

文章编号: 1007-4619(2007)04-0531-07

基于高光谱数据和专家决策法提取 红树林群落类型信息

肖海燕¹, 曾 辉^{1,2}, 咎启杰³, 白 钰², 程好好²

(1 北京大学 环境学院, 北京 100871; 2 北京大学 深圳研究生院 环境与城市学院, 广东 深圳 518055;

3 广东内伶仃—福田国家级自然保护区, 广东 深圳 518040)

摘 要: 高光谱遥感是进行地表植被观测的强有力工具, 研究并验证有效的算法和数据支撑技术, 对于合理利用高光谱数据进行地表植被监测与分析至关重要。在光谱特征分析和地面调查的基础上, 基于决策树方法和高光谱分析方法的组合, 以深圳市福田国家级自然保护区为例, 利用高光谱数据进行红树林群落信息提取的实证研究。结果证实了 HYMAP 数据对于红树林群落类型信息提取的数据支撑能力, 以及相关方法用于红树林分类研究方面的有效性。

关键词: 高光谱; 决策树; 红树林; 信息提取; 福田自然保护区

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

Decision Tree Model in Extraction of Mangrove Community Information Using Hyperspectral Image Data

XIAO Haiyan, ZENG Hui², ZAN Qi-jie, BAI Yu, CHENG Hao-hao

(1. College of Environment Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. College of Environment and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School of Peking University, Guangdong Shenzhen 518055, China;

3. Neilinding-Futian National Nature Reserve of Guangdong, Guangdong Shenzhen 518040, China)

Abstract: Hyperspectral remote sensing can be effectively used to observe vegetation. It is important to study and verify valid algorithms and data for vegetation observation and analysis by making the best use of hyperspectral remote sensing imagery. Based on spectral analysis and field reconnaissance, this paper attempted to combine Decision Tree model and hyperspectral analysis as an effective method to extract data of mangrove communities in Futian Reserve, Shenzhen. It is proved that HYMAP data can be a good source to derive data of mangrove community and the derived data can effectively support the classification of mangrove.

Key words: hyperspectral; decision tree; mangrove; information extraction; futian nature reserve

1 引 言

植被对电磁波的响应, 即植被的光谱反射或发射特性是由其化学和形态学特征决定的, 而这种特征与植被的类型、发育、健康状况及生长条件密切相

关^[1]。因此, 具有高光谱分辨率的成像光谱数据就成为对地表植被进行观测的强有力工具^[2]。红树林群落作为一种典型的海陆界面植被类型, 其相关生态研究一直是热带海滨及周边地区生态环境保护 and 开发利用研究的热点问题^[3]。不同的红树林群落在电磁波谱上显示出明显的光谱特征差异^[4], 因

收稿日期: 2005-12-20 修订日期: 2006-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 40328002)资助项目。

作者简介: 肖海燕(1980—), 女, 北京大学环境学院生态学系在读硕士研究生。主要从事景观生态学及生态遥感研究。已发表论文 1 篇。

此,从高光谱遥感影像中提取红树林群落的光谱信息,根据地面调查辅助判断提取群落类型信息并进行准确的群落分类,将可以在红树林群落湿地的调查中具有有良好的应用前景。

决策树方法 (Decision Tree Classifier, DTC) 作为一种非参数、分层结构的分类器,具有灵活、直观、清晰、运算效率高等特点^[5],对于高光谱高空间分辨率遥感的信息提取,决策树方法可以选用较少的特征,避免高维数据带来的系列问题^[6]。本文采用决策树方法,在光谱分析的基础上,结合 MNF 变换、SAM 填图等高光谱工具,开展高光谱影像数据 (Hymap) 提取红树林群落类型精确信息的实验研究,验证决策树方法和高光谱分析方法相结合在提取植被精细信息中的可行性,进而评估 Hymap 数据在上述研究中的数据支撑能力。

2 决策树方法及其在遥感分类上的应用

决策树方法的基本思想是逐步从原始影像中分离并掩膜每一种目标作为一个图层或树枝,避免此目标对其他目标提取时造成干扰及影响。决策树分类方法的原理是按照一定的规则把遥感数据集逐级进行细分以定义决策树的各个分支 (图 1)。决策树由一个根结点 (Root Nodes)、一系列内部结点 (Internal Nodes) (分支) 及终极结点 (Terminal Nodes) (叶) 组成,地物可根据决策树逐级决策,最终得到详细的划分^[7]。

