

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.06.006

杜正联,王琳,包云轩,等.典型滩涂植被米草和芦苇叶片高光谱特征分析[J].中国农业气象,2020,41(6):393-402

典型滩涂植被米草和芦苇叶片高光谱特征分析*

杜正联, 王琳**, 包云轩, 周晓

(南京信息工程大学气象灾害预报和评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044)

摘要: 芦苇 (*Phragmites australis*) 和互花米草 (*Spartina alterniflora*) 是中国东南沿海滩涂典型的植被类型。芦苇是本土植物, 在沿海湿地发挥着重要的生态功能, 而互花米草是外来入侵物种, 近几十年来不断扩散, 对当地生态系统和生物多样性构成严重威胁。利用遥感技术监测互花米草的时空动态已成为关注的热点, 但它与芦苇在叶片形状、颜色等方面都具有很大相似性, 传统的遥感信息难以区分。为了准确识别不同生长阶段的芦苇和互花米草, 以江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区沿海滩涂内的芦苇和互花米草为研究对象, 对它们的原始反射率光谱曲线、经连续统去除后的反射率光谱曲线和一阶导数光谱曲线进行了研究对比。结果表明: 在可见光波段范围内, 分析连续统去除后的光谱曲线可以有效区分夏季芦苇与米草, 芦苇反射率显著低于米草 ($P<0.05$), 在 350–1000nm 波段范围内, 原始光谱曲线更容易区分秋季芦苇与米草, 芦苇反射率显著高于米草 ($P<0.05$)。在 350–540nm 波段和近红外波段范围内, 芦苇原始光谱曲线容易区分植被所处的不同生长阶段, 其中夏季芦苇光谱反射率显著高于秋季 ($P<0.05$), 而在 520–700nm 波段范围内, 连续统去除法更易区分两者, 其中秋季芦苇光谱反射率显著高于夏季 ($P<0.05$)。在 350–1000nm 整个波段范围内, 分析米草原始光谱曲线可以直观区分植被所处的不同生长阶段, 其中夏季米草光谱反射率显著高于秋季 ($P<0.05$)。一阶导数光谱无法直接区分芦苇和米草, 但根据其红边参数以及植被光谱特征参数的变化可以识别两者不同的生长阶段。

关键词: 芦苇; 米草; 高光谱遥感; 光谱特征; 连续统去除法

Analysis of Hyperspectral Characteristics of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* Leaves in Typical Beach

DU Zheng-zhen, WANG Lin, BAO Yun-xuan, ZHOU Xiao

(Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044)

Abstract: The coastal beach has abundant resources and diverse ecological functions, and plays a crucial role in regulating climate, purifying water quality and protecting biodiversity. In recent years, frequent human activities have continued to affect the wetland ecosystem, which has been causing the wetland area to shrink gradually and destroying the living environment. As a result, the ecological function of the wetland is limited. *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* are typical vegetation types in coastal beaches of southeast China. *Phragmites australis* is a native plant which plays important ecological roles in coastal wetlands. *Spartina alterniflora* is an invasive species, which hinders the growth of local plants and changes the spatial distribution of original vegetation. It has been spreading continuously in recent decades and posing a serious threat to the local ecosystem and biodiversity. Traditional vegetation monitoring methods mainly rely on manual sampling, which takes a lot of time and effort and may damage the wetland. It has become a hot topic to use remote sensing technology to monitor *Spartina*

* 收稿日期: 2019-11-22

**通讯作者王琳, E-mail: linwangnuist@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金 (31601221)

第一作者联系方式: 杜正联, E-mail: dzznuist123@163.com

alterniflora. However, it is very similar to *Phragmites australis* in leaf shape, color and other aspects. And the traditional remote sensing information is difficult to distinguish them. In the present study, *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in the coastal beach of Jiangsu Yancheng Wetland National Nature Reserve Rare Birds were selected as the research objects. The original hyperspectral reflectance curves, the reflectance spectral curves after continuum removed, and the first derivative spectral curves were utilized to accurately identify *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in different growing periods, in order to realize fast and accurate identification of different vegetation in wetland and to provide references for dynamic monitoring of the wetland vegetation and protection of the wetland ecosystem. Continuum removal could effectively highlight the absorption and reflection characteristics of spectral curves, which could be used to extract characteristic bands for classification and recognition. It was shown that the original spectral curves of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* were basically the same in summer. Both of them showed a similar reflection peak near 550nm in the green band and a similar absorption valley near 670nm in the red band. Analyzing the spectral curves after continuum removed in the visible bands could effectively distinguish *Phragmites australis* from *Spartina alterniflora* in summer and the reflectance of *Phragmites australis* was lower than that of *Spartina alterniflora*($P<0.05$). However, the original spectral curves in autumn showed that the reflection peak and absorption valley of *Phragmites australis* were higher than those of *Spartina alterniflora*. The analysis of the original spectral curves in the whole range of 350–1000nm made it easier to distinguish *Phragmites australis* from *Spartina alterniflora* in autumn, and *Phragmites australis* had higher reflectance values than *Spartina alterniflora*($P<0.05$). The analysis of the original spectral curves of *Phragmites australis* in the range of 350–540nm and near-infrared bands could easily distinguish its growing periods and the spectral reflectance of *Phragmites australis* in summer was higher than that in autumn($P<0.05$). Meanwhile, the continuum removal method was easier to distinguish them in the range of 520–700nm, and the spectral reflectance of *Phragmites australis* in autumn was higher than that in summer($P<0.05$). In the range of 350–1000nm, the analysis of the original spectral curves of *Spartina alterniflora* could intuitively distinguish different growing periods and the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* in summer was significantly higher than that in autumn($P<0.05$). The first derivative spectra curve could not directly distinguish *Phragmites australis* from *Spartina alterniflora*, but their different growth periods could be identified according to the changes of their red edge and spectral characteristic parameters. The research could provide a basis for the identification of vegetation types and provide effective information for the protection and planning of the wetland ecosystem.

