

# 机载 LiDAR 和高光谱融合实现 普洱山区树种分类

刘怡君<sup>1</sup>, 庞勇<sup>2</sup>, 廖声熙<sup>1\*</sup>, 荚文<sup>2</sup>, 陈博伟<sup>2</sup>, 刘鲁霞<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南昆明 650224; 2. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

**摘要:** [目的] 通过机载遥感影像对普洱山区进行植被分类研究, 为山区森林经营规划与可持续经营方案的制图提供高效应用途径。[方法] 将 2014 年 4 月航拍的机载 AISA Eagle II 高光谱和 LiDAR 同步数据融合, 利用点云数据提取的数字冠层高度模型 (CHM) 得到树种的垂直结构信息, 结合经过主成分分析 (PCA) 的高光谱降维影像, 选用支持向量机 (SVM) 分类器进行分类。[结果] 普洱市万掌山实验区主要树种分为思茅松、西南桦、刺栲、木荷等。融合影像数据分类的总体精度和 Kappa 系数分别为 80.54%、0.78, 比单一高光谱影像数据分类精度分别提高 6.55%、0.08, 其中主要经营树种思茅松的制图精度达到了 90.24%。[结论] 该方法对山区主要树种的识别是有效的, 将机载 LiDAR 与高光谱影像融合可以有效改善分类精度。

**关键词:** 树种分类; 激光雷达; 高光谱; 数据融合

中图分类号: S771.8

文献标识码: A

## Merged Airborne LiDAR and Hyperspectral Data for Tree Species Classification in Puer's Mountainous Area

LIU Yi-jun<sup>1</sup>, PANG Yong<sup>2</sup>, LIAO Sheng-xi<sup>1</sup>, JIA Wen<sup>2</sup>, CHEN Bo-wei<sup>2</sup>, LIU Lu-xia<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** [Objective] To classify the tree species in Puer's mountainous area by remote sensing image, and to search an efficient way to forest management planning. [Method] The AISA Eagle II hyperspectral data and airborne LiDAR taken in April of 2014 were merged, and based on Canopy Height Model (CHM) derived from airborne LiDAR point cloud data, the vertical structure data of target species were obtained. Then, the Principal Component Analysis (PCA) transformation was used to reduce the noise and dimension of hyperspectral image. Finally, the Support Vector Machine (SVM) approach was used to classify the main tree species of Pu'er city. [Result] (1) The main tree species of Puer are *Pinus kesiya* Royle ex Gord. var. *langbianensis* (A. Chev.) Gaussen, *Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don, *Castanopsis hystrix* A. DC., *Schima superba* Gardn. et Champ and so on. (2) It showed that the total accuracy and kappa coefficient are 80.54%, and 0.78, which are 6.55% and 0.08 higher compared with the classification accuracies without CHM. The mapping accuracy of the main tree species reached as high as 90.24%. [Conclusion] It is proved that this method is feasible for the identification of tree species in mountainous areas, and is a feasible way to improve total accuracy with merged LiDAR and hyperspectral data.

**Keywords:** LiDAR; hyperspectral image; data fusion; classification of tree species

收稿日期: 2015-12-21

基金项目: 国家高科技研究发展计划(2012AA12A306); 国家重点基础研究发展计划(2013CB733406)

作者简介: 刘怡君(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事基于遥感山区植被分类研究。

\* 通讯作者: 廖声熙, 男, 副研究员, 博士, 硕士生导师。研究方向: 森林可持续经营技术。E-mail: cafliao@163.com

随着航天航空技术的快速发展,遥感技术已成为社会信息快速获取的重要工具,广泛地应用在各行各业,尤其在近年来成为研究热点的森林生态资源监测方面。遥感影像中蕴含的丰富信息,是森林植被识别分类的基础<sup>[1-2]</sup>。高光谱遥感影像能够提供几乎连续的地物波谱曲线,使得分类中波谱信息不足引起的不确定性得到降低<sup>[3]</sup>。机载激光雷达系统(LiDAR)可以为植被高程信息提取、三维建模等诸多领域提供可靠的三维测量数据<sup>[4]</sup>。因此,将二者相结合应用于森林植被的识别与分类中,分类精度将得到一定的改善。

