

周在明, 陈本清, 徐冉, 等. 基于无人机高光谱特征的红树林种群识别研究——以漳江口红树林国家级自然保护区为例[J]. 海洋学报, 2021, 43(9): 137–145, doi:10.12284/hyxb2021136

Zhou Zaiming, Chen Benqing, Xu Ran, et al. Identification of the mangrove species using UAV hyperspectral images: A case study of Zhangji-angkou mangrove national nature reserve[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(9): 137–145, doi:10.12284/hyxb2021136

基于无人机高光谱特征的红树林种群识别研究

——以漳江口红树林国家级自然保护区为例

周在明¹, 陈本清¹, 徐冉², 方维³

(1. 自然资源部第三海洋研究所 海洋声学及遥感实验室, 福建 厦门 361005; 2. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 3. 福建漳江口红树林国家级自然保护区, 福建 云霄 363000)

摘要: 红树林种群的组成和分布对于红树林生态系统的保护和恢复至关重要。本研究以漳江口红树林保护区为研究对象, 通过获取无人机高光谱影像, 进行光谱特征分析、光谱微分变换和包络线去除, 提取了 911 组 17 个光谱特征参数, 通过逐步判别分析筛选出 13 个用于决策树构建的特征参数, 最终通过 C5.0 决策树模型获得了研究区红树林种群的分布状况。结果表明, 漳江口红树林保护区植被种群呈现自上到下不同类型的分布情况, 研究区上部以桐花树和秋茄混合类型为主, 中间区域呈现白骨壤、桐花树和秋茄三者共生的现状, 研究区下部则以白骨壤分布为主, 伴生有少量的秋茄。通过混淆矩阵计算, 得到研究区总体分类精度为 87.95%, Kappa 系数为 83.81%, 具有较好的精度。研究结果可为区域红树林湿地保护提供数据支撑, 为红树林种群识别研究提供方法参考。

关键词: 红树林; 漳江口; 无人机; 高光谱影像; 种群识别

中图分类号: P407.8; S718.54

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)09-0137-09

1 引言

红树林是生长在热带及亚热带海岸潮间带上的生态群落, 其生产力高、固碳能力强, 对保护海岸带生物多样性具有十分重要的价值, 是国际湿地生态保护和生物多样性保护的重要对象, 是国际湿地公约中的重要分类系统^[1-3]。而红树林种群的分类和识别对红树林生态系统的保护和恢复及对红树林的深入研究至关重要^[4-5]。

在遥感数据的应用方面, 由于光谱和空间分辨率的影响, 中低分辨率多光谱遥感影像可在大尺度上实现红树林制图, 但较少应用于红树林种群的分类研究^[6]。Wang 等^[7]从红树林分布研究、生态参数提取、生态系统过程表征 3 个方面系统梳理了红树林遥感

相关研究的进程, 并阐明了红树林遥感与陆地森林遥感的阶段差异和相似性。高空间分辨率遥感影像通过空间纹理特征的分析, 可应用于红树林种群的分类研究中^[8]。Wang 等^[9]首次应用高空间分辨率 IKONOS 多光谱和全色影像实现了巴拿 Magaletta 红树林种群的分类研究。在此之后, 相关的研究逐渐兴起, 其数据源多以高空间分辨率影像为主^[10-11]。Xia 等^[12]通过多光谱卫星影像 GF-1 和 Landsat 8 OLI/TIRS 比较分析了淹没红树林识别指数——SMRI 指数的适用性。

随着卫星遥感技术的发展, 高光谱遥感将表征地物属性特征的连续光谱信息与表征地物几何位置特征的空间信息有机结合, 使得地物的精确定量分析与细节提取成为可能^[13]。在红树种群识别分类研究中, 高光谱影像逐渐显示出优越性, Kumar 等^[14]应用 EO-1

收稿日期: 2020-12-08; 修订日期: 2021-05-06。

基金项目: NSFC-山东联合基金(U1806203)。

作者简介: 周在明(1980—), 男, 山东省淄博市人, 副研究员, 主要从事生态环境遥感研究工作。E-mail: zhouzaiming@tio.org.cn

Hyperion 数据在支持向量机 SVM 方法的基础上实现了印度 Bhitarkanika 国家公园红树林高精度的种群识别。Jia 等^[5]综合 EO-1 Hyperion 高光谱影像和 SPOT-5 影像,应用面向对象的分类方法实现了香港米埔红树林的分类研究。随着新型传感器的在轨运行,学者们也进行了相关研究,Wan 等^[15]应用 GF-5 高光谱数据对香港米埔的红树林进行了分类研究,展示了 GF-5 高光谱数据的应用效果。在航空高光谱方面,Hati 等^[16]比较了航空高光谱 AVIRIS-NG 和卫星高光谱 Hyperion 与多光谱 Landsat 8 OLI 及 Sentinel-2 在红树林种群分类研究中的效果,显示出航空 AVIRIS-NG 数据在种群分类中的高精度性能。近年来,无人机平台遥感技术快速发展,在红树林遥感监测中也逐渐开展。刘凯等^[17]基于面向对象分类的最邻近分类器与随机森林分类器对红树林树种进行精细分类和对比分析,并探讨了不同类型无人机平台在红树林资源调查应用中的优缺点。Cao 等^[18]通过无人机高光谱影像结合数字表面模型,利用最邻近法和支持向量机分类方法对广东淇澳红树林种群进行了分类研究。

