

# 芦苇叶片含水量的光谱响应特征分析

侯艳军\*, 董琳琳

忻州师范学院地理系, 山西 忻州 034000

**摘要** 对艾比湖湿地自然保护区的芦苇叶片进行了采样、含水量测定, 利用 FieldSpec3 便携式光谱仪现场进行了芦苇叶片的光谱测量, 并对芦苇叶片原始光谱进行了平滑处理、导数变换, 分析在不同微分窗口尺度下芦苇叶片一阶导数对含水量变化的响应特征, 同时提取特征参数表征芦苇叶片含水量。研究表明: 当  $w=1\sim 15$  时, 一阶光谱曲线噪声难以有效降低, 致使光谱曲线的轮廓不易辨别, 叶片含水量变化引起的光谱响应特征不易判断。当  $w=16\sim 30$  时, 微分窗口尺度的增大较好地消除了芦苇叶片一阶导数光谱值中的噪声, 芦苇叶片一阶导数光谱与含水量之间的相关系数在 1460~1500 nm 波段与 1374~1534 nm 波段相比, 相关系数波动小, 标准差小, 表现较稳定, 1460~1500 nm 波段一阶导数光谱对含水量的响应呈现比较一致、显著的特征; 将 1460~1500 nm 波段内一阶导数光谱值的平均值作为特征参数, 在微分窗口尺度 1~30 下, 该特征参数与其他窗口尺度相比, 更适合指示芦苇叶片含水量变化, 为干旱区湿地芦苇水分遥感监测中采用短波红外反射光谱分析技术定量检验芦苇叶片水分提供新的途径。

**关键词** 光谱学; 短波红外; 芦苇叶片含水量; 一阶导数光谱; 特征参数

中图分类号 S151.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0330005

## Analysis on Spectrum Feature for Water Content of Phragmites Reed Leaf

Hou Yanjun\*, Dong Linlin

Department of Geography, Xinzhou Teachers University, Xinzhou, Shanxi 034000, China

**Abstract** The reed leaves in Ebinur Lake Wetland Nature Reserve were sampled and water content was measured. The spectrum of reed leaves was measured by FieldSpec3 portable spectrometer. The original spectrum of reed leaves was smoothed and derivative transformation was carried out. The response characteristics of the first derivative of reed leaves to water content change under different differential window scales were analyzed, and the characteristics were extracted. The water content of reed leaves was characterized by characteristic parameters. The results show that when  $w = 1-15$ , the noise of the first-order spectral curve is difficult to be effectively reduced, which makes the contour of the spectral curve difficult to distinguish, and the spectral response characteristics caused by the change of leaf water content are not easy to judge. When  $w = 16-30$ , the first derivative spectrum noise obtained can be effectively removed. Compared to the correlation coefficient between the first derivative spectrum of phragmites reed leaves and the water content in the 1374-1534 nm band, the correlation coefficient in 1460-1500 nm band demonstrates small fluctuations, small standard deviations, and stable performance, the response feature between the whole first derivative spectrum within 1460 nm and 1500 nm, and water content variation has more consistency and significantly response. Take the average value of the first derivative spectral value in the

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-06-10; 录用日期: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(41661057)、山西省高等学校科技创新项目(2020L0548)、忻州师范学院五台山文化研究项目(201701)、忻州市科技局应用基础研究项目(20190105-3)

\*E-mail: yjhou1223@163.com

1460—1500 nm band as the characteristic parameter. Under the differential range of 1—30, compare the characteristic parameter with other differential ranges, it is more suitable to indicate the change of reed leaf water content, which provides a new way for quantitative detection of reed leaf moisture by short-wave infrared reflectance spectroscopy in remote sensing monitoring of reed water in arid area.

