

基于机载高光谱的思茅松林光谱特征及其影响因子分析

吴楠¹, 李增元², 廖声熙^{1*}, 庞勇², 崔凯¹, 陈博伟²

(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]以云南普洱景阳河为例,基于机载遥感影像,探讨思茅松林冠层高光谱特征及坡向对其光谱反射率的影响。[方法]以2014年4月机载LiCHy系统获取的高光谱和激光雷达DEM提取的坡向数据,结合该地区二类调查数据,对不同坡向的思茅松林冠层光谱曲线特征值进行统计比较。[结果](1)思茅松冠层光谱反射特征与绿色植物光谱曲线总体相似,在0.74~1.0 μm近红外波段冠层反射率较高,0.89 μm最高;(2)阴坡思茅松冠层光谱反射率普遍高于阳坡,北坡、东北坡与南坡、东南坡的峰值波段反射率在0.05水平上差异显著;(3)根据太阳高度角,迎光面的东坡、东北坡、东南坡比背光面西坡、西北坡、西南坡光谱反射率在0.89 μm波段增加了14%~23%。[结论](1)思茅松冠层光谱反射率表现出“两谷一峰”、“红边”等典型的植被光谱特征,反射率较高的0.74~1.0 μm波段为思茅松的特征光谱段;(2)太阳高度角是影响不同坡向光谱反射率的主要因素,而坡向也是造成反射率差异的另一个重要原因。

关键词: 高光谱; 思茅松; 反射率; 太阳高度角; 坡向

中图分类号: S758.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)02-0063-06

Spectral Characteristics and Influencing Factors of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* Based on Airborne Hyperspectral Technique

WU Nan¹, LI Zeng-yuan², LIAO Sheng-xi¹, PANG Yong², CUI Kai¹, CHEN Bo-wei²

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

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

Abstract: [Objective] Hyperspectral characteristics and effect of aspect on spectral reflectance of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* canopy based on airborne remote sensing imagery were investigated in Caiyanghe National Park, south-east Pu'er, Yunnan province. [Method] Hyperspectral and Lidar data were obtained using airborne LiCHy system in April, 2014. The Lidar data were used to get DEM and slope data. In addition, the characteristic values of spectral curves of *P. kesiya* var. *langbianensis* stands in different aspects were statistically analyzed using hyperspectral and forest resources inventory data. [Result] (1) The spectral reflectance of *P. kesiya* var. *langbianensis* canopy was similar to that of green plant. The canopy reflectivity was high in the near infrared band (0.74~1.0 μm), of which, the highest reflectivity located in 0.89 μm. (2) The spectral reflectance of *P. kesiya* var. *langbianensis* canopy in shady slope was higher than that in sunny slope. There was a significant difference at the peak reflectance of band in north, northeast, south and southeast slopes. (3) According to the solar elevation angle, east, northeast and southeast slopes where face the light has more light radiation than west, northwest and southwest slope and the

收稿日期: 2017-07-10

基金项目: 973 课题“森林垂直结构信息多模式遥感协同反演与动态分析”(2013CB733404); 国家自然科学基金“基于高分辨率遥感数据的森林生物多样性监测”(31570546)

作者简介: 吴楠(1993—),女,安徽芜湖人,硕士,主要从事森林经理研究。

通讯作者: 廖声熙,男,副研究员,主要从事森林经理研究。Email: calliao@163.com.

spectral reflectance was also high. In 0.89 μm band, the reflection of the backlight was 14% ~ 23% lower than that of the face light. [**Conclusion**] (1) The spectral reflectance of *P. kesiya* var. *langbianensis* canopy shows typical vegetation spectrum characteristics such as “two valleys and one peak” and “red edge”. The reflectivity is higher in 0.74 ~ 1.0 μm band which usually used as special spectrum for *P. kesiya* var. *langbianensis*. (2) The solar elevation angle is the main factor affecting the spectral reflectance of different aspect. Besides, the aspect is another important reason causing the difference of reflectance. This study will provide references for complex terrain hyperspectral quantitative remote sensing and tree species identification.