基于无人机平台的高光谱传感器可以提供丰富的地物信息,且其灵活高效,是区域精细化数据获取的必要手段,运用高光谱技术对湿地植被光谱特征进

行分析研究是近年来的热点和重点内容,也是红树林理化信息获取的重要依据^[19-20]。然而,目前相关的研究并不多见,本研究以无人机高光谱影像为基础对滨海湿地红树林种群进行识别分类,为区域红树林湿地保护提供数据支撑,为红树林种群研究提供方法参考。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

漳江口红树林保护区位于福建省云霄县漳江入海口(23°53'45"~23°56'00"N,117°24'07"~117°30'00"E)(图 1),总面积为 2 360 hm²,是以红树植物、湿地水鸟、珍稀水产种质资源为主要对象的湿地类型自然保护区,是我国北回归线北侧种类最多、生长最好的红树林天然群落,为国家级自然保护区,并被列入《国际重要湿地名录》。漳江口红树林保护区属于亚热带海洋性季风气候,气候温暖湿润,年均气温为 21.2℃,年均降水量为 1 714.5 mm。

2.2 数据来源

本研究于 2019 年 10 月 28 日,应用纵横 CW-10 垂直起降固定翼无人机,通过稳定云台搭载德国 Cubert S185 画幅式高光谱成像仪,选择晴朗无风的中

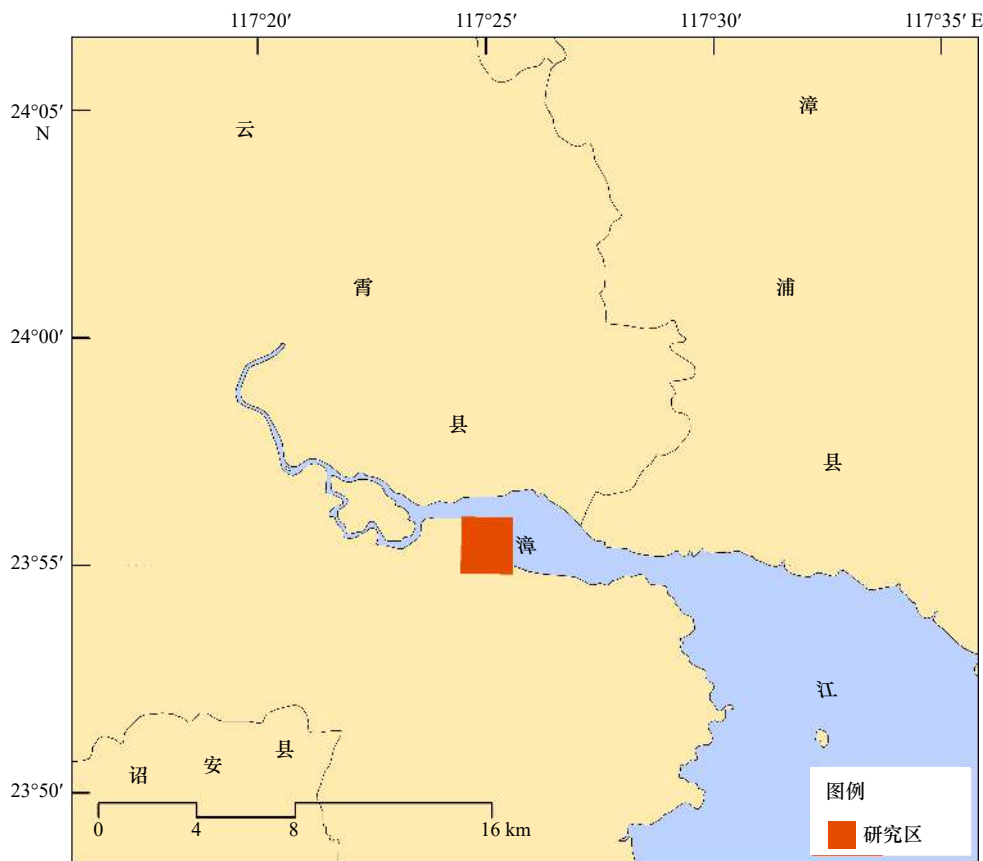


图 1 漳江口红树林研究区位置

Fig. 1 The location of Zhangjiangkou mangrove in the study area

午时段进行研究区控制飞行试验, 飞行前进行研究区航线规划、光谱仪白板校准, 飞行过程中对区域特征点位进行了地面控制测量, 飞行高度为 120 m。

CW-10 兼顾固定翼和旋翼机的功能, 最大起飞重量为 12 kg, 任务载荷为 1~2 kg, 巡航速度为 20 m/s, 最大续航时间为 1.5 h, 抗风能力为 6 级, 差分定位精度水平为 1 cm, 垂直精度为 3 cm。S185 成像光谱仪的光谱范围为 450~950 nm, 采样间隔为 4 nm, 光谱

分辨率为 8 nm, 光谱通道有 125 个。

对获取的无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)高光谱影像利用 Cubert-Pilot 软件进行图像融合, 利用 PhotoScan 软件进行影像拼接, 基于地面控制点进行几何校正, 最终裁剪生成研究区高光谱影像图(图 2a)。在高光谱影像获取的同时应用索尼 a7R II 普通数码相机获取了研究区 5 cm 空间分辨率的普通光学正射影像(图 2b)。

