

庞毓雯, 黄雨馨, 闻静怡, 徐俊锋. 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 YW, Huang YX, Wen JY, Xu JF. Study on the spectral characteristics and remote sensing recognition of the *Sphagnum* community [J]. Plant Science Journal, 2019, 37(2): 125~135

泥炭藓群落的光谱特征及遥感识别研究

庞毓雯^{1,2}, 黄雨馨^{1,2}, 闻静怡^{1,2}, 徐俊锋^{1,2*}

(1. 杭州师范大学遥感与地球科学研究院, 杭州 311121; 2. 浙江省城市湿地与区域变化研究重点实验室, 杭州 311121)

摘要: 以中位泥炭藓(*Sphagnum magellanicum* Brid.)为研究对象, 分别从实测冠层光谱和遥感传感器模拟光谱层面分析其群落的光谱特征。研究结果显示, 中位泥炭藓与北方针叶林光谱差异明显, 最佳光谱识别区间为740~1140 nm和1230~1412 nm。在可见光波段上, 中位泥炭藓与云杉(*Picea engelmannii* Parry ex Engelmann)和黑松(*Pinus contorta* Douglas ex Loudon)的绿峰位置有所差异。水竹(*Phyllostachys heteroclada* Oliver)和中位泥炭藓的光谱识别特征波段集中在可见光-近红外波段, 分别为400~550、560~696、1025~1143 nm。中位泥炭藓与北方针叶林以及水竹的特征光谱区间存在细微差异, 且与水竹在可见光波段有较好的可分性, 因此不同纬度带上中位泥炭藓群落的特征谱宽有所差异。红外波段是中位泥炭藓识别的最佳光谱区间。在多光谱遥感水平上, 中位泥炭藓识别效果较好, 传感器的识别能力依次为: MSI > ALI > OLI > ASTER。在2个中位泥炭藓群落的光谱特征分析中, 导数、对数、包络线去除法的光谱降维能力有所差异, 其中包络线去除法效果最好。

关键词: 泥炭藓; 针叶林; 水竹; 光谱分析; 遥感

中图分类号: Q948; Q949.35^{+2.1}

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2019)02-0125-11

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2019.20125

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on the spectral characteristics and remote sensing recognition of the *Sphagnum* community

Pang Yu-Wen^{1,2}, Huang Yu-Xin^{1,2}, Wen Jing-Yi^{1,2}, Xu Jun-Feng^{1,2*}

(1. Research Academy of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China;
2. Key Laboratory of Wetland and Regional change in Zhejiang Province, Hangzhou 311121, China)

Abstract: *Sphagnum* species are among the most important carbon sequestration plants in peatland systems and are closely related to regional and global material energy balance. Here, we analyzed the spectral characteristics of the *Sphagnum magellanicum* Brid community based on the measured canopy spectrum and remote sensing sensor simulated spectrum. Results showed that the spectral differences between *S. magellanicum* and northern coniferous forest were obvious, and the best spectral recognition intervals were 740~1140 nm and 1230~1412 nm. In the visible light band, the ‘green peak’ position of *S. magellanicum* was different from that of *Picea engelmannii* Parry ex Engelmann and *Pinus contorta* Douglas ex Loudon. Spectral identification characteristics of *Phyllostachys heteroclada* Oliver and *S. magellanicum* were concentrated in the visible-near-infrared bands at 400~550, 560~696, and 1025~1143 nm. There were subtle differences in the characteristic spectral bands between *S. magellanicum*,

收稿日期: 2018-10-09, 退修日期: 2018-11-30。

基金项目: 国家自然科学基金(41571049); 浙江省自然科学基金(LY16D010007); 杭州市科技计划项目(20170533B01)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (41571049), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LY16D010007), and Science and Technology Program of Hangzhou, China (20170533B01).

作者简介: 庞毓雯(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向为湿地植被生态遥感监测(E-mail: tzpangyuwen@126.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: junfneg_xu@163.com)。

northern coniferous forest, and *P. heteroclada*; for example, *S. magellanicum* and *P. heteroclada* showed good separability in the visible light region, thus the characteristic spectral width of the *S. magellanicum* community in different latitudes was different. The infrared band was the best spectral range for *S. magellanicum* recognition. The recognition effect of *S. magellanicum* was better at the multispectral remote sensing level, whereas the recognition performance of the sensor was as follows: MSI > ALI > OLI > ASTER. In the spectral characteristic analysis of the two *S. magellanicum* communities, the spectral dimension reduction ability of the derivative, logarithm, and continuum removal methods was different, among which the continuum removal method was the best.

Key words: *Sphagnum*; Coniferous forest; *Phyllostachys heteroclada*; Spectral analysis; Remote sensing

泥炭藓(*Sphagnum*)沼泽是一种独特的湿地景

观类型，以喜湿耐酸的泥炭藓为优势种形成植物群落^[1]。泥炭藓沼泽因较高的生物生产力和较低的有机质分解速率，成为全球碳循环重要的组成部分^[2-4]，固碳量约占土壤碳的15%^[5]。近年来，气候变化对泥炭藓的生长、生境安全等方面产生了威胁^[6]。因此，有必要对泥炭藓沼泽的空间分布、物种组成进行长期动态监测，以提高该系统的碳通量估计^[7, 8]。

泥炭藓沼泽中，泥炭藓在地表形成了一层非常紧密的覆盖层，此外还有其他不同类型和密度的灌木和乔木，区分泥炭藓与这些典型植被类型的光谱特征，是泥炭藓遥识别的基础。泥炭藓及泥炭藓沼泽植被的光谱特征分析开展较早，但后续发展以遥感水分监测为主。Vogelmann等^[9]描述了4种泥炭藓的光谱特征，指出物种间光谱可分；Bubier等^[10]采集了北方森林系统中几种泥炭藓的高光谱数据，描述了泥炭藓与维管植物间的光谱差异；Harris等^[11-13]通过水分胁迫分析，证明了泥炭藓水分特征与光谱密切相关，论证了泥炭藓监测沼泽地表水文监测的能力。Neta等^[14, 15]探讨了不同水分条件对常见亚北极地衣和苔藓光谱反射率的影响，指出他们在可见光和近红外波段内的独特光谱特征，证明他们可以通过卫星和航空图像进行探测。Meingast等^[16]利用光谱仪测量了两个以泥炭藓为主的泥炭沼泽的地表反射率，建立了光谱指数与地表水分及地下水位间的关系，评估了卫星遥感监测泥炭沼泽地表水文的能力，指出利用980 nm和1200 nm水吸收带的光谱指数反演泥炭藓含水量的效果最好，证明了遥感大面积监测地表水文和