**Key words** spectroscopy; short-wave infrared; water content of phragmites reed leaf; first derivative spectrum; feature parameter

**OCIS codes** 300.6340; 300.6170

## 1 引言

湿地是地球上具有多种功能的独特生态系统,不仅具有巨大的经济社会效益,还具有调节区域气候、均化洪水、净化水质、保持物种多样性等功能<sup>[1]</sup>。干旱区湿地在我国湿地中占有较大的比重,主要分布在江河源头、绿洲、河滩、内陆湖滨等生态敏感带,对维护干旱地区生态环境起着重要作用<sup>[2]</sup>。

艾比湖湿地自然保护区位于新疆北部准噶尔盆地西南,属于典型的干旱区湖泊湿地,在维护区域生态平衡,提供珍稀动植物栖息地和保护生物多样性等方面具有非常重要的作用<sup>[3]</sup>。芦苇作为湿地生态系统的基本组分,其群落特征的变化能够反映出生长环境的状况。芦苇叶片水分含量约为 40%~80%,水分是控制植被光合作用、呼吸作用以及生物量的主要因素,水分缺失会直接影响植物生理生化过程和形态结构,从而影响植物的生长和发育<sup>[4]</sup>。因此,及时准确监测或诊断芦苇叶片的含水量对反映芦苇的生理状况,以及对火灾、旱灾和生态安全的监测有重要的意义。

传统的监测和估算植被含水量的多种野外实测方法,由于受空间和时间的局限,测得的植被含水量只反映采样点周边较小空间和较短时间内的状况;同时,传统方法一般具有事后性和破坏性,在空间和时间上无法满足快速、实时、准确、无损的诊断要求,难以大面积应用<sup>[5]</sup>。而根据光谱测定进行植被含水量的分析与反演,无疑为解决传统植被含水量监测问题提供了一种有效途径。在植被水分遥感研究中,冠层温度法是诊断作物水分状况的重要手段<sup>[6]</sup>。随后研究人员相继提出参考温度法<sup>[7]</sup>、威迫积温法<sup>[8]</sup>、作物缺水指标法<sup>[9]</sup>等,在植被水分遥感监测方面取得较大的成就。目前,高光谱技术在反演荒漠植物的含水率<sup>[10]</sup>、小麦的水分状况<sup>[11-14]</sup>、土壤水分<sup>[15-16]</sup>等方面,得到了广泛应用。对高光谱技术研究表明,有效、无损地检测土壤有机质的重要前提是通过在适当的微分窗口尺度下从一阶导数光谱提取特

征参数<sup>[17]</sup>。因此,在一定范围的微分窗口内,通过选取合适的窗口尺度来辨别光谱对植物含水量的响应波段,提取最优的光谱特征参数来表征植物含水量的变化,是值得研究的问题。本研究对芦苇叶片原始光谱及其平滑处理后的光谱进行了对数和导数的变换,之后分析了在不同微分窗口尺度下芦苇叶片一阶导数对含水量变化的响应特征,同时提取特征参数表征植物含水量,旨在为干旱区湿地植被实现有效、准确、快速、大范围地遥感监测提供支持。

## 2 研究区概括

艾比湖湿地自然保护区(44°30'~45°09'N, 82°36'~80°50'E)位于新疆维吾尔自治区内,是准噶尔盆地西部最低洼地和水盐汇聚中心,总面积为 2670.85 km<sup>2</sup>,属典型温带大陆性干旱气候<sup>[3]</sup>。研究区年均气温为 5℃,多年平均降水量为 105.17 mm,潜在蒸发量为 1315 mm,降水量年内分配不均,夏多冬少,气候极端干燥,降水稀少。

艾比湖湿地自然保护区是我国内陆干旱区独特的生物基因宝库,因其处于阿拉山口主风道区,该地区形成了盐湖、沼泽、沙漠、盐漠等多种地类,由此形成了多种植被群落,其中包括旱生、盐生、沙生、湿生、水生等植被类群,芦苇是该地区典型的盐生植被代表<sup>[18]</sup>。

## 3 材料与方 法

### 3.1 芦苇叶片光谱测定

芦苇叶片光谱反射率的测定采用美国 Analytical Spectral Device (ASD) 公司生产的 FieldSpec3 便携式光谱仪,波段范围为 350~2500 nm。其中 350~1000 nm 光谱采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm;1000~2500 nm 光谱采样间隔为 2 nm,光谱分辨率为 10 nm。于 2013 年 5 月 15 日对艾比湖湿地自然保护区鸭子湾芦苇群落随机设置 10 m×10 m 的样方进行芦苇叶片的野外光谱测量。野外测量选择晴朗无风的时间,测量时

间为当地时间 10:00~14:00,至少每 20 min 利用白板进行 1 次优化。测量时选择芦苇的第一片完全展开叶,探头距离叶片中间部位约为 5 cm,保证探头的视野范围落在叶片上,每株芦苇测定 10 次,取平均值作为该样本代表性光谱曲线。

