

整合机载 CASI 和 SASI 高光谱数据的 北方森林树种填图研究

刘丽娟^{1,2,3}, 庞 勇², 范文义¹, 李增元², 李明泽¹

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091;
3. 杭州师范大学遥感与地球科学研究院, 浙江 杭州 310012)

摘要:将机载 CASI 和 SASI 高光谱数据整合,既可以获取可见光—近红外—短波红外区间连续的窄波段地物光谱,又能得到很高的空间分辨率,为高覆盖度的森林树种识别又增加了一种新方法。但是由于两种传感器的光谱响应不同,接收到的辐射值差异较大,如何将两种数据有效整合目前仍是一个难题。CASI 和 SASI 覆盖波段不同,受大气影响程度也不同,根据植被反射和吸收光谱特性,首先用基于统计模型的经验线性法和基于辐射传输的 MODTRAN 模型分别对 CASI 和 SASI 大气校正,复原地物光谱真实的反射率。然后去除反射率光谱包络线,用 Savitzky-Golay 滤波函数对归一化后的光谱曲线进行平滑,以去除噪声及异常点,实现 CASI 和 SASI 数据(CASI+SASI)的整合。与实测光谱曲线对比发现,整合后的 CASI+SASI 光谱曲线与实测光谱曲线匹配度较高,并且比单一传感器的光谱信息更丰富,有利于不同树种的区分识别。最后应用光谱微分及曲线匹配技术,选取 SVM 分类器实现了研究区的树种填图,总体精度达到 86.21%,Kappa 系数为 0.8297,该方法有效可行,为后续的相关研究提供了参考。

关 键 词:机载;高光谱;CASI;SASI;整合;包络线去除;Savitzky-Golay 滤波

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2011)02-0129-08

1 引 言

高光谱成像光谱仪为每个像元提供数十至数百个窄波段,能产生一条完整而连续的光谱曲线^[1]。超高的光谱分辨率使得高光谱遥感技术能够区分出具有诊断性光谱特征的地表物质,探测到许多宽波段遥感不可探测的信息。因此高光谱在生态、地质、大气、海洋、冰雪、灾害环境监测^[2-4]等很多领域都突显优势。

不同植被的细胞组织结构、叶绿素和液态水含量等不同,其光谱曲线特征也不同。近年来,利用植被独特的光谱曲线特征(“峰和谷”),高光谱数据在林业方面有一个重要的应用就是树种分类研究^[5]。Buddenbaum 等^[6]对 HyMap 数据,选用光谱角填图及最大似然两种分类方法,对德国西部的针叶林区

进行树种及林龄的划分;Goodenough 等^[7]利用 Hyperion、ALI 和 ETM+ 3 种遥感数据对加拿大维多利亚地区的 5 种森林类型进行了分类;宫鹏等^[8]利用高分辨率光谱仪实地测得光谱数据识别美国加州的 6 种主要针叶树种,采用相邻窄波段逐步加宽的办法,测试不同波段宽度对树种识别精度的影响。但是目前应用的高光谱数据多是星载传感器获取的,受大气和边缘效应影响较大,并且波谱和空间分辨率相对较低,难以实现对地物信息的精确提取。

机载平台高光谱传感器的出现,使得对局部小区域的精细研究成为可能。商用小型机载 CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager)/SASI (Shortwave infrared Airborne Spectrographic Imager)成像光谱仪采用推扫式成像方式,在可见光—短波红外波段成像。它有两种工作模式:空间和

收稿日期:2010-12-10;修订日期:2011-03-09

基金项目:国家 973 计划项目(2007CB714404),国家 863 计划项目(2009AA12Z142),国家林业局行业公益课题(200704019),教育部博士点学科专项基金(20070225003)资助。

作者简介:刘丽娟(1978—),女,江苏邳州人,博士研究生,主要从事 3S 技术在林业中的应用。E-mail:llj7885@163.com。

通讯作者:庞勇(1976—),男,安徽太和人,副研究员,主要从事 SAR 和激光雷达对地观测机理以及森林参数反演研究。

E-mail:caf.pang@gmail.com。

光谱模式。空间模式允许用户自行编程设置感兴趣光谱段的波段宽度和波段数;而光谱模式最高可获取 288 个连续光谱波段,为地物信息提取提供了详细的光谱信息。目前国内外已经对 CASI 数据开展了一些植被方面的研究^[9],但由于 SASI 覆盖的短波红外谱段对植被区分同样有一定的指示作用,并且加入 SASI 后的光谱可以与光谱仪的测量光谱相互比较验证,因此研究 CASI 和 SASI 的整合很有意义。本文采用包络线去除及曲线平滑技术,实现 CASI 和 SASI 的有效整合,应用一阶微分变换及光谱匹配技术实现对整合后光谱训练样本的自动提取,并将整合后光谱用于研究区的树种填图。