地下水位的潜力。

上述研究基于实验室光谱，定性描述了泥炭藓的光谱特征，但尚未定量分析泥炭藓的特征光谱区间。光谱分析强调泥炭藓的含水量反演，但未对群落的光谱特征进行分析，且未明确群落植被的遥感监测可行性。另外，这些研究样区多选在北方极地、亚极地森林系统中，而泥炭藓在中纬度甚至亚热带地区也有分布。不同纬度带上泥炭藓群落的光谱特征是否存在差异，是否能够采用一个固定的光谱波段进行泥炭藓提取，以及如何定量描述典型泥炭藓群落植被类型的光谱特征是亟需解决的科学问题。

目前，高光谱遥感技术迅猛发展，在植被识别和监测领域已进行了较多研究^[17, 18]，而主流的分析方法仍是基于实验室实测的光谱数据^[19-21]。与多光谱遥感技术相比，高光谱影像资料较少、数据冗余大，需经过复杂的预处理才能进行目的性实验^[22]。遥感技术具备监测面积大、重访周期短、数据质量高等核心优势，而高光谱遥感技术现阶段数据成本较高，不利于大规模推广应用^[23]。湿地植被识别和制图研究，多采用无人机航拍高光谱数据^[18, 22]，但该方法只能用于区域精细化分析，且经济成本高。多光谱仍是湿地植被遥感应用的主要数据源。杨立君等^[24]利用TM(Thematic mapper)数据实现了崇明东滩湿地植被分类，精度达到86.5%。多光谱影像在红树林识别中也得到良好的应用^[22, 25]。

因此，本研究选取4种多光谱传感器，通过光谱特征模拟，分析不同纬度带上中位泥炭藓(*Sphagnum magellanicum* Brid.)群落的光谱特征

差异,探究多光谱遥感在中位泥炭藓识别中的潜力。通过中位泥炭藓群落的光谱特征研究,结合地面调查辅助资料提取植被群落类型,并进一步进行细分,以期为推动沼泽湿地植被资源调查及生物多样性分析领域的发展奠定基础。

1 研究区概况

选取不同纬度带上的中位泥炭藓群落,包括北方高纬针叶林-泥炭藓沼泽和中纬度福建天宝岩水竹-泥炭藓沼泽群落,进行光谱特征分析。北方泥炭藓群落植被光谱分析,选取物种包括实验室实测的中位泥炭藓以及USGS光谱库中的云杉(*Picea engelmannii* Parry ex Engelmann)和黑松(*Pinus contorta* Douglas ex Loudon)。本研究在福建省天宝岩国家自然保护区选取的天宝岩水竹-泥炭藓沼泽植被保护状况良好,采集中位泥炭藓和水竹(*Phyllostachys heteroclada* Oliver)的冠层光谱数据进行分析(图1)。

2 研究方法

2.1 光谱数据

研究所用光谱数据包含:北方针叶林-泥炭藓

沼泽植被光谱分析中的云杉和黑松光谱来自USGS光谱库(<https://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>)^[26];中位泥炭藓光谱来自实验室暗室采集;天宝岩水竹-泥炭藓沼泽光谱分析数据均为野外采集(图2)。

采用ASD Field Spec 3便携式地物光谱仪进行光谱采集,其光谱波段为350~2500 nm;光谱分辨率为1.377 nm(350~1050 nm)和2 nm(1000~2500 nm)。选择晴朗无风、云层覆盖少的天气,于11:00~13:00进行光谱采集。选取植被类型单一、长势良好、覆盖度较高的群落布置样方,分别采集水竹和中位泥炭藓冠层光谱,每次采集10条光谱曲线,重复3次。测量时,将光纤探头垂直置于样方上方0.5 m处,每次测量前,都进行标准白板校正,以消除环境光影响。

通过构建暗室采集实验室中位泥炭藓的光谱。以1000 W的卤素灯为光源,光纤探头视场角25°,距离待测样品0.15 m条件下进行采集。每次采集后旋转120°,记录3次,以得到植物完整的冠层光谱。在采集前先进行标准白板校正,每次采集10条光谱曲线。



图1 水竹-中位泥炭藓沼泽光谱采集实验区

Fig. 1 *Phyllostachys heteroclada*-*Sphagnum magellanicum* bog spectral acquisition experimental area

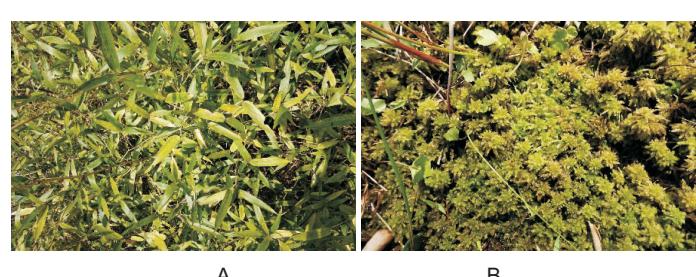


图2 光谱采集样本水竹(A)和中位泥炭藓(B)

Fig. 2 Spectral sampling of *P. heteroclada* (A) and *S. magellanicum* (B)

2.2 光谱分析

2.2.1 光谱预处理

(1) 异常值剔除及数据平滑 野外实测光谱受大气水分扰动较大, 本文参照王锦地等^[27]提出的强度大小检验法剔除异常光谱数据, 保留的有效波段范围为 400 ~ 1350 nm、1450 ~ 1750 nm 以及 2000 ~ 2400 nm。室内暗室采集的光谱, 保留 400 ~ 2500 nm。对剔除异常值的野外和室内光谱数据分别计算每个样本的平均值, 转换得到相应的光谱反射率。对处理好的光谱反射率采用五步平滑的方法(滑动平均)进行降噪。

(2) 导数、对数光谱计算 正确使用光谱分析方法, 能够有效放大和提取光谱反射率的变化特征^[28]。通过计算光谱的一阶导数(fdr)、对数光谱($\lg(1/R)$)提取光谱特征。计算公式如下。

一阶导数:

$$fdr(\lambda_i) = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}} \quad (1)$$

对数:

$$\lg(1/R) = \lg(1/R(\lambda_i)) \quad (2)$$

式(1)、(2)中, λ_i 表示波段为 i 的波长值, $R(\lambda_i)$ 表示波长为 λ_i 的反射率, $fdr(\lambda_i)$ 表示 λ_i 反射率的一阶导数, $\lg(1/R)$ 表示 λ_i 处反射率的倒数计算以 10 为底的对数值。

(3) 包络线去除 包络线去除法(Continuum removal, CR)能够有效增强地物的吸收特征, 已广泛应用于各领域的高光谱识别^[29, 30]。该方法通过将反射率归一化, 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数值特征对比, 提取特征波段和特征峰, 达到地物识别的目的。