Key words: *Phragmites australis*; *Spartina alterniflora*; Hyperspectral remote sensing; Spectral signature; Continuum removal

位于沿海大潮高低潮位之间的潮浸地带被称为沿海滩涂, 其具有各种丰富的资源和多样的生态功能, 在调节气候、净化水质和保护生物多样性方面起着至关重要的作用。近年来, 频繁的人类活动不断影响滩涂湿地生态系统, 湿地面积逐渐萎缩, 生物生存环境遭到破坏, 湿地生态功能受到限制。芦苇 (*Phragmites australis*) 和互花米草 (*Spartina alterniflora*) 是典型的滩涂植被, 二者生理特征相似, 传统的多光谱遥感难以区分。其中互花米草作为人为栽种的外来物种具有极强的入侵性^[1], 阻碍本地植物的生长, 改变原有植被的空间分布, 最终影响当

地的生态环境, 严重破坏湿地生态系统的平衡^[2]。而芦苇不仅能够抑制水中蓝藻的生长, 还可以涵养水源, 形成良好的湿地生态环境, 为丹顶鹤提供栖息地和食物来源, 对保护湿地生物多样性具有重要意义。植被的变化可以反映滩涂湿地生态系统的变化, 因此, 监测湿地植被对湿地的可持续利用具有重大意义。

传统的植被监测方法主要是靠人工采样, 覆盖范围小, 费时费力, 还有可能破坏湿地, 效果往往不尽如人意^[3]。高光谱遥感信息具有波段多、波谱连续等特点, 能实时获取所观测对象的光谱分布。随

着高光谱遥感技术的普及以及数据库的完善, 遥感技术已经成为识别与监控大尺度植被的重要手段^[4], 在精确识别滩涂湿地植被方面已取得较多成果, Pengra 等^[5]利用高光谱卫星图像和高光谱传感器绘制了北美入侵植物南芦苇的图谱。Lee 等^[6]利用遥感技术监控不同时期台湾淡水河口红树林群落, 进而分析提取不同时期植被的面积和类型。Zomer 等^[7]通过对加利福尼亚等三处沿海湿地中的植物冠层和叶片光谱进行观测, 将不同波段范围内的植物光谱特征进行了归纳。刘润红等^[8]通过不同分辨率的遥感影像, 对滨海湿地的资源管理与生态监控进行了综合评价。谢静等^[9]结合不同时期的遥感图像, 提取不同月份的湿地特征信息, 对三江平原内湿地面积和类型格局变化进行了归纳分析。宋仁飞等^[10]以东洞庭湖为研究对象, 利用高光谱技术对苔草、芦苇、芦蒿、辣蓼和旱柳开展了数据变换和分类识别。此外, 利用遥感技术能够识别湿地植被类型并进行生物量反演研究^[11]。Wang 等^[12]根据不同湿地植被光谱的差异, 利用高空间分辨率图像与 LiDAR 数据整合并绘制了高精度的米草生物量图谱。

但近年来, 针对滩涂湿地生态系统的研究大多集中在湿地资源的合理开发利用^[13-14], 而且针对湿地植被光谱的研究也多集中在选取最优方法进行湿地植被种类划分上, 对不同生长时期不同植被的光谱反射率差异的研究鲜有关注。因此, 本研究以江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区内的本地植物芦

苇和外来入侵植物互花米草为研究对象, 在原始光谱的基础上, 利用连续统去除法和一阶导数光谱对不同时期两种植物的光谱特征进行分析, 以期实现快速准确地识别湿地内不同植被, 从而为湿地植被的动态监测和湿地生态系统的保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区为中国最大的海岸湿地保护区, 地处江苏省盐城市东部 ($32^{\circ}48'47''-34^{\circ}29'28''N$, $119^{\circ}53'45''-121^{\circ}18'12''E$), 总面积约为 $2.4 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[15], 其中核心区域面积约为 $2.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (图 1), 核心区受到了严格的保护, 人为影响较小, 为本研究的开展提供了便利。研究区域内植被类型简单, 且呈带状分布, 自海向陆依次为互花米草、盐蒿和芦苇。其中互花米草原本为入侵物种, 20 世纪 60 年代由人工栽种而成, 现在已经发展为 500~1000m 的植被带^[16]。互花米草不仅可以提高土壤肥力, 作为牲畜的牧草, 还可以减弱海水冲击, 有效防风护堤, 但是其对当地的生态环境具有强烈的侵占效应, 往往导致其它植物种群数量大量减少^[17]。芦苇是研究区的本土物种, 在净化污水和造纸工业中起着重要作用, 能够为滩涂动物尤其是丹顶鹤提供珍贵的食物来源。互花米草的叶片形状、结构与芦苇极为相似, 是植被类型划分中的难点。盐蒿为肉质植物, 叶片呈现红色, 尤其秋季红色更为鲜艳, 因此, 其无论在冠层结构、叶片颜色、

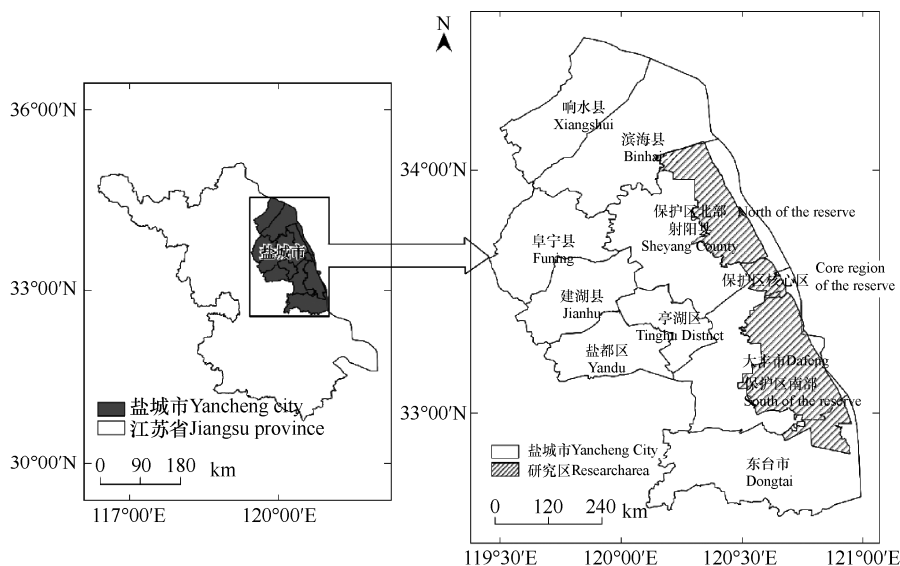


图 1 研究区域位置示意图^[15]