2 数据和方法

2.1 研究区概况与数据收集

2.1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省伊春市带岭区凉水国家级自然保护区。地理位置 47°10′50″N,128°53′20″E,地处欧亚大陆东缘,海拔高度在 280~707 m 之间,为典型的低山丘陵地貌,具有明显的温带大陆性季风气候特征。年平均气温-0.3℃,年平均降水量 676 mm,年平均相对湿度 78%,无霜期 100~120 d。境内地带性土壤为山地暗棕壤,保护区森林总蓄积量 170 万 m³,区内自然资源丰富,植被群落类型复杂多样,主要保护对象是以红松(*Pinus koraiensis*)为主的温带针阔叶混交林生态系统。区内还有国家重点保护野生植物水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、黄菠萝(*Phlloendron amurense*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)等。

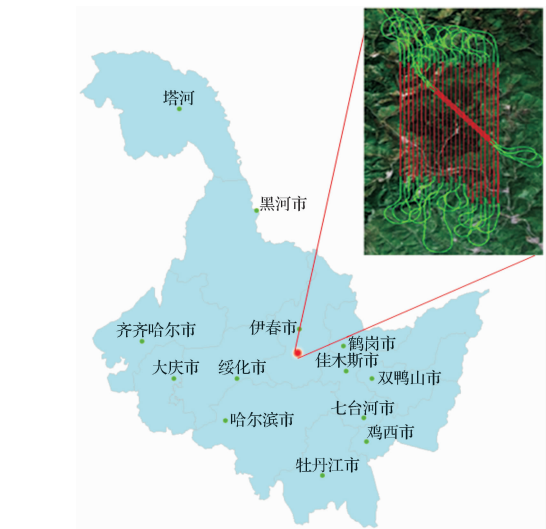


图 1 研究区位置及航线设计
Fig. 1 Study area and flight line

2.1.2 机载高光谱数据收集

2009 年 8 月 23 日,运-5 小型多用途飞机搭载高光谱传感器在黑龙江省伊春市带岭区凉水国家级自然保护区上空进行试验数据采集。飞行地速 180 km/h,总覆盖面积约为 208.8 km²,数据获取当天天气晴朗无(少)云。飞行平台搭载加拿大 IT-RES 公司引进的 CASI/SASI 航空高光谱测量系统(图 2)。主要由 CASI-1500 和 SASI-600 两个传感器、ICU 中央控制器及一系列精确几何校正和辐射校正的仪器(PAV30 三轴稳定平台、POS AV310 和 IMU 定位与惯导系统、ILS 太阳辐照度测量)等组成。航高 3.5 km,采用光谱模式获取 380~1 050 nm(CASI)和 950~2 450 nm(SASI)波长区间的高光谱影像数据,空间分辨率达到米级。具体参数见表 1。

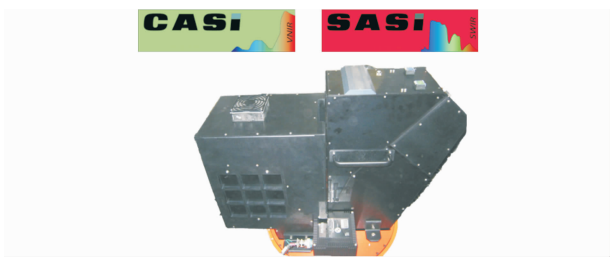


图 2 CASI/SASI 航空高光谱测量系统
Fig. 2 Airborne hyperspectral sensors of CASI/SASI

表 1 CASI/SASI 系统参数
Table 1 Parameters of CASI/SASI

	CASI-1 500	SASI-600
光谱范围/nm	380~1 050	950~2 450
波段数	144	101
空间分辨率/m	1.5	3.6
光谱分辨率/nm	2.4	7.5
总视场角/°	40	40
瞬时视场角/mrad	0.49	1.2

2.1.3 样地冠层光谱数据收集

使用 FieldSpec Pro 型光谱仪 (Analytical Spectral Devices, Inc., USA) 进行飞行同步的野外冠层光谱测量,光谱范围 350~2 500 nm,总视场角 25°。测量时,选定树冠的 5 处固定位置,光纤探头垂直向下,距冠层顶部垂直高度约 1 m。以 5 个光谱为 1 个采样间隔,每次记录 25 个光谱,取其平均值作为该树冠的光谱辐射值,数据采集前后均需进行标准白板校正,通过目标冠层与标准白板光谱辐射能量的比值获得冠层的反射率。

2.2 遥感数据处理

飞行获取的 CASI/SASI 数据除辐射定标、几何校正及正射校正外(Itres, Calgary, Canada), 还需进行大气校正。大气校正的目的是消除成像时光照和大气对地物反射率的贡献, 反演地物本身的真实反射率, 从而有利于地表特征的提取。由于机载数据是低空飞行获取的, 因此太阳的下行辐射能量衰减主要来自于 H_2O 、 O_3 、 CO_2 气体的吸收^[10]。不同植被在不同波段反射和吸收存在一定的差异(表 2), 应根据 CASI 和 SASI 的数据特点, 针对性地选择大气校正方法。在可见光谱段, 植被反射光谱受气体吸收影响很小, 光谱差异主要来自于植物体自身的细胞组织结构及色素含量, 因此可选用基于统计模型的经验线性法, 通过定标场地面实测光谱实现对 CASI 数据的反射率转换; 对于短波红外谱段的 SASI 数据, 由于其受水汽吸收影响较大, 应用目前成熟的基于辐射传输理论的 MODTRAN 模型对其进行大气校正。

