

红树植物地面反射光谱特征研究

翁强^{1,2}, 卢昌义¹

(1. 厦门大学环境科学与工程系, 福建 厦门 361005;

2. 福建工程学院环境与设备工程系, 福建 福州 350007)

摘要: 结合使用野外便携式光谱仪对九龙江口红树林保护区白骨壤、秋茄、桐花树 3 种红树植物的叶冠表观光谱的测量结果, 系统分析比较了红树植物叶冠反射光谱特征及其差异; 并在一个潮间带底质遥感信息处理平台上对研究地点进行基于表观光谱特征的白骨壤和秋茄的 SPOT 卫星遥感图像分类; 最后讨论了红树光谱研究中存在的问题。

关键词: 红树林; 叶冠光谱反射; 光谱特征; 图像分类

中图分类号: S771.8 文献标识码: A 文章编号: 1002-7351(2006)03-0014-06

Research on Mangrove Canopy Apparent Spectral Reflectance Characteristics

WENG Qiang^{1,2}, LU Changyi¹

(1. Environmental Science and Engineering Department, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;

2. Environment and Equipment Engineering Department, Fujian Engineering Institute, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract: This article describes canopy apparent spectral reflectance of three mangrove species at Jiulong River estuary reserve using a portable hyperspectrometer, using the spectral data collected in fields to analyze mangrove canopy spectral reflectance characteristics and to compare their differences. The mangrove species distribution classified by using a tideland remote sensing information discrimination software based on SPOT satellite remote sensing images, and the disadvantage of mangrove spectral reflectance in higher research is discussed.

Key words: mangrove; canopy spectral reflectance; characteristics of reflection spectrum; image classification

红树林是陆地过渡到海洋的特殊森林, 主要分布在南、北回归线之间, 局部地区受暖流的影响可延伸到北纬 32° 和南纬 44°^[1]。由于其独特的生态学特性, 红树林是研究海岸变化或海平面升高的重要载体之一, 对地球环境、气候变化研究具有重要的意义^[2]。随着植被光谱遥感应用的发展, 遥感技术在红树林生态监测与研究中也已经有了广泛的应用及研究成果^[3]。近几年来高光谱分辨率遥感成像光谱技术的迅速发展, 能更准确地探测植被的精细光谱信息, 提高了光谱分辨率和标准光谱的获取, 随着高光谱遥感与双向反射模型的反演相结合, 加上逐步成熟的植被高光谱分析算法, 使得从空中对地面目标物进行直接识别和微弱光谱差异的定量分析成为可能。主要表现在: ①可以区别属于同一种地物的不同类别, 如黑红树 (*Avicennia germinans*)、白红树 (*Laguncularia racemosa*) 与红红树 (*Rhizophora mangle*) 的区分与识别^[4]; ②植被生态、生化和物理参数的获取与地面调查图的制作, 如 Curran 等利用 AVIRIS (航空可见光成像光谱仪) 所获得的数据编制生物化学参数 (叶绿素、N、木质素和纤维素) 的含量^[5]; ③突破了光谱分辨率这一个限制, 在光谱空间很大程度上抑制了大气和土壤背景等干扰因素的影响, 这对于定量分析结果精度的提高有很大的帮助。

但是目前利用高光谱遥感数据对红树林进行分类制图的研究还比较少, 应用于其他方面的研究报道就更鲜见。各种环境胁迫如水渍、盐渍或其他生境变化等都会使红树叶片的光反射特性发生改变, 通过监测红树植物冠层光学反射特性, 可以分析红树植物及其群落在环境胁迫下的生理变化和结构变化^[6]。如何分析红树植物光谱特征, 掌握波谱响应的相关影响因素, 对于正确判读遥感图像和充分利用高光谱遥感

收稿日期: 2006-03-01; 修回日期: 2006-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40276036)、教育部博士点专项基金项目 (2000038401) 资助

作者简介: 翁强 (1977-), 男, 福建莆田人, 福建工程学院助教, 厦门大学在读硕士研究生, 从事基于高光谱数据的红树特征分析和生态工程方向研究。

数据是至关重要的,是红树林高光谱遥感研究的基础工作。本文结合使用野外便携式光谱仪对距离厦门不到 10 km 的九龙江口红树林保护区内 3 种红树植物叶冠表观光谱的测量结果,通过分析比较这几种红树植物的冠层叶片反射波谱,探讨了基于地面光谱数据的红树光谱特征及其差异,并使用 SPOT 卫星遥感图像在一个潮间带底质遥感信息处理平台上进行基于表观光谱特征的白骨壤和秋茄的遥感分类图,获得了与训练区域实际情况比较一致的结果。