Fig. 1 Location of the study area in coastal beach^[15]

叶面积指数等方面均与其它两种植物有明显差异,在光谱上也很容易与其它植被区分,故不作分析。

1.2 数据采集

2017 年 7 月 18–20 日和 10 月 17–21 日在核心区内设置一条垂直于海岸线的样方带。分别选取芦苇和互花米草(简称米草)作为研究对象,每种植物选取 5 个样点,每个样点设置 3 个大小为 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 的样方(共设 15 个样方)。从每个样方中随机选择 10 个叶片,使用美国 ASD FieldSpec3 便携式地物光谱仪在室内分别对叶片的上中下 3 个部位进行观测,取平均值作为该叶片的光谱数据。

1.3 光谱数据处理

利用 ViewSpec Pro 软件对光谱数据进行预处理,导出原始光谱和一阶导数数据。利用 Origin 软件进行平滑处理,减小噪声。利用 ENVI 软件将平滑过的数据导入,并进行连续统去除。连续统去除法可以有效突出光谱曲线的吸收和反射特征,与其它光谱曲线进行特征数值的比较,从而提取特征波段以供分类识别^[18]。考虑到光谱特征主要表现在可见-近红外波段上且波长大于 1000nm 以后的光谱数据受水吸收等影响波动较大^[19],所以最终选择 $350\text{--}1000\text{nm}$ 波段数据,数据间隔为 1nm 。

利用 SPSS19.0 判断两种植物叶片光谱差异的显著性水平。

2 结果与分析

2.1 两种滩涂植被光谱特征的种间差异

2.1.1 夏季光谱

图 2a 为夏季芦苇和米草的原始光谱曲线。从整体上看,夏季芦苇和米草的光谱曲线基本一致,且两者在绿光波段以 550nm 附近为中心处均表现出明显的反射峰,在红光波段以 670nm 附近为中心处均表现出明显的吸收谷。在可见光波段米草的光谱反射率略高于芦苇,在近红外波段反而低于芦苇,但这种差异未达到显著性水平。

图 2b 是连续统去除后的光谱曲线。由图可见,在对原始光谱进行连续统去除之后,曲线特征与原光谱曲线特征产生了变化。米草和芦苇在以 490nm 附近为中心的蓝光波段和以 670nm 为中心的红光波段均表现出明显的吸收谷,在以 540nm 为中心的绿光波段处均表现出明显的反射峰。在 $379\text{--}722\text{nm}$ 的可见光波段范围内米草反射率高于芦苇,且二者差异在 $400\text{--}690\text{nm}$ 波段范围内大多达到显著性水平($P<0.05$)。对比图 2a、

2b 可见,在可见光波段范围内,连续统去除法能够区分出芦苇和米草,但是在近红外波段范围内原始光谱和连续统去除法均不易区分。

图 2c 为夏季两种植物的一阶导数光谱曲线,主要显示了原始光谱曲线的变化速率。由图可见,夏季两种植物的一阶导数光谱曲线特征基本一致,仅在 $920\text{--}964\text{nm}$ 波段范围内达到显著差异($P<0.05$)。在

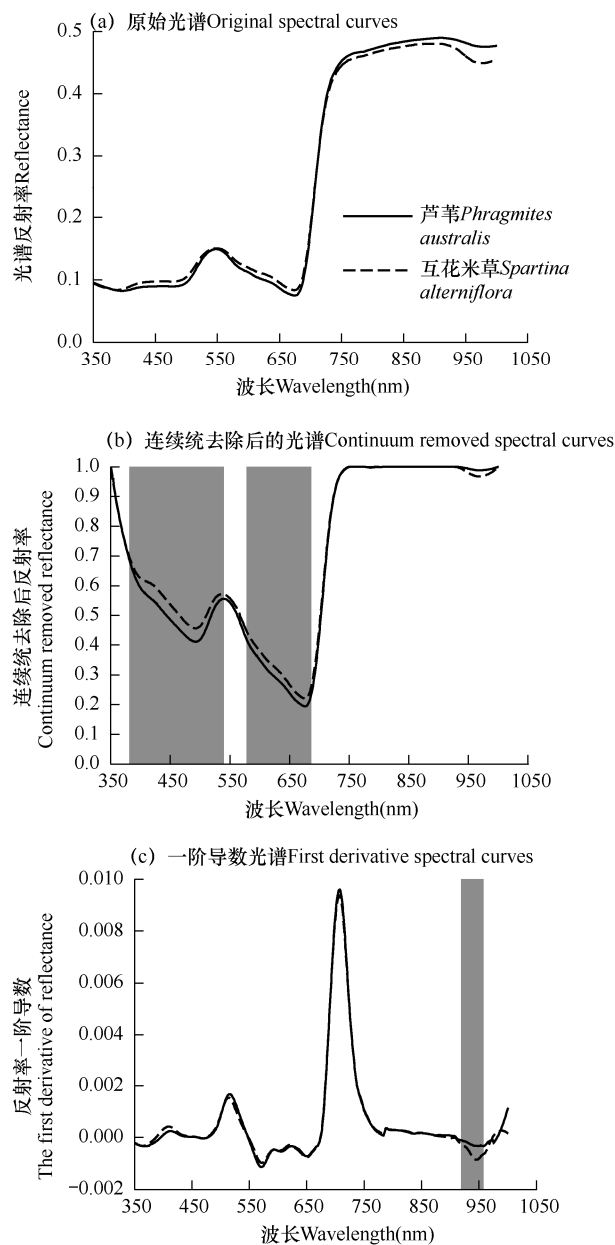


图 2 芦苇与米草夏季(7月中旬)光谱曲线对比

Fig. 2 Comparison of spectral curves between *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in summer (in the middle ten-day of July)

注:灰色部分表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Gray represents $P<0.05$. The same as below.

