

基于地基激光雷达与Landsat8影像的玉米LAI反演

张明政^{1,2} 苏 伟¹ 王瑞燕²

¹中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083

²山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018

摘要 光学遥感影像可以快速提取大面积玉米冠层信息,但无法提供冠层垂直结构信息,导致反演玉米叶面积指数(LAI)时存在无法表达植被冠层内部叶片贡献而使反演LAI偏低的问题;地基激光雷达能够获取玉米冠层的高精度三维结构信息,但是每次只能在有限样区内获取。结合这两种技术的优势,利用将激光雷达数据体素化的方式,通过冠层分析法提取高精度的冠层结构信息;利用Landsat8光学影像获得大面积玉米冠层反射率,与得到的冠层结构信息进行回归分析,从而反演得到大面积的玉米冠层精确LAI结果。研究表明,归一化植被指数(NDVI)与激光点云计算的LAI相关性最强,相关系数 $R^2=0.8086$,均方根误差(RMSE)为0.1230,比值植被指数(RVI)相关性最差, $R^2=0.7079$,RMSE为0.1520,通过实测值验证分析,三种模型的平均相对误差均小于10%,模型的可信度较高。

关键词 遥感;地基激光雷达;Landsat8;叶面积指数;体素;冠层分析法

中图分类号 P237

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1114002

Inversion of Corn Leaf Area Index Using Terrestrial Laser Scanning Data and Landsat8 Image

Zhang Mingzheng^{1,2} Su Wei¹ Wang Ruiyan²

¹College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

²College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China

Abstract Optical spectral remote sensing images can be used to extract corn canopy structure information rapidly in a large area. However, it cannot provide vertical canopy structure information, which leads to underestimated leaf area index (LAI) result. Terrestrial laser scanning can provide high precision 3D structure information of corn canopy, but only in the limited sampling area. Therefore, these two technologies are combined to extract high precision canopy structure through canopy analysis by using terrestrial laser scanning data voxelization method. Reflectance of large area of corn canopy using Landsat8 optical images is obtained, and accurate corn canopy LAI results are got through regression analysis of canopy structure information of voxel-based canopy profiling. The results show that LAI has the strongest correlation with the normalized difference vegetation index (NDVI), the correlation coefficient $R^2=0.8086$, the root mean square error (RMSE) is 0.1230, and the correlation between LAI and ratio vegetation index (RVI) is the worst, $R^2=0.7079$, RMSE is 0.1520. Based on the validation analysis of the measured values, the average relative error of the three models is lower than 10%, and the credibility of the three models is relatively high.

Key words remote sensing; terrestrial laser scanning; Landsat8; leaf area index; voxel; voxel-based canopy profiling

OCIS codes 280.3640; 280.4788; 280.4991

1 引言

叶面积指数(LAI)是分析冠层结构常用的参数之一,控制着植被的生物物理过程,如光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等,因此快速、可靠、客观地评价LAI非常重要^[1]。目前,广泛使用的叶面积指数定义为单位

收稿日期: 2015-06-11; 收到修改稿日期: 2015-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(41371327)

作者简介: 张明政(1990—),男,硕士研究生,主要从事农业遥感应用方面的研究。E-mail: 13718547852@yeah.net

导师简介: 苏 伟(1979—),女,博士,副教授,主要从事农业遥感应用方面的研究。E-mail: suwei@cau.edu.cn(通信联系人)

表面积上所有叶片表面积的一半^[2]。

传统实地测量 LAI 的方法具有破坏性,且需要耗费大量的人力、物力和财力,因而严重限制了大范围 LAI 的获取。光学遥感影像可以快速提取大面积玉米冠层信息,但无法提供其冠层垂直结构信息,导致在反演玉米 LAI 时存在无法表达植被冠层内部叶片贡献而使反演的 LAI 偏低的问题。地基激光雷达是一种新型的主动遥感技术,是传统雷达与现代激光技术结合的产物,通过位置、距离、角度等观测数据直接获取植被表面点的三维坐标,使其在高精度三维冠层信息的实时获取方面有极大的优势^[3]。地基激光雷达以其高分辨率、高精度、高效率、数字化采集、信息量丰富等优点,已在多个领域取得了广泛的应用^[4]。Hosoi 等^[5-8]提出利用冠层分析法提取植被 LAI,并成功使用地基激光雷达数据,提取了日本山茶树、榉树的垂直叶面积体密度分布曲线,提取了小麦不同生育期的叶面积垂直分布曲线以及 LAI。Zheng 等^[9]利用立体等角投影和朗勃方位角等积投影将三维点云数据投影到二维平面空间,并将其转换为栅格图像,进而利用线性最小二乘反演算法进行孔隙率和有效 LAI 的估算。在国内,庞勇等^[10-11]也已经开展了地基激光雷达应用于林业的研究,并取得了一定的成果。

