引文格式：汪贤挺,李俊青,郎泽东,等. 安吉小鲵栖息地典型植物光谱特征分析 [J]. 地理空间信息, 2025, 23(2): 69-73. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.02.015

安吉小鲵栖息地典型植物光谱特征分析

汪贤挺[1]，李俊青[2,3]，郎泽东[1]，沈家晓[2,3]，杨宇博[1]，凌在盈[2,3]，潘浩博[2,3]，王嘉芃[2,3*]

（1. 安吉小鲵国家级自然保护区管理中心，浙江 湖州 313300；
2. 杭州师范大学遥感与地球科学研究院，浙江 杭州 311121；
3. 浙江省城市湿地与区域变化研究重点实验室，浙江 杭州 311121）

摘　要：龙王山泥炭藓沼泽湿地是国家一级保护动物安吉小鲵的栖息地，近年来随着气候的变化，维管植物侵占程度加剧，生态功能不断退化，严重威胁安吉小鲵的生存与繁衍。分析湿地典型植物的光谱特征有助于后期利用遥感影像自动监测湿地植被动态变化。为此，利用FieldSpec4便携式地物光谱仪采集龙王山泥炭藓沼泽湿地4种典型植被的光谱数据，分析生长季泥炭藓与维管植物的冠层光谱特征差异及同种植物在不同季节的冠层光谱特征变化。结果表明：①与3种维管植物相比，泥炭藓在550 nm的绿色“反射峰”向长波方向移动，并且反射率低于维管植物；由于细胞含水量的差异，泥炭藓在970 nm处有明显的水吸收谷，这是区分维管植物与泥炭藓的最明显特征；②7月份是识别泥炭藓与维管植物的最佳月份。7月份泥炭藓的红边位置为701 nm，与其他3种维管植物的红边位置相差在16 nm以上，这是区别泥炭藓与维管植物的又一典型特征；除圆锥绣球与桂皮紫茉外，其他植物均可用红边位置区分；③泥炭藓在春、夏、秋的光谱曲线形态并无明显变化，而维管植物会随着细胞结构的衰老，光谱特征出现明显变化，秋季已不具备绿色植被的典型光谱特征，几乎变成一条向上的直线。

关键词：安吉小鲵；泥炭藓；维管植物；光谱特征；一阶导数

中图分类号：P237　　文献标志码：B　　文章编号：1672-4623（2025）02-0069-05

Spectral Characteristic Analysis of Typical Vegetation in Hynobius Amjiensis Habitat

WANG Xianting[1], LI Junqing[2,3], LANG Zedong[1], SHEN Jiaxiao[2,3], YANG Yubo[1],
LING Zaiying[2,3], PAN Haobo[2,3], WANG Jiapeng[2,3]

(1. Zhejiang Hynobius Amjiensis National Nature Reserve, Huzhou 313300, China;
2. Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China;
3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Urban Wetlands and Regional Change, Hangzhou 311121, China)

Abstract: The sphagnum wetland in Longwang Mountain is the habitat of hynobius amjiensis, a national first-class protected animal. In recent years, with the change of climate, the encroachment of vascular plants has intensified, and the ecological function has been degraded, which has seriously threatened the survival and reproduction of hynobius amjiensis. Analysis of spectral characteristics of typical wetland plants is helpful for automatic monitoring of dynamic changes in wetland vegetation by remote sensing images. Therefore, we used FieldSpec4 portable ground object spectrometer to collect spectral data of four typical vegetation species in Longwang Mountain sphagnum wetland, and analyzed the difference of canopy spectral characteristics between sphagnum and vascular plants in the growing season and the canopy spectral characteristic changes of the same plant in different seasons. The results show that ①compared with the three vascular plants, sphagnum moves towards the long wave direction at the green “reflection peak” of 550 nm, and its reflectivity is lower than that of vascular plants. Due to the difference of cell water content, sphagnum has obvious water absorption valley at 970 nm, which is the most obvious feature to distinguish vascular plants from sphagnum. ②July is the best month to identify sphagnum moss and vascular plants. In July, the red edge position of sphagnum is 701 nm, which is more than 16 nm different from the other three vascular plants. Except for hydrangea paniculata siebold and osmunda cinnamomea linn.var.fokiense cop, other plants can be distinguished by the position of red edge. ③The spectral curve of sphagnum in spring, summer, and autumn does not change significantly, while the spectral characteristics of vascular plants change significantly with the aging of cell structure. In autumn, the typical spectral characteristics of green vegetation are no longer displayed and almost become an upward straight line.

