

网络出版时间:2016-01-08 10:22

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.02.012

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160108.1022.024.html

福建将乐林场主要树种冠层光谱反射特征分析

张莹¹, 张晓丽¹, 王书涵¹, 李宏志¹, 薛书果²

(1 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2 河南省新密市第一高级中学, 河南 新密 452370)

[摘要] **【目的】**对福建将乐林场主要树种的冠层光谱曲线进行分析,以建立和完善该地区森林树种光谱数据库,并对利用高光谱数据研究森林树种分类提供理论和技术支持。**【方法】**对实测的林场内 5 个主要树种(马尾松、杉木、毛竹、木荷和苦槠栲)的平均冠层反射光谱曲线,采用导数光谱、红边特征及将冠层光谱曲线转化到频率域的离散傅里叶变换方法进行分析,比较各树种冠层光谱曲线在空间和频率域上的差别。**【结果】**在可见光波段(480~700 nm),毛竹和苦槠栲的冠层反射率高于其他树种;在近红外波段(720~920 nm),苦槠栲、木荷、毛竹的冠层反射率明显高于马尾松和杉木,且苦槠栲>木荷>毛竹。一阶导数光谱对植被类型有很好的区分作用,可以将植被在可见光波段附近吸收谷的特征和在近红外波段的红边特征进行突出显示。冠层光谱的红边特征参数表现为木荷和苦槠栲的光谱曲线红边斜率较大,明显高于马尾松、杉木和毛竹;毛竹的红边位置明显低于其他树种。对树种冠层光谱的频谱分析结果得出,冠层光谱前 12 次谐波能量累计达到 99%,原始光谱曲线冠层光谱在频域上也有可分性,前 4 次谐波的幅度谱可以将苦槠栲、木荷和毛竹区分出来。**【结论】**不同树种的光谱曲线在空间域和频率域都存在明显的差别,光谱曲线的红边参数和冠层光谱在频率域的幅度谱有助于量化地区分不同的树种类型。

[关键词] 高光谱遥感;光谱特征;红边参数;导数光谱;频谱分析;主要树种;福建

[中图分类号] S127;TP79

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)02-0083-07

Spectral reflectance characteristics of canopies of main tree species in Jingle forest farm in Fujian

ZHANG Ying¹, ZHANG Xiao-li¹, WANG Shu-han¹,

LI Hong-zhi¹, XUE Shu-guo²

(1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2 First Senior High School of Xinmi City, Xinmi, Henan 452370, China)

Abstract: **【Objective】**The canopy spectrum of different tree types were analyzed to improve forest spectral library and provide theoretical and technical support for hyperspectral remote sensing forest classification. **【Method】**The measured reflectance spectra of five main tree types were analyzed to obtain the differences using methods including derivative spectra analysis, red-edge characteristic analysis and frequency spectrum characteristics analysis. **【Result】**The canopy spectral reflectances of *Phyllostachys pubescens* and *Castanopsis sclerophylla* were larger than that of other types in the visible wavelength range (480—700 nm). In the near infrared wavelength range (720—920 nm), the spectral reflectances of *C. sclerophylla*, *Schima superba* and *P. pubescens* were significantly greater than that of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata*. The first derivative spectrum of canopy spectral reflectance was good to classify trees by

[收稿日期] 2015-06-26

[基金项目] 国家“863”高新技术研究与发展计划项目(2012AA102001-5)

[作者简介] 张莹(1982—),女,河南周口人,在读博士,主要从事定量遥感研究。E-mail:august12@163.com

[通信作者] 张晓丽(1967—),女,河北保定人,教授,主要从事 GIS 在资源与环境中的应用及定量遥感研究。
E-mail:zhang-xl@263.net

presenting the absorption valley feature in visible wavelengths and red-edge characteristic in near infrared wavelengths. The red edge characteristic parameters of *S. superba* and *C. sclerophylla* were higher than that of other tree types and that of *P. pubescens* was much smaller. Frequency spectrum analysis of canopy spectral showed that the separability in frequency domain was clear with 99% of energy spectrum from the first 12 low frequency harmonics. *C. sclerophylla*, *S. superba* and *P. pubescens* can be distinguished by the amplitude of first four low frequency harmonics. 【Conclusion】 The differences in spatial and frequency domains were clear and could be used to quantitatively distinguish different tree species by red-edge characteristic parameters and the amplitudes of low frequency harmonics within frequency domain.