2.2.2 基于马氏距离的特征波段选取

马氏距离(Mahalanobis distance, MD), 表示 2 个未知样本间的协方差距离, 是一种计算样本间相似度的有效方法^[30]。本研究使用马氏距离对原始及经过导数、对数、包络线去除获得的光谱特征波段进行检验, 选出符合要求的马氏距离对应的波段, 即为中位泥炭藓光谱识别最佳波段。马氏距离计算公式如下:

$$MD_k = \sqrt{(X_k - \mu)^T \Sigma^{-1} (X_k - \mu)} \quad (3)$$

式中: MD_k 为 2 个对比光谱样本集在波段 k 上的马

氏距离; X_k 为不同光谱曲线波长在 k 处光谱反射率差值矩阵; μ 为对比样本集的波段均值向量; Σ 为 X_k 的协方差矩阵; Σ^{-1} 为协方差矩阵的逆。中位泥炭藓与对比植被光谱间的马氏距离采用 SPSS 19.0 软件计算完成。

根据研究需要, 运用马氏距离法筛选中位泥炭藓光谱识别的特征波段时, 需满足 2 个条件: (1) k 波段上的 MD 大于全波段 MD 均值, 即视为该处的光谱特征有效; (2) 为了满足识别出的光谱波段能够应用于多光谱及高光谱遥感传感器, 将连续出现 60 nm 以上的、满足条件(1)的波段确定为有效光谱。

2.2.3 卫星传感器波段

本研究选取 EO-1 的 ALI 传感器、Terra 的 ASTER 传感器、Sentinel-2A 的 MSI 传感器以及 Landsat-8 的 OLI 传感器(表 1)。通过对比可看出 MSI 传感器在可见光-近红外波段上通道设置密集; ASTER 集中在短波红外波段。ALI 和 OLI 均为传统的波段设置, 谱段覆盖广。本研究基于传感器的波段响应函数进行中位泥炭藓、水竹植被冠层反射光谱的模拟。

3 结果与分析

3.1 中位泥炭藓与北方针叶林光谱特征分析

研究结果显示(图 3), 中位泥炭藓与云杉、黑松的光谱特征曲线形态相似, 但反射率差异较大, 通过获取光谱差异较大的波段可实现 3 者在光谱层面上的物种分离。在可见光波段, 中位泥炭藓的反射率较低, 绿峰的波段位置更靠近波长短的方向, 红边却往长波方向偏移, 且整个红边区变化平缓, 近红外的反射平台不清晰, 有两个强烈的水分吸收谷, 对应波长为 1000 nm 和 1200 nm。虽然云杉和黑松也出现同样的水分吸收谷, 但谷值出现位置和中位泥炭藓并不重合, 且水分吸收作用程度较弱。该波段的光谱特征由细胞结构决定, 表现为泥炭藓与维管植物光谱特征差异的共性。进入短波红外后, 受到水分吸收的影响, 中位泥炭藓整体反射率较低, 与云杉和黑松反差强烈, 且未出现 1650 nm 和 2200 nm 的反射峰。通过光谱处理(图 3: B~D), 可以有效实现高光谱降维, 获得较窄的光谱识别波段。由导数法可获得以 540、690、890、960、1140、1240、1330 nm 为中心

表1 卫星传感器波段

Table 1 Introduction to satellite sensor bands

传感器名称 Sensor name	波段名称 Band name	波长 (mm) Wavelength	空间分辨率 (m) Spatial resolution
EO-1 ALI	MS-1'	443 ~ 453	30
	MS-1	450 ~ 515	
	MS-2	525 ~ 605	
	MS-3	633 ~ 690	
	MS-4	775 ~ 805	
	MS-4'	845 ~ 890	
	MS-5'	1200 ~ 1300	
	MS-7	2080 ~ 2350	
Terra-ASTER	B1	520 ~ 600	15
	B2	630 ~ 690	
	B3	760 ~ 860	
	B4	1600 ~ 1700	30
	B5	2145 ~ 2185	
	B6	2235 ~ 2285	
	B7	2295 ~ 2365	
	B8	2360 ~ 2430	
Sentinel-2A MSI	B1	433 ~ 453	60
	B2	458 ~ 522	10
	B3	543 ~ 577	
	B4	650 ~ 680	
	B5	698 ~ 712	20
	B6	733 ~ 747	
	B7	773 ~ 793	
	B8A	855 ~ 875	60
	B9	935 ~ 955	
	B10	1360 ~ 1390	
	B11	1565 ~ 1655	20
	B12	2100 ~ 2180	
Landsat-8 OLI	B1	433 ~ 453	30
	B2	450 ~ 515	
	B3	525 ~ 600	
	B4	630 ~ 680	
	B5	845 ~ 885	
	B6	1560 ~ 1650	
	B7	2100 ~ 2300	
	B9	1360 ~ 1390	

的7个波段特征识别区间(图3: C);由包络线去除法获得以490、970、1180、1280、1400、1700、2245 nm为中心的7个特征波段识别区间(图3: D)。对比导数和包络线去除结果发现,中位泥炭藓与云杉、黑松最大光谱差异波段依次为:近红外>可见光>短波红外。