Key words: hynobius amjiensis, sphagnum, vascular plant, spectral characteristic, first derivative

---

项目来源：安吉小鲵栖息地生态系统监测研究项目（ZJMY（采）2021-082）。

第一作者简介：汪贤挺（1981—），硕士研究生，工程师，主要从事生态保护等方面的工作，E-mail：7588480@qq.com。

通信作者：王嘉芃（1991—），硕士研究生，高级工程师，主要从事遥感生态环境遥感监测、评估等方面的工作，E-mail：361608279@qq.com。

地物光谱研究是遥感理论及应用的重要基础[1]，为后期利用无人机遥感进行湿地植被自动分类与监测提供理论依据[2-7]。目前，国内外对泥炭藓光谱特征的研究主要集中在两方面，第一，探讨泥炭藓形态结构、生理结构及受水分胁迫状态下与光谱特征的关系[8-12]；第二，在实验室条件下比较泥炭藓与云杉等维管植物光谱特征差异，指出1 000 nm和1 205 nm的水吸收谷是区分泥炭藓与维管植物的典型特征[13]。前人调查发现龙王山泥炭藓沼泽湿地混生的维管植物主要包括桂皮紫萁、圆锥绣球、玉蝉花、薹草、黄山松、茅等，其中前3种植物在湿地广泛分布[2]，且分属不同的植物类型，泥炭藓属于苔藓植物，桂皮紫萁属于蕨类植物，圆锥绣球和玉蝉花属于被子植物[1]。鉴于国内外对泥炭藓与维管植物光谱特征的研究集中在云杉、芒等，对泥炭藓与其他维管植物（如桂皮紫萁、玉蝉花、圆锥绣球等）光谱特征差异的研究少见；另一方面，野外自然光照条件下植物光谱特征与实验室光源可能存在一定差异，难以直接将实验室结果应用到无人机遥感影像上；此外，泥炭藓与维管植物光谱特征季节变化的相关研究也比较少见。因此，本文对泥炭藓沼泽湿地内4种典型植物的光谱特征及季节变化进行精细分析，这不仅丰富了地物波谱库，而且可以建立地物光谱数据与无人机遥感影像之间的联系，为后期利用无人机遥感影像自动监测泥炭藓沼泽湿地植物分布与动态变化奠定基础。

1 研究区概况

龙王山泥炭藓沼泽湿地，又称“千亩田湿地”，地理位置为30° 22′31.68″ ~ 30° 25′ 12.29″N，119° 23′ 48.15″ ~ 119°26′38.42″E，属于典型的亚热带季风气候区，夏季高温多雨，冬季温和少雨，年均温为8.8 ℃，最低温度可达-20 ℃，年降水量为1 700 ~ 1 900 mm[2]。核心区面积为9 000 m^2，光谱采样点位置位于易于行走的水路旁边，每种植物布设3个采样点，各采样点植物长势均良好。

2 数据来源及处理

2.1 典型植物选取

本研究选取龙王山泥炭藓沼泽湿地4种典型植物（泥炭藓、桂皮紫萁、圆锥绣球、玉蝉花），4种植物在研究区均有广泛分布且各有特点，维管植物具有导管组织，可向上输送营养物质和水分[3]；与维管植物不同的是泥炭藓没有导管组织，但其具有独特的形态结构特征和很强的持水能力，吸水后可达自身干重的10 ~ 15倍左右，一年四季均有活力[3]。