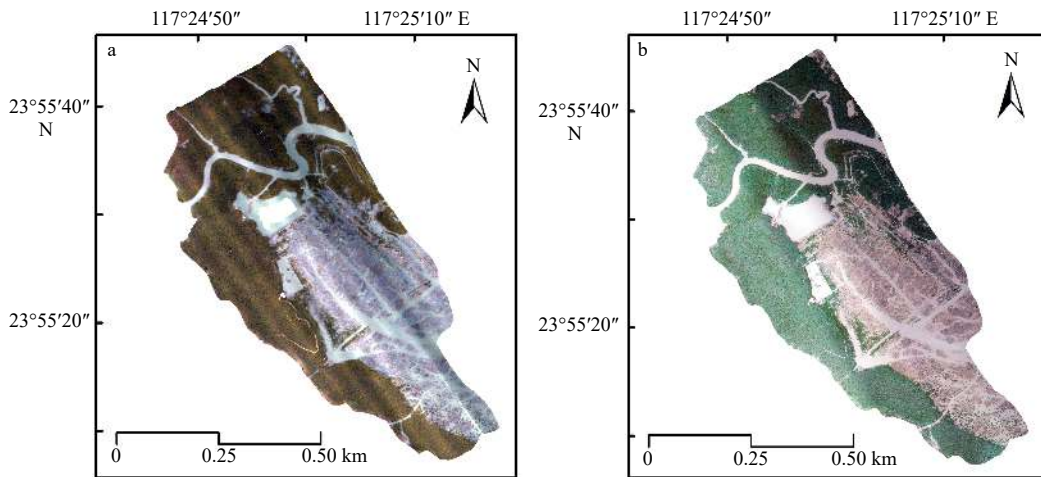


图 2 研究区无人机高光谱影像图(a)和普通光学影像(b)

Fig. 2 Unmanned aerial vehicle hyperspectral image (a) and RGB image (b) in the study area

3 结果与讨论

3.1 原始光谱特征

根据野外调查并结合研究区主要植被类型的实际分布情况, 本研究选取红树植被桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、秋茄(*Kandelia obovata*)和滨海盐沼互花米草(*Spartina alterniflora*) 4 种典型植被类型进行分析。根据野外调查植被种群的 GPS 位置信息和高光谱影像的纹理特征, 选取单种植被覆盖度大于 80% 的 1 304 个点位为样本点, 其中, 训练样本 911 个, 验证样本 393 个(表 1)。

根据训练样本点位在影像上提取光谱信息, 并对同类样本光谱进行均值和平滑处理, 最终得到研究区 4 种植被类型的光谱反射率曲线(图 3)。由图 3 可见, 桐花树、白骨壤和秋茄 3 种植被类型在可见光和近红外波段表现出典型绿色植物的主要光谱响应特征。在可见光波段, 植物光谱主要受叶绿素含量的影响, 470 nm 蓝光波段和 670 nm 红光波段附近叶绿素吸收辐射能形成吸收谷, 在 550 nm 绿光波段附近吸收相对减少, 形成绿色反射峰。受叶片内部细胞组织对近红外波段强反射的影响, 670~780 nm 之间“红边”反射迅速增高。近红外波段受叶片内部的细胞结

表 1 研究区典型植被类型样本情况表

Table 1 The information sheet of sample of the typical vegetation species in the study area

植被类型	桐花树	白骨壤	秋茄	互花米草
训练样本数	458	188	102	163
验证样本数	121	94	83	95

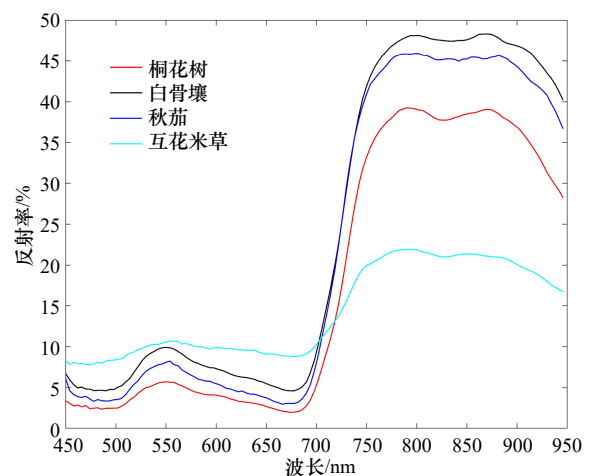


图 3 研究区典型植被类型光谱反射率曲线

Fig. 3 Spectral reflectance curves of typical vegetation species in the study area

构和叶冠结构对光强烈反射的影响, 780~950 nm 近红外波段内表现出高反射率特征, 且由于植被种群间叶子内部结构的变化, 不同植被种群近红外波段光谱反射率差异较可见光波段明显。

对互花米草而言, 不同于红树植被的常绿特性, 其光谱特征主要受季节性生长规律的影响, 10月漳江口互花米草植株生长进入末期, 并出现枯萎和倒伏, 叶片叶绿素含量降低, 导致可见光波段的光谱反射率显著提高^[21]。而在近红外波段受叶片细胞结构和叶片含水量的影响, 使得光谱反射率相对较低^[22-23]。

3.2 光谱变换特征

光谱特征的选择对湿地植被的识别精度和效率有着直接的影响^[24], 为了进一步突出植被的光谱信息, 增大植被光谱差异性, 需要放大植被的光谱特征。本研究对原始光谱进行一阶微分变换 FD (公式(1))、二阶微分变换 SD (公式(2))、包络线去除 CR (公式(3)) 3种变换。

$$FD(\lambda_i) = [r(\lambda_{i+1}) - r(\lambda_{i-1})] / (2\Delta\lambda), \quad (1)$$

$$SD(\lambda_i) = [r(\lambda_{i+2}) - 2r(\lambda_i) + r(\lambda_{i-2})] / (4\Delta\lambda^2), \quad (2)$$

$$\begin{cases} CR(\lambda_i) = r(\lambda_i) / h(\lambda_i), \\ h(\lambda_i) = r(\lambda_{start}) + k(\lambda_i - \lambda_{start}), \\ k = (r_{end} - r_{start}) / (\lambda_{end} - \lambda_{start}), \end{cases} \quad (3)$$