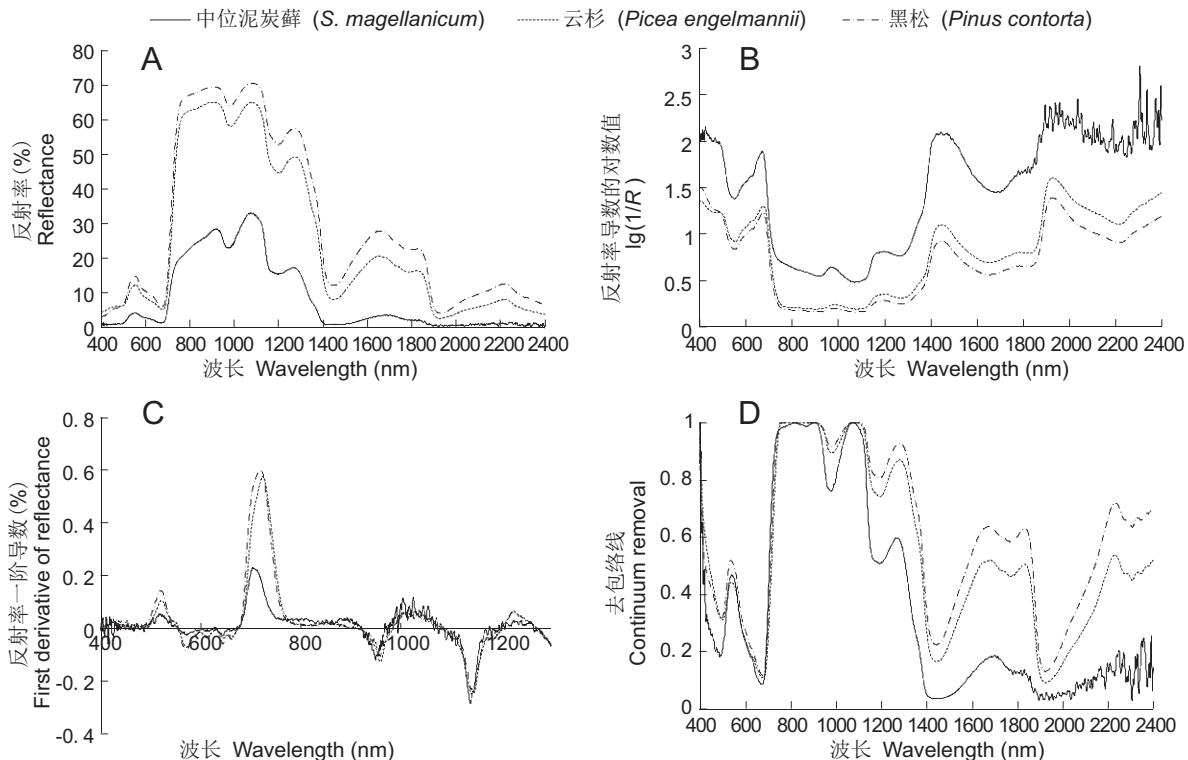
为确定中位泥炭藓识别的最佳谱宽,本研究分别将中位泥炭藓与黑松、云杉的各类型光谱曲线两两配对,计算得到相应的马氏距离(图4),并统计

符合识别条件的波段位置。3种植物差异最大的光谱范围为近红外,包络线去除法的识别效果最好。导数法虽能有效去除高光谱冗余,但筛选得到的特征波段显著性得不到保证,即这些特征波段离散分布,无法满足实际需要。原始光谱和对数光谱的结果相似,但数据降维效果不理想。根据马氏距离提取光谱特征波段的规则,得到各光谱分析方法获得的中位泥炭藓识别特征波段数量和对应波段(表2)。

3.2 天宝岩泥炭藓沼泽光谱特征分析

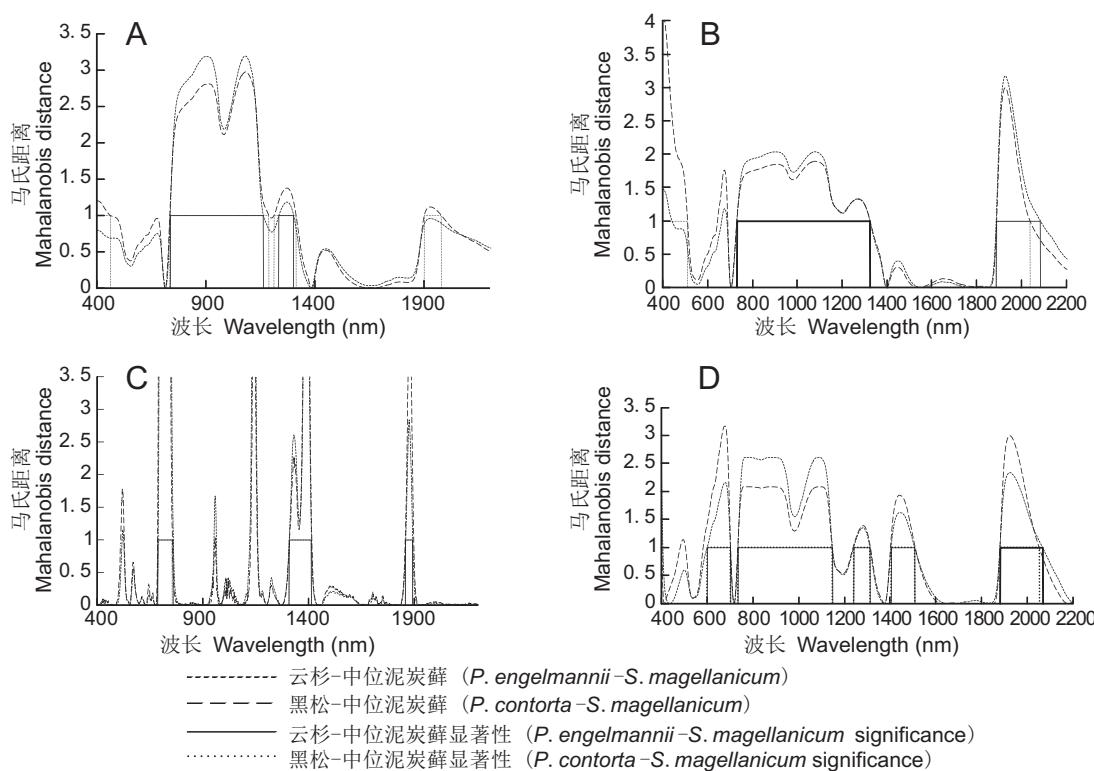
天宝岩泥炭藓沼泽中的水竹-中位泥炭藓群落在多个泥炭藓沼泽均有分布^[24, 25]。中位泥炭藓与水竹及其与北方针叶林植被的光谱特征有所不同(图4, 图5)。水竹在570 nm处的绿峰与中位泥炭藓近乎重合。两种植被类型的红边位置相似,但水竹表现出更高的反射率,有绿色植物常见的近红外反射平台。相较于云杉和黑松,水竹在近红外的2个水分吸收谷并不明显,与中位泥炭藓形成对比。在1200 nm左右,中位泥炭藓的水分吸收作用极为强烈,反射率陡降,该波段是中位泥炭藓与水竹反射率差异最大的波谱区间。在短波红外区,中位泥炭藓仍受到水分的强吸收作用,反射始终较低,而水竹有2个明显的反射峰,其反射峰特征与云杉和黑松近似,且表现更为强烈,能够作为区分水竹与中位泥炭藓的特征波段。从整体上看,中位泥炭藓与水竹的光谱特征差异仍为红外区,中位泥炭藓的光谱特征表现出很强的水分相关性。由对数光谱可以提取得到更窄的中位泥炭藓与水竹的识别区间,表现为以428、584、680、980、1180、1580、2200 nm为中心的7个光谱区间;在一阶导数图中,可获得以520、700、890、1020、1135、1350 nm为中心的6个光谱区间;包络线去除法获得以490、790、970、1160、1340 nm为中心的5个光谱区间。从特征区间的识别结果看,中位泥炭藓与水竹的最佳光谱识别波段以2个水分强吸收谷为中心,2种植被在短波红外的光谱差异也十分明显。中位泥炭藓与其他植被类型的光谱特征差异与水分密切相关。

中位泥炭藓与水竹各光谱曲线的马氏距离分析结果显示(图6),在原始光谱中,两者的特征光谱区间位于可见光和红外区,波段识别质量高;采用对数法,特征区间的宽度得到压缩,获得较窄的特征识别波段;导数法虽然能够获得较多的特征区



A: 原始光谱曲线; B: 对数光谱曲线; C: 导数光谱曲线; D: 去包络线光谱曲线。
A: Raw spectral curve; B: $\lg(1/R)$ spectral curve; C: Derivative spectral curve; D: CR spectral curve.