2.2 坡度数据获取

利用无人机搭载的激光雷达相机（大疆L1）获取泥炭藓沼泽湿地高精度（空间分辨率为1 m）DEM数据，通过ArcGIS空间分析功能提取研究区坡度，并依据坡度划分等级选取3种坡度类型（平地、微坡、缓坡）研究不同坡度对维管植物光谱特征的影响，不同坡度类型植被长势相同坡向均为阳坡。

2.3 光谱数据采集与处理

利用美国ASD公司生产的FieldSpec HandHeld 2手持便携式地物光谱仪进行野外植被光谱数据采集，其视场角为25°，采集的光谱范围为325 ~ 1 075 nm；选择晴朗无云无风或微风的天气，测量时间为10：00~14：00，时间跨度为2022年5月上旬至11月上旬。选取植被类型单一、长势良好的植株，分别采集泥炭藓、桂皮紫萁、圆锥绣球和玉蝉花的冠层光谱，每种植被采集3个样本，每个样本每次采集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，大约覆盖0.2 m^2，每次测量前，都进行标准白板校正，以消除环境光影响，为了保证每次测量植株的一致性，同时标记测量的位置[3]。

由于地物光谱仪各个组成部分工作时易产生噪声，为了减少噪声对后续分析的影响，对所测数据利用Origin软件的最小二乘法进行平滑处理[1]。计算30条光谱

表1 龙王山泥炭藓沼泽湿地典型植物及特征

植物名称	拉丁名	科	属	特征
泥炭藓	Sphagnum	泥炭藓科	泥炭藓属	植物体枝条纤长，黄绿色或黄白色；生于水湿环境及沼泽地带，四季均生长
桂皮紫萁	Osmunda cinnamomea Linn.var. fokiense Cop.	紫萁科	紫萁属	株高一般为40~60 cm，生长季为5-11月；5月抽穗发芽，密被灰棕色茸毛，6-8月叶片大而宽，颜色为黄绿色；9-11月枯萎，叶片为淡棕色
圆锥绣球	Hydrangea paniculata Siebold	绣球科	绣球属	圆锥绣球枝为暗红褐色或灰褐色，高1~2 m，叶片小，春季叶片的叶绿素含量比夏季较高，夏季叶片发黄，秋季叶片凋落。
玉蝉花	Iris ensata Thunb.	鸢尾科	鸢尾属	多年生草本植物，根状茎粗壮，斜伸；叶线形，中脉明显，长可达80 cm，宽约1 cm。5月发芽，7-8月开花期，9-10月结果期

曲线的平均值作为每种植被每个样本的光谱曲线，每月每种植被的光谱则为该植被3个样本的光谱平均值。

3　结果与分析

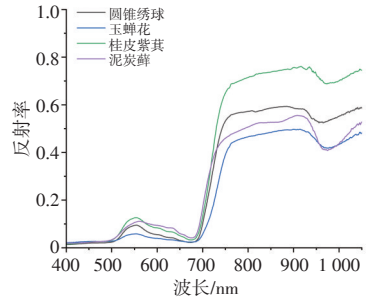
3.1　同一季节不同植物的冠层光谱特征

不同绿色植被叶片中叶绿素、叶黄素、花青素等成分的含量以及其他生物化学成分的差异，对植被的光谱特性产生显著影响[8-9]。同时，植被的生长状态、叶片面积、叶片结构、含水量、土壤背景、仪器观测角度等因素也在很大程度上影响了植被冠层的光谱曲线[10-11]。夏季是植被生长的旺季，植被长势较好[7]，因此本节选取7月份的测量数据对不同植物的冠层光谱特征进行分析。