Keywords: hyper spectrum; *Pinus kesiya* var. *langbianensis*; reflectance; solar elevation angle; slope

高光谱遥感常被用于准确探测各种植被类型、生物量、生化成分、树种识别、生态功能评估等方面,其中机载高光谱数据精细,分辨率较高,能有效提高树种识别精度。Banskota 等将离散小波变换方法应用于航拍高光谱影像,提高了松属树种的分类精度^[1]。申鑫等利用 LiCHy 系统的高光谱影像提取特征变量,划分北亚热带次生林的主要树种和森林类型,总体精度分别为 64.6% 和 81.1%^[2]。高光谱遥感影像在识别森林类型和主要树种方面有一定的应用潜力,但全球范围内森林多分布于地形起伏的山区,坡度坡向等地形因子对遥感观测的影响显著。马东辉和柯长青用地物光谱仪对不同坡度植被光谱特征进行分析,发现一定范围内坡度增大光谱反射率增加^[3]。Basiri 根据重要值指数分析坡向对伊朗阿塞拜疆西部森林类型的影响,发现黎巴嫩栎 (*Quercus libani* Oliv.) 分布在北、东北、西北坡向,扎格罗斯栎 (*Quercus brantii* Lindl.) 分布在南、东南、西南、东坡向^[4]。地形因子对相邻象元间的交叉辐射现象明显,常导致“同物异谱”与“同谱异物”,使遥感反演地物类型的精度下降,树种识别的难度增加。虽已有部分关于地形对植被光谱特征及其分布影响的研究,但较少基于航拍影像对不同坡向之间冠层光谱反射率差异及其影响因子进行定量分析,本文以思茅松林为例,基于 LiCHy 系统航拍高光谱影像对其冠层反射率及其影响因子进行定量分析比较。

思茅松 (*Pinus kesiya* var. *langbianensis* (A. Chew.) Gaussen) 是常绿针叶乔木树种,针叶 3 针一束,一年生长两轮至多轮,与其它松树种类相比,具有生长快,材质优良,松脂产量高的特点,主要分布在云南哀牢山以西的热带北缘和亚热带南部半湿润地区。思茅松是云南省重要的造林及用材树种之一,根据云南省第五次森林资源清查数据,思茅松现有面积约 59.03 万 hm^2 ,蓄积量占云南省森林总蓄

积量的 11%^[5],具有重要的经济价值、森林生态服务功能和碳汇效益。莢文、刘怡君等^[6-7]对思茅松的光谱曲线进行过初步描述,但缺乏对光谱精细数据变化的深入研究,目前未见基于高光谱遥感分析坡向等因子对思茅松林冠层光谱反射率影响的相关报道。实验选择中国林业科学研究院机载 LiCHy 系统获取思茅松的光谱、激光雷达 DEM 数据,测定思茅松光谱反射率的特征参数,分析太阳高度角、不同坡向影响思茅松林光谱特征的变化规律,为思茅松树种识别、健康监测、定量遥感及其他森林经营参数反演提供参考和科学依据。

1 实验区与数据

1.1 研究区概况

研究区位于云南普洱东南部的菜阳河国家森林公园,分布于 22°31' ~ 22°49' N、100°48' ~ 101°11' E、海拔 980 ~ 1 698 m,地处无量山脉南延末端,云贵高原西南部^[8]。属南亚热带季风气候,年平均气温 17.7℃,年平均降雨量 1 543 mm,年平均湿度 82%,土壤类型以赤红壤或红壤为主^[9-10],水热条件优越,植物种类丰富,典型的植被类型包括热带季雨林、季风常绿阔叶林等,全区植物多达 1 722 种,森林覆盖率达 91.8%^[11]。研究区地形破碎,沟窄坡陡,地势西南低东北高^[12],地理位置如图 1 所示。

1.2 数据获取

利用中国林业科学研究院机载 LiCHy 系统,获取覆盖研究区航拍影像。飞行时间 2014 年 4 月,飞行方向从东南到西北,飞行高度距地面约 1 500 m。实验中选择航带中间时刻的太阳参数代替整体,太阳高度角为 28.2°,方位角为 94.8°。LiCHy 系统由德国 IGI 公司集成,主要包括 AISA Eagle II 高光谱传感器、激光雷达传感器、CCD 相机和惯性导航装置 (Inertial Measurement Unit, IMU) 四个部分^[13]。本次实验主要采用其中的 AISA Eagle II 高光谱传