决策树是一种非参数、分层的分类方法,不需要数据的分布假设,因而更具鲁棒性^[9];分类结构清

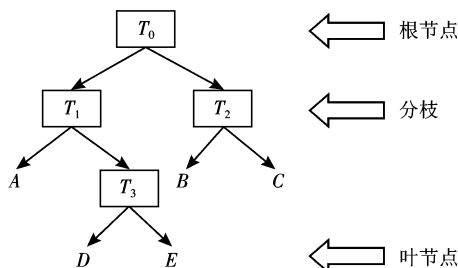


图 1 决策树分类器^[8]

Fig 1 Decision tree classification frame

晰,可重复性好,对数据分析与解释更具有灵活性^[10]。近年来,在全球及区域土地覆盖植被覆盖遥感制图上,决策树作为一种新兴的分类方法已得到成功应用^[11-17]。常规的决策树分类中,地物分类的顺序对结果有很大影响,往往是不可逆的,具有一定的随意性^[18]。本文从地物的光谱分析入手,构造具有排他性的光谱特征参量作为决策树分类的依据,验证决策树方法在 Hymap 影像中提取植被群落并进行精细区分的能力。

3 红树林群落冠层光谱特征

受叶绿素和水分吸收的影响,一般的绿色植物的光谱曲线总是呈现明显的多峰和多谷的特征^[2] (图 2)。在可见光区, $0.35-0.49\mu\text{m}$ 以及 $0.65-0.70\mu\text{m}$ 是胡萝卜素和叶绿素的强吸收带,其中叶绿素 a 在 $0.68\mu\text{m}$ 和 $0.70\mu\text{m}$ 处的吸收作用最大,反射率曲线具有波谷 (称为“红谷”) 的形态。在红外区, $0.70-0.75\mu\text{m}$ 波段植物光谱反射率急剧上升 (称为“红边”), $0.75-1.30\mu\text{m}$ 波段因缺乏色素和液态水的强

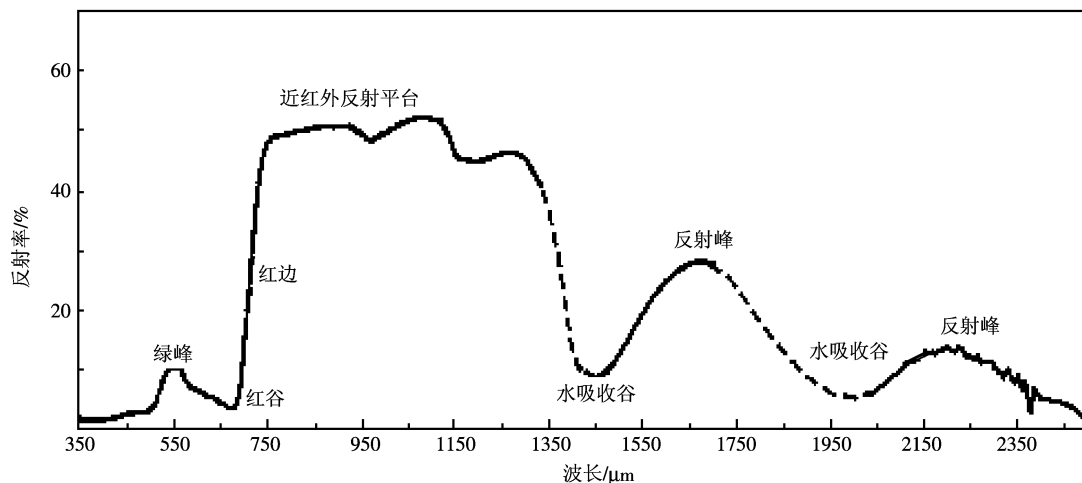


图 2 典型的植物光谱反射率曲线

Fig 2 Reflection curve of plant spectrum

吸收作用,同时又有植物叶子的内部组织结构(细胞结构)多次反射散射,反射率曲线具有波状起伏的形态和很高的反射率数值;在 $1.30\mu\text{m}$ 之后,反射率曲线具有两个明显的波谷,分别位于 $1.30\text{--}1.60\mu\text{m}$ ($1.4\mu\text{m}$), $1.83\text{--}2.08\mu\text{m}$ ($1.9\mu\text{m}$),和两个波峰,分别位于 $1.60\text{--}1.83\mu\text{m}$ ($1.65\mu\text{m}$), $2.08\text{--}2.35\mu\text{m}$ ($2.2\mu\text{m}$)。