图 3 中位泥炭藓与北方针叶林的光谱曲线
Fig. 3 Spectral curves of *Sphagnum magellanicum* and boreal coniferous forest



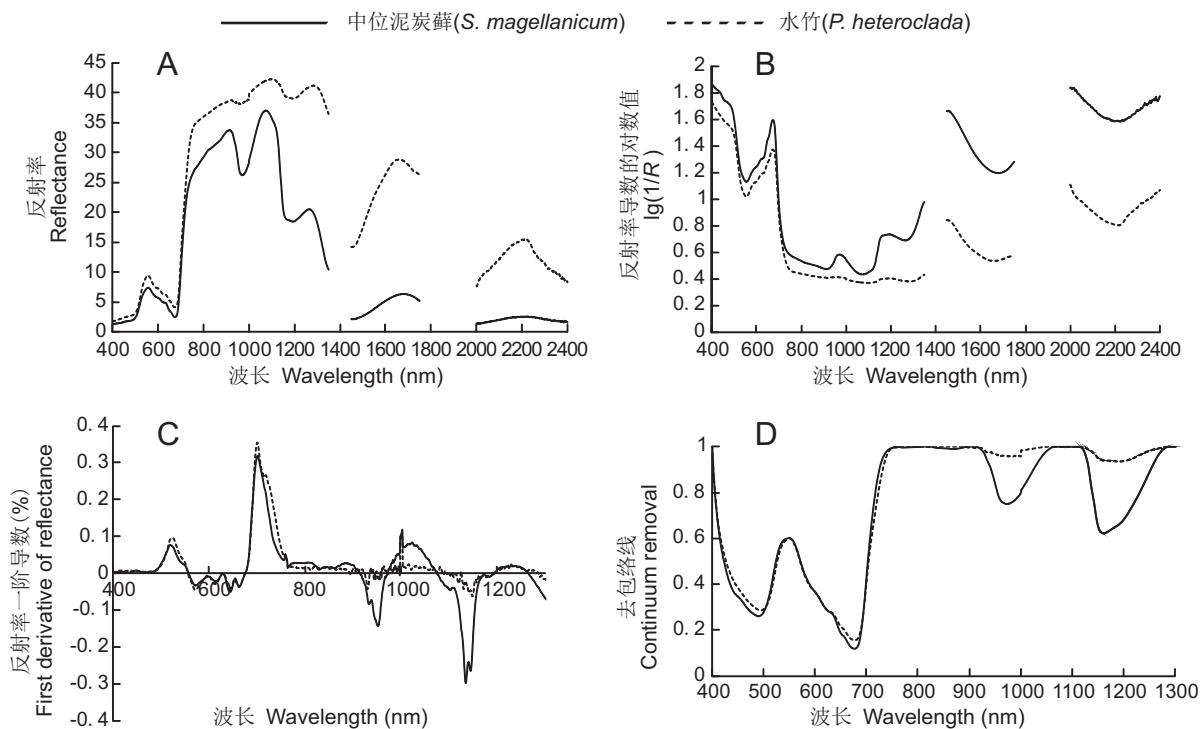
A: 原始光谱曲线; B: 对数光谱曲线; C: 导数光谱曲线; D: 去包络线光谱曲线。
A: Raw spectral curve; B: $\lg(1/R)$ spectral curve; C: Derivative spectral curve; D: CR spectral curve.

图 4 中位泥炭藓与黑松、云杉各光谱曲线的马氏距离
Fig. 4 MD diagrams of spectral curves of *S. magellanicum*, *Picea engelmannii*, and *Pinus contorta*

表2 马氏距离计算筛选出的北方针叶林-泥炭藓的光谱波段

Table 2 Statistical analysis of spectral bands of northern coniferous forest and *S. magellanicum* by MD

光谱类型 Spectral type	符合条件的波段数 Eligible band number	对应的识别波宽 (nm) Corresponding recognition wave width
原始光谱 (Raw)	3	744~1174、1230~1312、1902~1977
对数光谱 (log)	2	740~1325、1900~2035
导数光谱 (DGR)	2	690~752、1315~1412
包络线去除 (CR)	5	605~702、744~1144、1240~1312、1413~1510、1890~2050



A: 原始光谱曲线; B: 对数光谱曲线; C: 导数光谱曲线; D: 去包络线光谱曲线。

A: Raw spectral curve; B: $\lg(1/R)$ spectral curve; C: Derivative spectral curve; D: CR spectral curve.

图5 中位泥炭藓与水竹的光谱曲线
Fig. 5 Spectral curves of *S. magellanicum* and *P. heteroclada*