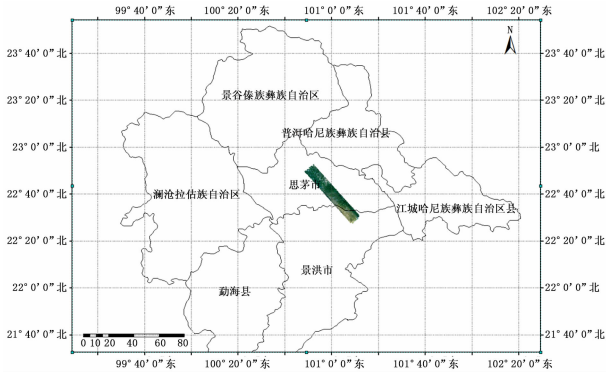


图1 实验区地理位置

Fig. 1 Experimentation area location

传感器获取菜阳河影像数据,提取思茅松冠层光谱反射率;激光雷达传感器获取研究区 DEM 数据,具体参数见表 1。辅助数据包括云南省普洱市 2008 年的“二类调查”数据和各县区矢量边界及其他专题成果。

表 1 LiChy 系统高光谱激光雷达主要参数

Table 1 The main parameters of hyperspectral lidar system of LiChy

高光谱 Hyperspectral: AISA Eagle II		激光雷达 Lidar: Riegl LMS-Q680i	
光谱范围 Spectral range /nm	400 ~ 1 000	波长 Wavelength /nm	1 550
光谱分辨率 Spectral resolution /nm	3.3	脉冲宽度 Pulse width /ns	3
波段数 Number of bands	64	脉冲发散角 Divergence angle of pulse /mrad	0.5
光谱采样间隔 Sampling interval in spectral /nm	9.2	扫描角 Scanning angle /°	±30
空间分辨率 Spatial resolution /m	4	测距精度 Accuracy of distance measurement /m	0.02
空间像元数 Number of spatial pixels	512	采样间隔 Sampling interval /ns	1
视场角 Field angle /°	37.7	最大扫描速率 Maximum scan rate / (lines · s ⁻¹)	200
瞬时视场角 Instantaneous field of view /mrad	0.646	最大重复频率 Maximum repetition rate /kHz	400

2.2 DEM 数据的获取与坡向划分

利用 CAF-LiChy 系统波形激光雷达模块进行复杂地形 DEM 重建。先基于低分辨率的 DEM 数据进行激光脉冲歧义处理、波形数据相对辐射校正,获得双通道全波形数据,其高能量通道能使弱回波信号获取精确的脉冲反射信号,加强复杂植被覆盖下弱信号的区分度。选择优化的多尺度曲率算法的 LiDAR 数据滤波方法,重建复杂地形地表下的精确 DEM,分辨率为 2 m^[14]。

实验利用 DEM 影像获取研究区的坡向图,并将 0 ~ 360° 的坡向按间隔 45 度,设定了 8 个不同坡向,分为北坡 (0 ~ 22.5° 和 337.5° ~ 360°)、东北坡 (22.5° ~ 67.5°)、东坡 (67.5° ~ 112.5°)、东南坡 (112.5° ~ 157.5°)、南坡 (157.5° ~ 202.5°)、西南坡 (202.5° ~ 247.5°)、西坡 (247.5° ~ 292.5°)、西北坡 (292.5° ~ 337.5°),分析坡向对思茅松林冠光谱反射的影响。

2 研究方法

2.1 机载高光谱数据预处理

机载高光谱数据的预处理主要包括辐射定标、几何校正、大气校正、地形辐射校正,处理后的光谱数据能更准确的反映地物真实的反射率。选择配套的 CaliGeoPro 软件和 SPECIM 公司提供的 AISA Eagle II 定标文件进行辐射定标。利用 POS 系统提供的航迹文件和激光雷达获取的 DEM 信息对影像像元的地理位置进行解算,实现几何校正。实验采用 ATCOR 4 软件通过获取太阳天顶角、方位角,气溶胶类型,正确定义 AISA Eagle II 高光谱数据水汽探测波段 (约 0.82 μm),调整大气可视距离,相邻像元距离等,消除大气对太阳辐射传输的影响。为了减小山体阴影对光谱的影响,选择综合辐射校正法 (Integrated Radiometric Correction, IRC) 进行地形辐射校正^[6]。