708nm 处的反射率反应两种植物在“红边”的反射率增速达到了极值，即红边幅值达到最大。由表 1 可见，夏季两种植物的红边参数无显著差别，绿峰红谷参数也较为接近，一阶导数光谱无法有效区分两者。

表 1 夏季两种植被光谱特征参数

	红边位置	红边幅值	绿峰位置 WP_g	绿峰幅值	红谷位置 WP_o	红谷幅值
	WP_r (nm)	Dr	(nm)	Rg	(nm)	Ro
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	708	0.0096	547	0.1490	674	0.0749
米草 <i>Spartina alterniflora</i>	708	0.0094	548	0.1502	674	0.0835

注：红边位置表示红光范围内导数光谱最大值所在的波长，红边幅值表示红光范围内导数光谱的最大值；绿峰位置表示绿光范围内原始光谱最大值所在的波长，绿峰幅值表示绿光范围内原始光谱的最大值；红谷位置表示红光范围内原始光谱最小值所在的波长，红谷幅值表示红光范围内原始光谱的最小值。下同。

Note: WP_r is the wavelength corresponding to the maximum value of 1st derivative spectrum within red-edge. Dr is the maximum value of 1st derivative spectrum within red-edge. WP_g is the wavelength corresponding to the maximum value of original spectrum within green-edge. Rg is the maximum value of original spectrum within green-edge. WP_o is the wavelength corresponding to the minimum value of original spectrum within red-edge. Ro is the minimum value of original spectrum within red-edge. The same as below.

2.1.2 秋季光谱

由图 3a 可以看出，秋季芦苇和米草的光谱曲线也基本一致，均在绿光波段以 550nm 为中心表现出明显的反射峰，在红光波段以 670nm 为中心表现出明显的吸收谷，在此之后的波段反射率都呈现先上升后基本稳定的趋势。在秋季，芦苇的反射率一直

高于米草，整个波段范围内差异达到显著性水平 ($P<0.05$)，利用原始光谱反射率的差异可以直观区分两者。

图 3b 为原始光谱曲线进行连续统去除后获得的曲线图，在该图中，两种植物的光谱曲线差异在 410–518nm 达到显著水平 ($P<0.05$)，芦苇的反射率

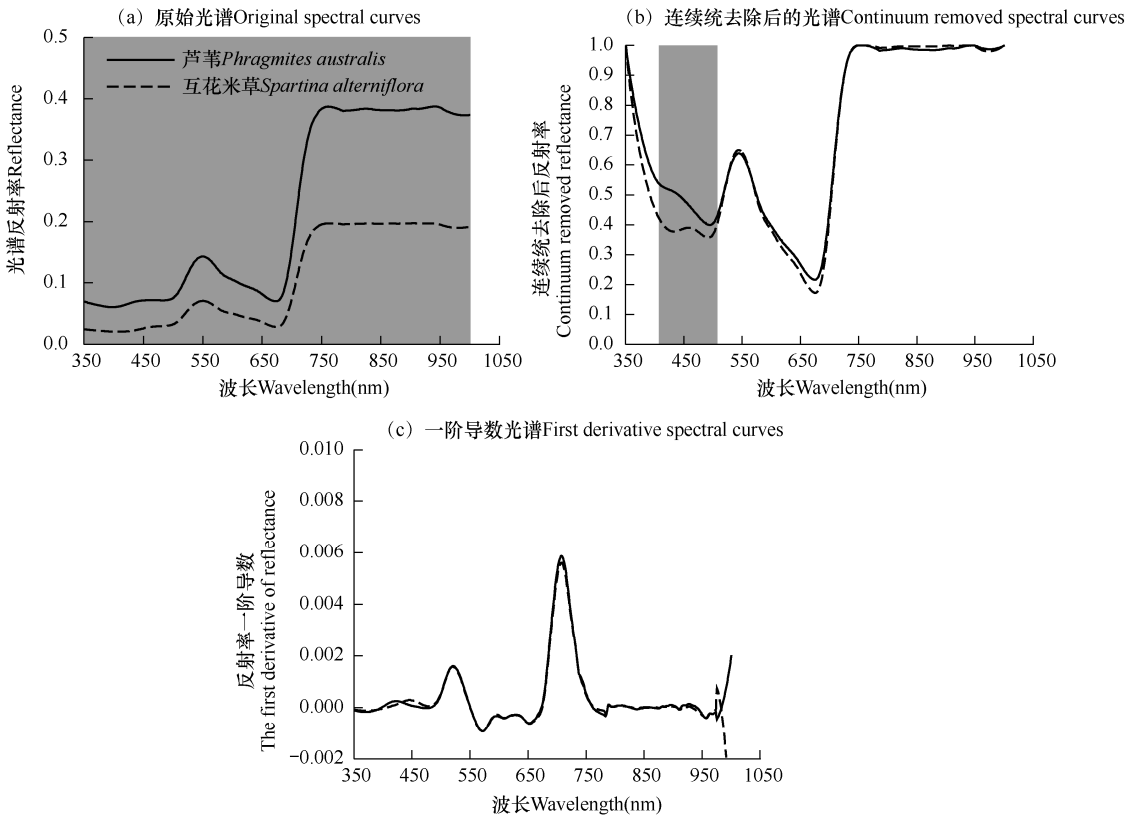


图 3 芦苇与米草秋季（10 月中旬）光谱曲线对比

Fig. 3 Comparison of spectral curves between *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in autumn (in the middle ten-day of October)

高于米草。此外，两者的吸收谷和反射峰波段也发生了变化。两者在绿光波段以 545nm 为中心处存在近乎相同的反射峰，在蓝光波段以 495nm 为中心处和红光波段以 678nm 为中心存在类似的吸收谷，米草吸收谷深度大于芦苇。在近红外波段范围内连续

统去除后无法有效区分两种植被。

秋季两种植物的一阶导数光谱曲线（图 3c）也基本一致，结合表 2 可见，两种植被的红边参数差异不显著，两种植被的绿峰位置和红谷位置也十分接近，但芦苇的绿峰红谷幅值大于米草。

表 2 秋季两种植被光谱特征参数

Table 2 Spectrum parameters of two plants in autumn

	红边位置 WP_r (nm)	红边幅值 Dr	绿峰位置 WP_g (nm)	绿峰幅值 Rg	红谷位置 WP_o (nm)	红谷幅值 Ro
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	708	0.0059	549	0.1432	673	0.0701
米草 <i>Spartina alterniflora</i>	708	0.0056	550	0.0705	674	0.0281