Key words: hyperspectral remote sensing; spectral characteristics; red edge parameter; derivative spectra; frequency spectrum analysis; main tree species; Fujian

高光谱遥感具有光谱分辨率高、波段连续性强、光谱信息量大等特点,其以纳米级的高光谱分辨率对地物进行成像,波段数多达几十、几百甚至上千个,因而可以获取更为精细的地物光谱信息,为定量分析地表物理化学变化过程提供参数和依据。利用高光谱对草地、农作物等进行研究比较常见,而森林冠层的反射光谱受到林木高度、设备自身因素的影响,获取较为困难,目前我国在这方面的研究还处于发展阶段,现主要以理论分析和小范围的应用研究为主。国外研究表明,高光谱数据对森林类型具有很强的识别能力^[1-4]。因此,对不同森林植被光谱特征进行分析研究,有助于利用高光谱遥感研究不同树种的覆盖度及其分类、植被的计算机识别与自动提取、遥感反演等,可以为森林分类及其科学经营管理提供有力的技术支持^[5]。

目前,国内许多学者利用高光谱数据对不同的地物类型进行了光谱观测和分析研究。如张凯等^[6]对甘肃省草地植被类型的光谱反射特征进行了研究,发现荒漠草甸植被冠层光谱高于高寒草甸植被,近红外波段则相反;杨红飞等^[7]利用便携式光谱仪,测定了新疆天然草地植被的光谱,分析了不同植被类型在可见光和近红外波段的反射光谱特征;徐光彩等^[8]对小兴安岭主要树种冠层光谱季相变化进行了研究,得出常绿和落叶树种光谱特征在冬季差异明显,夏季是采用单季相遥感数据进行树种识别的最佳时节;刘秀英等^[9]对 4 个树种的高光谱测量数据进行了分析,探索出不同树种在不同波段上的识别能力;宫鹏等^[10]对美国加州 6 种主要针叶树种的实地测量光谱进行了变换分析,探讨了不同波段宽度对树种识别精度的影响。此外,频谱作为能量的特征,与能谱和重力特征一样,可以用来识别物体的属性^[11]。目前,结合频谱的高光谱遥感已经受到越来越多的关注。童庆禧等^[12]提出利用光谱数据库

和频谱数据库结合的方式提升地物识别能力;王珂等^[13]利用美国地质调查局(USGS)光谱库中 4 种地物(融雪、水体、草地和水铁矿)的光谱曲线进行了频谱分析,发现光谱曲线经过离散傅里叶变换的低频分量即可表征原始光谱特征曲线,可以利用光谱曲线的低阶频谱建立频谱相似分类模型。

福建省将乐县将乐林场森林资源丰富,植物种类繁多,森林覆盖率达 93.76%。其中商品用材林占很大比重,主要是常绿针叶林,包括杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)、木荷(*Schima superba*)、苦槠栲(*Castanopsis sclerophylla*)等树种。为了探索高光谱遥感在森林树种分类、变化监测等方面的作用,本研究选择了位于福建将乐林场内的马尾松、杉木、毛竹、木荷和苦槠栲 5 个主要树种进行冠层光谱测定,对这 5 种类型树种冠层的光谱变化特征及其差异性进行了对比分析和研究,并利用离散傅里叶变换对光谱曲线进行了频谱分析,探讨各个树种在频域上区分的可行性,以期对森林分类和动态监测提供理论依据。

1 试验区概况

研究区位于福建省三明市将乐县境内的将乐国有林场。将乐县位于福建省山区的西北部,扼闽江支流金溪中下游,北纬 $26^{\circ}26'$ ~ $27^{\circ}04'$,东经 $117^{\circ}05'$ ~ $117^{\circ}40'$ 。林场内森林资源丰富,土壤肥沃,以红壤为主,适宜培育马尾松和杉木为主的用材林。该区域属中亚热带季风气候区,年平均气温 18.7°C ,年平均降雨量 1 669 mm。研究选取该区域中的马尾松、杉木、毛竹、木荷和苦槠栲 5 个典型树种,进行实地光谱测量和采样,然后在室内分析其光谱特征和频谱特征。

2 研究方法

2.1 光谱数据的测定

光谱测量采用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec HandHeld 光谱仪,波长范围 325~1 075 nm,波长精度 ± 1 nm,共 512 个波段。为了消除光照、云等环境因素影响,野外地物光谱测定选择在晴朗且无风或微风天气下进行,时间控制在 11:00—13:00。光谱测定时,仪器探头垂直向下,与待测植被和参考白板的距离均保持在 100 cm 左右(白板直径为 5.08 cm,探头视场角 25°)。为减少大气变化给观测造成的不利影响,每隔 5~10 min 进行 1 次标准白板的校正。为减小随机误差的影响,对每一植被冠层的光谱测定记录重复 10 次,取均值作为该植被的反射光谱;同时,记录测定点的地理坐标,并采集实地照片。

测定光谱数据后,通过 Field Spec Hand Held 光谱仪配套的光谱数据处理软件 ViewSpecPro 对测得的原始光谱数据进行筛选,去除无效和错误的数据。观察数据的光谱曲线发现,在 920~1 075 nm 的数据噪声较大,因此仅对 325~920 nm 的光谱数据进行处理。取每一树种冠层的平均光谱值,输出为文本文件,导入 EXCEL 2003 进行分析。