1 红树植物现场表观光谱的测量

1.1 研究地点概况

研究地点位于福建九龙江口红树林自然保护区南岸浮宫镇的海滩红树林(24°24'N、177°55'E)。该红树林湿地受潮汐周期淹没,林区海水盐度全年波动在 18~22,林地土壤为粉泥沉淀物、无结构,表层土壤含盐量 13.6, pH 7.6。保护区内主要有秋茄(*Kandelia candel* L. Druce)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、白骨壤(*Avicennia marina*) 3 种纯林。秋茄为灌木或小乔木,1962 年人工营造,群落郁闭度 0.9,平均树高 5.5 m;叶对生,革质,矩圆形、倒卵状矩圆形或椭圆形,长 5~12 cm,宽 2.5~5 cm,顶端钝或圆,叶脉不甚明显;秋茄单种群落的外貌呈亮绿色。白骨壤单种群落的外貌呈灰绿色,总盖度 70%~95%,高度 2~3 m,最高可达 8 m 以上,最低可达 1.2 m 左右。基径 8~10 cm,最大 23 cm,多呈萌生林状态;群落结构极简单,一般仅 1 层,少量与其他种类结合而呈 2 层结构。桐花树为灌木或小乔木,灌丛状,平均株高 1.3~1.5 m,最高可达 1.8 m;叶革质,倒卵形,长 5~10 cm,宽 3~4 cm,基部楔形,顶端圆形,微凹,叶纹较秋茄清晰,叶柄带有红色;单一树种组成的树林,外貌黄绿色;树木基部多分枝而树林顶部平整,植株多成萌生丛,每丛 4~17 株不等,无明显主干。单一的桐花树林结构简单,只有 1 层,由于基部的分枝多,一般基部的直径达 15 cm 左右,大者可达 30 cm。保护区内沿岸白骨壤与秋茄组成的带状混生群落呈明显的带状灰绿和带状亮绿为底伴有黄绿斑块的林相。

1.2 野外现场数据的采集

红树植物叶冠的光谱遥感反射率(R_{rs})采用 GER-1500 便携式瞬态光谱仪和反射率($\rho_p=50\%$)的配套标准板测量,该光谱仪的测量范围在 350~1 050 nm 之间,光谱分辨率为 3 nm,共有 512 个波段,每个波段的波长范围是 1.5 nm 左右。光谱仪在每个波段所测量到的光波强度是被测地物对太阳光波的绝对反射强度。其强度主要取决于当时太阳光波的强度和被测地物对太阳辐射的吸收强度。绝对反射强度受时空变化的影响很大,极不便相互对比与解译,所以很少被直接使用。如果将绝对反射强度与入射的太阳光的强度进行比较,我们就可以得到相对的反射强度。若将每个波段的相对反射强度按波长连接起来,我们就可得到一条反映被测地物吸收与反射特征的相对反射曲线。其优点是受时空变化的影响较小,便于相互对比与解译。测定时仪器观测平面背向太阳方向,与太阳入射平面的夹角 $90^\circ\sim 135^\circ$,与地面法线方向的夹角 $30^\circ\sim 45^\circ$ 。面向地面和标准版分别测量红树植物冠层信号 S_t 和标准版信号 S_p ,据此计算该点冠层叶片的光谱相对反射率 R_{rs} 。

所有的反射光谱数据都是在野外自然光的条件下测得的。为了减少不同太阳高度对反射率的影响,反射光谱的测量只在当地时间 11:00~14:00 进行,所有测点都是在晴朗无云的条件下完成光谱数据采集的。测定前先在研究区域内选定好要测定种类的小区,要求小区内为长势良好、生长期相近的同种类纯林。每个小区内选定 5 个固定位置的植株叶冠,光谱采样以 10 个光谱为一采样间隔,每次记录 10 个光谱,以其总平均值作为该小区的光谱反射值,并将平均反射率曲线作为标准光谱曲线。测量过程中及时进行标准白板校正。本试验现场对 3 种红树植物在不同地点选取有代表性的小区进行了光谱测量,并将其标准光谱曲线加以分析比较。