2.2 两种滩涂植被光谱特征的季节差异

2.2.1 芦苇光谱

由图 4a 可见，芦苇的光谱原始曲线在夏季与秋季的变化趋势基本一致，但总体上夏季芦苇的反射率高于秋季，且二者在 350–540nm 波段范围和红光–近红外波段 ($>720\text{nm}$) 差异达到显著性水平 ($P<0.05$)，可以有效识别芦苇的不同生长阶段。

经过连续统去除后的光谱曲线表明（图 4b），在 350–500nm 波段范围内，夏季芦苇反射率略高于秋季，而在 520–700nm 波段范围内，秋季芦苇反射率

显著高于夏季 ($P<0.05$)，且反射峰中心位置相对夏季右移，反射峰高度显著增高。说明连续统去除法在该波段内可以有效区分芦苇不同的生长阶段。

图 4c 为芦苇在夏秋两季的一阶导数光谱曲线。由图可见，其一阶导数光谱曲线形态也非常接近，但在 708nm 附近的峰值大小存在显著差异。结合表 1 和表 2 可知，芦苇夏季的红边幅值大于秋季，且差异显著 ($P<0.05$)，但不同季节的绿峰红谷参数差异不显著。说明一阶导数光谱在红边位置可以区分芦苇不同的生长阶段。

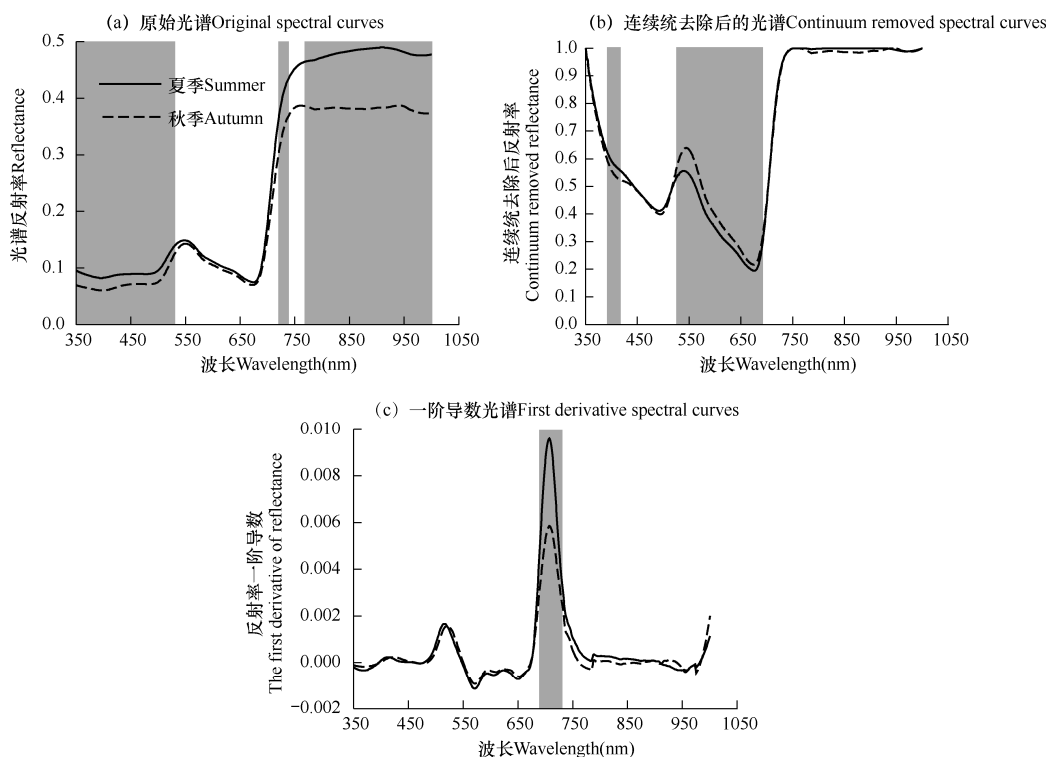


图 4 夏秋两季芦苇的光谱曲线对比

Fig.4 Comparison of spectral curves of *Phragmites australis* in summer(the middle ten-day of July) and in autumn (the middle ten-day of October)

2.2.2 米草光谱

图 5a 为夏季和秋季米草的原始光谱曲线。由图可见, 整体上夏季和秋季米草光谱曲线形态基本一致。在 350–1000nm 波段, 夏季反射率显著高于秋季 ($P<0.05$), 由此可以有效区别米草的不同生长阶段。

经过连续统去除后 (图 5b), 米草在不同季节的差异主要体现在可见光波段。其中秋季光谱曲线在 350–524nm 波段范围内显著低于夏季 ($P<0.05$), 在 524–590nm 波段范围内显著高于夏季 ($P<0.05$), 且夏秋两季的反射峰和吸收谷也呈现出不同的分布: 夏季光谱曲线仅在绿光波段以 536nm 为中心处表现出明显的反射峰, 而秋季在绿光波段以 436nm 为中

心处还存在一个反射峰, 其高度明显低于夏季, 但原曲线中相同位置处的反射峰中心移动到绿光波段 541nm 处, 并且反射峰高度显著增加。秋季米草在蓝光波段以 495nm 为中心处和红光波段以 677nm 为中心处的吸收谷深度相比夏季也出现明显降低。可见, 在 350–590nm 波段范围内, 连续统去除法也可以区分米草的不同生长阶段。

图 5c 为米草在夏秋两季的一阶导数光谱曲线。由图可见, 红边位置处夏季峰值显著大于秋季 ($P<0.05$)。结合表 1 和表 2 可知, 米草夏秋两季的红边、绿峰和红谷位置都很接近, 但夏季的红边、绿峰和红谷幅值皆大于秋季。