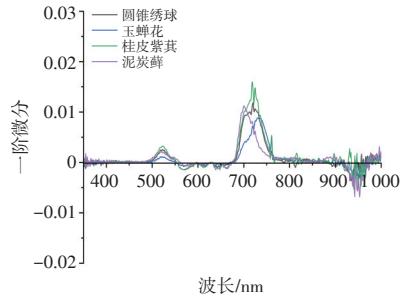
由图1a可知，4种不同植被的冠层光谱曲线具有相似的特征，但在特定波段上存在差异。在可见光波段（350~700 nm）光谱响应主要受叶绿素等色素支配，其反射率比较低，一般在20%以下；4种植被在480 nm和670 nm均有2个明显的叶绿素吸收谷，这2个谷通常称为“蓝谷”和“红谷”；然而在520~620 nm波段，由于叶绿素吸收作用相对较弱，形成了一个明显的反射峰（称为绿峰），其中3种维管植物的绿峰位置在550 nm处，而泥炭藓的绿峰（575 nm）出现向长波方向移动的现象，这主要是因为与维管植物相比泥炭藓叶绿素含量较低，从而导致“绿峰”后移；4种植物在680~750 nm波段，反射率急剧升高，出现“红边”现象。

植被冠层反射率在近红外波段（800~1 100 nm）受水汽影响较为显著，植被反射率较高，通常在0.4以上。由于4种不同植被的叶片内部组织结构和含水量存在差异，因此它们在这个波段的反射率也存在较大差异。泥炭藓反射率值相比维管植物要低，这主要是由于细胞结构不同而形成的光谱特征差异。泥炭藓为透明质细胞，且叶片仅由一层细胞构成，与维管植物相比细胞结构相对简单[4]；另外，泥炭藓在970 nm处有个明显的水吸收谷，造成在大约900 nm处形成反射率峰值，主要是因为泥炭藓含水量远高于维管植物，这也是区分泥炭藓与维管植物的典型特征。桂皮紫萁在近红外波段的反射率最高，几乎是玉蝉花的2倍，比圆锥绣球的反射率高0.2左右，这主要是因为7月份桂皮紫萁叶片比圆锥绣球、玉蝉花的叶片大，并且宽，叶绿素含量高。

图1b为4种植被光谱数据的一阶微分处理结果。总体来看，除680~750 nm波段外，4种植物的一阶微分值基本在−0.005与0.005之间波动。4种植物均有较明显的“红边”现象，其中桂皮紫萁的红边斜率（即红光波段一阶微分最大值）最高，达到了0.016，圆锥绣球、泥炭藓的红边斜率值为0.011，玉蝉花的红边斜率值最低为0.009；一阶微分曲线波峰或波谷位置，为光谱反射率变化最快的区域，如730 nm等值处；红边斜率最大值对应的波长为各植被的红边位置，圆锥绣球、桂皮紫萁、玉蝉花、泥炭藓4种植被的红边位置依次为722、717、733、701 nm，可见维管植物与泥炭藓在红边位置可区分性较大；圆锥绣球与桂皮紫萁的红边位置仅差4 nm，区分性较小，这主要源于2种植被形态结构差异，圆锥绣球属小灌木，叶片小且较稀疏，桂皮紫萁叶片虽然宽大，叶片之间紧凑，但其叶绿素含量相对较少，由此导致光谱仪在固定高度视场角范围内所获得的2种植物叶片叶绿素含量差异较小；圆锥绣球与玉蝉花、桂皮紫萁与玉蝉花之间的红边位置分别为11、16 nm，相对来说区别较大。