式中, $r(\lambda_{i+1})$ 、 $r(\lambda_{i-1})$ 、 $r(\lambda_{i+2})$ 、 $r(\lambda_i)$ 、 $r(\lambda_{i-2})$ 分别是各波段对应位置的光谱反射率; $\Delta\lambda$ 为相邻波长间的增量; $h(\lambda_i)$ 为 λ_i 波段对应的包络线外壳值; k 是起点波段和终点波段之间的斜率; λ_{start} 、 λ_{end} 为起点和终点波长。

3.2.1 一阶微分变换

一阶微分反映光谱曲线的响应速度, 能够减弱背景噪声^[25]。本研究对一阶微分变换后的光谱反射率曲线, 引入“三边”参数, 即蓝、黄、红“三边”斜率 Db 、 Dy 、 Dr 和“三边”面积 Sb 、 Sy 、 Sr 进行定量表达^[26](表 2)。由表 2 可见, 4种植被的“三边”参数中, 蓝边斜率 Db 和黄边斜率 Dy 值之间虽然有一定的区分但相差不大, 红边斜率 Dr 之间的相差值为 0.036~0.582, 表现出相对较好的区分度。在“三边”面积中, 白骨壤和秋茄两者的“三边”面积 Sb 、 Sy 、 Sr 值相对接近, 而其他种群间蓝、黄、红“三边”面积相差值分别为 0.159~0.382、0.091~0.214 和 1.400~7.266, 因此“三边”面积能进行 3种植被类型的区分, 其中红边面积 Sr 的区分度相对较好。

3.2.2 二阶微分变换

二阶微分光谱可放大不同植被的形态、水分和叶绿素含量信息, 并能削弱太阳角、地形因素、云层覆盖等对图像亮度的影响^[27]。本研究根据二阶微分变换曲线分别统计峰、谷波段内 4种植植二阶微分绝对

值的最大值即最大峰度值 K (表 3)。可见, 650~700 nm 波段的最大峰度值 $K1$ 由大到小依次为秋茄、白骨壤、桐花树、互花米草, 700~720 nm 波段的最大峰度值 $K2$ 由大到小依次为桐花树、秋茄、白骨壤、互花米草, 720~750 nm 波段的最大峰度值 $K3$ 由大到小依次为秋茄、桐花树、白骨壤、互花米草。650~700 nm 波段白骨壤和秋茄最大峰度值相差较小, 为 0.001 3, 其他种群间最大峰度值相差值为 0.007 9~0.019 8。700~720 nm、720~750 nm 波段桐花树和秋茄最大峰度值相差较小, 分别为 0.001 7、0.000 8, 其他种群间最大峰度值相差分别为 0.003 7~0.015 5 和 0.002 0~0.017 0。因此, 综合应用 650~750 nm 波段二阶微分变换后的最大峰度 K 值可适当进行植被种群类型的区分。

3.2.3 包络线去除

包络线去除能有效地增强地物吸收和反射特征, 该方法将反射率归一化, 进而将地物吸收特征归一化到统一的光谱背景中, 实现多种地物光谱的特征对比^[28]。由图 4 可见, 4种植植类型的包络线去除曲线具有一致的光谱吸收特征, 在吸收谷中表现出一定的差异性, 为了进一步比较其差异性, 分别计算 450~550 nm 和 550~750 nm 两个波段范围的吸收深度 H 、

表 2 研究区典型植被类型“三边”参数

Table 2 Three sides spectral parameters of the typical vegetation species in the study area

植被类型	Db	Dy	Dr	Sb	Sy	Sr
桐花树	0.002	-0.014	0.726	-0.239	-0.189	8.892
白骨壤	0.006	-0.031	0.791	-0.398	-0.312	10.313
秋茄	0.009	-0.035	0.827	-0.458	-0.307	10.292
互花米草	0.026	-0.001	0.245	-0.076	-0.098	3.047

表 3 研究区典型植被类型最大峰度统计

Table 3 The maximum kurtosis of the typical vegetation species in the study area

植被类型	650~700 nm		700~720 nm		720~750 nm	
	$K1$	$B1$	$K2$	$B2$	$K3$	$B3$
桐花树	0.019 9	690	0.024 8	718	0.031 6	738
白骨壤	0.027 8	690	0.019 4	714	0.029 6	738
秋茄	0.029 1	690	0.023 1	714	0.032 4	730
互花米草	0.009 3	690	0.009 3	718	0.015 4	742

注: $K1$ 、 $K2$ 、 $K3$ 分别为各波段范围内的最大峰度值; $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 分别为各峰度对应的波段值。

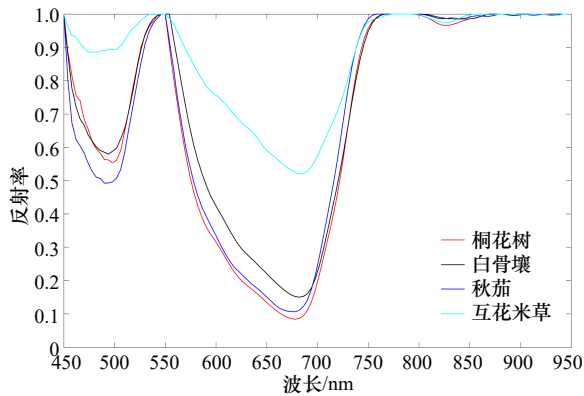


图4 包络线去除光谱反射率变换曲线

Fig. 4 Spectral reflectance curves of continuum removal

吸收峰面积 A 、左吸收峰面积 AL 和对称度 S (表4)。

由表4可以看出, 4种植被在450~550 nm波段范围内的吸收深度 $H1$ 、左吸收峰面积 $AL1$ 、吸收峰面积 $A1$ 明显小于其在550~750 nm波段内的吸收深度 $H2$ 、左吸收峰面积 $AL2$ 、吸收峰面积 $A2$, 而两个波段