Charaniya等<sup>[5]</sup>应用LiDAR数据特征和航空影像的亮度信息构成特征矩阵,选取高斯建模训练集,用最大似然分类法进行分类得到道路、草地、建筑物以及树木四大类。余柏藻等<sup>[6]</sup>将高分辨率彩色近红外遥感影像与LiDAR数据相结合,应用于城市绿地分类提取中,将城市绿地划分为乔木、灌木以及草地三种植被。董彦芳等<sup>[7]</sup>在对美国休斯敦大学及附近居民区进行房屋和树木信息提取时,将归一化数字地表模型(nDSM)与NDVI相结合,采用最大似然分类,最终分类精度高达84.0%。刘丽娟等<sup>[8]</sup>选用支持向量机(SVM)分类器,对伊春市凉水国家级自然保护区CASI(Compact Airborne Spectrographic Imager)遥感影像和LiDAR数据融合影像进行分类,得到分类总体精度为83.88%,Kappa系数为0.80。目前,高光谱遥感影像与机载LiDAR融合的植被信息分类,主要集中在平坦地区以及树种结构单一的纯林森林资源的识别与检测,而对于地形复杂的山区地带天然林应用较少。本研究以云南省普洱市万掌山林场山区天然林的机载LiDAR数据和AISA Eagle II高光谱数据为对象,对两种数据融合后用于山区主要树种分类研究,探索山区植被评估与监测方法,为山区森林资源经营管理提供数据基础和技术途径。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

研究区域位于云南省普洱市,地处横断山脉的无量山南部,云贵高原西南缘,主要集中在普洱市北部万掌山林场天然林区(100°35'51"~101°07'08"E、22°34'34"~22°57'10"N),海拔1 000~1 500 m。山地面积多达98%,地形起伏较大,为典型的高山地貌;属于南亚热带高原季风气候,受印度洋西南季风

暖湿气流影响,降水量丰沛但季节分配极不均匀,5~10月降水量占全年的86.9%,年平均气温20.3~22.6℃,相对湿度82%,≥10℃年活动积温7 326~8 176℃,年日照时数1 875.2~2 228.9h。全年无霜,夏长冬无,夏半年高温多雨,冬半年温暖多雾,温湿有效性高,为植被生长创造了优越的条件<sup>[9]</sup>。

按中国植被区划,研究区属于西部亚热带常绿阔叶林和西部热带季雨林、雨林区,其中,人工林树种主要是思茅松(*Pinus kesiya* Royle ex Gord. var. *langbianensis* (A. Chev.) Gaussen);同时还保存大量较典型完整的原始季风常绿阔叶林,主要树种有刺栲(*Castanopsis hystrix* A. DC)、西南桦(*Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don)、木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.)、石栎(*Lithocarpus glaber* (Thunb.) Nakai)、水青树(*Tetracentron sinense* Oliv.)、麻栎(*Quercus acutissima* Carruth.)等<sup>[10]</sup>。

### 1.2 数据获取

1.2.1 遥感数据获取 实验使用的机载高光谱影像获取于2014年4月,覆盖云南省普洱市万掌山林场北部区域。由中国林业科学研究院资源信息所机载LiChy系统,沿东南—西北的方向设有7条航带飞行获得,飞行高度约1 500 m(以地面为基准)。LiChy系统包括CCD相机、激光雷达传感器、AISA Eagle II高光谱传感器、IMU(Inertial Measurement Unit)。芬兰SPECIM公司生产的AISA Eagle II衍生光栅推扫式高光谱成像仪,包括传感器和控制器,IMU和外接GPS联合可提供准确的位置信息<sup>[11]</sup>。传感器采集波长在400~1 000 nm波段,主要是近红外和可见光波段,光谱分辨率为3.3 nm。传感器参数见表1。