2.2 导数光谱的计算

研究表明,导数变换有利于压缩低频背景光谱(如土壤)对目标光谱的影响^[7,14-16]。而光谱的反射率经对数变换后,不仅能增强可见光区的光谱差异,而且趋向于减少因光照条件变化引起的影响^[9]。因此,相对于原始光谱,用变换后的光谱进行研究分析,能取得更精确的分析效果。为了使各树种冠层的光谱变化特征能被较准确地反映出来,本研究采用一阶导数和二阶导数 2 种方法对不同树种的冠层光谱特征进行分析,其公式分别为:

一阶导数光谱表达式:

$$\rho'(\lambda_i) = \frac{\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})}{2\Delta\lambda}; \quad (1)$$

二阶导数光谱表达式:

$$\rho''(\lambda_i) = \frac{\rho(\lambda_{i+2}) - 2\rho(\lambda_i) + \rho(\lambda_{i-2})}{4(\Delta\lambda)^2}. \quad (2)$$

式中: $\rho'(\lambda_i)$ 为 i 波段的一阶导数光谱值, λ_i 为波段 i 的波长值, $\rho(\lambda_{i+1})$ 为波长 λ_{i+1} 的反射率, $\rho(\lambda_{i-1})$ 为波长 λ_{i-1} 的反射率, $\Delta\lambda$ 为波长 λ_{i-1} 到 λ_i 的间隔, $\rho''(\lambda_i)$ 为 i 波段的二阶导数光谱值, $\rho(\lambda_{i+2})$ 为波长 λ_{i+2} 的反射率, $\rho(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的反射率, $\rho(\lambda_{i-2})$ 为波长

λ_{i-2} 的反射率。

2.3 红边特征的分析

在近红外波段(680~750 nm),植被的一般光谱曲线会在此形成一个反射陡坡,称为“红边”。植被“红边”,是植被具有诊断性的光谱特征,其位置、高度和斜率因植被的不同及同一植被的生长状况而存在差异^[16]。植被光谱的红边参数主要有:红边位置 λ_r ,即红光范围(680~750 nm)内一阶导数光谱最大值所对应的波长(nm)^[17];红边斜率 D_r ,即红光范围内一阶导数光谱的最大值,红边斜率主要与植被覆盖度或叶面积指数有关,覆盖度越高,叶绿素含量越高,红边的斜率越大;红边面积 SD_r ,即红光范围内一阶导数光谱所包围的面积。

2.4 不同树种冠层光谱曲线频谱特征的分析

频谱作为物质的能量特征之一,与波谱、能谱、重力、磁力等特征一样,都是用来区别物体属性的重要依据^[11,13]。为深入研究各个树种的光谱曲线差异,故分析各光谱曲线的频谱特征。由于高光谱数据离散性的特征,本研究采用离散傅里叶变换(DFT)分析^[18]。光谱曲线以相同间隔采样,间隔为 1 nm,光谱区间为[325 nm,920 nm],采样信号长度为 596。设一维离散信号,DFT 可以定义为:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-i\frac{2\pi}{N}nk}; \quad (3)$$

$$u = \frac{1}{N}k, i = \sqrt{-1}; \quad (4)$$

$$|F(k)| = \sqrt{R^2(k) + I^2(k)}; \quad (5)$$

$$P(k) = R^2(k) + I^2(k); \quad (6)$$

$$F_{\text{phase}} = a \tan(I(k)/R(k)). \quad (7)$$

式中: $|F(k)|$ 、 $P(k)$ 、 F_{phase} 分别是频谱幅度谱、能量谱和相位谱; n 为离散采样点; N 为离散采样数据长度; $f(n)$ 是采样点对应的采样数据值,即冠层光谱反射率值; k 是 DFT 变换的序号; u 为原始光谱频率; $R(k)$ 、 $I(k)$ 分别是 $F(k)$ 的实部和虚部。

本研究运用能量累计分布函数 $p_f(n)$ 分析 5 个树种冠层光谱的频谱能量分布,公式定义为:

$$p_f(n) = \frac{\sum_{i=0}^n M_i}{\sum_{i=0}^N M_i} \times 100\%. \quad (8)$$

式中: M_i 为第 i 次谐波的能量谱值,即 $|F(i)|$; n 为第 n 次谐波; N 为最大谐波次数。

本研究还应用 Matlab 软件分析了 5 个树种冠层光谱的频谱分布特征。

3 结果与分析

3.1 不同树种冠层的导数光谱特征和红边特征

3.1.1 导数光谱 从图 1 可以看出,各个树种冠层光谱曲线的走向趋势大体相同,具有植被的一般光谱曲线特征。光谱曲线上存在“蓝谷”和“红谷”,即叶绿素强烈吸收的蓝光吸收带和红光吸收带,位于可见光波段 490 和 670 nm 附近,反射率一般为 0.03~0.09 和 0.04~0.11;其次,在蓝谷与红谷之间出现一个反射峰,被称为“绿峰”,这一波段对绿光的吸收弱,峰顶位于 550 nm 附近,反射率为 0.09~