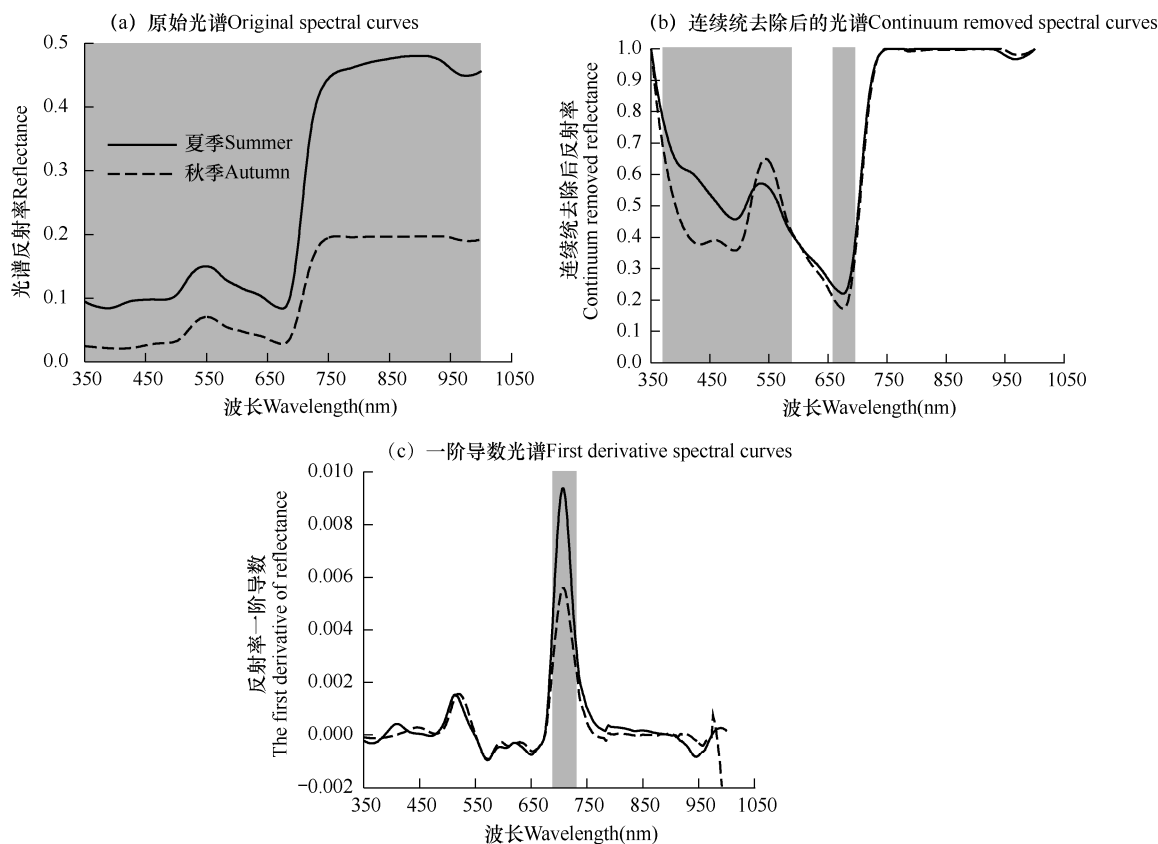


图 5 夏秋两季米草的光谱曲线对比

Fig.5 Comparison of spectral curves of *Spartina alterniflora* in summer(the middle ten-day of July) and in autumn (the middle ten-day of October)

3 结论与讨论

3.1 讨论

本研究以江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区内芦苇和米草为研究对象, 对其原始光谱特征、连续统去除后的光谱特征, 以及一阶导数光谱特征进行比较, 并分析不同品种不同季节间的光谱差异。

研究表明, 夏季芦苇和米草原始光谱曲线大体一致, 光谱特征差异较小, 两者无法有效区分。但在经过连续统去除之后, 两者曲线差异较大, 在可见光波段芦苇光谱反射率显著低于米草 ($P<0.05$)。而秋季芦苇和米草原始曲线差异显著, 芦苇的反射率高于米草, 且在整个波段内都达到显著性差异 ($P<0.05$)。

秋季光谱经过连续统去除后光谱反射率差异反而仅在 410–518nm 达到显著性水平 ($P<0.05$), 芦苇的反射率高于米草。何美梅^[20]研究表明, 7 月互花米草和芦苇的光谱曲线都表现出典型的绿色植物光谱特征, 两者曲线基本相似, 但连续统去除后降低了环境条件对光谱反射率的影响, 使不同反射光谱之间的差异增大, 因此, 在可见光波段内出现了显著性差异。10 月米草正处于植株缓慢变黄并且部分米草倒伏的阶段, 这也解释了秋季米草光谱曲线波动较多, 反射率降低的现象。张雪薇等^[21]在长江口南汇湿地的研究结果与本次试验得出结论相似, 即 7 月两种植物的原始光谱特征差异较小, 经过连续统去除后, 两者差异却非常显著。“红边”是植被光谱最显著的表现之一, 其所在的波段位置出现一阶导数光谱反射率值为最大值, 不同植被甚至是同种植物不同生长状态的“红边”位置会存在差异^[22]。除了秋季芦苇的绿峰红谷明显高于米草外, 其余红边参数和绿峰红谷参数基本相同, 一阶导数光谱和光谱特征参数基本无法区分两者。张启明^[23]在研究长江口南汇东滩植被时也发现了类似现象, 夏季两者的光谱特征参数差异很小, 不易区分。

综上所述, 在 400–690nm 波段范围内使用连续统去除法后, 夏季米草的反射率高于芦苇, 达到显著性差异 ($P<0.05$), 可以有效区分芦苇和米草。在秋季, 芦苇原始光谱曲线反射率在整个波段内都显著高于米草 ($P<0.05$), 便于直接区分两者。一阶导数光谱和光谱特征参数在夏秋两季都无法有效区分这两种植物。