1.2.2 地面数据获取 2013年12月至2014年4月,在航带区域内选取样地点,主要集中在天然林及次生天然林区内,共调查14块圆形样地,其中,4块样地为思茅松纯林,其余为天然次生混交林,树种主要包括思茅松、西南桦、刺栲、木荷等,共1 448棵树。圆形样地的半径分别为10、12、15 m,记录定位和样地信息,进行每木检尺。用激光测距/测高仪(OPTi-LOGIC 600X V)测量树高及枝下高,仪器误差0.5 m,另外记录了树高、枝下高、胸径、冠幅等基本测树因子。主要树种的光谱数据使用Fieldspec Pro型光谱仪(ASD)获取。实验利用主要树种400~1 000 nm波长范围内的光谱信息。

表 1 LiCHy 机载传感器主要参数

LiDAR				高光谱影像				CCD 相机	
垂直精度/m	0.15	最大频率/kHz	400	像元分辨率/m	1	FWHM/nm	4.6	像元尺寸/ $\mu\text{m}$	6
激光脉冲长度/ns	3	波长/nm	1 550	瞬时视场角/mrad	0.646	波段数/个	125	成像传感器尺寸/mm	40.30 × 53.78
扫描角/(°)	± 30°	采样间隔/ns	1	光谱范围/nm	400 ~ 1 000	总视场角/(°)	37.7	像元分辨率/pixels	8 964 × 6 716

## 2 树种分类实验方法

实验利用以 LiDAR 数据生成的数字冠层高度模型(CHM)和航拍高光谱影像作为初始的实验影像,首先对高光谱影像做 PCA (Principal Component Analysis) 变换,实现影像的降维处理,成分波段数设为 5;然后将经 PCA 变换后的影像与 CHM 影像合成波段数为 6 的实验新影像,含有光谱信息、空间信息及高程位置信息;结合样地测量数据,选择训练样本,采用 SVM 分类器,分别对融合影像和仅 PCA 变换后的高光谱影像进行树种分类,以 CCD 正射影像和样地实测数据为检验样本,建立混淆矩阵,选用总体精度和 Kappa 系数评价最后的分类结果。技术路线见图 1。

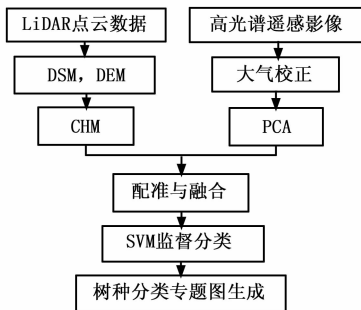


图 1 LiDAR 与高光谱融合的树种分类技术

### 2.1 遥感数据的处理

**2.1.1 机载 LiDAR 数据** 机载 LiDAR 数据处理包括由数据提供商完成的预处理(即生成点云数据)及数据后处理(即在对点云数据的处理基础上得到一系列数据子集<sup>[12]</sup>)。实验在 TerraScan 软件(芬兰 TerraSolid 公司产品)中进行迭代、孤立点和阈值等预处理,得到点云数据分离出的地面点和非地面点。对分离得到的地面点通过不规则三角网(TIN)插值运算生成数字地形模型(DEM),对所有点云数据内插生成数字地面模型(DSM),然后将 DSM 与 DEM 进行栅格差值运算生成高程归一化后的数字冠层高度模型(CHM),将地形的影响降到最低,因此,地物高度可以直接用 CHM 中的像元值来反映<sup>[13]</sup>。

**2.1.2 机载高光谱数据的预处理** 原始高光谱遥

感影像需要进行大气校正和几何校正,消除形变,减少对地物光谱反射的影响<sup>[14]</sup>。实验中机载配套 CaliGeoPro 软件可利用 SPECIM 公司提供的标定 AISA Eagle II 传感器的定标文件,外部 GPS、IMU 信息结算的航迹文件和激光数据提供的高精度的 DEM 信息对 AISA Eagle II 进行校正。应用 ATCOR 4 软件,通过采集的太阳方位角、天顶角等因子,调节邻近像元的影响,完成实验区高光谱航带数据的大气校正;选用综合辐射校正法中地形辐射校正方案来完成几何校正,改善地物光谱失真现象<sup>[15]</sup>。