红树林光谱曲线具有一般绿色植物光谱曲线的普遍特征,但也有具体差别。根据红树林群落冠层水平上采集到的 H^{ymal} 影像光谱分析(图 3),具有以下特征:在可见光区,“红谷”特征不是很明显,光谱曲线在绿峰之后近于平行,这可能与 H^{ymal} 成像数据略显粗糙的光谱分辨率 (15nm) 有关;在红外

区, $0.70\text{--}0.75\mu\text{m}$ 呈现“红边”特征, $0.75\text{--}1.34\mu\text{m}$ 呈现波状起伏的近红外平台, $0.93\mu\text{m}$, $1.11\mu\text{m}$ 和 $1.26\mu\text{m}$ 处表现为峰值, $0.96\mu\text{m}$ 和 $1.16\mu\text{m}$ 处表现为谷值,值得注意的是,红树林光谱曲线在 $1.11\mu\text{m}$ 处的反射率峰值达到最高;在 $1.30\mu\text{m}$ 之后,红树林反射率曲线具有与普通绿色植物反射率曲线相同的两个明显的波谷和波峰,其波谷波峰对应的光谱位置也相同,不同的是反射率的大小,由于红树林群落位于水体和潮滩上,与陆地植物相比,红树林群落下垫面吸热量大,反射率低,因此,红树林群落影像具有较低的反射率曲线,这种差别在红外区表现的尤其明显。