表 2 影响植被反射光谱特性差异的因子

Table 2 Factors resulted in difference in vegetation reflectance spectrum

可见光—近红外 (CASI)	
350~800 nm	植物体内叶绿素和其他色素成分
800~1 000 nm	来源于植物细胞组织散射
短波红外 (SASI)	
1 000~2 500 nm	植物细胞组织内的液态水吸收
800~2 500 nm	淀粉、蛋白质、木质素和纤维素等

经验线性法^[11]要求定标场是空间上足够大, 近朗伯体、无斜坡且无植被覆盖的均匀地物, 尽量减小

双向反射影响和邻近效应。在研究区选择了一块平坦空旷的水泥场地, 铺设足够面积且与像元大小成比例的黑、白布作为定标场, 与飞行同步利用光谱仪进行定标场的地面光谱测量, 并与影像上对应区域的均值光谱配对, 实现 CASI 数据的大气校正; MODTRAN 辐射校正模型主要设置传感器类型、大气模型、水汽吸收波段、气溶胶模型等输入参数, 通过高光谱像元光谱特征来估计大气的属性, 有效去除水汽和气溶胶散射, 完成 SASI 数据的大气校正。

图 3 是对研究区植被大气校正前后的光谱比较图。可以看出, 经过大气校正, 植被光谱曲线有明显的变化: 蓝、红波段的吸收谷、绿波段的小反射峰、近红外的高反射肩(图 3(a)), 以及短波红外区间的几处水汽吸收带(图 3(b)), 这些都突出了典型的植被光谱特征。因此认为通过大气校正, CASI/SASI 数据已较好地去除了光照和大气的影响, 基本复原了地物真实的反射率。

3 结果与分析

3.1 CASI 和 SASI 数据的整合 (CASI+SASI)

由于 CASI 和 SASI 光谱响应函数的不同, 传感器接收到的辐射值也不同, 将两者整合之前, 还需要进行一系列的处理工作。包络线去除^[12](CR) 是将地物的反射和吸收等光谱特征归一化到 0~1 区间, 从而在一致的光谱背景上, 与其他光谱曲线进行特征数值比较及光谱匹配分析。由于包络线去除能够抑制噪声, 突出地物光谱的特征信息, 因此能够提高不同植被的分类识别运算效率和精度。

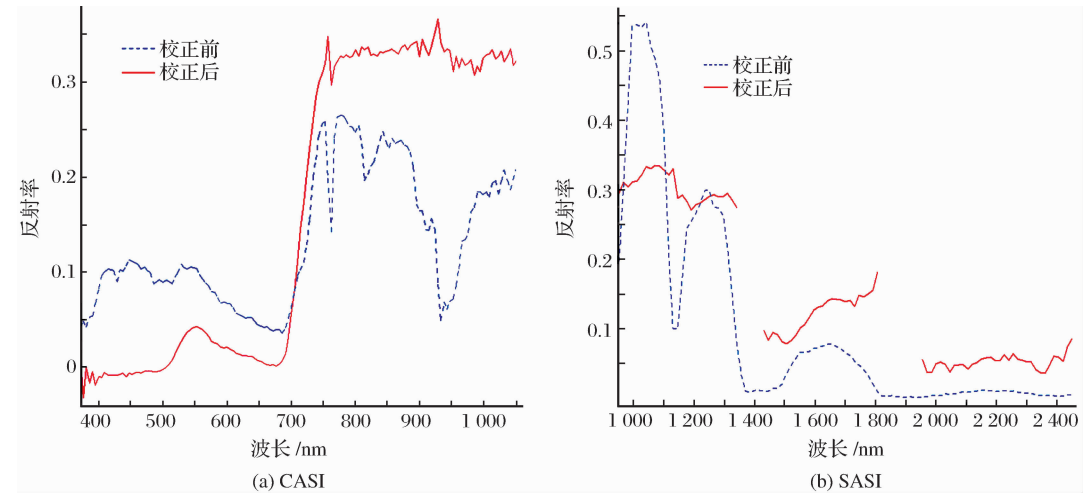


图 3 植被大气校正前后比较图

Fig. 3 Comparison of before and after atmospheric correction for vegetation

在数据处理过程中会出现某些像元光谱存在连续的锯齿噪声,或反射率突变的现象,因此本文对包络线去除后的光谱选用 Savitzky-Golay^[13] (SG) 滤波算法进行平滑操作去除噪声。Savitzky-Golay 滤波是一种最小二乘法卷积平滑技术,用一元 p 次多项式对长度为 n 的窗口邻域内各点数据拟合,多项式的系数借助最小二乘准则来确定,多项式在窗口中心点的值即为经卷积平滑处理后的值。滤波过程需不断改变窗口大小和阶数等参数,既要达到平滑去噪的效果,又不可过度平滑弱化了植被原始信息。经过多次试验比较后选定窗口长度为 7 的一元二次多项式拟合,对归一化后的光谱进行平滑。