a　原始冠层光谱特征



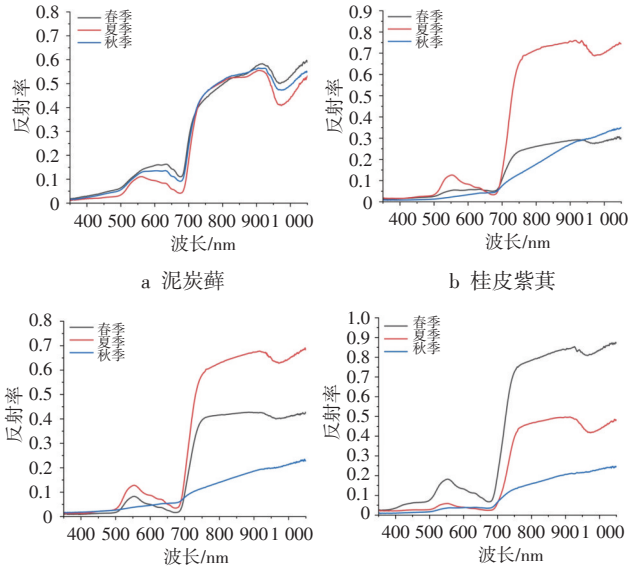
b　一阶微分

图1　不同植物原始光谱反射率及一阶微分

3.2　同种植物不同季节冠层光谱特征

图2为泥炭藓、玉蝉花、圆锥绣球、桂皮紫萁4种典型植物在春季（5月）、夏季（7月）、秋季（10月）的冠层原始反射率曲线。由图2a可知，泥炭藓在春、夏、秋3个季节的反射率曲线波形并无明显变化，而各个波段的反射率值出现较小的差异，原因主要来源于叶绿素和水分的含量。在380~700 nm波段，泥炭藓反射率表现为春季>秋季>秋季，700~900 nm波段3个季节的反射率接近，900~1 050 nm波段呈现

出与380~700 nm波段相同的特征。春季泥炭藓在水吸收谷处的反射率为0.5，秋季水吸收谷处的反射率比春季低0.02，夏季的水吸收谷处的反射率为0.4。玉蝉花、圆锥绣球、桂皮紫萁3种维管植物在春季、夏季、秋季的光谱反射率波形及各个波段的反射率值均表现出显著差异；春、夏季，3种植物在可见光波段均有“蓝谷”、“绿峰”、“红谷”，且光谱位置都相同；秋季，植物细胞衰老，叶绿素及水分含量显著减少，已失去绿色植物的典型光谱特征。



a 泥炭藓　b 桂皮紫萁

c 圆锥绣球　d 玉蝉花

图2 同种植物不同季节的原始光谱反射率曲线

春季，玉蝉花在550 nm处的反射率为0.2，在近红外波段（700~1 050 nm）的反射率均高于0.75；圆锥绣球在550 nm处的反射率值接近0.1，在近红外波段（700~1 050 nm）的反射率为0.4左右；与玉蝉花、圆锥绣球相比，桂皮紫萁在550 nm并没有明显的“绿峰”，在近红外波段的反射率比玉蝉花、圆锥绣球低，反射率在0.3以下，这主要因为桂皮紫萁本身的物候特征，春季桂皮紫萁叶片小且密被灰棕色绒毛，叶绿素含量较少。

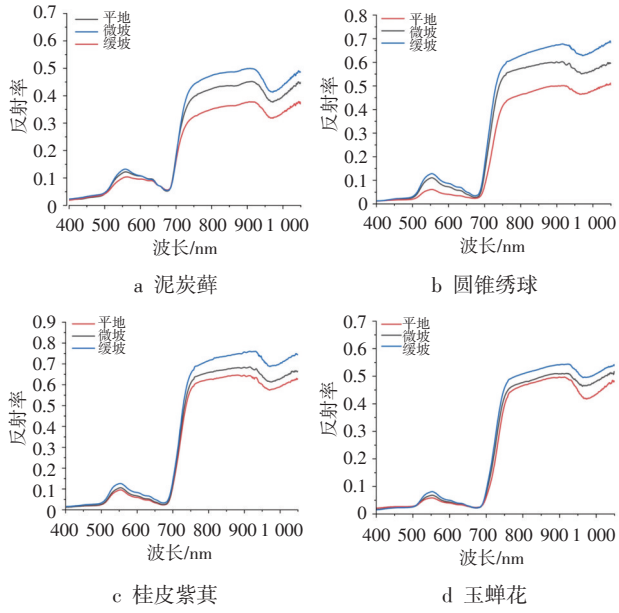
夏季，玉蝉花在整个波段的反射率均大幅度下降，“绿峰”处的反射率由0.2降低为0.05，在近红外波段（700~1 050 nm）的反射率值仅为春季的1/2，可见春季玉蝉花的叶绿素含量远高于夏季；而圆锥绣球在整个波段的光谱反射率均高于春季，其在“绿峰”的反射率由春季的0.1升高为0.15，在近红外的反射率由0.4增长为0.7，并且在970 nm的水吸收谷比春季深，可见圆锥绣球在夏季的叶片水分含量及叶绿素含量高于春季；夏季桂皮紫萁叶片宽且大，叶绿素含量及水分含量远高于春季，其在550 nm处的“绿峰”反射率达到了0.15，“红谷”加深，在近外波段的反射率急剧上升，几乎是春季的4倍，达到了0.79。