2 冠层反射谱线特征分析

2.1 红树植物的波谱特征

如图 1 所示,红树植物的光谱特征具备绿色植被的非常特殊的诊断性反射光谱特征。植被叶冠的波

谱特征主要是自然光与叶体核子、电子、分子、原子、电磁场等物质核能量运动吸收或放出能量叠加的结果; 植被叶冠波谱反射特征最显著的是在可见至近红外波段; 植被反射波谱曲线不仅因植物类别不同而有差异, 而且还因内部结构和外表形态不同表现出不同的波谱响应水平^[7]。红树林由于其生长环境周期性浸水, 并耐受高盐胁迫, 有着与乔木、草本植被不同的光谱特征, 所以红树植物各波段上的反射率明显低于一般绿色植物, 特别对于蓝色和红色具有更强烈的吸收, 因此, 在 404 nm 左右具有一个“蓝谷”, 其反射率大约为 0.5%~1.0%, 在 674 nm 左右具有一个“红谷”, 其反射率大约为 0.5%~1.5%, 相对微弱反射绿光, 呈现绿叶的颜色, 在 556 nm 左右存在一个绿峰, 反射率大约为 2.0%, 在 670~780 nm 之间存在一个红光到红外波段过渡波段的“红边”特征, 表现为反射率急剧增加, 反射率由 1.0%~2.0% 增加到 10%~15%, 这一特征的显著与否取决于植物叶片色素对红光吸收的强度及其内部细胞组织对近红外光多次反射散射的情况^[8]。在 750~1 300 nm 波长内, 叶面反射波谱特征主要受叶内细胞结构和叶冠结构控制, 反射率升高, 常称之为“红外高台阶”。在 900~1 000 nm 之间有一个明显的“水分吸收低谷”, 而且近红外“高原区”的高度越大, 该低谷就越明显。Penuelas 等人通过实验手段发现该吸收低谷与被测植物叶片水分有很好的相关性(Penuelas et al., 1997), 他们把 900 nm 和 970 nm 两处反射率的比值称之为水分指数(Water Index, WI)^[9]。可见光-近红外光谱范围内, 不同种类、不同生长阶段的红树植物叶冠光谱在曲线线形及变化趋势上有明显的相似性, 特别在近红外波段, 反射率曲线的近似平行更明显地表现了这样的相似性。这一现象说明: 在较细的波段之间有较高的相关性。因此可见红树植物光谱的主要指示波段位于光谱中可见光区的蓝边(蓝过渡到绿)、绿峰、黄边(绿过渡到红)、红光低谷和红边(红光过渡到近红外)区。