取地面实测光谱数据,移除 1 355~1 415 nm

和 1 820~1 940 nm 水汽吸收带,以及 $>2\ 300$ nm 信噪比低的波长区段,由于实测光谱采样间隔很小 (1 nm),因此只对其进行包络线去除,并与 CASI+SASI 的曲线进行比较(图 4)。图 4(a)和 4(b)分别是研究区 5 种主要树种的 CASI+SASI 影像光谱与实测光谱曲线图。图中可以看出两种光谱曲线的总体趋势较一致,经过文中方法处理后,不同树种的光谱曲线吸收和反射特征明显,但部分波长区间存在偏移现象,这可能是实测光谱在测量时受到外界随机影响造成的;选取落叶松(图 4(c))和白桦(图 4(d))分别与实测光谱详细比较,发现波长在 1 800~1 940 nm 以及大于 2 200 nm 的实测光谱波动较大且有一定偏移量,原因可能是此区间受水汽吸

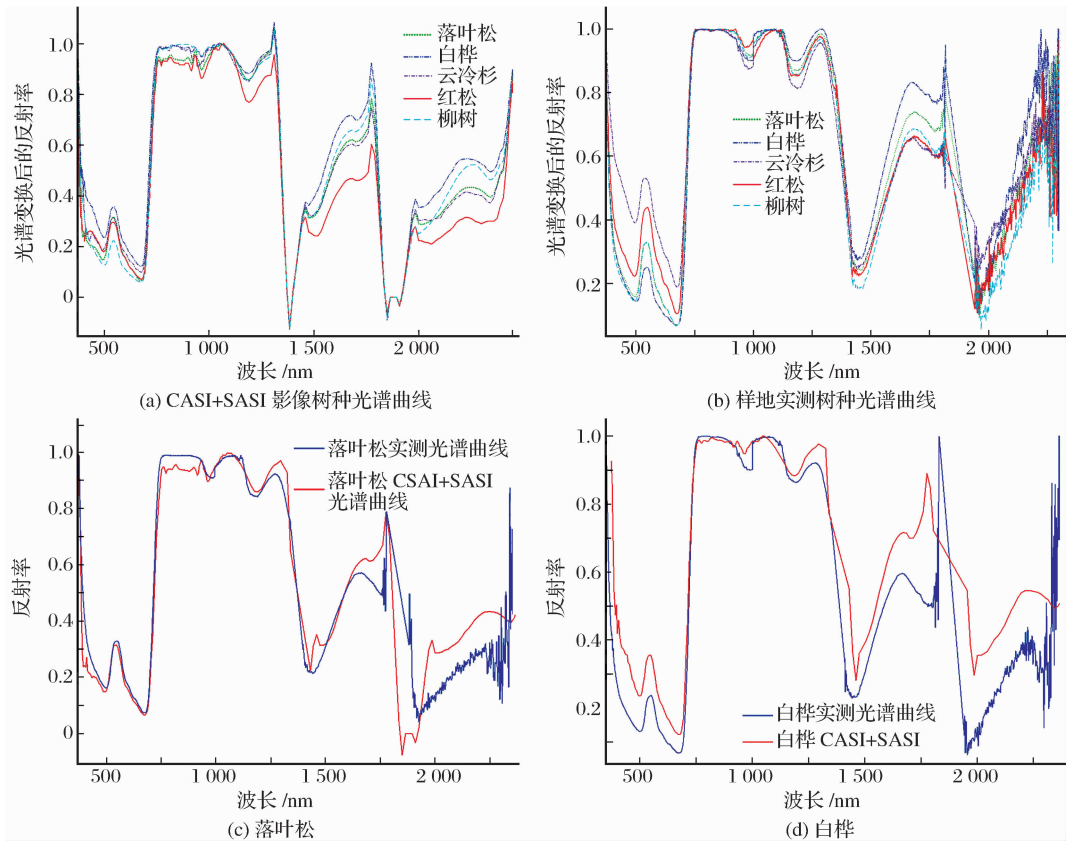


图 4 整合后树种光谱与实测光谱比较

Fig. 4 Compared field spectra with integrated spectra of tree species

收影响较大,为尽可能多地保留实测光谱信息,没有对其做过多处理,因此会有一些异常值和噪声被保留下来。对于这种情况,在进一步的特征提取和分类之前,还需对整合后光谱曲线进行光谱变换,以利于特征的提取。