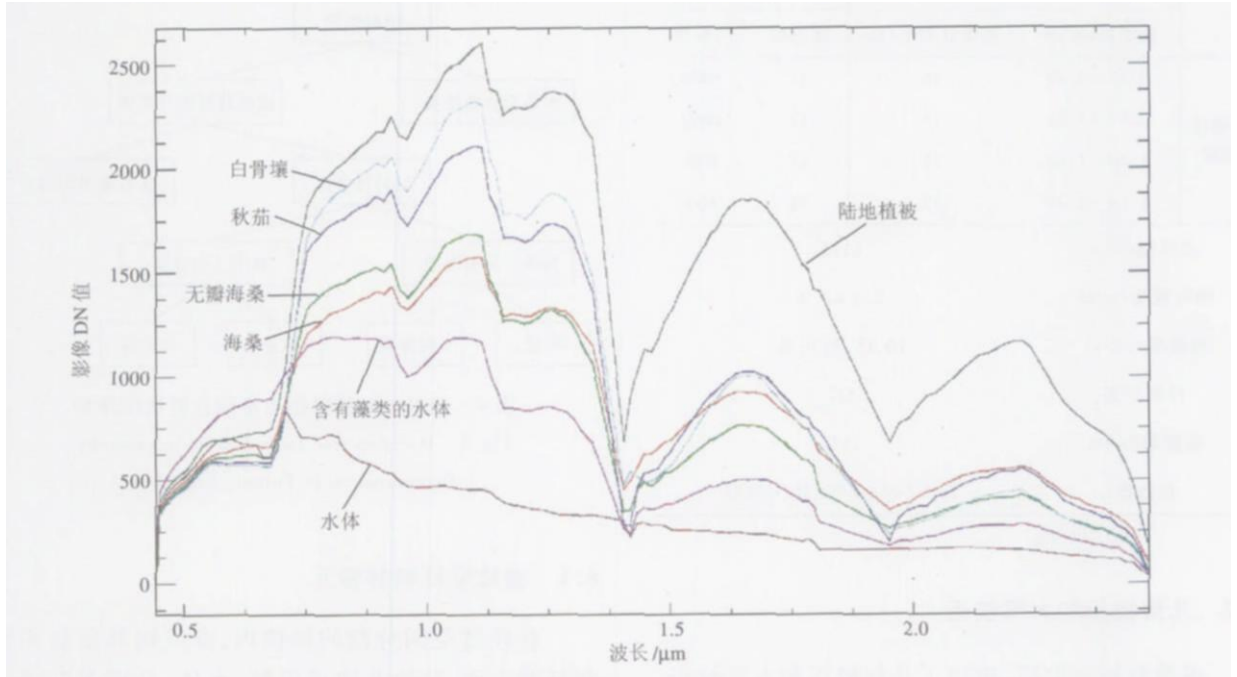


图 3 研究区像元光谱

Fig 3 Endmember spectra from image

4 区域概况

深圳湾为珠江口伶仃洋东岸溺谷型海湾,地理坐标为东经 $113^{\circ}53'\text{--}114^{\circ}05'$,北纬 $22^{\circ}30'\text{--}22^{\circ}39'$,面积 75km^2 。该处河海相互作用,咸淡水混合,并有潮汐作用,两侧发育了宽广的淤泥滩,为红树林发育提供了良好的生境,成为中国大陆沿岸现存面积较大的红树林分布区,福田红树林保护区即位于此。作为从西伯利亚到澳大利亚的候鸟迁徙途中的中继站和中国唯一位于城市腹地的红树林分布区,具有极其重要的生态、经济和社会价值^[19](图 5)。

福田红树林基本呈带状分布,群落外貌简单,为灌木或小乔木林,林冠较整齐,一般高 4m ,最高地段可达 6m ,部分地段群落可分为两层,覆盖度通常为 90% 或更大。群落的种类组成中,白骨壤 (*Avicennia marina*)、秋茄 (*Kandelia candel*)、海桑 (*Sonneratia caseolaris*) 和无瓣海桑 (*Sapotela*) 占优势地位,桐花树 (*Aegiceras omijulatum*) 间杂分布在秋茄和白骨壤群落中,老鼠筋 (*Acanthus ilicidius*) 和海漆 (*Excoecaria agallocha*) 数量很少,仅分布在红树林群落靠近海岸部分的下层。因此,在空间分辨率约为 5m 的水平上,能够区分出的红树林群落类型有 4 种,即白骨壤、秋茄、海桑和无瓣海桑群落。

5 数据获取和预处理

5.1 数据获取

本次研究采用的影像数据来自北京大学深港产学研环境技术中心的相关项目。该套数据采用 HyMap 成像光谱测量系统(表 1),以国产运五飞机为飞行平台,航高 2000m,地面分辨率 4.3m。测量时间为 2004 年 3 月 5 日,天气晴好,能见度 > 10 km。

表 1 HyMap 主要技术指标
Table 1 Parameters of HyMap

	总波段数		128	
	光谱范围 / μm	光谱分辨率 /nm	波段数	信噪比
光谱仪 指标	0.45-0.89	15	32	1000
	0.89-1.35	15	32	1000
	1.40-1.80	15	32	800
	1.89-2.48	17	32	500
总视场 /($^{\circ}$)			61.3	
瞬时视场 /mrad			2.5 × 2.0	
扫描率 /(L/s)			10 15 20 可选	
行像元素			512	
数据编码 /bit			12	
探测器			Si-PCGaAs InSb MCT 线阵	

5.2 几何校正和大气校正

成像数据获取后,进行了几何校正和大气校正。几何校正分两步进行,首先利用 HyMap 自带的姿态控制与位置姿态测量设备系统(包括三轴稳定平台、差分 GPS 定位系统和 ROS 姿态控制系统)所获取的参数,通过开发处理程序进行计算,再利用对应的 1:2.5 万地形图进行系统精校正。

成像遥感数据的大气校正方法可分为基于地表实测数据的回归分析法、公式计算法和基于大气观测数据的大气效应校正法等。后者因具有较好的时间、区域同步性而具有较好的通用性,便于重复试验和比较研究。基于大气吸收散射的机理模型应用较多的有 5S、6S、DISORT、LOWTRAN、MODTRAN 等,前几种模型适用于低光谱分辨率遥感,MODTRAN 可用于中高光谱分辨率遥感。本次实验选用 MODTRAN 模型进行辐射校正。MODTRAN 模型要求输入的参数包括大气模式、气溶胶及云雨模式、探

测几何模式、波段及分辨率等。本次实验中选择低纬度大陆性气候设定的大气参数,气溶胶模式为城市气溶胶,云雨模式为无云无雨状态,结合飞行日的能见度 (> 10 km) 等信息代入计算,得到校正后的图像 DN 值。