通过分析植被光谱特征的时间差异发现, 夏季植被的原始光谱反射率均明显高于秋季, 芦苇季节间反射率差异在 350–540nm 波段和红光–近红外波段范围内 ($>720\text{nm}$) 差异达到显著水平 ($P<0.05$), 而米草季节间反射率差异在 350–1000nm 波段范围内均达到显著水平。这是因为夏季是芦苇和米草生长的旺盛期, 叶片厚度较大, 叶绿素含量较高, 因此, 反射率较高。但随着时间的推移, 由于光照和温度的降低, 秋季植被会逐渐衰落, 光谱反射率会出现较大的降低^[24]。张雪薇等^[25]在研究夏秋季节潮滩植被光谱特征时发现, 夏季芦苇光谱反射率大多高于秋季, 因为秋季芦苇叶片细胞内的叶绿素含量明显下降, 色素的分解多于合成, 从而影响了芦苇的光谱曲线。对于芦苇而言, 经过连续统去除后,

夏季反射率在 520–700nm 波段范围内显著低于秋季 ($P<0.05$), 这恰好弥补了原始光谱在该波段范围内的不足。对于米草而言, 350–590nm 波段范围内, 夏秋两季反射率曲线波动较大, 且差异达到显著水平 ($P<0.05$), 可以用来确认原始光谱识别的准确性。王佳鹏^[26]的研究发现, 芦苇和互花米草的叶绿素含量与光谱变量相关性分别达到 0.87 和 0.86, 因此, 在秋季随着叶绿素含量的下降, 植被光谱反射率会显著下降。同时, 他还发现位于红光波段范围内的曲线经过连续统去除之后, 与叶绿素含量的相关性更高, 这与本研究结果相似。无论是芦苇还是米草, 夏秋两季植被的一阶导数光谱反射率均在“红边”范围内达到差异显著, 夏季植被的红边幅值大于秋季。从夏季到秋季, 芦苇的绿峰红谷位置基本无变化, 但米草的绿峰红谷幅值却明显减小。刘浦东^[27]认为, 植被叶绿素含量的差异对红边位置的光谱反射率及其通过运算得到的红边参数具有重要影响。秋季植被的叶绿素含量下降, 红边幅值也随之减小。

综上所述, 在 350–540nm 波段和近红外波段范围内, 芦苇夏季原始光谱曲线反射率明显高于秋季, 可以有效区分不同生长时期的芦苇, 在 520–700nm 波段范围内连续统去除后更易区分。对于米草而言, 整个波段范围内, 夏季植被反射率远大于秋季, 使用原始光谱可以快速识别。夏秋两季植被的一阶导数光谱曲线均在“红边”位置差异显著, 夏季的反射率远大于秋季, 由此也可识别不同生长阶段的植被。

但由于外界条件的限制, 本研究仅对比了芦苇和米草在夏季和秋季的光谱差异, 未来将增加春季和冬季的光谱差异, 并考虑增加高光谱卫星遥感影像的研究, 以进一步实现利用高光谱遥感技术对湿地不同生长阶段植被的精确识别。

3.2 结论

(1) 芦苇和米草可以用高光谱数据进行区分。在夏季, 使用连续统去除法后, 可见光波段芦苇光谱反射率显著低于米草 ($P<0.05$), 可以有效区分芦苇和米草。在秋季, 由于芦苇和米草的原始光谱曲线差异显著, 在整个波段内芦苇的反射率显著高于米草, 分析原始光谱曲线更适合区分两者。

(2) 同一植物类型的光谱特征在不同季节有显著差异。在 350–540nm 波段和近红外波段范围内夏季芦苇光谱反射率显著高于秋季 ($P<0.05$), 分析芦苇原始光谱曲线更容易区分植被所处的生长阶段,

而在 520–700nm 波段范围内, 秋季芦苇光谱反射率显著高于夏季 ($P < 0.05$), 连续统去除法显得更为合适。整个波段范围内, 夏季米草光谱反射率显著高于秋季 ($P < 0.05$), 分析其原始光谱曲线可以直观地区分植被所处的生长阶段。

(3) 一阶导数光谱不适合单独区分芦苇和米草, 但可以根据其“红边”参数以及植被光谱特征参数的变化对不同生长阶段的植被进行识别。

参考文献 References

- [1] 谢桂林, 赫福霞, 谢桐音, 等. 米草入侵对江苏省滩涂动物群落的影响[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(3): 68-76.
Xie G L, He F X, Xie T Y, et al. Effects of rice grass invasion on animal communities in shoals of Jiangsu province[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(3): 68-76. (in Chinese)
- [2] Ma Z J, Li B, Zhao B, et al. Are artificial wetlands good alternatives to natural wetlands for waterbirds: a case study on Chongming Island, China[J]. Biodiversity & Conservation, 2004, 13(2): 333-350.
- [3] 张树文, 颜凤芹, 于灵雪, 等. 湿地遥感研究进展[J]. 地理科学, 2013, 33(11): 1406-1412.
Zhang S W, Yan F Q, Yu L X, et al. Research progress of wetland remote sensing[J]. Geographic Sciences, 2013, 33(11): 1406-1412. (in Chinese)
- [4] Rainey M P, Tyler A N, Gilvear D J, et al. Mapping intertidal estuarine sediment grain size distributions through airborne remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(4): 480-490.
- [5] Pengra B W, Johnston C A, Loveland T R. Mapping an invasive plant, *Phragmites australis*, in coastal wetlands using the EO-1 Hyperion hyperspectral sensor[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(1): 74-81.
- [6] Lee T M, Yeh H C. Applying remote sensing techniques to monitor shifting wetland vegetation: a case study of Danshui River estuary mangrove communities, Taiwan[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(4): 487-496.
- [7] Zomer R J, Trabucco A, Ustin S L. Building spectral libraries for wetlands land cover classification and hyperspectral remote sensing[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(7): 2170-2177.
- [8] 刘润红, 梁士楚, 赵红艳, 等. 中国滨海湿地遥感研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(6): 998-1011.
Liu R H, Liang S C, Zhao H Y, et al. Research progress of remote sensing in coastal wetlands in China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(6): 998-1011. (in Chinese)
- [9] 谢静, 王宗明, 任春颖. 基于遥感的湿地景观格局季相分析[J]. 生态学报, 2014, 34(24): 6-14.
Xie J, Wang Z M, Ren C Y. Seasonal analysis of wetland landscape pattern based on remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24): 6-14. (in Chinese)
- [10] 宋仁飞, 林辉, 臧卓, 等. 东洞庭湖湿地植被高光谱数据变换及识别[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(11): 135-139.
Song R F, Lin H, Zang Z, et al. Transformation and identification of hyperspectral data of wetland vegetation in east Dongting lake[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2014, 34(11): 135-139. (in Chinese)
- [11] 王鹏, 万荣荣, 杨桂山. 基于多源遥感数据的湿地植物分类和生物量反演研究进展[J]. 湿地科学, 2017, 15(1): 114-124.
Wang P, Wan R R, Yang G S. Research progress of wetland plant classification and biomass inversion based on multi-source remote sensing data[J]. Wetland Science, 2017, 15(1): 114-124. (in Chinese)
- [12] Wang J, Liu Z, Yu H, et al. Mapping *Spartina alterniflora* biomass using Li DAR and Hyperspectral data[J]. Remote Sensing, 2017, 9(6): 589.
- [13] 李秋月. 扎龙湿地保护区生态旅游研究[J]. 东北农业大学学报(社会科学版), 2007, 5(2): 116-117.
Li Q Y. Research on ecological tourism in Zhalong wetland reserve[J]. Journal of Northeast Agricultural University (Social Science Edition), 2007, 5(2): 116-117. (in Chinese)
- [14] 郑永莉, 许大为, 王瑞兰. 浅析自然湿地景观设计框架[J]. 东北农业大学学报, 2005, 36(4): 541-544.
Zheng Y L, Xu D W, Wang R L. Analysis on landscape design framework of natural wetland[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2005, 36(4): 541-544. (in Chinese)
- [15] 谢富赋, 刘红玉, 李玉凤, 等. 基于极坐标定位的丹顶鹤多尺度越冬生境选择研究: 以江苏盐城自然保护区为例[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 318-328.
Xie F F, Liu H Y, Li Y F, et al. Multi-scale wintering habitat selection of red-crowned crane based on polar positioning: a case study of Yancheng nature reserve in Jiangsu