### 3.2 芦苇叶片含水量测定

在样地内取光谱测定的芦苇叶片,装入封口袋,立即称鲜重、贴标签,芦苇叶片光谱测定与含水量测定所用叶片样品一一对应。样品带回实验室内,装入纸袋中,使用电热恒温鼓风箱,先将温度调至 100 °C~105 °C 杀青 15 min,然后将温度调至 80 °C,烘至恒重并称其干重,鲜重与干重的差值与鲜重之比即为芦苇叶片含水率<sup>[10]</sup>。40 个芦苇样本中,含水率最大值为 70.39%,最小值为 35.44%,平均值为 57.28%。

### 3.3 数据处理

赵钊等<sup>[10]</sup>通过研究古尔邦通古特沙漠南缘典型荒漠植被含水量的光谱表达特征区段,认为 1374~1534 nm 是荒漠植被对水分最为敏感波段,因而本文把 1374~1534 nm 作为芦苇叶片含水量响应波段,对每个样品采集的光谱进行平均。实验在 1374~1534 nm 波段对芦苇叶片光谱进行对数和导数变换,以加强因芦苇叶片含水量的变化所产生的光谱响应差异,对数变化采用的计算公式为<sup>[17]</sup>

$$A(\lambda) = \ln [1/R(\lambda)], \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为波长,范围为 1374~1534 nm; $R(\lambda)$ 为波长位于 $\lambda$ 处芦苇叶片原始光谱的反射率; $A(\lambda)$ 为波长位于 $\lambda$ 处对数变换后的芦苇叶片光谱值。导数变换的公式为<sup>[17]</sup>

$$D(\lambda) = [A(\lambda) - A(\lambda + \omega)] / \omega, \quad (2)$$

式中: $\omega$ 为微分窗口尺度,范围为 1~30; $D(\lambda)$ 为波长位于 $\lambda$ 处导数变换后的芦苇叶片一阶导数光谱值。

### 3.4 相关性分析

线性相关分析是分析两种因素关联性大小的一种数学统计方法。两种因素的相关性表明两种因素的关联程度,关联度越大,两种因素的相关性越大,关系越密切;反之,表明关系越远。相关性分析运算结果值介于-1~1之间,当相关性值 $>0$ ,表明两种因素为正相关;当相关性值 $<0$ ,表明两种因素为负相关。相关性分析运算结果值的绝对值离 1 越近,说明这两种因素的相关性越大,两种因素相关性分析结果值的绝对值越接近于 0,表明这两种因素的相关性越小<sup>[19]</sup>。

## 4 结果与讨论

### 4.1 导数变换对含水量不同的芦苇叶片光谱响应特征的影响

依据(1)式和(2)式求出在不同尺度的微分窗口下( $\omega=1,2,\dots,30$ ),含水量不同芦苇叶片的一阶导数光谱(图 1);同时求出芦苇叶片的一阶导数光谱与含水量之间的相互关系(图 2)。由图 1 和图 2 可知,由于微分窗口尺度的增大,导数变换后的一阶导数光谱曲线的平滑效果明显得到优化。当 $\omega=1\sim 5$ 时,由于微分窗口尺度小,导数变换的平滑作用差,大量的噪声对芦苇叶片的一阶导数光谱曲线有着严重的干扰,导致光谱曲线轮廓不易辨别,因叶片含水量变化引起的光谱响应特征受到强干扰,敏感波段难以提取,光谱质量差;在对应的微分窗口尺度下,一阶导数光谱与含水量之间的关系曲线振荡强烈,频率高、振幅大。当 $\omega=6\sim 10$ 时,由于微分窗口尺度的逐渐增大,导数变换对芦苇叶片一阶导数光谱曲线的平滑作用得到了提高,噪声对一阶导数光谱曲线的干扰有了相应程度的降低,但噪声干扰仍然较强,致使光谱曲线轮廓依然不易辨别,芦苇叶片含水量变化引起的光谱响应特征依然难以判断;在对应微分窗口尺度下,虽然一阶导数光谱与含水量之间的关系曲线振荡的强度有所下降,但振荡依然强烈,振幅大。当 $\omega=11\sim 15$ 时,由于微分窗口尺度的进一步增大,导数变换对芦苇叶片一阶导数光谱曲线的平滑作用有了较大的提升,噪声对一阶导数光谱曲线的干扰得到了进一步的降低,光谱曲线轮廓大致能够辨别出来,但叶片含水量变化引起的光谱响应特征依然不易判断;在对应微分窗口尺度下,一阶导数光谱与含水量之间的关系曲线振荡的强度得到了进一步的下降,但振荡依然起伏大,不易提取含水量变化引起的光谱响应波段。当 $\omega=16\sim 30$ 时,由于微分窗口尺度的不断增大,导数变换对芦苇叶片光谱曲线的平滑作用得到了更好的提升,噪声对一阶导数光谱曲线的干扰得到了有效去除,光谱曲线轮廓能够得到更清晰的辨别。在波长范围 1374~1414 nm 内,含水量不同的各条光谱曲线均存在一个“V”形特征的吸收谷;其中在 1381~1382 nm 处,一阶导数光谱值位于谷底;对于含水量不同芦苇叶片的光谱值,在 1460~1500 nm 范围内随着含水量的增加整体呈上升趋势,与其他波段比较,该波段范围内光谱表现出较为一致、显著的响应



