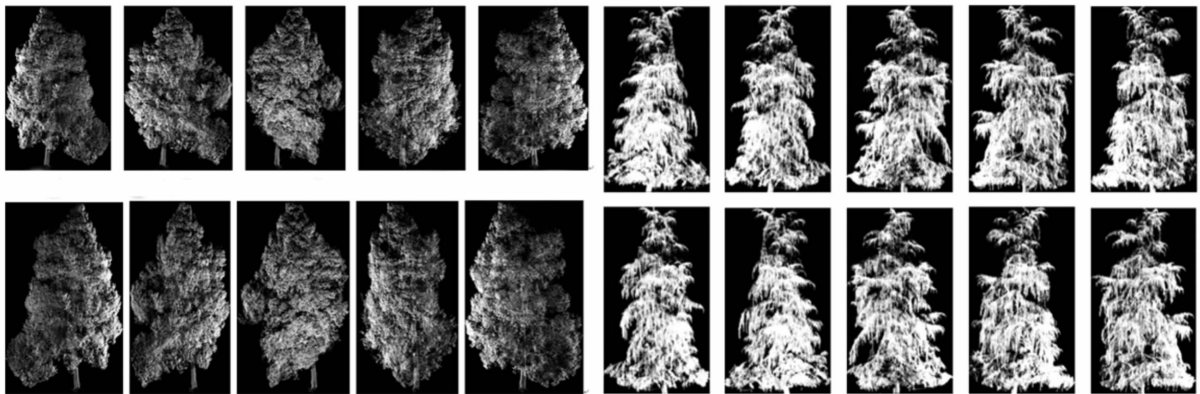


图6 点云投影图像

Fig. 6 Picture of point cloud

4 结论

(1)基于三维激光点云数据,本文提出的微分法估算单棵树三维绿量,经检验其结果可靠,更接近真值,符合树木的实际情况。

(2)三种方法计算的结果是:树冠体积>三维绿量1(绿视率法)>三维绿量2(微分法),台体法计算的树冠体积最大,远远大于绿量的真值,绿视率法计算的三维绿量较大,微分法计算的三维绿量更接近真值。对于树冠大小比较接近的不同树种而言,阔叶树的绿量值大于针叶树,这与实际情况相符。另外,三维绿量不仅与树种有关,而且

与树龄有关,即和树的胸径、冠高、冠幅相关。本研究提出的微分法三维激光点云数据测定单木三维绿量可节省人力,具有快速、高效、精准、无损测量、野外作业相对简单等优点。应用python语言开发的单木三维绿量计算软件STreeCaptureV1.0使得三维激光点云数据内业处理变得更加容易,自动化程度大大提高,整个过程由程序实现。采用三维激光扫描数据测定单木三维绿量,为整个城市森林三维绿量的定量研究打下了坚实的基础,在精准农林业领域具有推广的实用价值。应用遥感技术和三维激光扫描技术相结合研究三维绿量是一种发展趋势,同时,三维绿量动态监测