6 红树林群落信息提取

本次实验选用的影像数据为第 21 条带,首先通过空间分割提取红树林所在区域,然后通过光谱分析,构建决策树逐步剔除非红树林信息和区分红树林群落类型(图 4)。

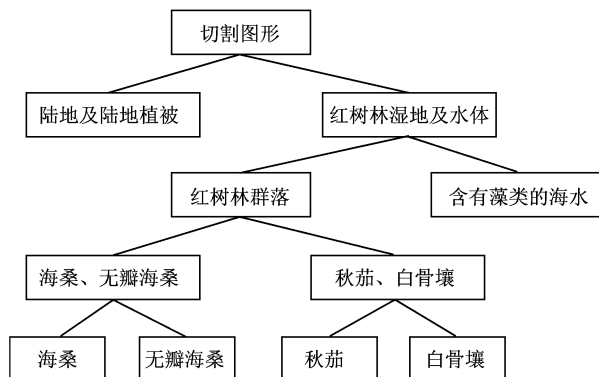


图 4 福田红树林群落类型信息提取决策树
Fig. 4 Decision tree for mangrove community discrimination in Fujian Shenzhen

6.1 去除非红树林像元

在经过空间分割的影像内,非红树林信息主要包括两方面:陆地及陆地植被、水体,分别采取阈值法和光谱变换法,剔除非红树林信息。由于陆地较水体升温快,在影像中,陆地及陆地植被在红外波长区间具有比红树林湿地明显高的 DN 值,经反复实验,在第 80 波段(中央波长 1.635 μm)设 DN 阈值 1250,高于此阈值的可以认为是陆地信息;由于水体中含有藻类等绿色植物,水体的光谱曲线也表现出“红谷”和“近红平台”等与植被光谱相似的信息,但红树林在 1.1 μm 波长处达到新的峰值,而含有藻类的水体不具有这一特性。因此,通过设置一个光谱变换算式并设置阈值,提取纯红树林群落。