但是地基激光雷达对于农作物,尤其是玉米这种种植密集、植株形态不规则、叶片具有明显动态变化的农作物类型的结构参数的提取方法研究较少。所以,开展以地基激光雷达为数据源的玉米 LAI 提取研究十分必要,此研究不仅可为玉米长势监测、农业灾害胁迫对玉米产量影响分析、提高玉米估产精度奠定基础,还可为提取玉米及其他作物主要农艺性状信息提供借鉴。

2 研究区域概况及数据来源

2.1 研究区域概况

研究区域为北京、天津、河北三个省、市的玉米主产区,地理范围为北纬 39°~40°,东经 116°~117°,平均海拔为 100 m 左右。2013 年 8 月 31 日、9 月 1 日分别在北京通州郊区、大兴郊区,天津武清区,河北永清县、霸州市、雄县,选取 6 块玉米样地进行地基激光雷达扫描实验。选取的 6 个玉米样方内,玉米长势良好、田块较大、具有代表性,且地势平坦、视野开阔、交通便利,有利于激光扫描仪的架设和激光扫描。图 1 给出了 2013 年 9 月 1 号研究区域的 Landsat8 遥感影像图。

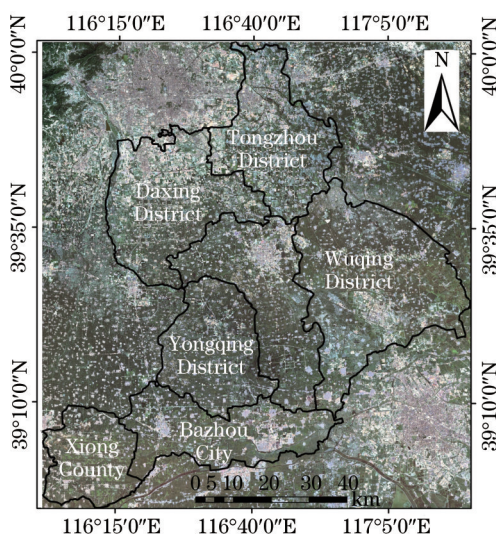


图 1 研究区域 2013 年 9 月 1 日 Landsat8 影像(R/G/B:2/3/4)

Fig.1 Landsat8 image of the investigated area acquired on Sep 1st, 2013 (R/G/B: 2/3/4)

2.2 数据源

2.2.1 地基激光雷达数据源

激光数据扫描使用的激光扫描仪为奥地利 Riegl 公司生产的 RIEGL VZ-400 三维激光扫描仪,扫描系统应用了最先进的近红外高性能激光技术结合高速扫描装置,具有每秒发射 30 万个纤细激光束的非接触的三维数据获取能力。基于 Riegl 独有的回波数字化和在线波形处理功能实现高精度测距,即使在恶劣的测量环

境下也能实现高精度测量和多重目标回波的辨识。激光扫描测量是通过调整激光雷达扫描头的方位、俯仰运动来实现的^[12]。扫描装置由一个含数个反射面的多边形棱镜实现,提供了完全线性、单向、平行的扫描线。详细的激光扫描参数如表1所示。点云数据记录了玉米植株每个点的X、Y、Z坐标信息。利用仪器配套的软件 RiSCAN PRO[®](奥地利 Riegl 公司)对获取的多站数据进行拼接和裁剪,然后利用 TerraScan[®](芬兰 TerraSolid 公司)软件对裁剪后的点云数据进行噪声去除和点云分类,提取玉米点云。

表1 Riegl VZ-400 参数

Table 1 Riegl VZ-400 parameters

Parameter	Value
Product model	Riegl VZ-400
Laser wavelength	Near infrared wavelength band
Scanning mode	Pulse type
Scanning distance	600 m (ground reflectance of 90%)
Scanning accuracy	3 mm (100 m distance)
Laser safety grade	Primary safety laser
Scanning speed	300000 point/s
Range of scanning field of view	100°×360°
Angular resolution	0.0005°
Camera	NIKON D700/D300(s)
Tilt sensor	Double axis tilt sensor (tilt range ±10°, accuracy ±0.008°)
Dust waterproof grade	IP64, dust proof, rain proof
Data storage	Embedded 32 GB flash memory
Weight	9.6 kg