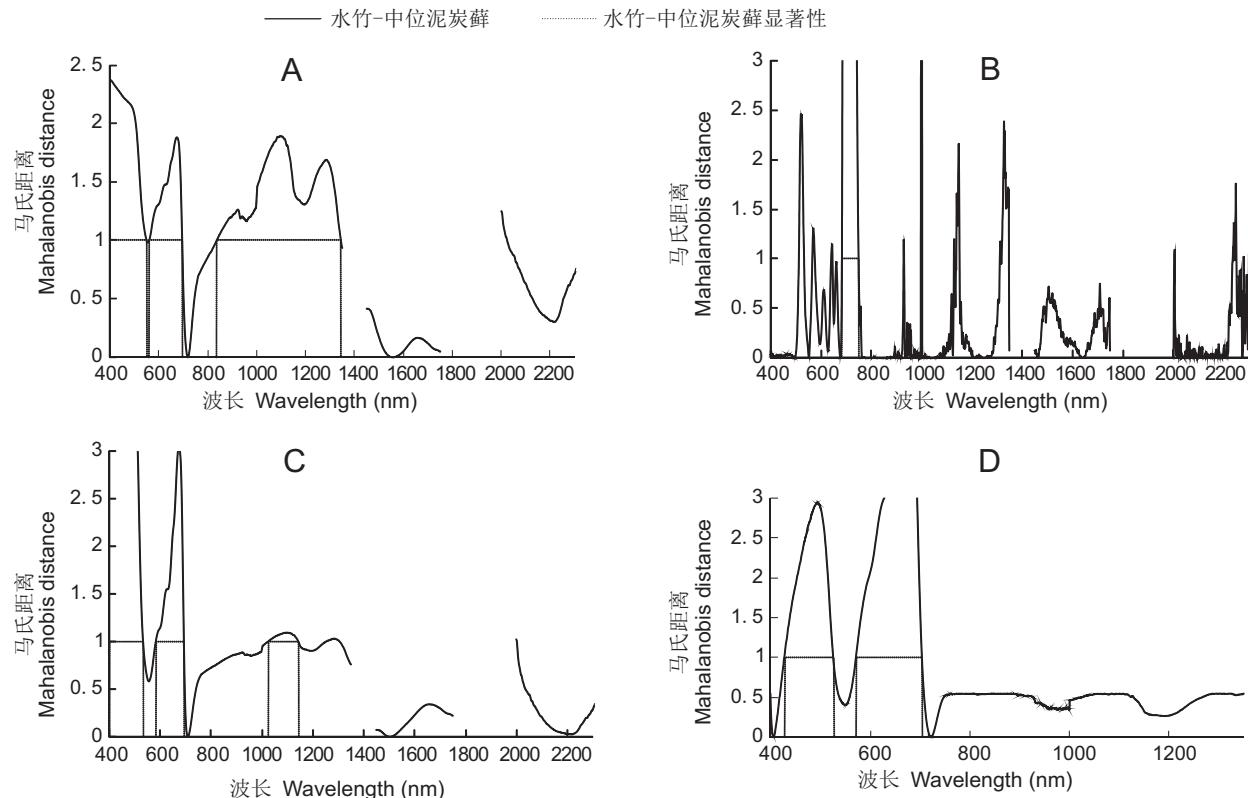
间,但符合要求的特征波段较少;包络线去除法的光谱分析效果最好,数据有效压缩质量高。对比原始光谱和3种光谱分析的马氏距离结果发现,中位泥炭藓与水竹区分的特征波段在可见光和近红外区。与北方针叶林不同中位泥炭藓和水竹在可见光波段的识别效果较好,体现不同纬度带上泥炭藓群落光谱特征的差异。近红外受细胞结构控制,中位泥炭藓光谱特征在该波段上特征稳定,能够与不同纬度带上的群落典型植被类型区分开来。因此在应用光谱特征进行大区域泥炭藓识别时,应选择近红外波段特征。

水竹与中位泥炭藓的特征识别波段在可见光及近红外区的范围为400~550、560~696、1025~1344 nm(表3)。两种植物原始光谱的提取效果最

佳。由于2种植物光谱数据来自野外实测,在1300 nm后的波段受水汽影响严重,因此未对1300 nm后的波段进行包络线去除分析。此外,对数分析法数据压缩质量高;导数法虽能灵敏检测植物的光谱特征,但光谱波段较窄,实用性效果不佳。

3.3 基于卫星传感器波段的泥炭藓识别比较

通过绘制水竹和中位泥炭藓在4种传感器上的等效光谱曲线以探究多光谱卫星水平上泥炭藓识别的潜力,结果显示(图7),除ASTER外,其他3种传感器在可见光波段均有较多的通道设置,在植被监测中有较好表现。本研究发现,中位泥炭藓与群落典型绿色植物(北方针叶林和水竹)的光谱识别特征空间在红外区表现稳定且特征谱段分布密



A: 原始光谱曲线; B: 对数光谱曲线; C: 导数光谱曲线; D: 去包络线光谱曲线。

A: Raw spectral curve; B: $\lg(1/R)$ spectral curve; C: Derivative spectral curve; D: CR spectral curve.图 6 中位泥炭藓与水竹各光谱曲线的马氏距离
Fig. 6 MD diagrams of spectral curves of *S. magellanicum* and *P. heteroclada*

表 3 马氏距离计算筛选出的水竹-泥炭藓光谱波段

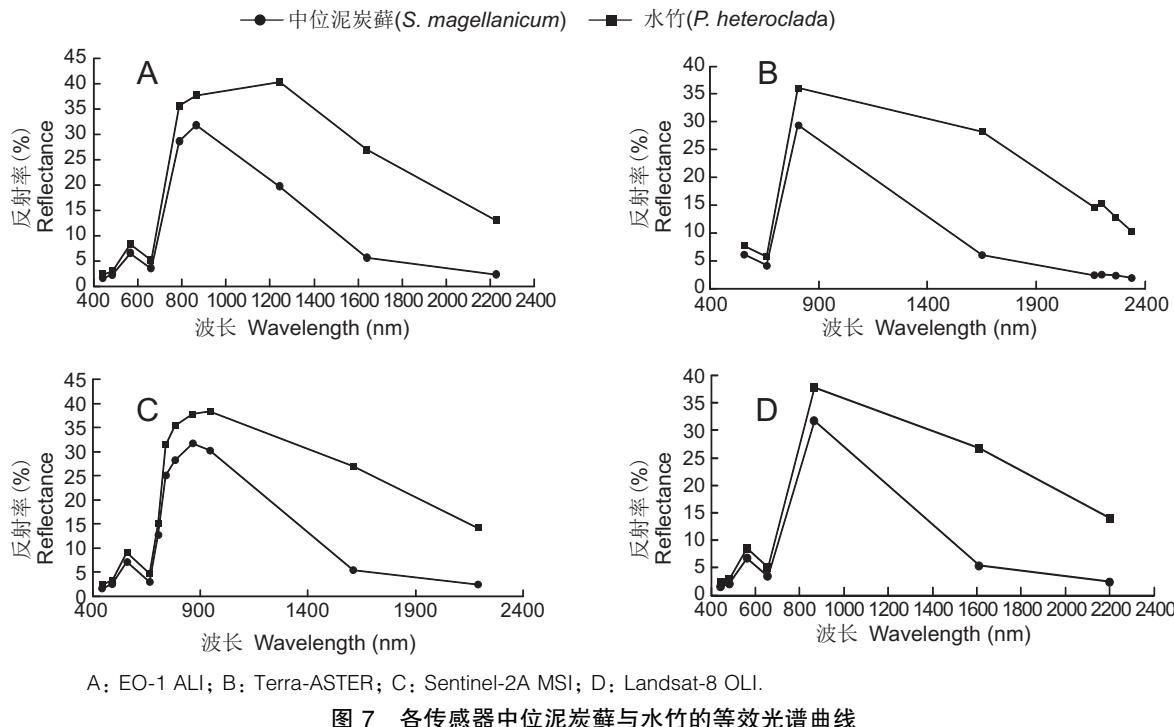
Table 3 Statistical analysis of spectral bands of *P. heteroclada* and *S. magellanicum* by MD