范围内的对称度 S 基本相似。两个不同波段范围内的吸收特征均表现出吸收深度、左吸收峰面积、吸收峰面积3个特征参数在红树植被上的值均明显高于其在互花米草上的参数值。桐花树、白骨壤和秋茄对应的 $H1$ 值为0.420 4~0.507 4、 $AL1$ 值为13.791 8~15.476 2、 $A1$ 值为24.359 9~30.705 8、 $H2$ 值为0.849 3~0.916 0、 $AL2$ 值为76.755 4~86.550 7、 $A2$ 值为112.484 6~127.111 5; 互花米草相应的参数 $H1$ 值为0.114 7、 $AL1$ 值为2.587 4、 $A1$ 值为6.328 5、 $H2$ 值为0.479 6、 $AL2$ 值为36.971 9、 $A2$ 值为56.787 7。总体上, 4种植被类型间的吸收深度、吸收峰面积、左吸收峰面积数值上都具有一定的差别, 相差分别为 $H1$ 值0.026 3~0.392 7、 $AL1$ 值0.415 2~12.888 8、 $A1$ 值0.059 2~24.377 3、 $H2$ 值0.022 2~0.436 4、 $AL2$ 值2.496 1~49.578 8、 $A2$ 值7.444 5~70.323 8, 其中两个吸收峰面积 $A1$ 和 $A2$ 在4种植被种群间的差别相对较大, 可较好地用于植被种群间的区分。

表4 研究区典型植被类型包络线去除光谱吸收参数

Table 4 Spectral absorption parameters after continuum removal of typical species in the study area

植被类型	$H1$	$H2$	$AL1$	$AL2$	$A1$	$A2$	$S1$	$S2$
桐花树	0.446 7	0.916 0	15.061 0	86.550 7	24.359 9	127.111 5	0.618 3	0.680 9
白骨壤	0.420 4	0.849 3	13.791 8	76.755 4	24.419 1	112.484 6	0.564 8	0.682 4
秋茄	0.507 4	0.893 8	15.476 2	84.054 6	30.705 8	119.929 1	0.504 0	0.700 9
互花米草	0.114 7	0.479 6	2.587 4	36.971 9	6.328 5	56.787 7	0.408 9	0.651 1

注: $H1$ 、 $AL1$ 、 $A1$ 、 $S1$ 为450~550 nm波段范围内的参数值; $H2$ 、 $AL2$ 、 $A2$ 、 $S2$ 为550~750 nm波段范围内的参数值。

3.3 决策树构建

为了有效地筛选出具有较好植被类型识别能力的光谱特征参数, 本研究对一阶微分变换、二阶微分变换和包络线去除后提取的 Db 、 Dy 、 Dr 、 Sb 、 Sy 、 Sr 、 $K1$ 、 $K2$ 、 $K3$ 、 $H1$ 、 $AL1$ 、 $A1$ 、 $S1$ 、 $H2$ 、 $AL2$ 、 $A2$ 、 $S2$ 共911组17个光谱参数进行基于马氏距离的逐步判别分析。结果表明, 通过两个典型功能判别函数入选13个光谱参数, 经检验, 4种植被类型样本的交叉验证总体识别精度可达到95.5%, 筛选出的13个光谱参数分别是 Db 、 Dr 、 Sb 、 Sy 、 Sr 、 $K1$ 、 $K2$ 、 $H1$ 、 $AL1$ 、 $A1$ 、 $H2$ 、 $AL2$ 、 $A2$ 判别分析结果如图5所示。

应用C5.0经典决策树模型算法构建决策树, C5.0决策树算法是由QUINLAN提出的ID3算法不断改进形成, 是以信息熵的下降速度作为选取最佳分支变量和分割阈值的判定依据^[29]。去除研究区的水体信息, 将通过逐步判别分析方法入选的13个光谱特征

参数作为测试变量, 桐花树、白骨壤、秋茄和互花米草4种典型植被类型作为目标变量, 最终通过阈值判

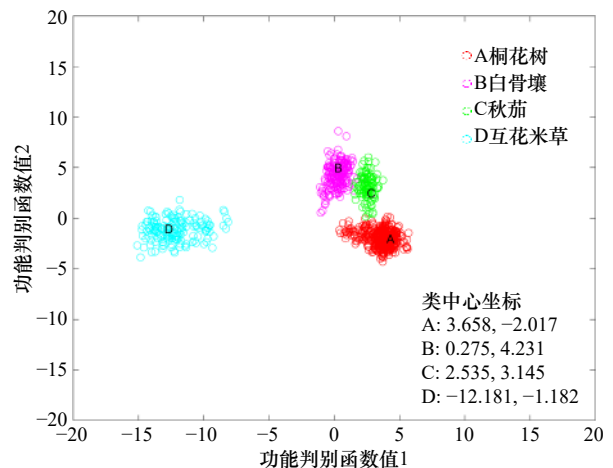


图5 研究区典型植被类型逐步判别分析结果

Fig. 5 Stepwise discriminant analysis result of the typical vegetation species in the study area