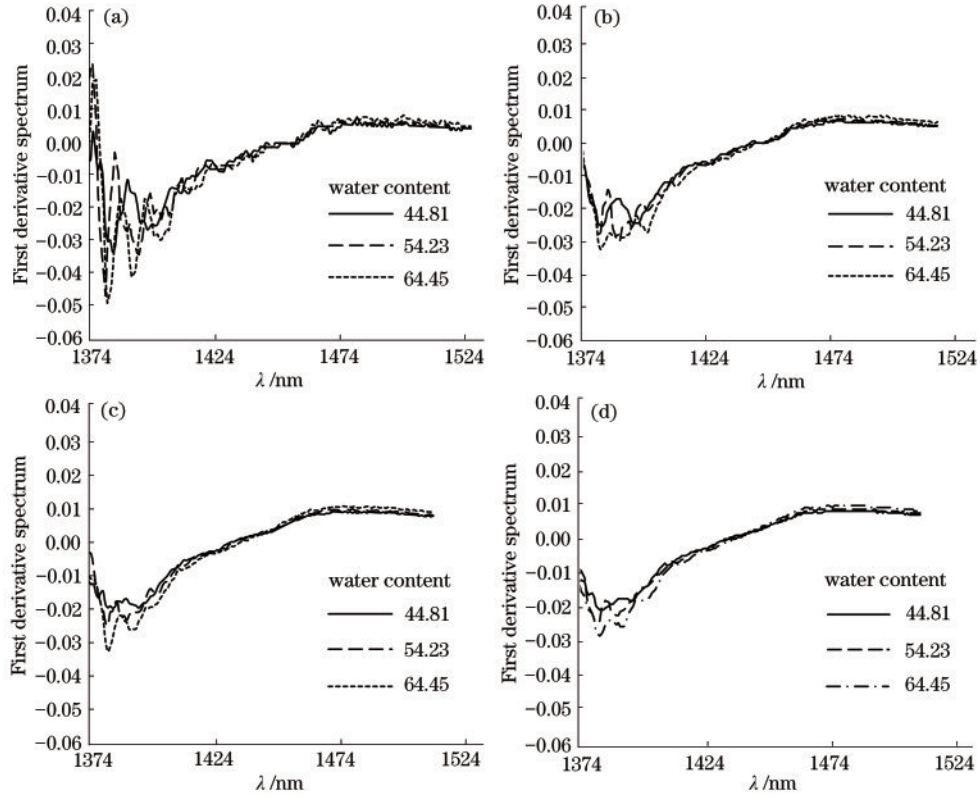


图 1 不同尺度的微分窗口对芦苇叶片一阶导数光谱响应特征的影响。(a)  $\omega=5$ ; (b)  $\omega=10$ ; (c)  $\omega=15$ ; (d)  $\omega=20$   
 Fig. 1 Effects of different differential window scales on first derivative spectral response characteristics of reed leaves. (a)  $\omega=5$ ; (b)  $\omega=10$ ; (c)  $\omega=15$ ; (d)  $\omega=20$