是今后发展的方向。

参考文献 References

- [1] 周延刚,罗红霞,郭达志. 基于遥感影像的城市空间三维绿量(绿化三维量)定量研究[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 415-420.
ZHOU Yangang, LUO Hongxia, GUO Zhida. Quantitative research on 3D green volume of urban space based on remote sensing image [J]. Ecological Journal, 2005, 25(3): 415-420.
- [2] 安勇,卓丽环. 哈尔滨市紫丁香绿量[J]. 东北林业大学学报, 2004, 32(6): 81-83.
AN Yong, ZHUO LiHuan. The amount of lilac green quantity in Harbin City[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2004, 32(6): 81-83.
- [3] HECHT R, MEINEL G, BUCHROITHNER M F. Estimation of urban green volume based on single-pulse LiDAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3832-3840.
- [4] PEPER P J. Equations for predicting diameter, height, crown width, and leaf area of San Joaquin valley street trees[J]. Journal of Arboriculture, 2001, 27(6): 306-317.
- [5] 聂鹏程,杨燕,刘飞,等. 植物叶面积无损测量方法及仪器开发[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 198-202.
NIE Pengcheng, YANG Yan, LIU Fei, et al. Method of non-destructive measurement for plant leaf area and its instrument development[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 198-202.
- [6] 陈自新,苏雪痕,刘少宗,等. 北京城市园林绿化生态效益研究(2): 量化研究城市园林生态效益基础手段的建立及园林植物生态功能的系列研究[J]. 中国园林, 1998(2): 51-54.
CHEN Zixin, SU Xuehen, LIU Shaozong, et al. Study on ecological benefits of urban landscape greening in Beijing(2): quantitative study on the ecological benefits of urban landscape and the establishment of the basic means, and series research of garden plant ecological function [J]. Chinese Landscape Architecture, 1998(2): 51-54.
- [7] 陈芳,周志翔,王鹏程,等. 武汉钢铁公司厂区绿地绿量的定量研究[J]. 应用生态学报, 2006, 4(17): 592-596.
CHEN Fang, ZHOU Zhixiang, WANG Pengcheng, et al. Quantitative study on the green quantity of green space in the factory of Wuhan Iron and Steel Corporation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 4(17): 592-596.
- [8] 周坚华. 城市绿量测算模式及信息系统[J]. 地理学报, 2001, 56(1): 14-23.
ZHOU Jianhua. Urban green quantity calculation model and information system[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(1): 14-23.
- [9] 刘镭源,王纪华,杨贵军,等. 冬小麦叶面积指数地面测量方法的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 220-224.
LIU Rongyuan, WANG Jihua, YANG Guijun, et al. Comparison of ground-based LAI measuring methods on winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 220-224.
- [10] 周坚华,孙天纵. 三维绿色生物量的遥感模式研究与绿化环境效益估算[J]. 环境遥感, 1995, 10(3): 162-174.
ZHOU Jianhua, SUN Tianzong. Study on the remote sensing model of three dimensional Green Biomass and the estimation of green environmental benefits[J]. Environmental remote sensing, 1995, 10(3): 162-174.
- [11] 刘常富,何兴元,陈玮,等. 沈阳城市森林三维绿量测算[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(3): 32-37.
LIU Changfu, HE Xingyuan, CHEN Wei, et al. Measurement of three dimensional green quantity of urban forest in Shenyang[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(3): 32-37.
- [12] 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. Measurement of 3D green quantity of trees based on three dimensional laser scanning [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 229-233.
- [13] 王来刚,田永超,朱艳,等. 不同时空分辨率遥感数据融合估算冬小麦叶面积指数[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 117-124.
WANG Laigang, TIAN Yongchao, ZHU Yan, et al. Estimation of winter wheat leaf area index by fusing different spatial and temporal resolution remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(17): 117-124.
- [14] 熊妮娜,王佳,罗旭,等. 一种基于三维激光扫描系统测量树冠体积方法的研究: 以油松为例[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(S2): 61-65.
XIONG Nina, WANG Jia, LUO Xu, et al. Study on the method of the crown volume measurement based on 3D laser scanning system: taking Pinus tabulaeformis as an example[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(S2): 61-65.
- [15] 贺鹏,易正晖,王佳. 基于地面激光扫描点云数据测定树木三维绿量[J]. 测绘通报, 2013(S1): 104-107.
HE Peng, YI Zhenghui, WANG Jia. Measurement of three-dimensional green biomass of trees based on the ground laser scanning point cloud data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(S1): 104-107.
- [16] 温一博,范文义,常颖,等. 野外叶面积指数自动测量仪器设计及应用试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 154-160.
WEN Yibo, FAN Wenyi, CHANG Ying, et al. Design and applied experiment of long time series leaf area index measuring instrument[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(9): 154-160.

(编辑 桂智刚)