**2.1.3 高光谱影像与机载 LiDAR 数据融合** 由于机载 LiDAR 和高光谱影像来自于不同的传感器,在融合之前需要互配准。将实验提取的分辨率为 1 m 的 LiDAR CHM 与同分辨率的高光谱影像统一到 UTM 投影 WGS-84 坐标系下,采用最邻近重采样方法,在 2 个影像上选取具有典型代表的控制点 20 个进行配准操作,总 RMS error 为 0.823,说明配准可信。

实验中使用具有 125 波段的高光谱影像,影像的质量同时受很多因素影响,如噪音的存在,而通过降维处理可以得到一定的改善。将机载高光谱影像经过 PCA 变换处理得到波段数为 5 的降维影像,与机载 LiDAR CHM 通过波段融合的方式与降维影像相融合,得到 6 波段的融合影像。

图 2(a)为高光谱影像 R、G、B 分别被赋予第 53 波段、第 34 波段和第 14 波段生成的真彩色合成影像。图 2(b)经过 PCA 处理,对 R、G、B 分别赋予第三、二、一主成分分量生成的彩色合成影像。PCA 变换中影像信息集中在前 3 个波段,其中第一分量中多包含空间信息,而光谱信息分布在其他分量中。因此,分类过程中选取前 3 个主成分,可以在不改变原影像信息的基础上改善分类精度。

图 3(a)是由加载 LiDAR 点云数据生成的 CHM 影像,灰度值表示地物的高度,越亮表明地物越高,因此,植被突出显示出来。图 3(b)是由 PCA 变换后的第二主成分、第三主成分和 CHM 分别赋予 R、G、B 融合生成的彩色合成影像。与图 2(b)相比,图 3(b)中充分运用了机载 LiDAR 数据提供的高程信