0.17;在近红外波段,形成一个反射陡坡,称为“红边”,位于 680~750 nm 光谱区,其光谱反射值随波长的增加而急剧升高;波长 780~920 nm 是一个相对平坦的较高反射率区域,此区域主要由植被的细胞构造所决定。此外,5 个树种冠层光谱在可见光和近红外波段存在明显的差别,在波长 480~700 nm 的可见光波段,苦槠栲和毛竹的冠层反射率明显高于其他树种;在波长 720~920 nm 的近红外波段,苦槠栲、木荷、毛竹的冠层反射率明显高于马尾松和杉木,并且苦槠栲>木荷>毛竹。

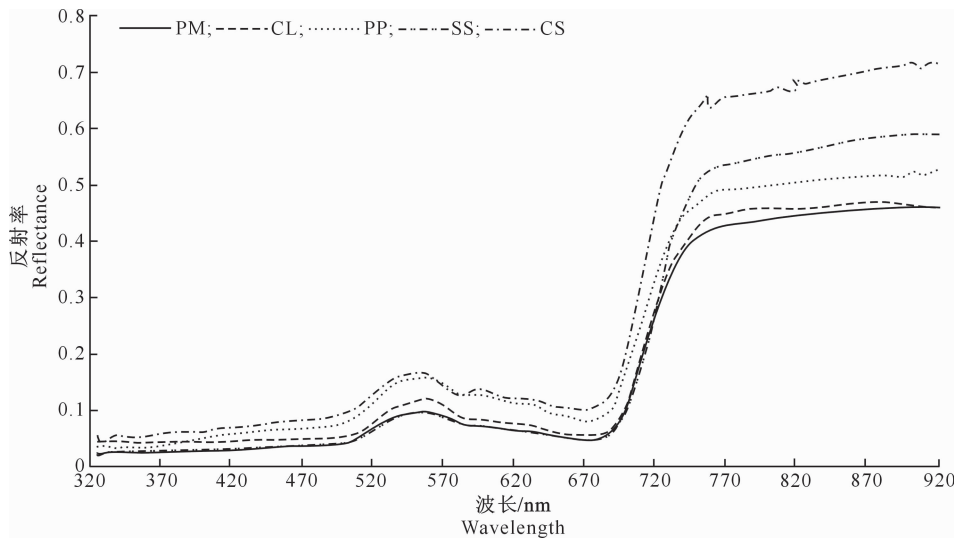


图 1 福建将乐林场 5 个树种的冠层光谱曲线

PM. 马尾松;CL. 杉木;PP. 毛竹;SS. 木荷;CS. 苦槠栲。下同

Fig. 1 Canopy spectral curves of five tree species in Jiangle forest farm in Fujian

PM. *Pinus massoniana*; CL. *Cunninghamia lanceolata*; PP. *Phyllostachys pubescens*;

SS. *Schima superba*; CS. *Castanopsis sclerophylla*. The same below

对各个树种的冠层光谱进行导数光谱分析,得出其一阶导数光谱曲线(图 2-A)和二阶导数光谱曲线(图 2-B)。从图 2 可以看出,导数光谱运算可以强化植被的红边特征。红边的位置(REP)是绿色植物冠层光谱在波长为 680~750 nm 变化率最快的点,也是一阶导数光谱在该区间的拐点^[19],是由植被红光波段的强烈吸收和近红外波段的强烈反射形成的。多项研究证实,红边的位置对于叶绿素 a 和 b 的浓度、植被叶细胞结构变化很灵敏,也与植被冠层结构密切相关,但对噪声不敏感^[19]。红边是航空和航天遥感调查植物状态的理想工具,红边的位置和幅度被广泛应用于绿色植物生物量、产量、叶面积指数、光合作用能力及叶绿素含量的计算^[19]。

由图 2-A 还可以看出,植被在可见光 510 和 570 nm 波段附近存在吸收谷的特征被突出显示出

来,且一阶和二阶导数光谱均突出显示了 5 个树种冠层光谱的红边特征。冠层反射率的一阶导数光谱可见光区的吸收谷,主要由绿色植物的叶绿素吸收蓝光所致,其中苦槠栲的一阶导数光谱明显高于其他 4 个树种。在红边区域,马尾松和杉木的导数光谱与毛竹、木荷和苦槠栲的导数光谱有明显区别,而马尾松与杉木间的导数光谱则较难区分。

3.1.2 红边特征 由图 1 可知,不同树种在符合植被一般光谱特征的同时,其光谱反射率曲线之间又存在着明显的差异,这与植被类型、叶片形状、叶绿素和水分含量及叶片结构等因素有关。由图 1 还可看出,5 个树种的“红边”高度和斜率存在差异,苦槠栲和木荷冠层光谱的红边斜率明显高于其他树种,可以在地物识别和分类时加以利用。

由图 3 可知,5 个树种冠层光谱的红边曲线形

状存在双峰或三峰现象。不同树种的红边光谱存在明显差异,其中马尾松和杉木呈现双峰特征,其叶面积指数小,且受土壤背景的影响其“双峰”现象并不明显;毛竹和木荷也呈双峰特征,其叶面积指数相对