2.3 思茅松光谱反射率提取与分析

将高光谱与 DEM 影像转换为北京 54 坐标和高斯克吕格投影系统与森林资源二类调查数据统一。从小班调查的矢量图中提取主要树种为思茅松的小班,与 DEM 提取的坡向图相交,获取不同坡向思茅松矢量图。结合 CCD 影像,在高光谱影像上选择不同坡向典型的思茅松林,提取光谱曲线。选择光谱反射率变化明显的波段,利用 SPSS 19.0 软件对不同坡向间反射率进行单因素方差分析 (ANOVA),选择最小显著差异法 (Least-significant difference, LSD) 进行多重比较,定量分析坡向对思茅松光谱反射率的影响。

3 结果与分析

3.1 思茅松冠层光谱反射特征分析

思茅松冠层光谱反射特征与绿色植物光谱曲线总体呈现相似,反射率平均值 (黑线) 及波动 (灰色

区域)如图2可见,在0.40~0.68 μm 思茅松反射率总体较低(小于0.070),呈小幅上升后再下降的趋势。

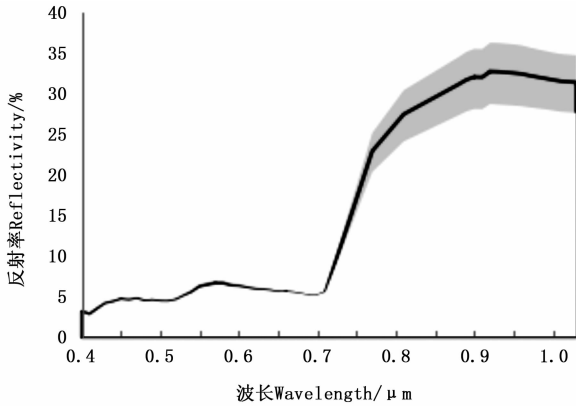


图2 思茅松在400~1 000 nm光谱反射特征
Fig. 2 Spectral reflectance characteristics of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* in 400 ~ 1 000 nm

在绿光波段(0.52~0.58 μm)形成一个反射小峰,0.55 μm 处达到峰值,反射率约0.066,即“绿峰”现象;在0.47 μm 和0.67 μm 附近反射率较低,呈现为“蓝谷”和“红谷”。0.68~0.74 μm 为急剧上升阶段,升幅非常大,反射率从0.055提高到了0.230左右,与植被特有的“红边”现象表现相符,随后0.74~0.85 μm 继续小幅上升。光谱曲线0.85~0.91 μm 波段内的波动呈现“两峰一谷”,峰值差异不明显,0.87 μm 处出现第一个峰值0.321,波动范围为0.281~0.356;随后0.88 μm 出现了一个小“V”型波谷,反射率降低为0.320,波动范围为0.280~0.355;在0.89 μm 附近反射率达到最高点0.327,波动范围为0.287~0.363;最后0.89~1.0 μm 有小幅下降,但反射值仍处于大于0.314的高位,波动范围为0.276~0.347。

3.2 坡向对思茅松光谱特征值的影响

由图3可见,各个坡向光谱值在0.4~0.69 μm 统计学上无差异,0.69~0.74 μm 开始有所区分,

随着波长增加,差别逐渐增大,至0.74~0.78 μm 处差别明显,0.78~1.0 μm 差别最大化。整个波长范围内的思茅松光谱在各波段的反射率随坡向的变化表现为趋势相同,具有较高的线性相似度的曲线族。思茅松光谱反射率随坡向的变化,同时受坡向差异和太阳高度角的影响。在同一波段上表现为,南、东南、西南坡等阳坡分别低于北、东北、西北坡等阴坡,东面、东南面、东北面等迎光面高于西面、西南面、西北面等背光面,总体上阴坡高于阳坡,迎光面高于背光面。