秋季，玉蝉花、圆锥绣球、桂皮紫萁的光谱反射率曲线已失去植被典型“双峰双谷”的特点，可见光波段的“绿峰”、“红谷”几乎变成了一条迅速上升的曲线，这主要是因为秋季3种植物叶片细胞衰老，结构发生变化，叶绿素及水分含量大幅度降低所致。

4 讨 论

4.1 坡度对4种植物光谱的影响

由图3可知，3种维管植物的光谱反射率随着坡度的增加而增加，这与马东辉等[14]的研究结论相一致。这主要是因为植物叶片并不是一个理想的光滑表面，存在二向性反射特征，而植物叶片的镜面反射是影响植物二向性反射的主要原因。在一定坡度范围内，由于观测探头始终垂直向下，因此植被冠层的观测天顶角随坡度增加而增加，视场内植被冠层上层部分所占的比重也相应增加。而上层部分光谱反射率比下层阴影部分高，所以植被冠层的光谱反射率也相应升高[14]。与维管植物不同，泥炭藓的光谱反射率随坡度的增加而增加，这可能是由于不同坡度下（高低丘）土壤的含水量存在差异，而泥炭藓对水分的变化及其敏感，所以其光谱反射率发生变化[3]。



a 泥炭藓　b 圆锥绣球

c 桂皮紫萁　d 玉蝉花

图3 不同坡度下4种植物的光谱特征

4.2 不同季节4种植物的可分性

为了解一年中哪个月份4种植物的可分性最好，对每月采集的每种植被的每个样本点进行一阶导数计算，

得到4种典型植被5–10月红边位置的波动范围，其中，5–10月份泥炭藓的红边位置波动范围在690~701 nm之间，各月份之间红边位置相差不大。桂皮紫萁在6–8月的红边位置波动范围为717~719 nm，相对稳定；而5月、9月、10月由于桂皮紫萁叶片中叶绿素含量差异较大，导致红边位置移动。玉蝉花5–10月的红边位置在694~736 nm之间，圆锥绣球的红边位置在693~719 nm之间。总体来说，整个生长季各植被红边位置因细胞结构，色素含量差异及季节变化而波动，泥炭藓红边位置波动相对较少，其他植物红边位置波动较大。