息,凸显出不同地物的差别,尤其是植被与其他地物 更为明显。

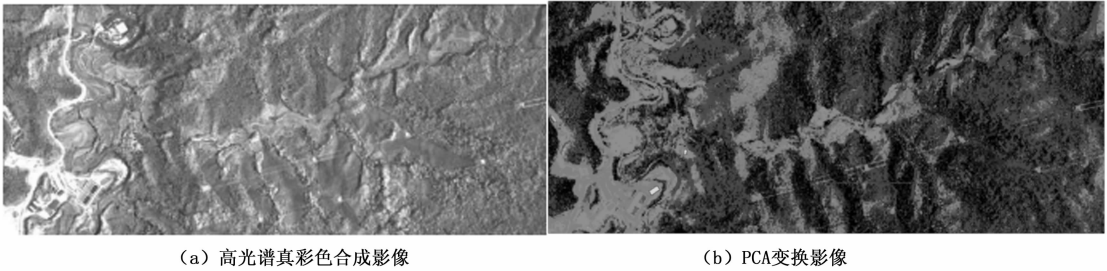


图2 高光谱遥感影像图

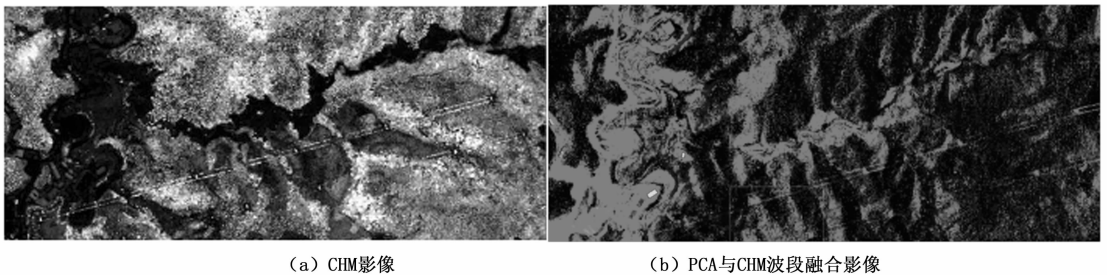


图3 不同数据影像图

## 2.2 监督分类

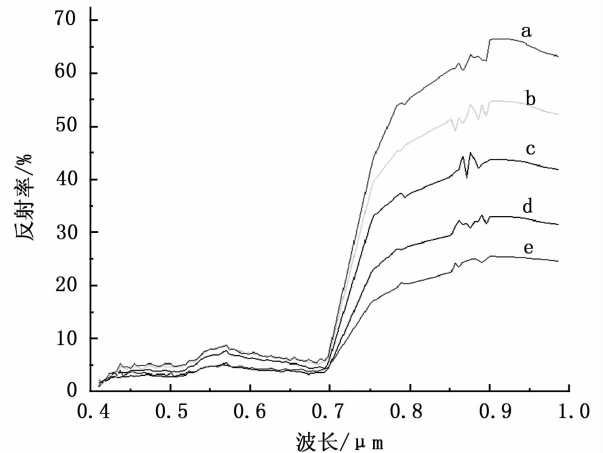
根据样地数据与 CCD 正射影像数据,与实测光谱曲线相比对,以高光谱影像中树种冠层的平均光谱曲线为依据,同时结合目视判读完成训练样本的选取。对融合影像数据采用 SVM 方法进行树种分类。在 ENVI 平台的 SVM 分类工具下,选择径向基函数(RBF)为核函数<sup>[16]</sup>,设置惩罚系数和核参数,获取分类结果图。

## 3 结果与分析

实验中高光谱影像首先经过大气校正和几何校正,因而树种的光谱特性相对准确。由图4可见,实验区内的思茅松、西南桦、刺栲、木荷、其他灌木等树种高光谱影像光谱曲线特征有明显差异,说明训练样本选取正确。

图5(a)是 PCA 分类的结果,图5(b)是对融合影像进行分类的结果。其中,思茅松的识别度最高,同时两幅分类影像中房屋、水体、裸地的均质性较好,识别度较高;而主干道虽然均可识别,但边缘部分提取不够清晰,存在与裸地混淆的现象。

用正射影像和样地实测数据组成的验证样本,建立混淆矩阵,对两种影像的各种分类结果的精度进行评价,如表2所示。



a—其他植被;b—西南桦;c—木荷;d—刺栲;e—思茅松

图4 影像中主要树种的光谱特性

表2 基于 SVM 分类结果比较

项目	PCA 影像	PCA 与 CHM 融合	精度变化
总体精度/%	73.99	80.54	6.55
Kappa 系数	0.70	0.78	0.08

仅使用 PCA 变换的高光谱影像分类,存在相似高度和光谱信息不同树种干扰,出现“同谱异物,同物异谱”的现象,导致训练样本的精度不高,影响分类精度。

实验结果(表3)表明:2种方法对西南桦的分类精度差异不大,对其他树种分类精度普遍提高。思

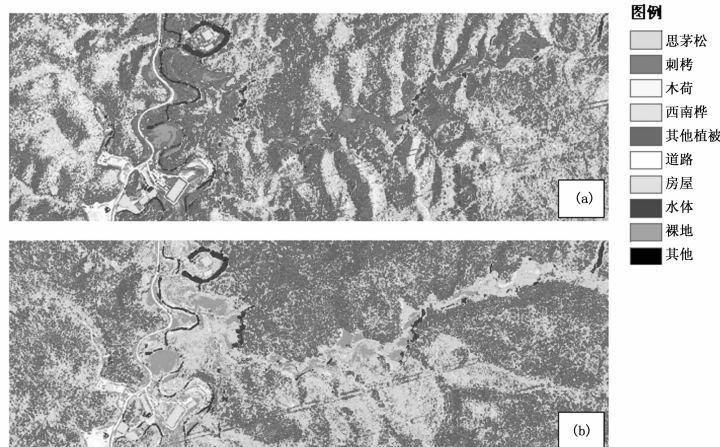


图5 PCA 变换分类结果(a)和 PCA + CHM 分类结果(b)