3.2 CASI+SASI 一阶微分变换

由于太阳辐照度的变化、大气效应、噪声、光谱分辨率等因素的影响,地物所固有的光谱特征在影

像上会有失真,而光谱微分技术可以部分消除或减弱背景、噪声光谱对目标光谱的影响,并能在某些光谱段增大不同植被间的差异^[14];Smith 等^[15]的研究也发现,冠层覆盖度达到 20% 以上时,土壤背景对一阶微分的影响很小。一阶微分的定义为:

$$\frac{\partial y_{i,j,\lambda}}{\partial \lambda} = \lim_{\Delta \lambda \rightarrow 0} \frac{y_{i,j,\lambda+\Delta \lambda} - y_{i,j,\lambda}}{\Delta \lambda} \tag{1}$$

其中: $y_{i,j,\lambda}$ 表示高光谱影像第 i 列、第 j 行的像元在

波长 λ 处的反射率值。

尽管数据已经进行了大气校正,但仍不可避免地存在一些其他噪声,干扰训练样本的提取。本文应用光谱微分技术对 CASI 影像进行一阶微分变换

(式 1),降低噪声的同时突出树种间的差异,并在此基础上进行训练样本的自动提取工作。图 5 为植被的 CASI 原始光谱曲线和一阶微分曲线示意图。曲线一阶微分后突出了近红外区域的植被反射特性。

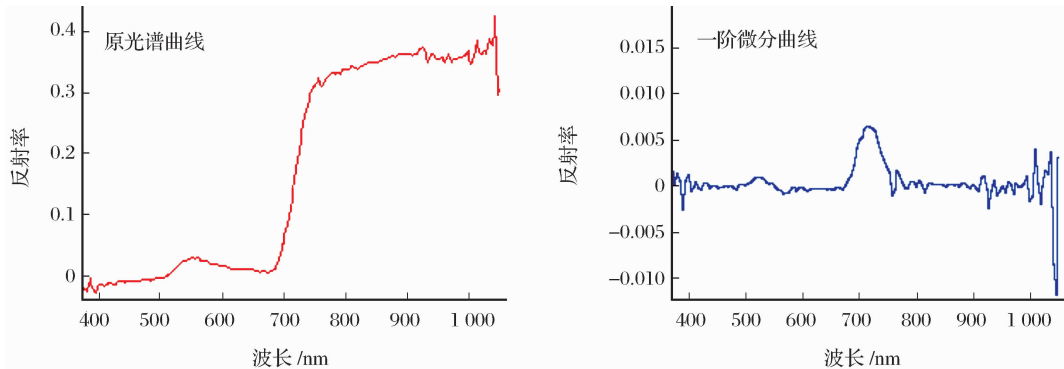


图 5 CASI 原始光谱曲线与一阶微分曲线图
Fig. 5 Figures of CASI spectral curve and first spectral derivative curve

3.3 训练样本自动提取

计算影像光谱与参考光谱间的相关系数作为特征光谱段两光谱相似度的测定指标。相关系数越大,说明曲线间匹配度越高,是相同树种的可能性越大。

$$R_{xy} = \frac{\delta_{xy}^2}{\delta_{xx}\delta_{yy}}$$
$$= \frac{\sum_k (x_k - \bar{x}_k)(y_k - \bar{y}_k)}{\sqrt{\sum_k (x_k - \bar{x}_k)^2} \sqrt{\sum_k (y_k - \bar{y}_k)^2}} \quad (2)$$

其中: R_{xy} 为相关系数, δ_{xy} 为协方差, δ_{xx} 、 δ_{yy} 为标准差。

随机抽取 60% 的样地实测点,提取各树种的均值光谱曲线作为参考光谱曲线,逐像元计算影像一阶微分曲线与参考光谱曲线的相关系数(式 2)。健康植被由于叶绿素等色素含量不同,在可见光波段有不同的吸收和反射特性;而在近红外波段,由于叶片内部的细胞结构不同,细胞壁和细胞空隙间折射率也不同,多重反射形成了近红外的高反射特性;另外,不同树种在短波红外波段也会呈现不同的水汽吸收特性。因此,对全波长区间进行树种的区分并没有明显的帮助,反而会因为过大的区间而累加噪声,造成训练样本的误判,需要进行特征区间的选取。

通过对整合后不同树种一阶微分曲线的比较,最终选定一阶微分后的光谱曲线特征差异大的区间(图 6): 462 ~ 590 nm、676 ~ 776 nm、1 047 ~ 1 355 nm、1 760 ~ 1 820 nm、1 895 ~ 2 030 nm 与参考光谱匹配来选取训练样本。由于实测光谱在大于 1 200 nm 的波长区间受水汽吸收影响很大,经过一

阶微分转换后仍然很难分离信号和噪声,但是从影像光谱来看,不同树种在水汽吸收带有不同的吸收深度,即水汽吸收带附近光谱对树种识别确实有一定的贡献。因此仅有实测光谱作为参考光谱是不够的,本文还选择了部分地面实测点,从 CASI+SASI 影像上提取均值光谱作为参考光谱,并计算影像一阶微分曲线与参考波谱曲线的相关系数,参与训练样本的选取。