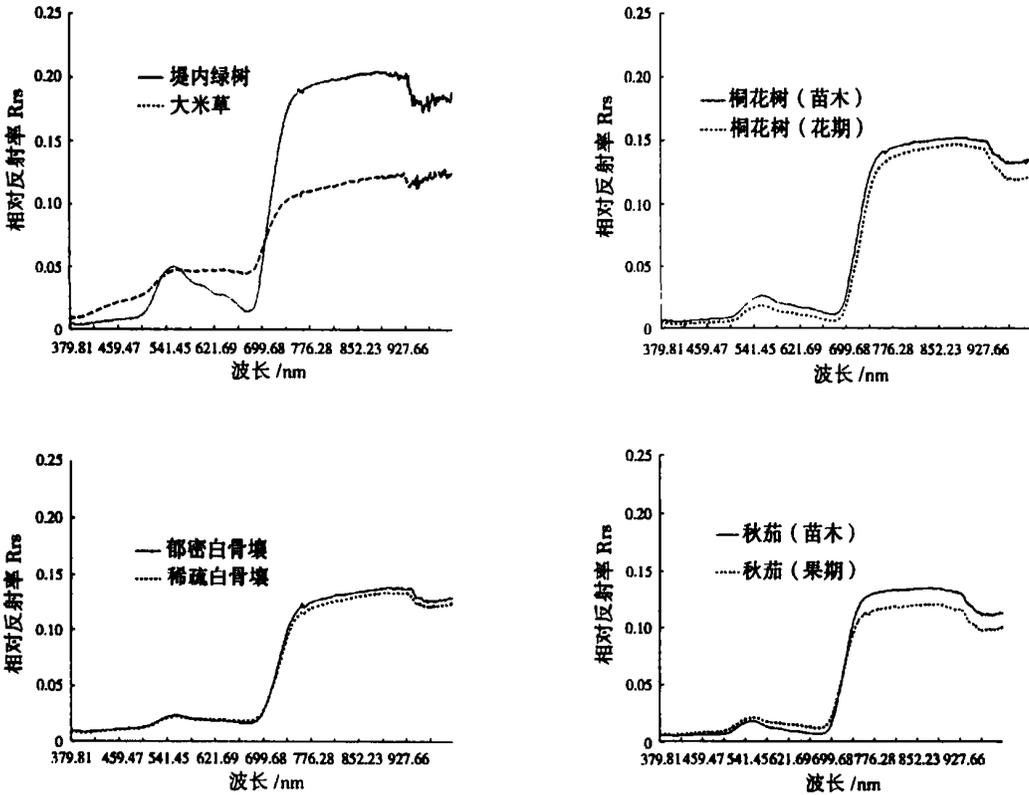


图 1 野外采集不同样本的叶冠光谱反射

红树植物反射光谱的这些特性使得它们在多波段图像上具有色调显著性: 在蓝波段和红波段为暗色调, 尤其在红波段为显著暗色调; 在绿波段稍亮, 在近红外波段则为显著高亮度, 因而能够采用遥感探测植被的许多技术方法和理论成果。

2.2 白骨壤、秋茄、桐花树叶冠光谱曲线的比较

白骨壤单种群落的外貌呈灰绿色, 秋茄单种群落的外貌呈亮绿色, 桐花树单种群落的外貌呈黄绿色。

植物颜色主要取决于叶内各种色素,主要是绿色的叶绿素和黄色的类胡萝卜素之间的比例。叶绿素主要包括叶绿素 a 和叶绿素 b,叶绿素 a 呈蓝绿色,而叶绿素 b 呈黄绿色;其强吸收带位于 400~450 nm 蓝紫光部分和 650~700 nm 红光附近。类胡萝卜素主要包括胡萝卜素和叶黄素,胡萝卜素呈橙黄色,而叶黄素呈黄色;425~490 nm 是类胡萝卜素的吸收带,490~560 nm 是其次吸收带。在 670~780 nm 之间为“红边”陡坡。“红边”前端的位置主要与叶绿素的含量有关,后端取决于叶内组织结构和植物体内含水量的影响。研究表明叶绿素含量和叶片光谱特性之间存在强相关性,叶片及冠层光谱反射率或透射率对光合色素含量的响应可能作为一种监测光合作用、氮素状况和水、病害与污染等胁迫的有力手段^[10]。

从图 1 可以看出,由于叶片对光的反射面积大小不同,郁密白骨壤的近红外反射率比稀疏白骨壤的要高,因为所测定的白骨壤植株的生长阶段相近,它们在可见光区域的光谱反射曲线基本重合。成熟果期秋茄在红光与蓝光波段的反射率明显高于幼小苗木,这与冠层叶绿素浓度水平的减少有关,同时由于叶片内部组织结构发生的变化,近红外的反射率相对下降。处于花期的桐花树在可见光—近红外波段的反射率整体低于幼小苗木,与白骨壤和秋茄伸展披散型的叶冠不同,桐花树基部直立分枝的紧凑型叶冠对光的反射面积比较大,所以,它的近红外反射率在 3 种红树植物中是最高的。可以看出,不同红树植物光谱反射率曲线变化的规律性与其生长发育的群体变化特征具有较高的相关性。