茅松和西南桦的制图精度和用户精度相差很小,说明这2个树种的识别很稳定,而木荷的相对差异偏大,可能这个树种对训练样本的敏感性较高。单从PCA与CHM融合影像的制图精度来看,思茅松最高(90.42%),西南桦次之。综合比较PCA与CHM融合的影像和PCA影像,就制图精度而言,刺栲提高较大(13.35%),木荷有所降低(-7.02%);就用户精度而言,木荷提高最大(8.68%);刺栲和思茅松次之,分别提高2.50%和2.49%,西南桦反而有所降低(-5.87%)。从总体来看,刺栲精度提高稳定且幅度较大,说明融合数据在采取SVM分类时,对思茅松和刺栲的识别性较好,西南桦的识别不够稳定,但总体比仅用高光谱影像分类的精度有所提高,因此,加入树高特征可以改善树种的分类精度。

表3 SVM 分类各树种分类精度 %

树种	精度	PCA 影像	PCA 与 CHM 融合影像	精度变化
思茅松	制图精度	88.87	90.42	1.55
	用户精度	80.02	82.51	2.49
西南桦	制图精度	63.32	60.51	-2.81
	用户精度	61.06	55.19	-5.87
木荷	制图精度	53.02	46.00	-7.02
	用户精度	55.89	64.57	8.68
刺栲	制图精度	35.82	49.17	13.35
	用户精度	52.20	54.70	2.50

## 4 讨论

CHM与PCA变换相融合的影像,由于加入树种的高程信息,相似高度的不同树种光谱信息干扰减弱,训练样本的精度提高,同时整个影像的分类精度得到改善。机载LiDAR数据与遥感影像相结合,改善地物的分类精度是目前研究的热点之一,例如,Goodenough等<sup>[17]</sup>将极化SAR、高光谱和机载LiDAR

数据融合,应用于森林信息的提取,最终分类精度达到84%。Sasaki等<sup>[18]</sup>对日本吹田市某地区应用面向对象的分方法,分析高空间分辨率近红外影像和小脚点点云数据融合数据,实现对树种进一步的精细分类。管海燕等<sup>[19]</sup>应用多源数据融合的面向对象分类方法,将航空彩色影像与机载LiDAR融合数据,有效地分离出房屋、树木和裸地3种基本地物。巩翼龙等<sup>[20]</sup>利用LiDAR点云与可见光影像对建筑物变化检测,提出多层次规则分类算法,最终Kappa系数高达0.90。

从本文实验结果看,图5(a)将明显的建筑物误分为裸地和道路,同时树体阴影的存在,将其错分为其他地物,而图5(b)则实现准确分类;在房屋识别中,屋顶颜色的干扰出现错分现象,加入CHM后有所改善。实验区域植被属于季风常绿针阔叶混交林,表现为林冠浓郁、暗绿色,多波状起伏,以常绿树为主体,掺杂少量的落叶树。针叶林以思茅松为主,阔叶林以刺栲、木荷、石栎群落为主,其中乔木冠层多以刺栲为优势木,伴生西南桦、红木荷等。树种分类而言,其中刺栲类的错分率最高,达到43.21%,由于天然林植被的光谱特性受到冠层间遮挡、BRDF效应等影响,阔叶树种之间的区分难度增加;山区地形的多变,山体阴坡阳坡的差异,也会干扰阔叶树种之间的区分。

## 5 结论

实验将高光谱影像经过PCA变换后与LiDAR CHM相融合进行树种分类,将普洱市实验区主要树种分为思茅松、西南桦、木荷、刺栲等。结果表明,融合影像数据分类的总体精度和Kappa系数分别为

80.54%、0.78,比单一高光谱影像数据分类精度分别提高6.55%、0.08,说明此方法可以有效提高山区植被树种的分类精度。因此,在影像分类过程中加入LiDAR数据提供的高程信息,不仅总体的分类精度有所提高,单独树种的分类精度也有所提高,进一步说明将机载LiDAR数据与高光谱影像融合进行山区树种分类的可行性。