6.2 典型红树林群落类型的识别和制图

通过分析光谱曲线,海桑与无瓣海桑、秋茄与白骨壤在近红平台的光谱值两两相近,可各分为一组,采用阈值法可将两组光谱分开。

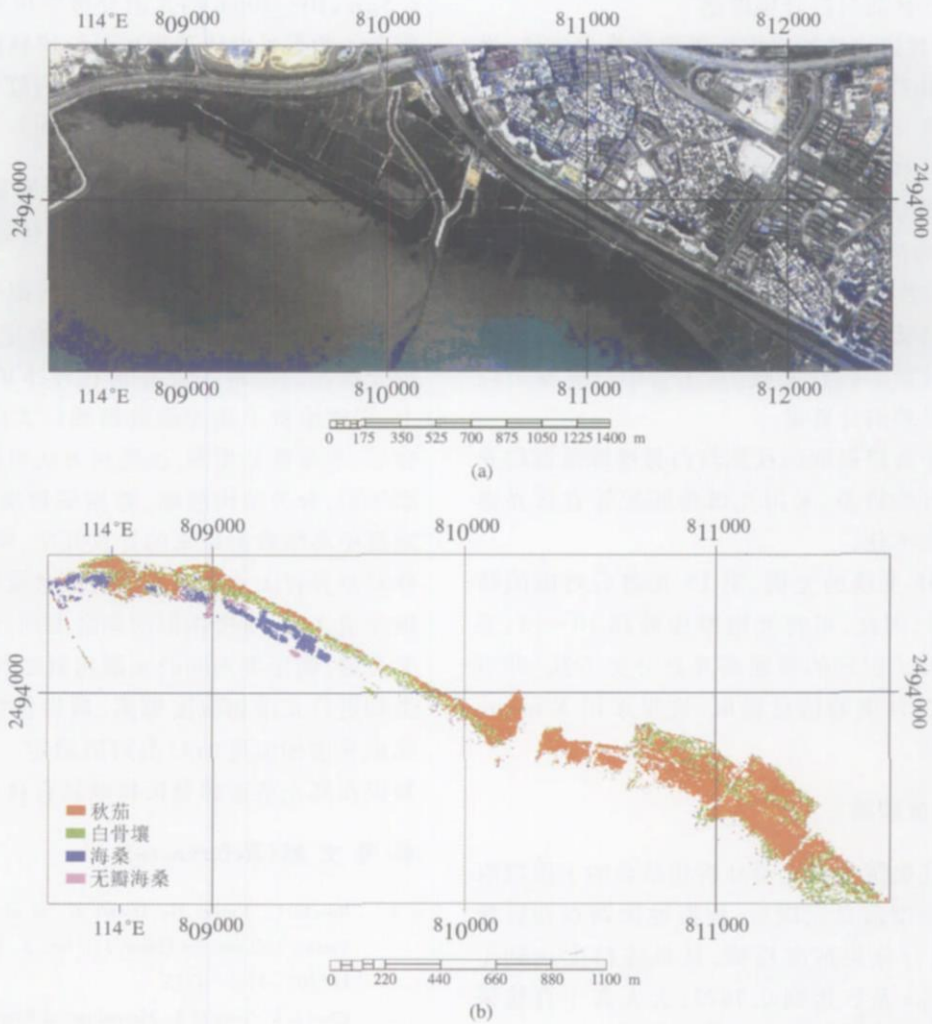


图 5 (a) 福田红树林保护区 Hymap 影像(真彩色); (b) 福田红树林典型群落类型提取

Fig 5 (a) Hymap image of mangrove in Futian, Shenzhen (True Color); (b) Mangrove community types in Futian, Shenzhen

(1) 区分海桑与无瓣海桑群落

目前对成像光谱图像进行植被光谱分析的算法可分为 4 类^[20]: 光谱植被指数、光谱匹配、混合光谱和模型反演。典型的光谱匹配和识别算法主要有: 光谱吸收指数 (SAI)、二值编码匹配、导数光谱波形匹配和光谱角度匹配 (SAM) 等^[21]。其中, 光谱角度匹配法应用范围广泛, 处理便捷, 能方便地提取感兴趣的信息和进行地物识别。

光谱角匹配法以实验室测得的标准光谱或从图像上提取的已知点的平均光谱为参考, 求算图像中每个像元矢量 (将像元 n 个波段的光谱响应作为 n 维空间的矢量) 与参考光谱矢量之间的广义夹角, 根据夹角的大小来确定光谱间的相似程度, 以达到识别地物的目的。

光谱角是指具有同样波长范围的两个像元向量在光谱空间上所形成的夹角, 其计算公式为:

$$\cos \theta = \frac{A \cdot B}{|A| |B|} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N B_i^2}}$$

式中, N 为波段数, $A = (A_1, A_2, \dots, A_N)$ 和 $B = (B_1, B_2, \dots, B_N)$ 分别表示两个光谱向量, 其元素 A_i 和 B_i 表示像元在 i 个波段上的反射率, α 为光谱角。对于每个像元光谱, 计算它与第 i 个端元光谱的广义夹角 α_i ($i = 1, 2, \dots, \xi$ 为端元光谱数), 假如 $\alpha_i = \{\alpha_j\}_{\min}$ ($j = 1, 2, \dots, \xi$ 且 $j \neq i$), 则 i 被判归为第 j 类光谱, 对于 α_i 超过设定阈值的光谱值将不被分到任何一类。

结合地面调查从影像中直接提取端元, 在 env4.0 的 SAM 程序模块下实现光谱角分类, 通过查看 rule 文件, 反复试验, 设置光谱匹配阈值, 实现海桑和无瓣海桑的类型提取。

(2) 区分秋茄与白骨壤群落

近年来,对高光谱数据进行投影变换的方法,逐渐广泛地应用于高光谱影像的特征选择、端元提取、混合像元分解、图像分类和识别等方面^[22, 23]。主成分分析(PCA)和最小噪声变换(MNF)是最常用的两种投影变换。PCA选择数据方差为投影指标, MNF以数据的信噪比为投影指标。MNF是一种特殊的主成分变换,用于压缩光谱维信息^[24]。变换后各成分按照信噪比从大到小的顺序来排列,该方法被用来确定数据的内在维数、从图像中分离噪声以及减少后续处理的计算量。

从影像中直接提取的秋茄与白骨壤群落冠层光谱曲线可区分性较差,采用光谱角匹配等直接光谱匹配算法效果不佳。

经过 MNF 变换的光谱,第 15 光谱后对应的特征值接近于 1,因此,可将光谱维压缩到 10—15,采用基于统计模式识别的普通多光谱分类方法,即可进行秋茄和白骨壤的信息提取,这里采用 K-means 非监督分类法。