断、优化和修剪构建了具有 14 个节点, 深度为 8 的决策树模型(图 6)。

3.4 结果与评价

由于用于本研究的高光谱数据具有 125 个波段, 数据量较大, 因此, 本研究选取区域范围内从上至下 4 个代表性区块 a、b、c、d 进行识别。通过图像参数计算和图像波段合并后, 利用上述决策树模型进行植被种群分类识别, 其分类识别结果见图 7 所示。

由图 7 可知, 研究区上部 a 区块以桐花树和秋茄

混合生长类型为主, 中间 b 和 c 区块呈现白骨壤、桐花树和秋茄三者的共同生长现状, 研究区下部 d 区块则以白骨壤分布为主, 伴有少量的秋茄分布, 而近水域部分则以互花米草的分布为主, c 区块在互花米草分布区的边缘有成片桐花树分布。

为了分析基于高光谱特征的红树种群分类结果的准确性, 本研究以同期获取的研究区 5 cm 空间分辨率无人机普通光学正射影像为基础并结合部分现场调查资料进行精度检验。在 a、b、c、d 4 个区块中

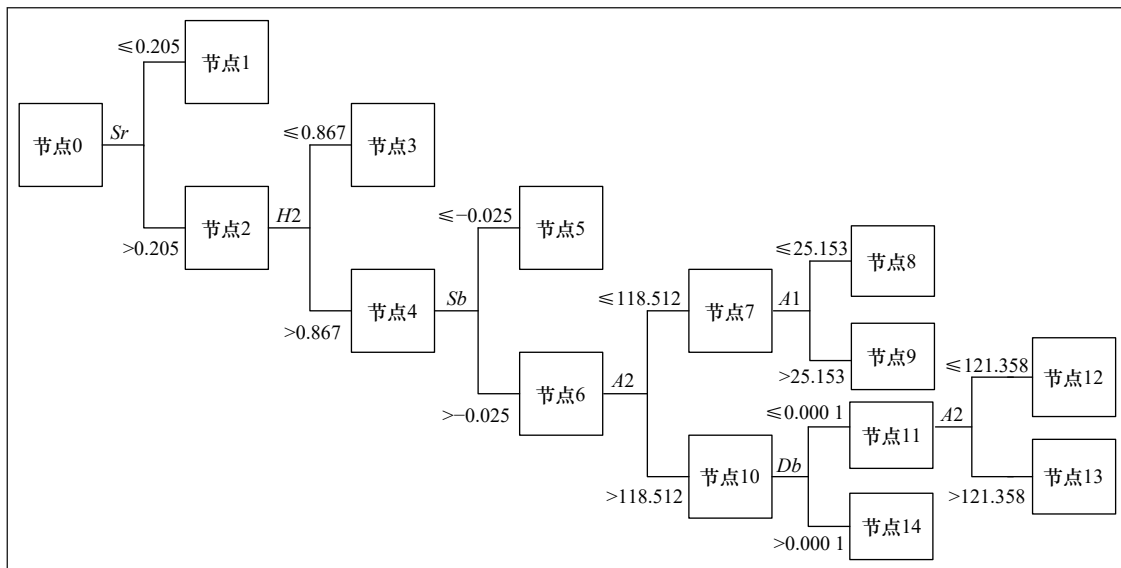


图 6 研究区典型植被类型决策树模型示意图

Fig. 6 The sketch map of decision tree classification model of the typical vegetation species in the study area

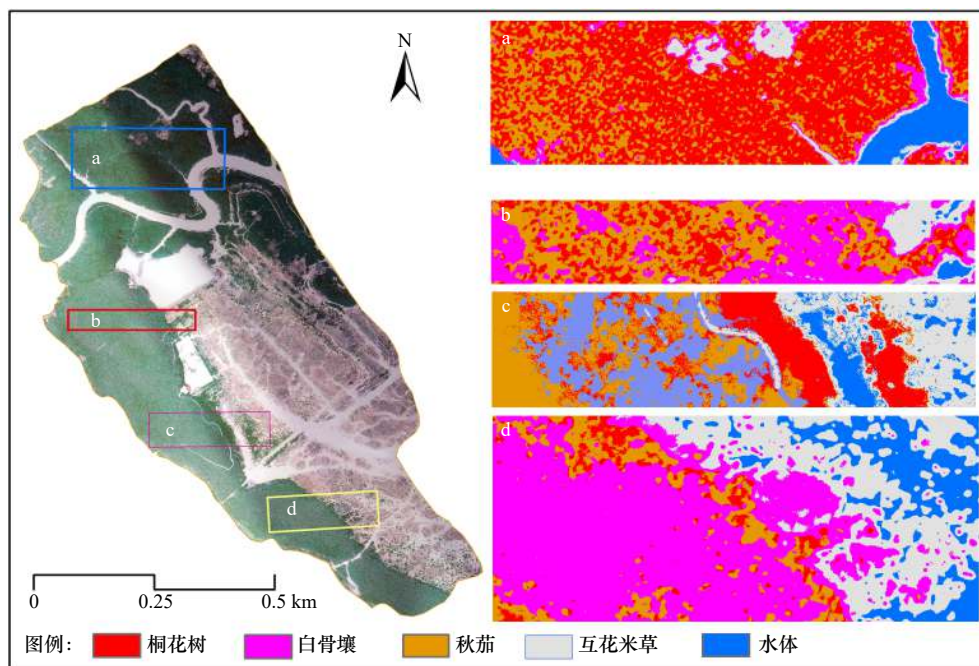


图 7 研究区植被类型分类识别结果

Fig. 7 Identification and classification results of the typical vegetation species in the study area