2.2.2 遥感影像数据源

遥感数据使用 Landsat8 影像,影像的拍摄时间为 2013 年 9 月 1 日,获取影像的处理等级为 L1T,进行地形数据参与的几何校正,为保证定量反演的精确性,还需进行辐射定标和大气校正。大气校正采用 FLAASH 方法,得到地物反射率。然后用已有的研究区玉米种植分布矢量图进行裁剪,得到玉米冠层的反射率信息,如图 2 所示。

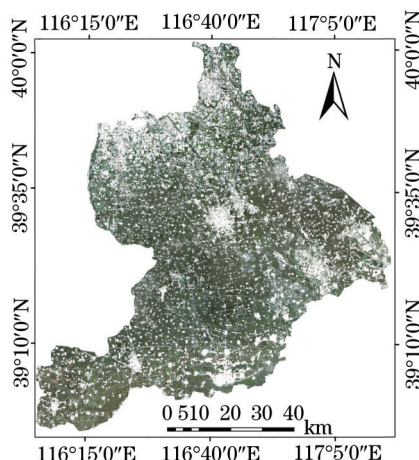


图2 玉米种植区

Fig.2 Corn planting region

2.2.3 野外实测数据

在激光扫描的同时,在每个样方内随机选取 3~6 个点进行人工测量,实测时选点的标准是样点之间的间隔大于 30 m,确保均匀覆盖每个样方。影响叶面积的主要参数为叶片长度和叶片宽度。研究表明,二者与叶面积均有较高的相关度^[13]。实测玉米叶片面积使用的方法为长宽系数法。长宽系数法是用尺子分别测出

玉米植株所有叶片的叶长 a (从叶基到叶尖)和叶宽 b (叶片上与主脉垂直方向上最宽处),如图 3 所示。单个叶片的面积 S 计算公式为

$$S = abL, \quad (1)$$

式中 L 为长宽校正系数,经过大量实验证明,当玉米的长宽校正系数 $L=0.75$ 时,计算的叶面积更为准确。

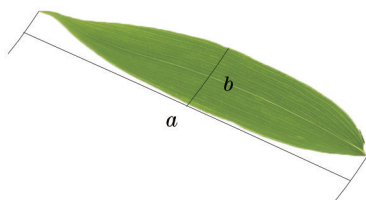


图 3 测量叶片长宽示意图

Fig.3 Measurement of leaf length and width

3 研究方法

3.1 冠层分析法

基于地基激光雷达的 LAI 反演方法基于激光光束的截获概率进行,即激光光束与玉米冠层的接触频率。研究借鉴 Omasa 等^[5]在 2006 年提出的针对树木的冠层分析方法(VCP),建立玉米冠层体素化 VCP,从而完成 LAI 反演。体素是三维数组中的最基本单元,所有匹配后的点云都可以通过下面的公式转换为体素坐标:

$$i = \text{int} \left(\frac{X - X_{\min}}{\Delta i} \right), \quad (2)$$

$$j = \text{int} \left(\frac{Y - Y_{\min}}{\Delta j} \right), \quad (3)$$

$$k = \text{int} \left(\frac{Z - Z_{\min}}{\Delta k} \right), \quad (4)$$

式中 (i, j, k) 为体素坐标, int 为取整函数, (X, Y, Z) 为配准后的点云坐标, $(X_{\min}, Y_{\min}, Z_{\min})$ 为点云坐标的最小值, $(\Delta i, \Delta j, \Delta k)$ 为体素大小,可根据激光雷达的扫描精度确定。对所有玉米点云的体素赋值为 1,表示该处的激光光束被截获,其余赋值为 0,表示该处的激光光束未被截获。然后,通过计算激光接触每层冠层叶片的概率求得叶面积体密度(LAD),LAD 计算公式为

$$f_{\text{LAD}}(h, \Delta H) = \frac{\cos \theta}{G(\theta)} \cdot \frac{1}{\Delta H} \sum_{k=m_h}^{m_h+\Delta h} \frac{n_1(k)}{n_1(k) + n_p(k)}, \quad (5)$$