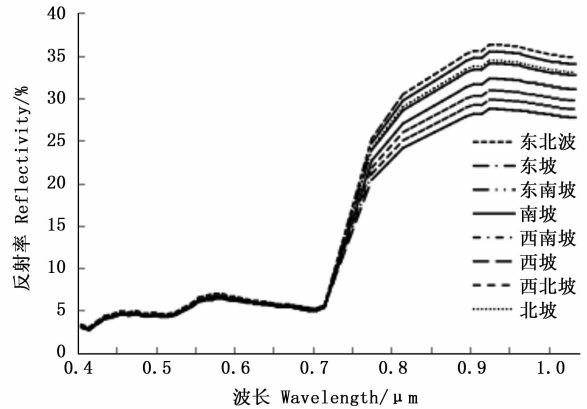


图3 分布于各坡向的思茅松光谱曲线

Fig. 3 Spectral curves of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* distributed in different slope

选择光谱反射率差异明显的0.78 μm 、0.87 μm 、0.89 μm 3个波段,分析坡向对思茅松光谱反射率的影响(表2)。分析发现思茅松光谱反射率在3个波段中的变化趋势及坡向间的差异性类似。北坡(阴坡)与南坡(阳坡)光谱反射率在峰值波段0.89 μm 上的差异为0.021 2,存在着显著差异($P < 0.05$);东北坡与东南坡的差异为0.022 1,存在着显著差异($P < 0.05$);西北坡与西南坡的差异为0.010 9,差异不显著。各坡向间光谱反射率的高低表现为东北坡>东坡>北坡>东南坡>南坡>西北坡>西南坡>西坡。

表2 各波段坡向间光谱反射率

Table 2 Spectral reflectance of each band in different slope

	Spectral reflectance of each band in different slope							%
坡向 Slope	东北 Northeast	正东 East	东南 Southeast	正南 South	西南 Southwest	正西 West	西北 Northwest	正北 North
样本数 Number of samples	39	36	42	40	35	36	38	35
0.78 μm	30.43 ± 2.45a	29.70 ± 2.93abg	28.55 ± 2.84 bg	26.99 ± 3.22cf	25.01 ± 2.49def	24.12 ± 2.07e	25.97 ± 2.74f	28.97 ± 3.07g
0.87 μm	35.54 ± 2.80 a	34.72 ± 3.26abg	33.35 ± 3.15bg	31.61 ± 3.70 cf29	29.19 ± 2.86 def	28.12 ± 2.41 e	30.26 ± 3.14 f	33.74 ± 3.42 g
0.89 μm	36.27 ± 2.84 a	35.44 ± 3.30abg	34.06 ± 3.16bg	32.29 ± 3.76cf	29.80 ± 2.92 def	28.73 ± 2.45 e	30.89 ± 3.20 f	34.41 ± 3.52 g

注:表格中数据为均值±标准差,同行中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: The data are displayed as mean ± SE. The different lowercase in the same line indicate significant difference ($P < 0.05$)

3.3 太阳高度角对思茅松光谱特征值的影响

航拍影像中太阳方位角 $\pm 30^\circ$ 为迎光方向,太阳方位角 $+180^\circ \pm 30^\circ$ 为背光方向。选择 $0.78 \mu\text{m}$ 、 $0.87 \mu\text{m}$ 、 $0.89 \mu\text{m}$ 3 个波段,绘出各个坡面方向思茅松的光谱反射率(图 4),显示太阳高度角对思茅松林冠层光谱反射的影响。其中东面为迎光面,西面为背光面,表现为东坡光谱反射率大于西坡。东北坡、东南坡迎光,西北坡、西南坡背光,光谱反射率东北坡 > 西北坡,东南坡 > 西南坡。以入射面与坡面的垂直交线为轴,轴两侧各个坡面光谱反射比基本成对称分布,反映太阳高度角对光谱反射的影响较大。

从光谱特征方面来看,以反射最高的 $0.89 \mu\text{m}$ 波段为例,背光面西、西北、西南面的光谱反射率比迎光面东、东北、东南面分别降低了 23%、17%、14%,反射率最大差值为西面与东面,达到了 0.067 1(见表 3),东北面与西北面、东南面与西南面之间