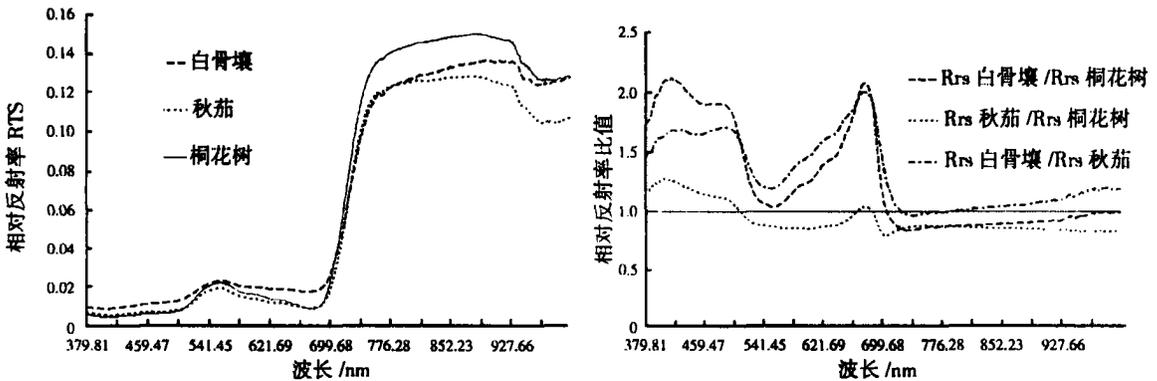


图 2 3 种不同红树植物叶冠光谱反射对比

观察图 2,把对应比值为 1 的直线作为参比(可以理解为 R_{rs} 桐花树/ R_{rs} 桐花树,或 R_{rs} 白骨壤/ R_{rs} 白骨壤,或 R_{rs} 秋茄/ R_{rs} 秋茄),做出 3 种红树植物的相对反射率比值曲线进行比对。不难发现不同红树之间的光谱变化主要体现在吸收谷、反射峰、红边和反射率平台的强度上的差别,正是这些差别引起了曲线形状的变化,相反,这些特征的反射(或吸收)位置则变化不明显。在 380~500 nm 的蓝波段和 600~680 nm 的红波段之间,各波段间的相关性普遍较低。这表明这 2 个波段之间的差别包括了较多的信息,同时也表明植被在这 2 个波段范围之间发生了一次含有其间差别信息的特征变化。事实上,这种变化就是它们在蓝紫波段和红黄波段附近的特征吸收(叶绿素等),这种变化与白骨壤、秋茄和桐花树的外貌颜色特征是对应的。还可以看出,相对反射率比值曲线越接近参比直线,数据的相关性越大。秋茄与桐花树的光谱曲线表现出较高的相关性,说明遥感区分的难度较大,而白骨壤树种是比较容易与其它 2 类在遥感图像上区分出来的。另外可以发现同一种红树如秋茄在不同生长阶段的光谱变化相当于不同红树之间的变化,只是这时候这种变化表现出一定的规律性。例如,秋茄苗木与成熟植株相比,有对绿光反射的相对强和近红外反射的相对弱的特点。在近红外波段(平台),除了白骨壤的反射曲线线形斜率表现出明显差别,桐花树和秋茄的反射曲线基本平行,说明这些波段之间有非常好的相关性。

从表 1 特征位置和特征参数(参见谭倩等^[11])的计算结果来看,不同红树植物光谱及同一红树植物不同个体间的光谱曲线的特征位置相差很小,具有很高的不变性。但在比值特征参数上有较大的差别。这说明应该细分的光谱范围位置是特征位置中的蓝、黄、红边位置,也就是说,植被光谱曲线的斜曲线部分是信息量最大的部位,而不必细分的那些部分是绿反射峰、红吸收峰、红外反射平台、蓝紫吸收峰的位置。

上述红树植物植被的实测光谱体现出高光谱植被遥感中的 2 个难题: 植被光谱间的高度相似性和植被光谱本身的高度时间动态性。在不同红树植物光谱具有高度形状相似性的同时又表现出同一红树植物不同个体间相对而言明显的变异; 除了时间动态性外, 红树植被的光谱还具有高空间动态性, 而且两者互相联系。空间的动态性还表现在多角度效应上; 另外, 像元尺度效应的影响非常大。