从单个月份对不同植物的红边位置进行分析可知，5月份泥炭藓与桂皮紫萁之间的红边位置范围重合，难以进行区分；而与玉蝉花、圆锥绣球之间的红边位置相差16 nm，可进行区分。维管植物之间，玉蝉花与圆锥绣球的红边位置范围重合，难以区分；桂皮紫萁与玉蝉花、桂皮紫萁与圆锥绣球之间的红边位置最小差18 nm，可进行区分。6月份，泥炭藓与3种维管植物的红边位置最小差16 nm，圆锥绣球与桂皮紫萁的红边位置范围重合，难以区分，其他维管植物之间的红边位置最小差11 nm。7月份泥炭藓与玉蝉花的红边位置最小相差34 nm，而与其他2种植物之间的红边位置最小差16 nm；圆锥绣球与桂皮紫萁的红边位置范围重合，难以区分；玉蝉花与其他2种维管植物的红边位置最小相差16 nm。8月份，泥炭藓与圆锥绣球的红边位置范围重合，难以区分；与玉蝉花、桂皮紫萁的红边位置最小差分别为23 nm，16 nm；对于3种维管植物而言，玉蝉花与圆锥绣球、桂皮紫萁的红边位置差分别为23 nm、16 nm，可进行区分，而圆锥绣球与桂皮紫萁红边位置范围重合无法进行区分。9–10月份，4种植被的红边位置范围均重合，无法进行区分。由此可知，5月份除泥炭藓与桂皮紫萁、玉蝉花与圆锥绣球难以区分外，其他植物之间可区分性最好，7月份除桂皮紫萁与圆锥绣球难以区分外，其他植物之间可分性最好。

上述研究表明除桂皮紫萁与圆锥绣球难以用红边区分外，其他植物在7月份的可分性最好，但基于2022年的现场观测发现5月份3种维管植物植株相对来说比较矮小，泥炭藓裸露面积多，是泥炭藓与维管植物识别分类的最佳月份，因此综合理论研究及现场观测，我们建议后期利用5月和7月的的无人机遥感影像数据，采用分层分类方法对湿地植被进行长期动态监测。

5　结　论

光谱研究可以了解不同植被的光谱特性和变化规律，建立与遥感影像之间的关系，为后期利用遥感影像自动监测泥炭藓沼泽湿地植被分布与动态变化奠定基础。本文利用FieldSpec HandHeld 2地物光谱仪对龙王山泥炭藓沼泽湿地的4种典型植被的冠层光谱进行测量，并对其光谱特征及季节变化进行分析，得出以下结论。

1）泥炭藓的光谱特征与桂皮紫萁、玉蝉花、圆锥绣球三种维管植物存在较大差异：维管植物在550 nm有一个明显的绿色“反射峰”，泥炭藓的反射峰后移（575 nm）并且反射率较维管植物低；另外，泥炭藓在970 nm处有个明显的水吸收谷，这主要是因为泥炭藓含水量远高于维管植物，是区分泥炭藓与维管植物的最明显的特征。

2）对湿地5–10月份4种典型植被的光谱进行一阶导数计算，发现泥炭藓与维管植物在7月份可分性最好，桂皮紫萁与其他植物在5月的可分性最好。泥炭藓的红边位置为701 nm，与其他3种维管植物的红边位置差均在16 nm以上，这是后期利用高光谱遥感影像区分泥炭藓与维管植物的又一典型特征；对于3种维管植物而言，除圆锥绣球与桂皮紫萁外，其他植物之间的红边位置最小差均在16 nm以上，可进行区分。

3）泥炭藓在春、夏、秋3个季节的光谱曲线形态并无明显变化，但在特定波段（350~700 nm，900~1 050 nm）反射率发生变化，总体表现为春季>夏季>秋季；3种维管植物随着细胞结构的衰老光谱曲线形态出现显著变化，春夏两季3种植物都有明显的“绿峰”、“红谷”；圆锥绣球、桂皮紫萁在春夏两季的反射率表现为夏季>春季，玉蝉花光谱反射率呈现出相反的特征，表现为春季>夏季；秋季，3种维管植物“绿峰”、“红谷”2个典型特征消失，变为一条迅速上升的曲线。

参考文献

[1]　岳心睿. 龙王山千亩田泥炭藓湿地微生物群落结构研究[D]. 杭州:杭州师范大学,2023

[2]　俞立鹏,汪贤挺,郎泽东,等. 1979年以来5个时期安吉小鸊生境变化分析及预测[J]. 湿地科学,2022,20(3):303-310

[3]　王波,柳小妮,王洪伟,等. 东祁连山高寒灌丛六种灌木植物的光谱特征分析[J]. 光谱学与光谱分析,2019,39(5):

（下转第77页）