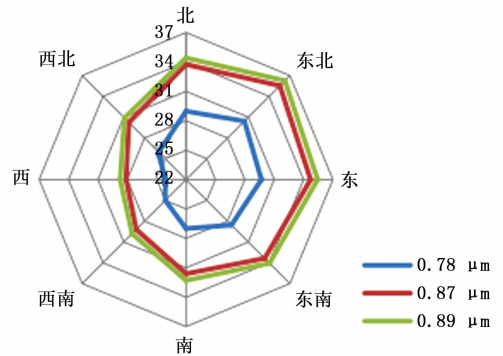


图 4 不同波段光谱思茅松林冠层反射率随坡向变化

Fig. 4 Different spectral reflectance along with the slope change of *Pinus kesiya* var. *langbianensis*

的差异达 0.053 8、0.042 6。背光面思茅松除了光谱反射率明显低于迎光面外,各个方向光谱曲线的波形变化趋势一致,波动规律高度相似。

表 3 $0.89 \mu\text{m}$ 坡向间光谱反射率 LSD 方差分析

Table 3 LSD analysis of spectral reflectance at $0.89 \mu\text{m}$ in different slope

坡向 Slope	东北 Northeast	正东 East	东南 Southeast	正南 South	西南 Southwest	正西 West	西北 Northwest
正东 East	0.83						
东南 Southeast	2.22 **	1.38					
正南 South	3.99 **	3.15 **	1.77 *				
西南 Southwest	6.47 **	5.64 **	4.26 **	2.48 **			
正西 West	7.54 **	6.71 **	5.32 **	3.55 **	1.07		
西北 Northwest	5.38 **	4.54 **	3.16 **	1.39	-1.09	-2.16 **	
正北 North	1.86 *	1.03	-0.35	-2.13 **	-4.61 **	-5.68 **	-3.52 **

注: * 和 ** 分别代表在 0.05 和 0.01 水平上有显著性差异;

Note: * and ** respectively indicate the significant difference at 0.05 and 0.01 level.

4 讨论

思茅松林冠层光谱反射率在可见光波段,表现为“绿峰”和“红蓝谷”,主要是由于叶绿素对绿光反射作用较强而对红蓝光的吸收作用较强,但总体反射率较低。而近红外波段($0.74 \sim 1.0 \mu\text{m}$)反射率主要受叶子内细胞结构的影响,叶片的细胞空隙和细胞壁的折射率不同会产生多重反射,反射能占入射能的 45%~50%^[15]。近红外辐射在叶腔内产生多次散射,因此思茅松冠层反射率在此波段较高,可以选择作为思茅松林的特征光谱波段。

太阳高度角和坡向是影响植被反射率的两个不同因素,分析它们对林分冠层光谱反射率的变化及其影响程度,利于提高树种识别精度。虽然冠层高度、生物量、生产力、树种组成和植被覆盖度等均能

影响冠层光谱反射率,但由于各个方向测定的样本数量均足够大,且提取其光谱均值进行比较,因此地面因素所造成的影响被平均化。对强阳性树种思茅松而言坡向是一个重要的环境因子,各坡向的不同水分分配及光照,影响着树种长势,群落的组成、结构和功能,进而影响着林分冠层光谱反射率。实验发现北坡、东北坡冠层光谱反射率最高,结合研究区地理气象资料分析发现,该地区地势东北高西南低,北面最高,山脉呈东西走向,受印度洋冬季东北季风影响,北坡处于迎风坡,受到东北向水汽影响,水分蒸发较弱,土壤水分、湿度相对较高,思茅松长势较好,因此冠层光谱反射率更高。Olivero 等在俄亥俄州发现较湿润的东北坡的物种丰富度和多样性显著高于西南坡,进一步支持了本次实验结果^[16]。

除了坡向对叶片本身的影响因素外,太阳高度

角对林分冠层光谱反射率也有一定影响。由于思茅松林冠层不是理想的朗伯面,其辐射亮度具有方向性,所以入射的角度差异直接影响了树体的反射率。东面等迎光方向接受到光辐射更多,反射的太阳辐射也更多,光谱反射率越大;而西面等背光方向背向太阳造成入射光减少。这与孙玮祺等在实验室条件下对各树种不同坡向光谱特征的分析结果相符^[17]。从多重比较分析结果看,太阳高度角是影响思茅松冠层光谱反射率的重要因素之一,其通过分配于各个坡向的辐射亮度来影响光谱反射值。在同一背阴或向阳面太阳高度角对思茅松光谱反射有相同的影响力,由坡向变化引起的光谱识别精度差异不明显。在自然条件下思茅松林冠层反射率受林分结构、土壤背景、林分下层植被等多因素共同作用。