较大,其“双峰”现象相对比较明显;而苦槠栲呈现三峰现象,其生物量较大,叶面积指数也大,受土壤背景的影响减少,因此“三峰”现象比较明显,冠层红边光谱波动较大。

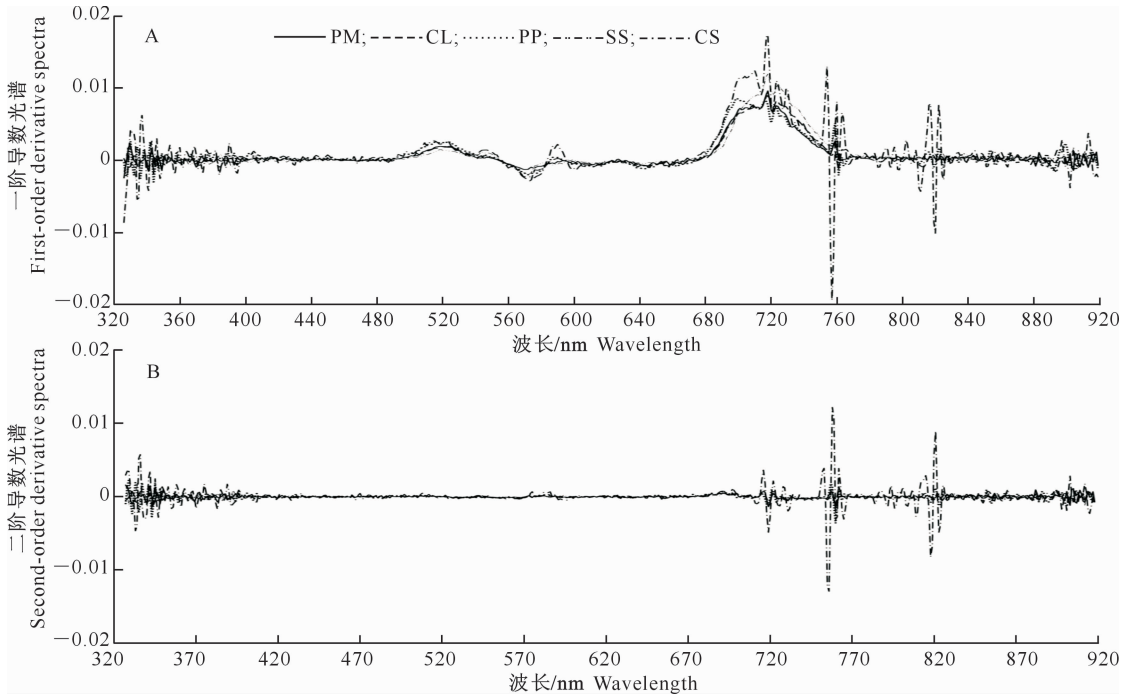


图 2 福建将乐林场 5 个树种冠层的一阶导数光谱(A)和二阶导数光谱(B)
Fig. 2 First-order derivative (A) and second-order derivative curves (B) of canopy spectra of five tree species in Jiangle forest farm in Fujian

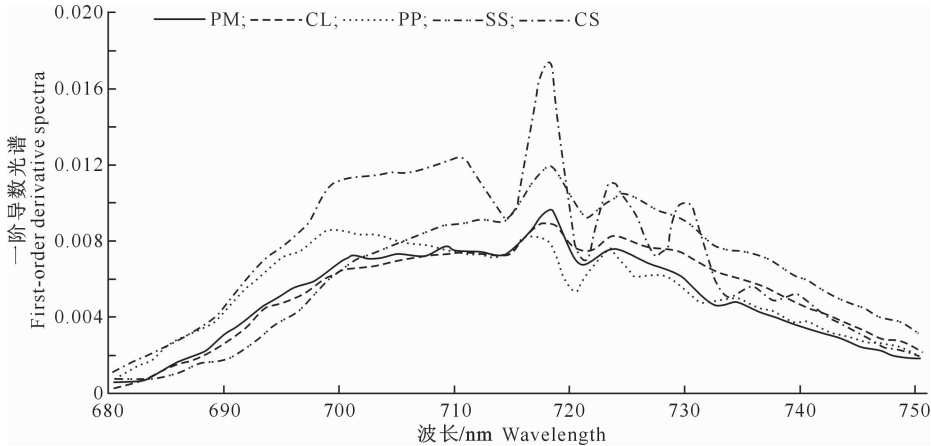


图 3 福建将乐林场 5 个树种冠层红边处的一阶导数光谱
Fig. 3 First-order derivative curves of red edge position in canopy spectra of five tree species in Jiangle forest farm in Fujian

由表 1 可知,5 个树种红边参数存在差异。马尾松、杉木、木荷和苦槠栲的红边位置在 718 nm 处,而毛竹的红边位置在 699 nm 处,表现为毛竹<马尾松=杉木=木荷=苦槠栲;而不同树种红边斜率表现为毛竹<杉木=马尾松<木荷<苦槠栲;红边面