表 1 红树植物叶冠光谱反射特征位置和特征参数

| 树种 | 蓝谷 /nm | 绿峰 /nm | 红谷 /nm | 红边位置 /nm | 红边振幅 $d\lambda_{red}$ | 最小振幅 $d\lambda_{min}$ | $d\lambda_{red}/d\lambda_{min}$ | R970nm/R900nm |
|---------|--------|--------|--------|----------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------|
| 秋茄(苗株) | 406.15 | 557.69 | 675.71 | 722.76 | 0.00296 | 7.8E-05 | 37.88 | 0.97 |
| 秋茄(果期) | 404.57 | 556.07 | 674.93 | 721.23 | 0.00287 | 5.2E-05 | 54.90 | 0.82 |
| 桐花树(苗株) | 402.99 | 556.07 | 674.93 | 722.76 | 0.00242 | 6.2E-05 | 39.24 | 0.82 |
| 桐花树(花期) | 409.31 | 554.45 | 674.93 | 721.23 | 0.00298 | 3.8E-05 | 77.66 | 0.84 |
| 白骨壤(稀疏) | 402.99 | 557.69 | 671.82 | 725.83 | 0.00236 | 7.1E-05 | 33.44 | 0.91 |
| 白骨壤(郁密) | 399.85 | 559.31 | 664.04 | 728.90 | 0.00210 | 5.9E-05 | 35.46 | 0.91 |

3 基于表观光谱特征的白骨壤和秋茄的遥感分类

选择低潮位时相的 SPOT 全色波段数据为信息源, 经过几何精校正、分段拉伸等一系列处理后, 在遥感图像上切出红树林的分布范围。由于红树林的分布具有明显的地理相关, 在假彩色合成图上很容易将其与周围滩涂、水域、堤岸等不同地物区分。所用遥感软件是在 TITAN 遥感信息处理平台上独立开发的潮间带底质识别模块, 主要由厦门大学海洋与环境学院及计算机系联合编写。软件所提供的地物分类算法是基于 TITAN IMAGE API 开发包实现的。采用的算法主要是直方图分类算法。

通过计算白骨壤、秋茄地面光谱对应 SPOT 在 B1 (0.50 ~ 0.59 μm)、B2 (0.61 ~ 0.68 μm)、B3 (0.78 ~ 0.89 μm) 3 个波段间遥感反射率的平均值, 并计算 B1/B2、B3/B2、B3/B1 的比值, 如表 2 所示。

表 2 叶冠光谱对应 B1、B2、B3 波段的遥感反射率平均值和比值

| | $\bar{R}_{rs B1}$ | $\bar{R}_{rs B2}$ | $\bar{R}_{rs B3}$ | B1/B2 | B3/B2 | B3/B1 |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------|-------|-------|
| 白骨壤 | 0.019 | 0.018 | 0.130 | 1.04 | 7.05 | 6.75 |
| 秋茄 | 0.015 | 0.011 | 0.126 | 1.38 | 11.80 | 8.55 |

B1、B2、B3 波段分别对应绿光波段、红光波段、近红外波段, 可以看出, 白骨壤、秋茄在 B2、B3 波段存在显著的遥感反射率差异。据此建立 B2/B3 二维直方图, 运用识别模块人机交换识别, 并在 SPOT 图像空间对应映射出来, 得到该 B2—B3 波段组合的试验地点 1 和试验地点 2 的白骨壤与秋茄分类结果图, 如图 3 所示。