5 结论

实验以植被丰富的云南普洱菜阳河区域为代表,基于高光谱数据,提取思茅松冠层光谱反射率特征,并分析太阳高度角、坡向等对其光谱曲线的影响。结果显示:(1)思茅松冠层光谱反射率在近红外波段,反射率较高,0.89 μm 最高达 0.327,因此可以选择作为思茅松林的特征光谱段。(2)思茅松冠层光谱反射率受不同坡向水肥、热量等条件差异和太阳高度角制约,总体上阴坡高于阳坡,迎光面高于背光面,表现为东北坡 > 东坡 > 北坡 > 东南坡 > 南坡 > 西北坡 > 西南坡 > 西坡;(3)太阳高度角是影响思茅松林冠层光谱反射率不同的主要因素,迎光面接受到的光辐射越多,光谱反射率越大,背光方向反之,不同坡向上树种生长状况也是另一个重要原因。实验受机载高光谱传感器高成本和覆盖范围的局限性,未能比较不同季节思茅松林冠层光谱反射率的差异,在分析思茅松不同生长阶段内的光谱变化方面存在不足。随着地形因子对光谱反射率影响的进一步深入,在多维光谱特征空间中,寻找同一树种间光谱反射率的细微变化规律,利于提高树种识别精度,为林区遥感识别精度的提高和定量遥感的发展提供重要的参考信息和研究方向。

参考文献:

[1] Banskota A, Wynne R H, Kayastha N. Improving within-genus tree

species discrimination using the discrete wavelet transform applied to airborne hyperspectral data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(13):3551-3563.

- [2] 申鑫,曹林,徐婷,等. 基于高分辨率与高光谱遥感影像的北亚热带马尾松及次生落叶树种的分类[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(12):1125-1135.
- [3] 马东辉,柯长青. 南京冬季典型植被光谱特征分析[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(4):702-708.
- [4] Basiri R. Quantitative Analysis of Forest Types with Respect to Aspect in West Azarbaijan, Iran[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2011, 14(8):1136-1140.
- [5] 李江. 思茅松人工林生态学研究与应用[M]. 昆明:云南科技出版社, 2011.
- [6] 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.
- [7] 刘怡君,庞勇,廖声熙,等. 机载 LiDAR 和高光谱融合实现普洱山区树种分类[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(3):407-412.
- [8] 朱华,李保贵,邓少春,等. 思茅菜阳河自然保护区热带季节雨林及其生物地理意义[J]. *东北林业大学学报*, 2000, 28(5):87-93.
- [9] 冯源. 基于 CBM 模型云南普洱地区森林生态系统碳收支研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2014.
- [10] 黄小波,刘万德,苏建荣,等. 云南普洱季风常绿阔叶林 152 种木本植物叶片 C、N、P 化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(3):567-575.
- [11] 栗忠飞,郑征,李佑荣,等. 云南菜阳河自然保护区热带季节雨林乔木生物量[J]. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12(1):41-45.
- [12] 何蓉. 菜阳河自然保护区 3 种森林类型的土壤特性[J]. *云南林业科技*, 2003, 103(2):25-30.
- [13] Pang Y, Li Z, Ju H, et al. LiChy: The CAF's LiDAR, CCD and Hyperspectral Integrated Airborne Observation System[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5):398.
- [14] Lu H, Pang Y. A waveform exploitation optimized multiscale curvature algorithm for recognizing ground echoes from airborne laser scanner in densely forested area [C]. *Geoinformatics, 2015 23rd International Conference on, IEEE, Wuhan, China, 2015: 1-5.*
- [15] 于泉洲,王绍强,黄昆,等. 基于 Hyperion 高光谱数据的温带森林不同冠层结构的光谱特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(7):1980-1985.
- [16] Olivero A M, Hix D M. Influence of aspect and stand age on ground flora of southeastern Ohio forest ecosystems[J]. *Plant Ecology*, 1998, 139(2):177-187.
- [17] 孙玮祺,赵云升,涂林伶. 坡地植物反射高光谱影响因子分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(9):2495-2499.

(责任编辑:张玲)