6.3 分类精度检验

采用上述决策树和光谱分析相结合的手段提取红树林群落类型信息完成后,根据地面调查和影像分类结果,进行分类精度检验,其总体精度达到了 90.63%, Kappa 系数达到 0.7972 大大高于直接采用光谱匹配进行信息提取达到的精度。

福田保护区的 4 种典型红树林群落的信息提取得到了较为理想的结果,秋茄、白骨壤、海桑及无瓣海桑群落空间分布与实际情况具有较高的吻合程度。其中,沙嘴地带的秋茄群落的片状分布区域,凤塘河以西的秋茄和白骨壤的带状分布区域,以及纯无瓣海桑和海桑群落都得到了较准确的分类(图 5)。

7 结 论

基于决策树方法的 Hymap 数据进行福田红树林群落类型信息提取的研究结果表明,高光谱成像遥感技术为植被的精细区分提供了可能,在植被的生态环境监测方面具有巨大的发展潜力。本文的研究工作主要得到以下两个方面的初步结论。

7.1 Hymap 数据可以有效地支撑植被群落类型信息提取

研究表明, Hymap 提供的从 0.44 到

2.5 μm , 10—20 m 的光谱分辨率和 4—5 m 的空间分辨率的数据可以成功地区分红树林群落与非红树林信息,并能够精细地提取不同的红树林群落类型。实现宽波段遥感难以企及的目标。

7.2 基于高光谱影像特征的专家决策法对于高光谱影像数据的信息提取具有显著效用

高光谱图像数据与多光谱数据一个巨大的不同就是前者的光谱波段间隐含着特定的物理含义,对待分地物的理解不能停留在样本的数学统计基础上,否则浪费了高光谱数据的巨大内涵。作为一种分层、非参数分类器,决策树方法可以更好地结合专家知识,分类结构清晰,数据解释能力强,可以有效地避免高维数据带来的计算冗余、噪音干扰等问题,针对差异较大地物的光谱特征参量构造及其分类提取完成之后,对极相似的剩余类别,依据地物的纯像元光谱,确定类别间的光谱相似度判断依据,对每种类别进行光谱相似度填图,最后仍然在专家决策下完成光谱相似度的归类阈值确定。由此可见,专家知识在高光谱遥感分析领域具有良好的应用前景。

参 考 文 献 (References)

- [1] Boochs F, Kupfer G, Docter K, et al. Red Edge Shape as Vitality Indicator for Plants [J]. Int J Remote Sensing, 1990, 11(10): 1741—1753.
- [2] Chen C P, Tong Q X. Mechanism of Remote Sensing Information [M]. Beijing: Science Press, 1998 [陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1998]
- [3] Lin P. Mangrove [M]. Beijing: The Ocean Press, 1984. [林鹏. 红树林 [M]. 北京: 海洋出版社, 1984]
- [4] Demuro M, Chishton L. Assessment of Hyperion for Characterizing Mangrove Communities [J]. Proceedings of the AVIRIS 2003 Workshop [J]. NASA Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, USA, 2003.
- [5] Li S, Zhang E X. The Decision Tree Classification and its Application in Land Cover [J]. Aerial Research and Development, 2003, 22(1): 17—21. [李爽, 张二勋. 基于决策树的遥感影像分类方法研究 [J]. 地域研究与开发, 2003, 22(1): 17—21.]
- [6] Wang J N, Zhang B, Liu J G, et al. Hyperspectral Data Mining toward Target Recognition and Classification [J]. Journal of Image and Graphics, 1999, 4(11): 957—964. [王晋年, 张兵, 刘建贵等. 以地物识别和分类为目标的高光谱数据挖掘 [J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(11): 957—964.]
- [7] Swain P H, Hauska H. The Decision Tree Classifier: Design and Potential [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1977, GE-15, 142—147.
- [8] Friedl M A, Brodeur C E. Decision Tree Classification of Land Cover from Remotely Sensed Data [J]. Remote Sensing of