目前,基于机载LiDAR与高光谱遥感数据进行山区植被分类特征表达与分类还没有形成通用可靠的方法,因为山区植被类型、立地多样、林相季节变换等影响因素众多,其分类精度仍然不高。仅用光谱特征分类过程中无法避免“同物异谱,同谱异物”现象的存在,因此在后续实验中,可以尝试在分类过程中利用高光谱影像的关联性提取完备的纹理辅助分类信息,并与激光波形数据相结合,实现山区复杂植被特征的提取,改善分类精度;同时,多时相数据能反映树种在不同时期的变化,表现出更多的差异,可以更加准确的提取树种特征,提高分类精度。随着分类精度的提高,分类结果可应用于森林结构信息的提取与植被演替阶段的估测,为森林的可持续经营提供相关参数和为管理部门制定森林经营方案建立数据基础,将是未来重点发展的方向之一。

## 参考文献:

[1] 薛东艳. 遥感技术在林业中的应用现状与展望[J]. 科技视界, 2014(21): 309-311.

[2] 贾坤, 李强子, 田亦陈, 等. 遥感影像分类方法研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(10): 2618-2623.

[3] 李海涛, 顾海燕, 张兵, 等. 基于MNF和SVM的高光谱遥感影像分类研究[J]. 遥感信息, 2007 29(5): 12-15.

[4] 李雪松. 机载激光LiDAR原理及应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(2): 221-224.

[5] Charaniya A P, Manduchi R, Lodha S K. Supervised parametric classification of aerial lidar data[C]//Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, 2004. CVPRW 04. Conference on. IEEE, 2004: 30-30.

[6] 余柏浪, 刘红星, 吴健平. 一种应用机载LiDAR数据和高分辨率遥感影像提取城市绿地信息的方法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(5): 782-789.

[7] 董彦芳, 庞勇, 许丽娜, 等. 高光谱遥感影像与机载LiDAR数据融合的地物提取方法研究[J]. 遥感信息, 2014, 29(6): 73-76.

[8] 刘丽娟, 庞勇, 范文义, 等. 机载LiDAR和高光谱融合实现温带天然林树种识别[J]. 遥感学报, 2013, 17(3): 679-695.

[9] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林优势物种不同生长阶段叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 52-62.

[10] 吴征镒, 朱彦丞, 姜汉桥. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社, 1987.

[11] 荚文, 庞勇, 岳彩荣, 等. 基于AISA Eagle II机载高光谱数据的普洱市山区森林分类[J]. 林业调查规划, 2015, 40(1): 9-14.

[12] 张东东, 杜培军. 机载LiDAR数据处理与地物提取[J]. 测绘信息与工程, 2011, 36(1): 5-7.

[13] 刘美爽, 邢艳秋, 吴红波, 等. 基于ICESat-GLAS波形估测平均树高的研究[J]. 林业科学研究, 2014, 27(3): 309-315.

[14] 赵时英. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[15] Kobayashi S, Sanga-Ngoie K. A comparative study of radiometric correction methods for optical remote sensing imagery: the IRC vs. other image-based C-correction methods[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(2): 285-314.

[16] Mountrakis G, Im J, Ogole C. Support vector machines in remote sensing: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(3): 247-259.

[17] Goodenough D G, Chen H, Dyk A, et al. Data fusion study between polarimetric SAR, hyperspectral and LiDAR data for forest information[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International. IEEE, 2008, 2: II-281-284.

[18] Sasaki T, Imanishi J, Ioki K, et al. Object-based classification of land cover and tree species by integrating airborne LiDAR and high spatial resolution imagery data[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2012, 8(2): 157-171.

[19] 管海燕, 邓非, 张剑清, 等. 面向对象的航空影像与机载LiDAR数据融合分类[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(7): 830-833.

[20] 巩翼龙, 闫利. 结合机载LiDAR数据与航空可见光影像多层次规则分类建筑物变化检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(5): 1325-1330.

(责任编辑:张玲)