积表现为马尾松<杉木<毛竹<木荷<苦槠栲。木荷和苦槠栲的红边斜率和红边面积均明显高于其他 3 个树种,原因可能是因为木荷与次生的苦槠栲生物量、叶绿素含量较高和叶面积指数较大。总体而言,木荷和苦槠栲的光谱曲线“红边”斜率较大,明显

高于马尾松、杉木和毛竹;马尾松、杉木和毛竹的光谱曲线红边斜率相近,区别不大,但毛竹的红边位置明显低于其他几种树种,可以运用 5 个树种的这些红边特征进行树种区分。

表 1 福建将乐林场 5 个树种冠层光谱曲线的红边参数

树种 Tree species	红边位置 λ_r /m Red edge position	红边斜率 D_r Red edge slope	红边面积 SD_r Red edge area
马尾松 <i>Pinus massoniana</i> m	718	0.009	0.358
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	718	0.009	0.379
毛竹 <i>Phyllostachys pubescens</i>	699	0.008	0.386
木荷 <i>Schima superba</i>	718	0.011	0.446
苦槠栲 <i>Castanopsis sclerophylla</i>	718	0.017	0.525

3.2 不同树种冠层光谱曲线的频谱特征

本研究利用序列长度的离散傅里叶变换(DFT),将冠层光谱的反射曲线转化到频率域进行频谱特征分析。利用频谱能量累计分布函数(公式(8)),分析出 5 个树种频谱能量累计大于 99% 的频率位置,结果见表 2。由表 2 可以看出,马尾松、木荷和苦槠栲的谐波次数大于 12 时,其能量累计达到

99%;而杉木和毛竹的谐波次数分别大于 10 和 11 时,能量累计便高于 99%。可见所有树种前 12 次谐波分量便包含了冠层光谱曲线几乎所有的能量,可以很好地反映并重构原始光谱曲线。因此采用离散傅里叶变换能有效去除高频部分的噪音,运用低次谐波可以重构原始光谱曲线。

表 2 福建将乐林场 5 个树种频谱能量累计大于 99% 的频率位置及相应值

树种 Tree species	能量分布 Energy distribution	频率位置 Frequency location
马尾松 <i>Pinus massoniana</i> m	0.990 690	12
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.990 675	10
毛竹 <i>Phyllostachys pubescens</i>	0.990 634	11
木荷 <i>Schima superba</i>	0.990 486	12
苦槠栲 <i>Castanopsis sclerophylla</i>	0.991 062	12

研究应用 Matlab 软件分析冠层光谱的频谱分布特征,结果见图 4,图 4 显示了冠层光谱在频域上的前 12 次谐波幅度谱。

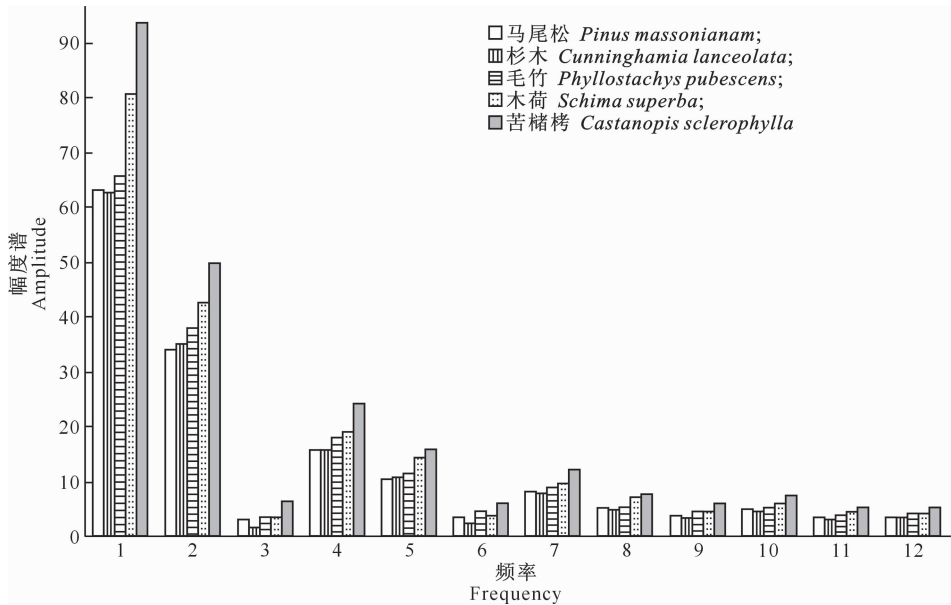


图 4 福建将乐林场 5 个树种冠层光谱曲线的频谱分布

Fig. 4 Distribution of frequency spectrum of canopy spectra curves of five tree species in Jiangle forest farm in Fujian