式中 θ 为激光光束天顶角; ΔH 为水平层厚度; $n_1(k)$ 和 $n_p(k)$ 分别表示第 k 层体素值为 1 和 0 的个数,则 $\frac{n_1(k)}{n_1(k) + n_p(k)}$ 表示激光接触冠层的频率; $\cos \theta / G(\theta)$ 为叶倾角和激光光束方向的校正因子。Omasa 在实验中得出激光光束天顶角 $\theta = 57.5^\circ$ 时, LAD 精度最高,此时 $\cos \theta / G(\theta) = 1.1$ 。

LAD 是具有量纲的参数,与 LAI 主要用于描述连续植被冠层的总叶片面积不同, LAD 主要表征植被在垂直方向上一定间隔内叶面积的差异,体现的是冠层内叶面积随着高度变化的分布状况^[14]。LAD 与 LAI 的关系为

$$f_{\text{LAI}} = \int_0^Z f_{\text{LAD}_z}(Z) dZ, \quad (6)$$

式中 Z 为玉米的高度。LAD 描述叶面积在垂直方向上的变化,受到植被品种、生育阶段及周围环境的影响,是生态过程模型的重要输入变量。

3.2 植被指数

植被指数(VI)是对地表植被活动的简单、有效、经验性度量,将两个或多个光谱观测通道组合就可以得到。波段的组合参照一定的物理基础^[15],由于叶绿素在红光波段(ρ_{red})吸收较强,而在近红外波段(ρ_{NIR})反射较强,一般选用红光波段和近红外波段进行波段组合以提取植被信息。表 2 列出了用到的植被指数及其计算公式。

表2 常见植被指数计算公式

Table 2 Common VI formulae

Vegetation index	VI formulae	Reference
Ratio vegetation index (RVI)	$f_{RVI} = \rho_{NIR} / \rho_{Red}$	Jordan ^[16]
Normalized difference vegetation index (NDVI)	$f_{NDVI} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$	Deering ^[17]
Modified simple ratio (MSR)	$f_{MSR} = \frac{f_{RVI} - 1}{(f_{RVI} + 1)^{0.5}}$	Chen ^[18]

植被指数作为遥感领域中用来表征地表植被覆盖、生长状况的一种简单有效的经验型度量参数,比单波段探测生物量具有更高的敏感性,广泛用于反演植被生物物理学参数。

3.3 结合地基激光雷达和 Landsat8 影像的 LAI 反演方法

地基激光雷达能够获取玉米冠层的高精度三维结构信息,但是每次只能在有限样区内获取;光学遥感影像可以快速提取大面积玉米冠层信息,但无法提供其冠层垂直结构信息,结合两种数据的优势,弥补彼此的不足之处,从一个相对较小的地区的雷达数据扩展到大面积覆盖的全光学场景^[19-20],可以有效提高 LAI 的反演精度。

利用将激光雷达数据体素化的方式,通过冠层分析法提取玉米 LAI;利用 Landsat8 光学影像获得激光雷达站点的玉米冠层反射率,并计算得到植被指数,与冠层分析法得到的 LAI 进行回归分析,从而反演得到大面积的玉米冠层精确 LAI 结果,最后与地面实测值进行验证,分析得出结论。

4 精度验证与结果分析

基于地基激光雷达点云数据,利用冠层分析法提取各样区内的 LAI;基于 Landsat8 影像计算研究区内的反射率,从而计算比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)和优化的比值植被指数(MSR),并与对应位置的 LAI 结果进行回归分析,最终得到整个研究区的 LAI 反演结果。表 3 为 LAI-RVI、LAI-NDVI、LAI-MSR 回归分析结果。

从表 3 可以看出,LAI-RVI、LAI-NDVI、LAI-MSR 三者的相关系数 R^2 均大于 0.7,而且均方根误差(RMSE)均小于 0.16,表明三种植被指数与玉米冠层激光雷达点云提取的 LAI 值拟合效果较好。其中 NDVI 与 LAI 拟合效果最佳, $R^2=0.8086$,RMSE 为 0.1230;其次为 MSR, $R^2=0.7398$,RMSE 为 0.1434。

表3 LAI与植被指数的回归分析结果

Table 3 Regression equations and R^2 , RMSE statistic data

Model	Regression equation	R^2	RMSE
LAI-RVI	$y=0.1572x+2.672$	0.7079	0.1520
LAI-NDVI	$y=5.1771x-0.0741$	0.8086	0.1230
LAI-MSR	$y=0.8501x+2.384$	0.7398	0.1434