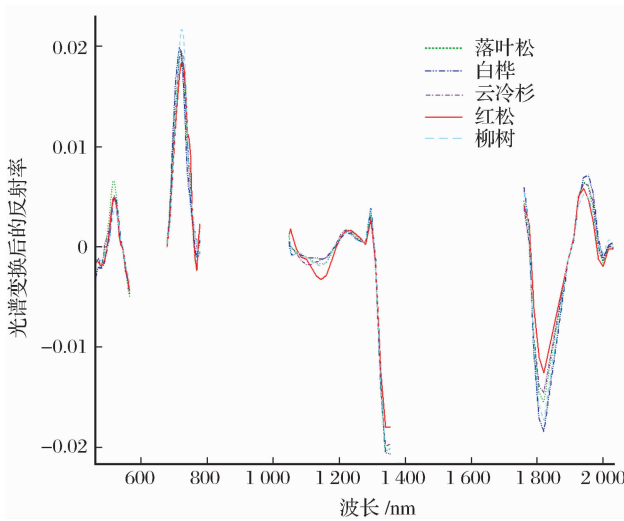


图 6 CASI+SASI 各树种一阶微分特征区间选取
Fig. 6 Feature selection of tree species after first spectral derivative for CASI+SASI curve

3.4 分类及精度评价

3.4.1 支持向量机 SVM (Support Vector Machine) 分类器

支持向量机适合于解决本质上非线性的分类、

回归和密度函数估计等问题。它的理论最初来源于数据分类问题的处理,要寻找一个满足要求的分割平面,使训练集中的点距离该平面尽可能远。

(1) 线性可分:

设线性可分样本集 $(x_i, y_i), i = 1, \cdots, n, x \in R^d, y \in \{+1, -1\}$, d 维空间中的线性判别函数: $g(x) = wx + b$, 分类面方程为:

$$\frac{1}{2} \|w\|^2 + C(\sum_{i=1}^n \xi_i) C > 0 \tag{3}$$

对其归一化,使得所有样本都满足 $|g(x)| \geq 1$ 。因此,满足式(3)且使 $\|w\|^2$ 最小的分类面就是最优分类面。

(2) 线性不可分:增加一个松弛项 $\xi_i \geq 0$, 成为:

$$y_i[wx_i + b] - 1 + \xi_i \geq 0, i = 1, \cdots, n \tag{4}$$

将目标改为求 $\frac{1}{2} \|w\|^2 + C(\sum_{i=1}^n \xi_i)$ 最小,即折衷考虑最少错分样本和最大分类间隔,得到广义最优分类面。在最优分类面中采用适当的核函数 $K(x_i, x_j)$ (满足 Mercer 条件^[16]), 即可实现某一非线性变换后的线性变换,且不增加计算复杂度。相应分类函数为:

$$f(x) = \text{sgn}\{\sum_{i=1}^k a_i^* y_i K(x_i \cdot x) + b^*\} \tag{5}$$

其中: a^*, b^* 为确定最优划分超平面的参数, $(x_i \cdot x)$ 为两个向量的点积。

SVM 是专门针对小样本训练区分类的方法,能够弥补传统分类方法如最大似然法在高维、多源等大数据量情况下病态分类的不足。因此本文应用基于小样本的 SVM 分类器对研究区进行树种识别分类。

3.4.2 分类结果及树种填图

本文针对机载高光谱 CASI 和 SASI 数据提出了包络线去除、滤波的光谱整合方法,并通过光谱一阶微分变换和特征区间光谱匹配技术,提取训练样本,选取优势阔叶树种白桦、柳树、针叶树种落叶松、红松、云冷杉以及水体、道路、房屋和草地作为分类对象,支持向量机法对研究区进行分类试验。

分类结果建立混淆矩阵,统计各地类的分类精度。分类精度的评价指标选取总体精度和 Kappa 系数表示。总体精度表示对每一个随机样本,所分类的结果与地面对应区域的实际类型相一致的概率,总体精度只用到了位于对角线上的像元数量;而 Kappa 系数法是另一种离散的多元技术,考虑了混淆矩阵的所有因素,可以更客观地评价分类质

量^[10]。两指标数值越大,表明分类精度越高。经过对混淆矩阵的分析得出,本文方法分类结果总体精度达到 86.21%, Kappa 系数 0.83, 分类结果见图 7。

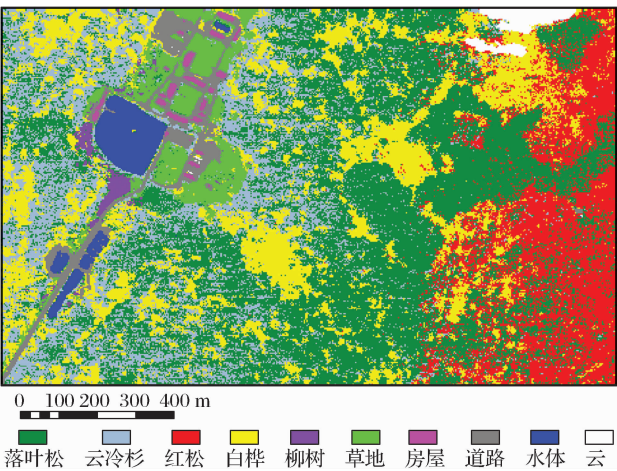


图 7 CASI+SASI 森林树种分类结果图
Fig. 7 Classification map of tree species based on CASI+SASI data