- Environment 1997, **61**: 399–409
- [9] Robert A Schowengerdt. Remote Sensing Models and Methods for Image Processing [M]. Academic Press, 1997.
- [10] Hansen M, Dubayah R, DeFries R. Classification Trees: An Alternative to Traditional Land Cover Classifiers [J]. Int J Remote Sensing 1996, **17**(5): 1075–1081.
- [11] DeFries R S, Hansen M C, Townsend J G R, et al. Global Land Cover Classification at a 1 km Spatial Resolution: The Use of Training Data Derived from Landsat Imagery in Decision Tree Classifiers [J]. Int J Remote Sensing 1998, **19**: 3141–3168.
- [12] Friedl M A, Meier D K, Hodges J C F, et al. Global Land Cover Mapping from MODIS: Algorithms and Early Results [J]. Remote Sensing of Environment 2002, **11**(83): 287–302.
- [13] Muchoney D, Borak J, Borak H C, et al. Application of the MODIS Global Supervised Classification to Vegetation and Land Cover Mapping of Central America [J]. Int J Remote Sensing 2000, **21**: 1115–1138.
- [14] Joy S M, Reich R M, Reynolds R T. A Non-parametric Supervised Classification of Vegetation Types on the Kaijap National Forest Using Decision Trees [J]. Int J Remote Sensing 2003, **24**(9): 1835–1852.
- [15] Wang J, Dong G R, Li W J, et al. Primary Study on the Multi-layer Remote Sensing Information Extraction of Desertification of Desertification Land Types by Using Decision Tree Technology [J]. Journal of Desert Research 2000, **20**(3): 243–247 [王建, 董光荣, 李文君等. 利用遥感信息决策树方法分层提取荒漠化土地类型的研究探讨 [J]. 中国沙漠, 2000, **20**(3): 243–247.
- [16] Zhang F, Xiong Z, Kou N. Research on Rice Fine Classification using Hyperspectral Remote Sensing Images [J]. Journal of Wuhan University of Technology 2002, **24**(10): 36–39 [张丰, 熊帆, 寇宁. 高光谱遥感数据用于水稻精细分类研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2002, **24**(10): 36–39]
- [17] Zhao P, Feng X Z, Lin G F. The Decision Tree Algorithm of Automatically Extracting Residential Information from SPOT Images [J]. Journal of Remote Sensing 2003, **7**(4): 309–315. [赵萍, 冯学智, 林广发. SPOT卫星影像居民地信息自动提取的决策树方法研究 [J]. 遥感学报, 2003, **7**(4): 309–315]
- [18] Zhang B. Hyperspectral Data Mining Supported by Temporal and Spatial Information [D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2002 [张兵. 时空信息辅助下的高光谱数据挖掘 [D]. 中国科学院研究生院, 2002]
- [19] Wang B S, Liao B W, Wang Y J, et al. Mangrove Forest Ecosystem and its Sustainable Development in Shenzhen Bay [M]. Beijing: Science Press, 2002 [王伯荪, 廖宝文, 王勇军等. 深圳湾红树林生态系统及其持续发展 [M]. 北京: 科学出版社, 2002]
- [20] Tong Q X, Zheng L F, Wang J N. Study on Imaging Spectrometer Remote Sensing Information for Wetland Vegetation [J]. Journal of Remote Sensing 1997, **1**(1): 50–57. [童庆禧, 郑兰芬, 王晋年. 湿地植被成像光谱遥感研究 [J]. 遥感学报, 1997, **1**(1): 50–57]
- [21] Wang H Y, Dong G J, Tang H S, et al. Hyperspectral Image Classification in Coastal Area [J]. Hydrographic Surveying and Charting 2004, **24**(6): 20–23 [王宏勇, 董广军, 唐汗松等. 海岸带高光谱影像分类技术研究 [J]. 海洋测绘, 2004, **24**(6): 20–23]
- [22] Horne H S, Shen D G. An Affine Invariant Active Contour Model for Mode-based Segmentation [J]. Image and Vision Computing 1998, **16**(2): 135–146.
- [23] Xue Z, Li S Z, Teoh E K. A Lie Group An Affine Invariant Deformable Contour Model for Object Matching [J]. Image and Vision Computing 2002, **20**(2): 77–84.
- [24] Boardman J W, Kruse F A. Automated Spectral Analysis: A Geological Example Using AVIRIS Data, North Grapevine Mountains, Nevada [A]. ERM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing. Environmental Research Institute of Michigan [C]. Ann Arbor, MI 1994. 1407–1418.