从图 4 可以看出,不同树种光谱曲线频谱的高低频分布有一定的相似性,低频信息能量高,高频信息能量低,频谱能量大部分集中在低频区,随着频率的增加,频谱能量下降很快。同时,图 4 清晰地反映了冠层光谱曲线起伏的剧烈程度,可以看出各个树种冠层在低频区域的幅度谱具有可分性,尤其是前 4 次谐波,能够区分 5 个树种在频率域的差别。1 次谐波幅度谱中,苦槠栲和木荷的幅度谱明显高于其他 3 个树种,因而可以明显区分出来,这与图 1 中苦槠栲和木荷的反射光谱曲线较其他树种冠层光谱起伏大相对应,尤为明显的是苦槠栲;而马尾松和杉木的冠层光谱曲线起伏变化比较相似,在频率域中也很难区分;在 3 次谐波幅度谱中,杉木的冠层光谱幅度谱明显小于其他树种,具有明显的可分性。随着频率的增大,幅度谱的变化趋于相似,可分性不强。

4 结 论

1)对福建将乐林场 5 个树种冠层光谱的导数光谱和红边特征参数的分析可以看出,一阶导数光谱对不同树种有很好的区分作用,将植被在可见光波段附近吸收谷的特征和在近红外波段的红边特征突出地显示出来;在红边位置,马尾松、杉木、毛竹和木荷呈现双峰现象,而苦槠栲呈现三峰现象,且三峰现象比较明显,其冠层红边光谱波动较大。5 个树种的红边斜率、红边面积和红边位置存在差别;木荷和苦槠栲的冠层光谱曲线红边斜率较大,明显高于马尾松、杉木和毛竹;毛竹的红边位置明显低于其他 4 个树种,可以区分出来;5 个树种的红边面积与红边斜率有相似的变化趋势。

2)从各冠层光谱曲线在频域的分析结果可以看出,低频信息能量高,高频信息能量低,利用前 12 次谐波便可以很好地反映并重构原始光谱曲线。从 1 次谐波幅度谱的分析结果便可区分出槠栲和木荷,而杉木在 3 次谐波幅度谱中具有明显的可分性;马尾松和杉木的冠层光谱曲线起伏变化比较相似,在幅度谱中较难区分。

本研究还有许多方面可以继续优化和深入,如利用宽波段的光谱仪获取短波红外光谱数据,分析短波红外的波段特征;根据各个树种类型的物候特征获取不同时相的光谱数据,分析时相特征,为树种级别的分类提供最佳的识别特征。

[参考文献]

[1] Goodenough D G, Bhogal A S, Dyk A, et al. Monitoring forests

with Hyperion and ALI [J]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002, 2(2): 882-885.

- [2] Aspinall R J. Use of logistic regression for validation of maps of the spatial distribution of vegetation species derived from high spatial resolution hyperspectral remotely sensed data [J]. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2/3): 301-312.
- [3] Martin M E, Newman S D, Aber J D, et al. Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(3): 249-254.
- [4] Ghiyamat A, Shafri H Z M, Mahdiraji G A, et al. Airborne hyperspectral discrimination of tree species with different ages using discrete wavelet transform [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(1): 318-342.
- [5] 朱 炜, 李 东, 沈 飞, 等. 高光谱遥感森林树种分类研究进展 [J]. *浙江林业科技*, 2013, 33(2): 84-90.
- Zhu W, Li D, Shen F, et al. Review on forest identification by hyperspectral remote sensing [J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2013, 33(2): 84-90. (in Chinese)
- [6] 张 凯, 郭 锐, 王润元, 等. 甘肃省两种主要草地类型的光谱反射特征比较 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(13): 142-148.
- Zhang K, Guo N, Wang R Y, et al. Comparison of spectral reflectance characteristics of two main grassland types in Gansu Province [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(13): 142-148. (in Chinese)
- [7] 杨红飞, 李建龙, 穆少杰, 等. 新疆三种主要草地植被类型的高光谱反射特征研究 [J]. *草业学报*, 2012, 21(6): 258-266.
- Yang H F, Li J L, Mu S J, et al. Analysis of hyperspectral reflectance characteristics of three main grassland types in Xinjiang [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(6): 258-266. (in Chinese)
- [8] 徐光彩, 庞 勇, 李增元, 等. 小兴安岭主要树种冠层光谱季变化研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(12): 3303-3307.
- Xu G C, Pang Y, Li Z Y, et al. The changes of forest canopy spectral reflectance with seasons in Xiaoxing'anling [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(12): 3303-3307. (in Chinese)
- [9] 刘秀英, 林 辉, 熊建利, 等. 森林树种高光谱波段的选择 [J]. *遥感信息*, 2005(4): 41-44, 64.
- Liu X Y, Lin H, Xiong J L, et al. Band selection from hyperspectral data of forestry species [J]. *Remote Sensing Information*, 2005(4): 41-44, 64. (in Chinese)
- [10] 宫 鹏, 浦瑞良, 郁 彬. 不同季相针叶树种高光谱数据识别分析 [J]. *遥感学报*, 1998, 2(3): 211-217.
- Gong P, Pu R L, Yu B. Conifer species recognition with seasonal hyperspectral data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(3): 211-217. (in Chinese)
- [11] 李德仁, 张继贤. 影象纹理分析的现状和方法: 一 [J]. *武测科技*, 1993(3): 30-37.
- Li D R, Zhang J X. The present situation and method of image texture analysis: I [J]. *Journal of Geomatics*, 1993(3): 30-37. (in Chinese)

(下转第 96 页)

1991,10(3):281-285.