将分类结果与航片比较可以看出,各类别的分布区域和范围比较准确,房屋、水体和道路的类别边缘清晰,说明整合后的光谱与地物实测光谱匹配较好,整合方法是可靠的。比较各树种的分类精度(图 8)及错分误差和漏分误差(表 3)。研究区由于柳树较少且比较集中,光谱曲线与针叶树种相差较大,因此识别率较高,错分和漏分误差都很小;而云冷杉分布区域广,并且是喜阴树种,常生长于阴坡,在影像上光谱信息往往受到阴影的影响,漏分误差最大,达到 22.16%,降低了识别精度;错分误差最大的为红松 24.45%,这部分可能是由于研究区有部分人工中幼龄红松林,与落叶松、云冷杉等针叶树种混交生

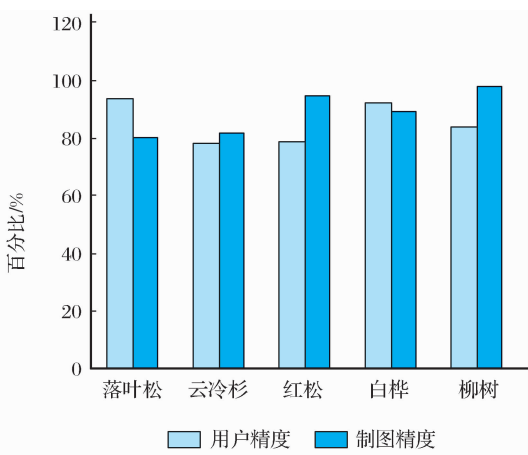


图 8 各树种分类结果精度比较
Fig. 8 Comparison of classification accuracy for different tree species

表 3 各树种错分及漏分误差

Table 3 Commission and omission errors of tree species

类别	错分误差/%	漏分误差/%
落叶松	9.06	14.63
云冷杉	12.75	22.16
红松	24.45	11.29
白桦	11.46	9.15
柳树	4.35	12.00

长,其光谱特征近似,因而造成了错分率的增大。但总体而言各树种的制图精度和用户精度都在 78% 以上,部分树种达到 90% 以上,较好地实现了研究区的森林树种填图。

4 结 语

在森林类型复杂的北方地区,如何应用新型高光谱遥感技术来提高树种的识别精度,从而更好地发挥森林生态系统服务功能,是当前的研究重点也是难点。机载高光谱传感器 CASI/SASI 可以在同一飞行平台下获取覆盖可见光—近红外—短波红外光谱段的高光谱影像,并且光谱分辨率和空间分辨率要远远优于多光谱及星载高光谱数据,具有广泛的应用前景。

但是由于两种数据源的光谱响应不同,不能直接实现波段整合,目前应用多限于单传感器数据的研究。考虑到两数据源覆盖的不同光谱段对树种分类各有贡献,本文尝试先将两传感器数据进行整合,再进行树种分类,得到以下结论并进行了相应讨论:

(1) 利用包络线去除技术将两数据源首先归一化到统一的背景下,发现两数据源在重叠区域过渡很好,移除低光谱分辨率 SASI 数据的重叠波段,实现 CASI 和 SASI 光谱的整合,并对异常值采用 Savitzky-Golay 滤波进行曲线平滑。将整合后 CASI+SASI 光谱曲线与实测光谱曲线进行比较发现,二者整体上匹配较好,但是由于实测光谱受人为及环境干扰因素较大,并且在大于 1200nm 波长后受水汽吸收影响很大,数据多噪声,因此在部分波长区间存在偏移及突变点现象。考虑到实测数据的情况,加入部分地面参考点在影像上的均值光谱作为参考光谱。

(2) 对整合后数据进行一阶微分计算,经过与参考光谱比较,选取特征差异大的 462~590 nm、676~776 nm、1 047~1 355 nm、1 760~1 820 nm、1 895~2 030 nm 区间,计算影像光谱与参考光谱间的相关系数,实现了训练样本的提取。

(3) 应用基于小样本的 SVM 分类器对研究区进行树种填图,总体精度达到 86.21%,Kappa 系数 0.8297,各树种的用户精度和制图精度也很高,均在 78% 以上,部分树种的用户精度达到 90% 以上,说明本文对 CASI/SASI 数据整合的方法是有效的,可以为后续的研究提供一些借鉴和参考。但对于实测光谱曲线在短波红外区域的数据噪声问题还需要进一步分析及研究解决方法,以实现影像光谱与实测光谱的精确匹配。

参考文献(References):

[1] Vane G,Goetz A F H. Terrestrial Imaging Spectrometry;Current Status,Future Trends[J]. Remote Sensing of Environment,1993,44:117-126.