光谱类型 Spectral type	符合条件的波段数 Eligible band number	对应的识别波宽 (nm) Corresponding recognition wave width
原始光谱 (Raw)	3	400~550、560~696、837~1344
对数光谱 (log)	3	400~533、584~693、1025~1143
导数光谱 (FDR)	1	684~750
去包络线 (CR)	2	428~526、572~704

集。由于 4 种多光谱传感器在可见光波段内光谱分辨率较低, 中位泥炭藓与水竹的区别性较差; 在近红外区, 4 种传感器均能反映 2 种植物的光谱特征差异, 而这种差异可通过遥感模型定量化表达出来, 实现泥炭藓群落物种的识别。在短波红外区, 其他 3 种传感器的光谱分辨率很低, 而 ALI 在 1000 ~ 1700 nm 波段上有更多信号采集通道, 体现了基于近红外的遥感反演方法提取泥炭藓的潜力。另外, 以往研究^[13]提到泥炭藓在 1200 nm 处的水分吸收谷特征在本研究中也有所

体现, 因此利用该波段的反射特征, 可以通过简单的阈值或斜率函数, 实现泥炭藓的快速区分。1600 nm 后, 中位泥炭藓有强烈水分吸收, 4 种传感器表达的光谱曲线相似, 在该波段 2 种植物对比明显, 中位泥炭藓的反射率均较低, 水竹较高, 该波段能够作为区分中位泥炭藓的遥感识别特征波段。

总体上来看, 多光谱传感器能较敏锐捕捉中位泥炭藓与水竹的光谱特征, 通过构建波段函数或设置阈值, 可实现遥感水平的泥炭藓提取。经光谱分析可知, 中位泥炭藓与群落植被的光谱差异稳定在 700 ~ 1000 nm 和 1200 ~ 1300 nm 波段上, 包括泥炭藓的 2 个水分带。从传感器的等效光谱曲线分析发现, 无论传感器的光谱分辨率如何, 中位泥炭藓在近红-短波红外上表现出明显的特异性, 说明传感器在近红-短波红外 (800 ~ 2300 nm) 的信号通道对识别泥炭藓十分有价值, 若通道足够且合适, 能够实现泥炭藓生化参数的定量反演。



A: EO-1 ALI; B: Terra-ASTER; C: Sentinel-2A MSI; D: Landsat-8 OLI.

图 7 各传感器中位泥炭藓与水竹的等效光谱曲线
Fig. 7 Equivalent spectral curves of *S. magellanicum* and *P. heteroclada* in each sensor

4 讨论

本研究通过对北方针叶林-泥炭藓群落和中纬度水竹-泥炭藓群落的植被光谱特征分析,获得了中位泥炭藓的光谱识别波段,论证了在不同纬度带上光谱识别波段的异同,通过绘制泥炭藓在4种多光谱传感器上的等效光谱曲线探究了卫星水平上泥炭藓提取的可行性。

研究发现,中位泥炭藓与水竹、针叶林的光谱识别区间有所不同,其稳定的识别区间位于红外,涵盖了泥炭藓的水分带。中位泥炭藓与针叶林植被在可见光波段上的可分性较差,但其与水竹的可分性较好,这是阔叶与针叶植被在叶绿素含量的差异对光谱特征产生的影响,而这种差异能够用于不同泥炭藓群落类型的区分。植被在细胞结构和含水量上的生理差异,使中位泥炭藓与水竹、针叶林植物在近红外光谱上的可分性稳定且质量好,因此可利用该波段进行大面积泥炭藓识别。由马氏距离检验得到的中位泥炭藓识别区间结果显示,不同的光谱分析方法降维能力存在差异。包络线去除法在本研究中表现最佳。对数法在2个中位泥炭藓群落光谱特征分析中识别能力波动较大,光谱降维效果不稳定;导数法能够敏锐捕捉不同植被的光谱差异,但

特征谱宽度较窄,应用性较差。在后续地物光谱分析中,应当对比多种光谱分析方法,以获得真实可行的特征光谱区间。本研究对比了4种传感器上水竹、中位泥炭藓的等效光谱曲线,发现中位泥炭藓在高光谱中表现的特征在多光谱上受到极大压缩,尤其是可见光波段。水竹与中位泥炭藓的可分性在多光谱遥感中不能直观地捕捉,揭示了实验室水平到卫星层面上的尺度损失,表明稳定的物种间光谱特征差异是遥感应用的关键。同时,冠层高光谱和传感器等效光谱模型均证明近红外是泥炭藓识别的最佳区间,因此近红外波段密集的传感器更利于泥炭藓沼泽提取。

此外,本研究选取的实验样本存在一定局限性,如未考虑泥炭藓生境周围的低矮灌木等植被的光谱特征,后续研究可引入更多小尺度上的生活型植被探究植被种间的光谱可分性;本研究选择了泥炭藓沼泽中常见的中位泥炭藓进行群落光谱特征研究,未来可进一步论证其他泥炭藓群落或泥炭藓属与其他属的遥感识别潜力,并进行应用分析。在时间维度上,研究尚未考虑中位泥炭藓与针叶林、水竹的季节周期生长规律对光谱特征的影响,基于时间变化周期的物种识别和植被群落光谱特征分析将是未来的研究趋势。本研究通过泥炭藓的光谱特征

及传感器水平的等效光谱分析发现, 泥炭藓光谱识别特征明显, 基于多光谱遥感数据的泥炭藓识别前景广阔, 可尝试基于光谱特征来构建相应的指数模型, 以实现对泥炭藓及泥炭藓沼泽的自动识别。

参考文献:

- [1] 高谦. 中国苔藓志: 第1卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [2] Yu ZC. Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review [J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(10): 4071–4085.
- [3] Baird AJ, Belyea LR, Comas X, Reeve AS, Slater LD. Carbon Cycling in Northern Peatlands [DB/OL]. [2019-03-05]. <https://doi.org/10.1029/GM184>.
- [4] Huang XY, Pancost RD, Xue JT, Gu YS, Evershed RP, et al. Response of carbon cycle to drier conditions in the mid-Holocene in central China [J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 1369.
- [5] Limpens J, Berendse F, Blodau C, Canadell J G, Freeman C, et al. Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications—a synthesis [J]. *Biogeosciences*, 2008, 5(6): 1475–1491.
- [6] Treat C, Wisser D, Marchenko S, Frolking S. Modelling the effects of climate change and disturbance on permafrost stability in northern organic soils [J]. *Mires Peat*, 2013, 12(2): 1–17.
- [7] Limpens J, Granath G, Gunnarsson U, Aerts R, Bayley S, et al. Climatic modifiers of the response to nitrogen deposition in peat-forming *Sphagnum* mosses: a meta-analysis [J]. *New Phytol*, 2011, 191(2): 496–507.
- [8] Spahni R, Joos F, Stocker BD, Steinacher M, Yu ZC. Transient simulations of the carbon and nitrogen dynamics in northern peatlands: from the Last Glacial Maximum to the 21st century [J]. *Clim Past*, 2013, 9(3): 1287–1308.
- [9] Vogelmann JE, Moss DM. Spectral reflectance measurements in the genus *Sphagnum* [J]. *Remote Sens Environ*, 1993, 45(3): 273–279.
- [10] Bubier JL, Moore TR. An ecological perspective on methane emissions from northern wetlands [J]. *Trends Ecol Evol*, 1994, 9(12): 460–464.
- [11] Harris A, Bryant RG, Baird AJ. Detecting near-surface moisture stress in *Sphagnum* spp. [J]. *Remote Sens Environ*, 2005, 97(3): 371–381.
- [12] Harris A, Bryant RG, Baird AJ. Mapping the effects of water stress on *Sphagnum*: Preliminary observations using airborne remote sensing [J]. *Remote Sens Environ*, 2006, 100(3): 363–378.
- [13] Harris A. Spectral reflectance and photosynthetic properties of *Sphagnum* mosses exposed to progressive drought [J]. *Ecohydrology*, 2010, 1(1): 35–42.
- [14] Neta T, Cheng Q, Bello RL, Hu B. Lichens and mosses moisture content assessment through high-spectral resolution remote sensing technology: a case study of the Hudson Bay Lowlands, Canada [J]. *Hydro Process*, 2010, 24(18): 2617–2628.
- [15] Neta T, Cheng Q, Bello RL, Hu B. Development of new spectral reflectance indices for the detection of lichens and mosses moisture content in the Hudson Bay Lowlands, Canada [J]. *Hydro Process*, 2015, 25(6): 933–944.
- [16] Meingast KM, Falkowski MJ, Kane ES, Potvin L, Benscoter B, et al. Spectral detection of near-surface moisture content and water-table position in northern peatland ecosystems [J]. *Remote Sens Environ*, 2014, 152: 536–546.
- [17] 由佳, 张怀清, 陈永富, 高志海, 刘华. 基于GF-4号卫星影像东洞庭湖湿地植被类型监测能力比较研究 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46(3): 152–156.
- You J, Zhang HQ, Chen YF, Gao ZH, Liu H. Based on the GF-4 satellite image for the east Dongting Lake wetland vegetation type monitoring ability [J]. *Anhui Agricultural Science*, 2018, 46(3): 152–156.
- [18] 柴颖, 阮仁宗, 傅巧妮, 岁秀珍. 面向对象的高光谱影像湿地植被信息提取 [J]. 地理空间信息, 2015, 13(4): 83–85.
- Chai Y, Ruan RZ, Fu QN, Sui XZ. Object-oriented information extraction of wetland vegetation using hyperspectral image data [J]. *Geospatial Information*, 2015, 13(4): 83–85.
- [19] 张雪薇, 韩震, 刘美君, 丁如一. 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 XW, Han Z, Liu MJ, Ding RY. Study on spectral absorption characteristics of vegetation in Nanhui Wetland of Yangtze River estuary [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2018, 36(2): 50–54.
- [20] 黄灵光, 周学林. 南矶湿地国家自然保护区典型植被光谱波段特征分析及建库 [J]. 湖北农业科学, 2018, 57(11): 103–106.
- Huang LG, Zhou XL. Characteristic analysis and database construction of typical vegetation spectral band in Nanji Wetland National Nature Reserve [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2018, 57(11): 103–106.
- [21] 凌成星, 刘华, 鞠洪波, 张怀清, 孙华, 等. 基于地面成像光谱数据特征的湿地典型植被类型识别研究: 以东洞庭湖核心区湿地为例 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 208–213.
- Ling CX, Liu H, Ju HB, Zhang HQ, Sun H, et al. Identifying typical wetland vegetation types based on imaging spectrometer data: a case studying Dongting Lake Wetland area [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(3): 208–213.
- [22] 冯家莉, 刘凯, 朱远辉, 李勇, 柳林, 等. 无人机遥感在红树林资源调查中的应用 [J]. 热带地理, 2015, 35(1): 35–42.
- Feng JL, Liu K, Zhu YH, Li Yong, Liu L, et al. Application

- tion of unmanned aerial vehicles to mangrove resources monitoring[J]. *Tropical Geography*, 2015, 35(1): 35–42.
- [23] Adam E, Mutanga O, Rugege D. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review[J]. *Wet Ecol Manag*, 2010, 18(3): 281–296.
- [24] 杨立君, 马明栋, 唐立军. 基于 TM 影像的崇明东滩湿地植被分类研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 126–130.
Yang LJ, Ma MD, Tang LJ. Research on wetland vegetation classification of Chongming Easter Tidal Flat based on TM image[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(1): 126–130.
- [25] 刘春燕, 张雪红, 陈健. 基于决策树的角度指数方法 EO-1 ALI 影像的红树林遥感识别[J]. 湿地科学, 2015, 13(4): 451–455.
Liu CY, Zhang XH, Chen J. Identifying mangrove forest with EO-1 ALI imagery combining decision tree with angle indices[J]. *Wetland science*, 2015, 13(4): 451–455.
- [26] Kokaly RF, Clark RN, Swayze GA, Livo KE, Hoefen TM, et al. USGS spectral library version 7[DB/OL]. [2019-03-05]. <https://doi.org/10.3133/ds1035>.
- [27] 王锦地, 张立新, 柳钦火, 等. 中国典型地物波谱知识库[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [28] Liu ZY, Wu HF, Huang JF. Application of neural networks to discriminate fungal infection levels in rice panicles using hyperspectral reflectance and principal components analysis[J]. *Comput Electron Agr*, 2010, 72(2): 99–106.
- [29] 林海军, 张绘芳, 高亚琪, 李霞, 杨帆, 等. 基于马氏距离法的荒漠树种高光谱识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3358–3362.
Lin HJ, Zhang HF, Gao YQ, Li X, Yang F, et al. Mahalanobis distance based hyperspectral characteristic discrimination of characteristic discrimination of leaves of different desert tree species[J]. *Spectroscopy and spectral analysis*, 2014, 34(12): 3358–3362.
- [30] 丁丽霞, 王志辉, 葛宏立. 基于包络线法的不同树种叶片高光谱特征分析[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(6): 809–814.
Ding LX, Wang ZH, Ge HL. Continuum removal based hyperspectral characteristic analysis of leaves of different tree species [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2010, 27(6): 809–814.

(责任编辑:张平)