随机选取 498 个 1 m×1 m 样方, 对无人机普通光学正射影像上的样点进行专家目视解译, 建立混淆矩阵(表 5), 最终计算得到总体分类精度为 87.95%, Kappa 系数为 83.81%, 表明本研究结果具有较好的分类识别精度。

4 结论

漳江口红树林保护区植被种群呈现自上到下不同类型的分布格局, 研究区上部以桐花树和秋茄混生长类型为主, 中间呈现白骨壤、桐花树和秋茄三者的共生现状, 研究区下部则以白骨壤分布为主, 伴有少量的秋茄分布, 而近水域部分以互花米草分布为主。

以同期 5 cm 空间分辨率影像和地面调查资料为真实值, 通过混淆矩阵计算得到研究区总体分类精度为 87.95%, Kappa 系数为 83.81%, 表明本研究的红树林种群分类结果具有较好的精度。

在高光谱识别分类过程中, 红树林与水体交界的区域, 受浑浊水体的影响, 光谱特征对分类结果会有一定的影响, 容易产生误判。

参考文献:

- 王乐, 时晨, 田金炎, 等. 基于多源遥感的红树林监测[J]. *生物多样性*, 2018, 26(8): 838–849.
Wang Le, Shi Chen, Tian Jinyan, et al. Researches on mangrove forest monitoring methods based on multi-source remote sensing[J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(8): 838–849.
- 林鹏. 中国红树林湿地与生态工程的几个问题[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(6): 33–38.
Lin Peng. The characteristics of mangrove wetlands and some ecological engineering questions in China[J]. *Engineering Science*, 2003, 5(6): 33–38.
- Seto K C, Fragkias M. Mangrove conversion and aquaculture development in Vietnam: a remote sensing-based approach for evaluating the Ramsar Convention on Wetlands[J]. *Global Environmental Change*, 2007, 17(3/4): 486–500.
- Jia Mingming, Zhang Yuanzhi, Wang Zongming, et al. Mapping the distribution of mangrove species in the Core Zone of Mai Po Marshes Nature Reserve, Hong Kong, using hyperspectral data and high-resolution data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 33: 226–231.
- Jia Mingming, Wang Zongming, Zhang Yuanzhi, et al. Monitoring loss and recovery of mangrove forests during 42 years: the achievements of mangrove conservation in China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 73: 535–545.
- Ciri C, Ochieng E, Tieszen L L, et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(1): 154–159.
- Wang Le, Jia Mingming, Yin Dameng, et al. A review of remote sensing for mangrove forests: 1956–2018[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111223.
- Zhu Yuanhui, Liu Kai, Liu Lin, et al. Retrieval of mangrove aboveground biomass at the individual species level with worldview-2 images[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 12192–12214.
- Wang L, Sousa W P, Gong P. Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(24): 5655–5668.
- Everitt J H, Yang C, Sriharan S, et al. Using high resolution satellite imagery to map black mangrove on the Texas gulf coast[J]. *Journal of Coastal Research*, 2008, 2008(246): 1582–1586.
- Hauser L T, Vu G N, Nguyen B A, et al. Uncovering the spatio-temporal dynamics of land cover change and fragmentation of mangroves in the Ca Mau peninsula, Vietnam using multi-temporal SPOT satellite imagery (2004–2013)[J]. *Applied Geography*, 2017, 86: 197–207.
- Xia Qing, Qin Chengzhi, Li He, et al. Evaluation of submerged mangrove recognition index using multi-tidal remote sensing data[J].

表 5 研究区典型植被分类结果混淆矩阵

Table 5 Confusion matrix of classification results of the typical vegetation species in the study area

	桐花树	白骨壤	秋茄	互花米草	总计	用户精度/%
桐花树	131	3	12	0	146	89.72
白骨壤	3	108	4	6	121	89.25
秋茄	12	4	113	3	132	85.60
互花米草	2	7	4	86	99	86.86
总计	148	122	133	95	498	–
生产精度/%	88.51	88.52	84.96	90.52	–	–

注: –代表空值。

本研究以高光谱影像获取时段的数据为基础进行基于光谱特征的种群识别研究, 获得了不同红树植被种群的分类结果, 但由于不同物候季节中植被种群的光谱存在一定的差异, 因此, 在日后的工作中应加强红树林不同物候生长季节的光谱特征和光谱区分度研究, 以实现更好的红树林种群识别。