利用表 3 中的回归方程对整个研究区的 LAI 进行反演,反演结果用野外实测值进行精度验证,表 4 为精度验证结果。其中,绝对误差=|示值-标准值|(即测量值与真实值之差的绝对值),相对误差=|示值-标准值|/标准值(即绝对误差所占真实值的百分比)。由表 3 可以看出,三种植被指数反演的绝对误差和相对误差都较小,LAI-RVI、LAI-NDVI、LAI-MSR 三种模型的反演绝对误差平均值分别为 0.30、0.35、0.29,相对误差平均值分别为 7.68%、9.47%、7.57%,绝对误差最大值均小于 0.75,相对误差最大值均小于 20%,这表明模型的可信度比较高。

表4 反演结果精度验证

Table 4 Accuracy assessment of LAI inversion

Model	Absolute error			Relative error /%		
	Min	Avg	Max	Min	Avg	Max
LAI-RVI	0.02	0.30	0.69	0.71	7.68	18.48
LAI-NDVI	0.00	0.35	0.73	0.09	9.47	19.56
LAI-MSR	0.02	0.29	0.70	0.44	7.57	16.69

为全面评价整个研究区的 LAI 反演精度,对所有测试样点上的反演结果进行评价。图 4 为所有测试样点的实测 LAI 与相应位置 LAI 反演结果的分析图。从图 4 可以看出,实测 LAI 与各反演 LAI 值趋势基本一致,而且各点相差很小,表明反演精度比较高。比较分析 LAI-RVI、LAI-NDVI、LAI-MSR 三种模型的精度表明,LAI-RVI 与 LAI-MSR 反演的 LAI 曲线更接近真实值而且两者的曲线基本重合,反演精度较高。但是,从图中可以看出,实测值大多数略高于利用三种回归模型得到的反演值,这很可能是因为激光雷达扫描时部分玉米叶片的遮挡造成部分数据的缺失而导致的。图 5 是 LAI-NDVI 反演的研究区玉米 LAI 图。从图中可以看出,玉米 LAI 主要集中在 3~4 之间,主要是因为研究区均为大田玉米,种植方式和管理方式差别不大,所以玉米长势比较均一。

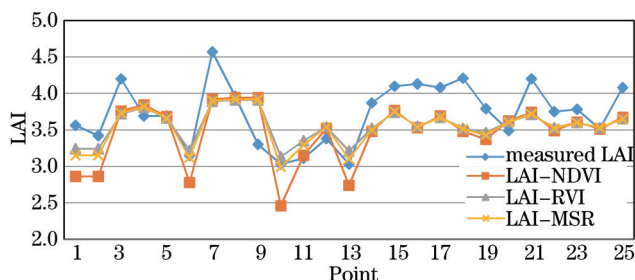


图 4 模型反演 LAI 与实测 LAI 值的比较分析结果

Fig.4 Comparison curves of inversed LAI and measured LAI in field work

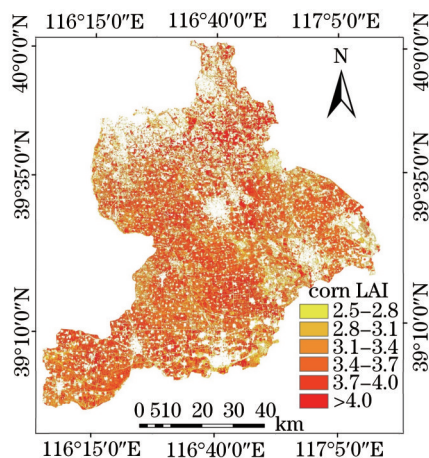


图 5 LAI-NDVI 反演玉米 LAI

Fig.5 Corn canopy LAI inversed by LAI-NDVI

5 结 论

对结合使用地基激光雷达点云数据与 Landsat8 影像反演 LAI 的方法进行研究,重点解决了如何利用激光点云计算 LAI 的方法以及如何使用回归分析法将基于激光雷达点云数据的 LAI 反演结果从样区扩展到面。后续研究中将通过辐射传输模型将两者结合起来,以达到快速提取大面积、高精度 LAI 的目的。结合两种数据源的 LAI 反演结果,分析得到如下结论:

1) 结合使用地基激光雷达点云数据和 Landsat8 遥感影像反演 LAI,并用地面实测值进行验证,根据绝对误差、相对误差和趋势、大小的比较曲线的分析,结果表明地基激光雷达与 Landsat8 影像反演 LAI 的方法切实可行;

2) 地基激光雷达可以提供精确的玉米冠层结构信息,具有空间分辨率高、探测范围广等特性,能够满足玉米等农作物的三维结构信息提取,在农作物长势监测和农作物估产方面有巨大潜力。

此外,该研究还有许多值得改进的地方。对于玉米,由于封垄后玉米叶片相互遮挡,使激光点云缺失,造成 LAI 值偏低,这个问题可以尝试通过引入作物模型来解决;基于地基激光雷达点云数据提取玉米冠层的叶片聚集度指数,从而引入植被辐射传输模型中,也可以提高玉米 LAI 指数的反演精度。

- 1 Luo Shezhou, Wang Cheng, Zhang Guibin, *et al.*. Forest leaf area index (LAI) inversion using airborne LiDAR data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1467-1475.
骆社周, 王成, 张贵宾, 等. 机载激光雷达森林叶面积指数反演研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1467-1475.
- 2 Chen J M, Black T A, Adams R S. Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1991, 56(1): 129-143.
- 3 Ahmed O S, Franklin S E, Wulder M A, *et al.*. Characterizing stand-level forest canopy cover and height using Landsat time series, samples of airborne LiDAR, and the random forest algorithm[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2015, 101: 89-101.
- 4 Tan Kai, Cheng Xiaojun. TLS laser intensity correction based on polynomial model[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0314002.
谭凯, 程效军. 基于多项式模型的TLS激光强度值改正[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0314002.
- 5 Hosoi F, Omasa K. Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(12): 3610-3618.
- 6 Hosoi F, Omasa K. Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3D portable lidar imaging[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(12): 3463-3473.
- 7 Hosoi F, Omasa K. Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable lidar imaging[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(2): 151-158.
- 8 Hosoi F, Nakai Y, Omasa K. Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote-sensing techniques[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(5): 2215-2223.
- 9 Zheng G, Moskal L M. Spatial variability of terrestrial laser scanning based leaf area index[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 19(10): 226-237.
- 10 Xu G C, Pang Y, Li Z Y, *et al.*. Classifying land cover based on calibrated full-waveform airborne light detection and ranging data[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(8): 082801.
- 11 Zhao Yang, Yu Xinxiao. Applicability of 3D laser technology in noninvasive measurement of stand structure in forestry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 071201.
赵阳, 余新晓. 三维激光技术无损测量林分结构因子适用性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 071201.
- 12 Li Danni, Hu Dan, Wang Jinsong, *et al.*. Application of three-dimensional laser radar to the measurement of deviation angle of guns[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1014004.
李丹妮, 呼丹, 王劲松, 等. 三维激光雷达在火炮偏离角测量中的应用[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1014004.
- 13 Zai Songmei, Wen Ji, Guo Dongdong, *et al.*. Determination of leaf area of sweet pepper based on support vector machine model and image processing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 237-241.
宰松梅, 温季, 郭冬冬, 等. 基于支持向量机模型和图像处理技术的甜椒叶面积测定[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 237-241.
- 14 Myneni R B, Ross J, Asrar G. A review on the theory of photon transport in leaf canopies[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1989, 45(1): 1-153.
- 15 Li Yuxia, Yang Wunian, Tong Ling, *et al.*. Remote sensing quantitative monitoring and analysis of fuel moisture content based on spectral index[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1403-1407.
李玉霞, 杨武年, 童玲, 等. 基于光谱指数法的植被含水量遥感定量监测及分析[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1403-1407.
- 16 Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology, 1969, 50(4): 663-666.
- 17 Deering D W. Rangeland Reflectance Characteristics Measured by Aircraft and Spacecraft Sensors[D]. Texas: Texas A & M University, 1978: 338.
- 18 Chen J M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1996, 22(3): 229-242.
- 19 Korhonen L, Heiskanen J, Korpela I. Modelling lidar-derived boreal forest canopy cover with SPOT 4 HRVIR data[J]. Remote Sensing, 2013, 34(22): 8172-8181.
- 20 Stojanova D, Panov P, Gjorgjioski V, *et al.*. Estimating vegetation height and canopy cover from remotely sensed data with machine learning [J]. Ecological Informatics, 2010, 5(4): 256-266.

栏目编辑: 吴秀娟