- province[J].Acta Ecologica Sinica,2018,38(15):318-328.(in Chinese)
- [16] 伍蓝.基于 ALOS 等数据的盐城湿地植被分类及土地覆盖时空变化研究[D].南京:南京师范大学,2008.
- Wu L.Study on vegetation classification and spatial and temporal change of land cover in Yancheng wetland based on ALOS data[D].Nanjing:Nanjing Normal University,2008.(in Chinese)
- [17] 张秀玲.米草属引入中国海岸带的利弊分析[J].生态学杂志,2007,26(11):1878-1883.
- Zhang X L.Analysis of the advantages and disadvantages of the introduction of *Spartina* into the coastal zone of China[J].Journal of Ecology,2007,26(11):1878-1883.(in Chinese)
- [18] 邱琳.东洞庭湖典型湿地植被高光谱特征分析与识别[D].长沙:中南林业科技大学,2013.
- Qiu L.Analysis and identification of hyperspectral characteristics of typical wetland vegetation in east dongting lake[D].Changsha:Central South University Of Forestry and Technology,2013.(in Chinese)
- [19] 赵祥,梁顺林,刘素红,等.高光谱遥感数据的改正暗目标大气校正方法研究[J].中国科学(D 辑:地球科学),2007,37(12):1653-1659.
- Zhao X,Liang S L,Liu S H,et al.Research on atmospheric correction method for dark target correction of hyperspectral remote sensing data[J].Science of China (Series D: Earth Science),2007,37(12):1653-1659.(in Chinese)
- [20] 何美梅.结合地面高光谱遥感与卫星遥感监测崇明东滩互花米草的入侵[D].上海:复旦大学,2008.
- He M M.Combined ground hyperspectral remote sensing and satellite remote sensing monitoring of the invasion of the east beach of chongming[D].Shanghai:Fudan University, 2008.(in Chinese)
- [21] 张雪薇,韩震,刘美君,等.长江口南汇湿地植被的光谱吸收特征研究[J].海洋学研究,2018,36(2):50-54.
- Zhang X W,Han Z,Liu M J,et al.Spectral absorption characteristics of wetland vegetation in Nanhui,Yangtze estuary[J].Oceanographic Research,2008,36(2):50-54.(in Chinese)
- [22] 陈彦兵,况润元,曾帅.基于高光谱数据的鄱阳湖湿地典型植被识别分析[J].人民长江,2018,49(20):23-27.
- Chen Y B,Kuang R Y,Zeng S.Identification and analysis of typical vegetation in wetland of Poyang lake based on hyperspectral data[J].People's Yangtze River,2018,49(20): 23-27.(in Chinese)
- [23] 张启明.长江口南汇东滩优势种植被的光谱和理化参数信息提取与分析[D].上海:上海海洋大学,2015.
- Zhang Q M.Extraction and analysis of spectral and physicochemical parameter information of dominant planted mulch in Nanhui,Yangtze Estuary[D].Shanghai: Shanghai Ocean University,2015.(in Chinese)
- [24] 阮俊潮,戴文红,李文兵,等.滨海湿地优势植物芦苇和互花米草的生态响应与效应研究进展[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2019,18(5):490-498.
- Ruan J C,Dai W H,Li W B,et al.Research progress on ecological response and effect of reeds and reeds in coastal wetland[J].Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition),2019,18(5):490-498.(in Chinese)
- [25] 张雪薇,韩震,王文柳,等.夏秋季节潮滩植被光谱特征的差异性研究[J].海洋湖沼通报,2018,164(5):34-41.
- Zhang X W,Han Z,Wang W L,et al.Differences in spectral characteristics of tidal flat vegetation in summer and autumn[J].Chinese Journal of Marine Lagoons,2018,164(5): 34-41.(in Chinese)
- [26] 王佳鹏.湿地植被叶片光谱特征及其光合色素反演研究[D].上海:华东师范大学,2018.
- Wang J P.Spectral characteristics and photosynthetic pigment inversion of wetland vegetation leaves[D]. Shanghai:East China Normal University,2018.(in Chinese)
- [27] 刘浦东.种间竞争条件下互花米草光谱特征分析及叶绿素含量反演研究[D].上海:华东师范大学,2018.
- Liu P D.Investigation of the spectral characteristics and the inversion of *Spartina alterniflora* chlorophyll content under interspecies competition[D].Shanghai:East China Normal University,2018.(in Chinese)