[2] Resmini R G,Kappus M E,Aldrich W S,*et al.* Mineral Mapping with Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment (HYDICE) Sensor Data at Cuprite,Nevada,U. S. A. [J]. International Journal of Remote Sensing,1997,18(7):1553-1570.

[3] Schlapfer D,Borel C C,Keller J,*et al.* Atmospheric Precorrected Differential Absorption Technique to Retrieve Columnar Water Vapor[J]. Remote Sensing of Environment,1998,65:353-366.

[4] Sun Lin,Liu Qinhuo,Chen Liangfu,*et al.* The Application of HJ-1 Hyperspectral Imaging Radiometer to Retrieve Aerosol Optical Thickness Over Land[J]. Journal of Remote Sensing,2006,10(5):770-776. [孙林,柳钦火,陈良富,等. 环境与减灾小卫星高光谱成像仪陆地气溶胶光学厚度反演[J]. 遥感学报,2006,10(5):770-776.]

[5] Boschetti M,Boschetti L,Oliveri S,*et al.* Tree Species Mapping with Airborne Hyperspectral MIVIS Data:The Ticino Park Study Case[J]. International Journal of Remote Sensing,2007,28:1251-1261.

[6] Buddenbaum H,Schlerf M,Hill J. Classification of Coniferous Tree Species and Age Classes Using Hyperspectral Data and Geostatistical Methods[J]. International Journal of Remote Sensing,2005,26(24):5453-5465.

[7] Goodenough D G,Dyk A,Niemann K O,*et al.* Processing Hyperion and ALI for Forest Classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2003,41(6):1321-1331.

[8] Gong Peng,Pu Ruiliang,Yu bin. Conifer Species Recognition with Seasonal Hyperspectral Data [J]. Journal of Remote Sensing,1998,2(3):211-217. [宫鹏,浦瑞良,郁彬. 不同季相针叶树高光谱数据识别分析[J]. 遥感学报,1998,2(3):211-217.]

[9] Pu Ruiliang,Gong Peng. Hyperspectral Remote Sensing and Its Applications[M]. Beijing:Higher Education Press,2000. [浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2000.]

- [10] Zhao Yingshi. Principles and Methods of Remote Sensing Application[M]. Beijing: Science Press, 2003. [赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [11] Milton E J, Webb J P. Ground Radiometry and Airborne Multispectral Survey of Bare Soils[J]. International Journal of Remote Sensing, 1987, 8: 3-14.
- [12] Tong Qingxi. Hyperspectral Remote Sensing-Principle, Techniques and Applications [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. [童庆禧. 高光谱遥感—原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.]
- [13] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures[J]. Analytical Chemistry, 1964, 36: 1627-1639.
- [14] Niu Zheng. Remote Sensing Applications for Carbon Cycle [M]. Beijing: Science Press, 2008: 41. [牛铮. 碳循环遥感基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 41.]
- [15] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Use of Hyperspectral Derivative Ratios in the Red-edge Region to Identify Plant Stress Responses to Gas Leaks[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92: 207-217.
- [16] Vapnik V N. Statistical Learning Theory[M]. Hoboken: Wiley, 1998.

Integration of Airborne Hyperspectral CASI and SASI Data for Tree Species Mapping in the Boreal Forest, China

LIU Li-juan^{1,2,3}, PANG Yong², FAN Wen-yi¹, LI Zeng-yuan², LI Ming-ze¹

(1. College of Forest, Northeast Forestry University, Ha'erbin 150040, China;

2. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, CAF, Beijing 100091, China;

3. Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Integrating CASI and SASI airborne hyperspectral data could help acquire both continuous narrow-band spectra covered the visible-near infrared-shortwave infrared range and high spatial resolution information. It provides a new method for tree species identification in high coverage rate forest. However, due to the different spectral response of the two sensors, there were differences between the received radiances. How to integrate the two dataset effectively for tree species classification is still a problem. CASI and SASI data have both different coverage of spectrum and atmosphere impact. According to the characteristic of reflectance and absorption spectra of vegetation, experience linear method based on statistical model and MODTRAN model based on radiative transfer theory were used for atmospheric correction of CASI and SASI data respectively to retrieve the real spectral reflectance of ground object. Then CASI and SASI data were integrated (CASI + SASI) by Savitzky-Golay filter function smoothed continuum removal spectra to reduce noise and abnormal points. Compared the integration of CASI + SASI spectrum with the field measured spectrum showed that the two curves matched well each other. In addition, the integrated spectra have richer spectral information for tree species distinction than any single one. Tree species mapping was realized base on the integration of CASI and SASI data using SVM classifier. An overall accuracy of 86.21% and Kappa coefficient of 0.8297 were obtained. And the result indicated that the proposed method to integrate CASI and SASI data is feasible for a more accuracy in forest tree species classification, and it would be a reference for the later research.

Key words: Airborne; Hyperspectrum; CASI; SASI; Integration; Continuum removal; Savitzky-Golay filter