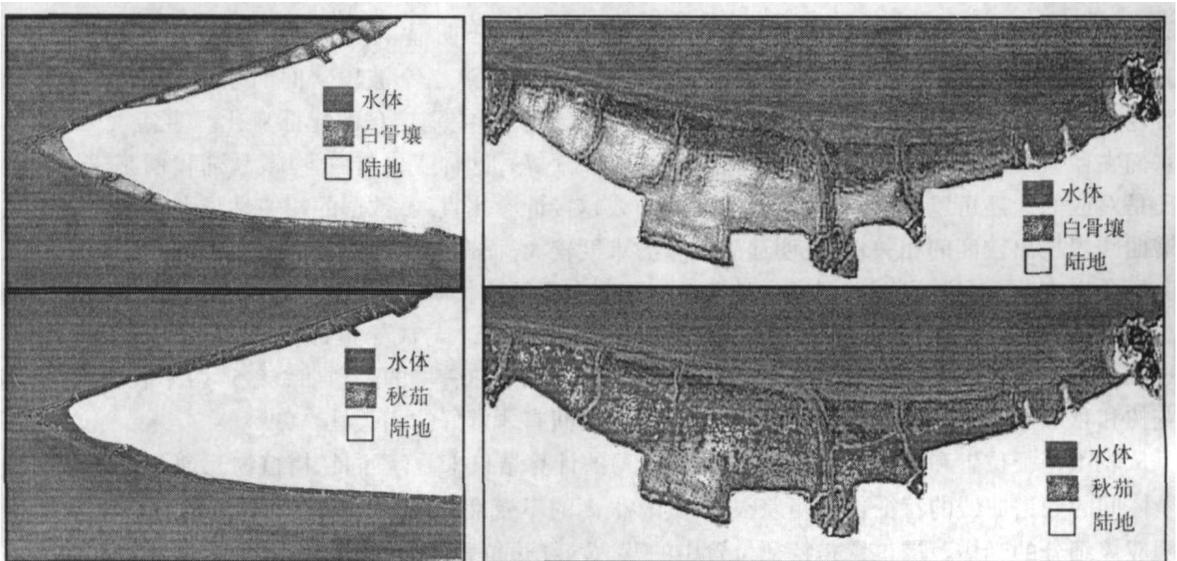


图 3 地点 1 和地点 2 的红树分类结果图

4 结语

由于地面光谱测量结果深受环境因素(包括时间、季节、天气、太阳入射角等)的影响,要建立一个具有代表性的光谱数据库并不是一项简单的任务。此次野外数据采集是一个开始,但由于受时间和条件的限制,数量还不够多,且部分光谱测量结果不够理想,有待今后进一步补充和提高。这次采用的便携式光谱仪的测量范围仅在350~1 050 nm之间,这一波长范围对探讨植物的物理与生理状态很有效果,但缺少了对研究土壤与水分情况最重要的部分近红外(NIR)和短波红外(SWIR)。

受遥感数据源条件限制,本次遥感图像分类没有使用高光谱遥感图像进行分类。另外,地面获取的红树植被高光谱遥感数据还可用于以下几个方面:(1)建造红树光谱数据库,以便高光谱图像与此直接匹配,以识别植被类型和土壤覆盖类型;(2)研究红树植被的高光谱特性与红树植被生物理化参数的关系,为用高光谱图像在大范围内反演红树植被的各种生长与营养参数、监测植被长势及群落结构变化奠定基础。目前关键要解决的是:如何更好地分析形状很相似,同时又具有很强的时、空动态性和受复杂因素组合影响的红树植被的光谱特征,使得红树植被光谱的差异性和规律性能得到更好地体现;了解掌握已有光谱分析模型和图像信息提取模型的评价、应用条件及局限性。因此,需要在深入理解实测光谱的成因和各种影响因子作用规律的基础上,从光谱形状上分析十分相似的红树植被光谱的特征,使它们之间的差异或相关关系得到突显,同时建立一些影响因子的作用规律描述,从而用于红树植物的分类、识别和相关信息提取。应该考虑从基于光谱形状匹配的出发点,构造针对可见光—近红外光谱分析的相关拟合分析模型,并与传统的分析模型如“导数光谱”技术或“红边”光学参数等方法进行比较,进行进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 郑德璋,郑松发. 海南岛清澜港红树林发展动态研究[M]. 广州:广东科技出版社,1995.
- [2] Blasco F, Saenger P, Janodet E. Mangroves as indicators of coastal change[J]. *Catena*, 1996, 27(3): 167-178.
- [3] 余祥,赵冬至,张丰收. 遥感技术在红树林生态监测与研究中的应用进展[J]. *海洋环境科学*, 2005, (2): 76-80.
- [4] Le Wang, Wayne P. Sousa, Peng Gong, Gregory S. Biging. Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91: 432-440.
- [5] Curran P J, Dawson T P. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry testing the Kokaly and Clark methodologies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76: 349-359.
- [6] Lillesand, T. M. and Keifer, R. W. Remote sensing and image interpretation[M]. New York: Third Edition John Wiley & Sons Inc 1994.
- [7] 徐瑞松,马跃良,何有成. 遥感生物地球化学[M]. 广州:广东科技出版社,2003: 99-117.
- [8] Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. *Int J Remote Sensing*, 1994, 15(7): 1459-1470.
- [9] Penuelas J, Pinol J, Ogaya R and Filella. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI(R900/R970)[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13): 2869-2875.
- [10] Madeira AC, Mendonca A, Ferreira MF, et al., Relationship between spectroradiometric and chlorophyll measurements in green beans communication[J]. *Soil science and Plant Analysis*, 2000, 31(5/6): 631-643.
- [11] 谭倩,赵永超,童庆禧,等. 植物光谱维特征提取模型[J]. *遥感信息*, 2001, (1): 14-18.