Xu Y M. Specific gravity variation in *Pinus tabulaeformis* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1991, 10 (3): 281-285. (in Chinese)

[21] 夏 炎,张 伟,岳 孔. 速生杨木材基本密度变异规律及其与生长性状的关系 [J]. 东北林业大学学报,2010,38(8):14-17.

Xia Y,Zhang W,Yue K. Variation patterns and relationship between density and growth properties of fast-growing Poplar [J]. Journal of Northeast Forestry University,2010,38(8): 14-17. (in Chinese)

[22] 渡道治人. 木材应用基础 [M]. 张勤丽,乌竹香,王国超,等译. 上海:上海科学技术出版社,1986.

Du D Z R. The application base of wood [M]. Translated by Zhang Q L,Wu Z X,Wang G C,et al. Shanghai:Shanghai Science and Technology Publishing House,1986. (in Chinese)

[23] Callister A N. How dense is my blue gum? Prediction of whole-tree basic density of *Eucalyptus globulus* [J]. New Forest, 2010,40:153-164. DOI:10. 1007/s 11056-010- 9190-3.

[24] Raymond C A,Macdonald A C. Where to shoot your pilodyn: Within tree variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania [J]. New Forest,1998, 15:205-221.

[25] 李大纲. 杨树新无性系木材物理力学性质的研究 [J]. 江苏林业科技,2001,28(4):10-13.

Li D G. Study on physical and mechanical properties of new clones of *Poplar* [J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology,2001,28(4):10-13. (in Chinese)

[26] 潘 彪,翟胜丞,蔡家斌,等. 鞭茜草木的木材物理力学性质 [J]. 林业科技开发,2009,23(5):55-57.

Pan B,Zhai S C,Cai J B,et al. A Study on the physical and mechanical properties of *Mastixiodendron pachyclado* [J]. China Forestry Science and Technology,2009,23(5):55-57. (in Chinese)

[27] 中国林业科学院木材工业研究所. 中国主要树种的物理力学性质 [M]. 北京:中国林业出版社,1982.

China Academy of Forestry Sciences Research Institute of Wood Industry. Physical and mechanical properties of China's major tree species [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 1982. (in Chinese)

.....

(上接第 89 页)

[12] 童庆禧,唐 川,励惠国. 腾冲航空遥感试验推陈出新 [J]. 地球信息科学,1999,1(1):67-75.

Tong Q X,Tang C,Li H G. A creative action:The second experiment of Tengchong aerial remote sensing [J]. Geo-information Science,1999,1(1):67-75. (in Chinese)

[13] 王 珂,顾行发,余 涛,等. 基于频谱相似性的高光谱遥感图像分类方法 [J]. 中国科学:E 辑,2013,43(4):407-416.

Wang H,Gu X F,Yu T,et al. Hyperspectral remote sensing image classification method based on spectrum similarity [J]. Science China:E,2013,43(4):407-416. (in Chinese)

[14] 张良培,郑兰芬,童 禧. 利用高光谱对生物变量进行估计 [J]. 遥感学报,1997,1(2):111-114.

Zhang L P,Zheng L F,Tong Q X. The estimation of vegetation variables based on high resolution spectra [J]. Journal of Remote Sensing,1997,1(2):111-114. (in Chinese)

[15] 张娟娟,田永超,朱 艳,等. 不同类型土壤的光谱特征及其有机质含量预测 [J]. 中国农业科学,2009,42(9):3154-3163.

Zhang J J,Tian Y C,Zhu Y,et al. Spectral characteristics and estimation of organic matter contents of different soil types [J]. Scientia Agricultura Sinica,2009,42(9):3154-3163. (in Chinese)

[16] 范文义,杜华强,刘 哲. 科尔沁沙地地物光谱数据分析 [J]. 东北林业大学学报,2004,32(2):45-48.

Fan W Y,Du H Q,Liu Z. Spectral data analysis of ground objects in Kerqin desertification areas [J]. Journal of Northeast Forestry University,2004,32(2):45-48. (in Chinese)

[17] Horler D N H,Dockray M,Barber J. The red edge of plant leaf reflectance [J]. International Journal of Remote Sensing, 1983,4(2):273-88.

[18] Moody A,Johnson D M. Land-surface phenologies from AVHRR using the discrete fourier transform [J]. Remote Sensing of Environment,2001,75(3):305-323.

[19] 邹红玉,郑红平. 浅述植被“红边”效应及其定量分析方法 [J]. 遥感信息,2010(4):112-116.

Zou H Y,Zheng H P. The effect and method of quantitative analysis of “Red Edge” of vegetation [J]. Remote Sensing Information,2010(4):112-116. (in Chinese)