- Ecological Indicators*, 2020, 113: 106196.
- [13] 赵春晖, 王立国, 齐滨. 高光谱遥感图像处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
Zhao Chunhui, Wang Liguang, Qi Bin. Hyperspectral Remote Sensing Images Processing Methods and Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [14] Kumar T, Panigrahy S, Kumar P, et al. Classification of floristic composition of mangrove forests using hyperspectral data: case study of bhitarkanika national park, India[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2013, 17(1): 121–132.
- [15] Wan Luoma, Lin Yinyi, Zhang Hongsheng, et al. GF-5 hyperspectral data for species mapping of mangrove in Mai Po, Hong Kong[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 656.
- [16] Hati J P, Samanta S, Chaube N R, et al. Mangrove classification using airborne hyperspectral AVIRIS-NG and comparing with other spaceborne hyperspectral and multispectral data[J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2021, 24(2): 273–281.
- [17] 刘凯, 龚辉, 曹晶晶, 等. 基于多类型无人机数据的红树林遥感分类对比[J]. 热带地理, 2019, 39(4): 492–501.
Liu Kai, Gong Hui, Cao Jingjing, et al. Comparison of mangrove remote sensing classification based on multi-type UAV data[J]. *Tropical Geography*, 2019, 39(4): 492–501.
- [18] Cao Jingjing, Leng Wanchun, Liu Kai, et al. Object-based mangrove species classification using unmanned aerial vehicle hyperspectral images and digital surface models[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 89.
- [19] 周振超, 李贺, 黄翀, 等. 红树林遥感动态监测研究进展[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(11): 1631–1643.
Zhou Zhenchao, Li He, Huang Chong, et al. Review on dynamic monitoring of mangrove forestry using remote sensing[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(11): 1631–1643.
- [20] Yang Shanshan, Wang Le, Shi Chen, et al. Evaluating the relationship between the photochemical reflectance index and light use efficiency in a mangrove forest with *Spartina alterniflora* invasion[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 73: 778–785.
- [21] 黄冠闽. 漳江口红树林区互花米草的生长特性及其与秋茄的相对竞争力[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
Huang Guanmin. The growth characteristics of *Spartina alterniflora* and relative competitive ability with *Kandelia obovata* in mangrove areas of Zhangjiang Estuary[D]. Xiamen: Xiamen University, 2009.
- [22] 王美玲, 焦琳琳, 王晓红, 等. 曹妃甸湿地典型植被光谱特征差异性分析[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(6): 963–969.
Wang Meiling, Jiao Linlin, Wang Xiaohong, et al. Differences in spectral characteristics of typical vegetation in Caofeidian wetland[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(6): 963–969.
- [23] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013.
Zhao Yingshi. Principles and Methods of Remote Sensing Application Analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013.
- [24] 岁秀珍, 陈浩. 基于高光谱的湿地植被分类研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(5): 137–140, 144.
Sui Xiuzhen, Chen Hao. Classification of wetland vegetation based on hyperspectral[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(5): 137–140, 144.
- [25] 罗宁, 阮仁宗, 王俊海. 基于机器学习的高光谱湿地植被分类研究[J]. 林业调查规划, 2019, 44(3): 1–7.
Luo Ning, Ruan Renzong, Wang Junhai. Classification of hyperspectral wetland vegetation based on machine learning[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2019, 44(3): 1–7.
- [26] 史冰全, 张晓丽, 白雪琪, 等. 基于“三边”参数的油松林叶绿素估算模型[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(5): 80–83.
Shi Bingquan, Zhang Xiaoli, Bai Xueqi, et al. Chlorophyll estimation model of *Pinus tabulaeformis* based on “Sanbian” parameters[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(5): 80–83.
- [27] 曾帅, 况润元, 肖阳, 等. 鄱阳湖湿地植物实测高光谱数据分类[J]. 遥感信息, 2017, 32(5): 75–81.
Zeng Shuai, Kuang Runyuan, Xiao Yang, et al. Measured hyperspectral data classification of Poyang Lake wetland vegetation[J]. *Remote Sensing Information*, 2017, 32(5): 75–81.
- [28] 庞毓雯, 黄雨馨, 问静怡, 等. 泥炭藓群落的光谱特征及遥感识别研究[J]. 植物科学学报, 2019, 37(2): 125–135.
Pang Yuwen, Huang Yuxin, Wen Jingyi, et al. Study on the spectral characteristics and remote sensing recognition of the *Sphagnum community*[J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(2): 125–135.
- [29] 王怀警, 谭炳香, 房秀凤, 等. C5.0决策树Hyperion影像森林类型精细分类方法[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(4): 724–734.
Wang Huaijing, Tan Bingxiang, Fang Xiufeng, et al. Precise classification of forest types use Hyperion image based on the C5.0 decision tree algorithm[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, 35(4): 724–734.

Identification of the mangrove species using UAV hyperspectral images: A case study of Zhangjiangkou mangrove national nature reserve

Zhou Zaiming¹, Chen Benqing¹, Xu Ran², Fang Wei³

(1. Ocean Acoustics and Remote Sensing Laboratory, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China; 2. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Zhangjiangkou Mangrove National Nature Reserve, Yunxiao 363000, China)

Abstract: The composition and distribution of mangrove species are crucial to the protection and restoration of mangrove wetland ecosystems. In this study, mangrove species distribution was identified by unmanned aerial vehicle (UAV) hyperspectral images from Zhangjiangkou mangrove national nature reserve. Spectral characteristics, spectral differential, and spectral continuum removal were analyzed, 17 spectral parameters of 911 group spectral data from different vegetation species were obtained. Furthermore, 13 parameters for decision tree construction were selected by stepwise discriminant analysis. As a result, an accurate distribution map of mangrove species in the study area was obtained through C5.0 decision tree classification model. The vegetation species present different distribution types from top to bottom in the Zhangjiangkou mangrove national nature reserve. The upper part of the study area was dominated by the mixed type of *Aegiceras corniculatum* and *Kandelia obovata*. The middle area showed symbiosis status of three different mangrove species *Avicennia marina*, *Aegiceras corniculatum* and *Kandelia obovata*. The lower part of the study area was dominated by *Avicennia marina*, and a small amount of *Kandelia obovata*. Through the confusion matrix, the overall classification accuracy is 87.95% and the Kappa coefficient is 83.81%, showed a satisfactory precision. Therefore, our mangrove species identification results from UAV hyperspectral images could be used as a reference for ecological protection of regional mangrove wetland, and also as a identification method reference for mangrove species.

Key words: mangrove; Zhangjiangkou; unmanned aerial vehicle (UAV); hyperspectral images; species identification