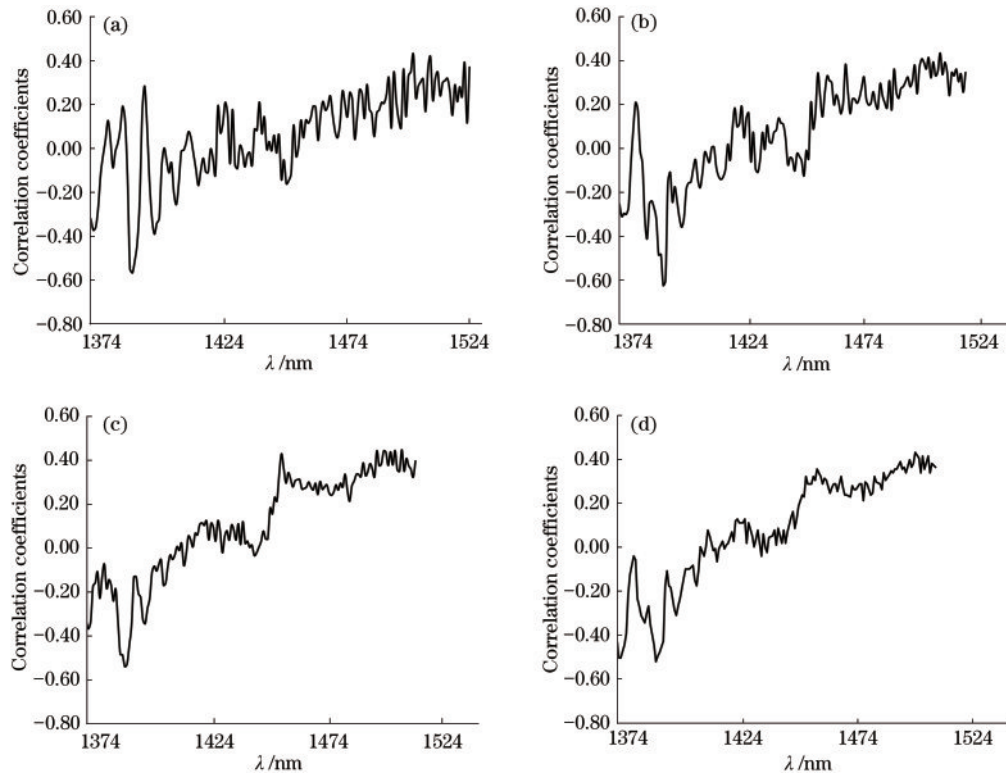


图 2 不同尺度的微分窗口对芦苇叶片一阶导数光谱与含水量相关系数的影响。(a)  $\omega=5$ ; (b)  $\omega=10$ ; (c)  $\omega=15$ ; (d)  $\omega=20$   
 Fig. 2 Effects of different differential window scales on correlation coefficient of reed leaf first derivative spectra and water content. (a)  $\omega=5$ ; (b)  $\omega=10$ ; (c)  $\omega=15$ ; (d)  $\omega=20$

特征。以  $\omega=20$  为例,在 1374~1534 nm 范围内,一阶导数光谱与含水量之间的相关系数范围为  $-0.54\sim 0.40$ ,平均值为 0.05,标准差为 0.25;在 1460~1500 nm 范围内,一阶导数光谱与含水量之间的相关系数范围为  $0.18\sim 0.36$ ,平均值为 0.27,标准差为 0.04。一阶导数光谱与含水量之间的相关系数标准差在 1460~1500 nm,比 1374~1534 nm 小 0.21,因而能够说明在 1460~1500 nm 内一阶导数光谱与含水量之间的相关系数波动小,表现较稳定。

在  $\omega=16\sim 30$  时,波长范围 1460~1500 nm 内芦苇叶片一阶导数光谱值比较一致,而且波动幅度小;对叶片含水量的变化,整体上表现出较为一致、显著的响应特征。本研究采用该波段范围内一阶导数光谱值的平均值作为特征参数表征芦苇叶片含水量变化。计算公式为

$$M_s^\omega = \frac{1}{41} \cdot \sum_{\lambda=1460}^{1500} D_s^\omega(\lambda), \quad (3)$$

式中: $D_s^\omega(\lambda)$ 代表经对数变换后,微分窗口尺寸为  $\omega$  时,波长位置  $\lambda$  处芦苇叶片一阶导数光谱值; $M_s^\omega$  代表波长范围 1460~1500 nm 内  $D_s^\omega(\lambda)$  的平均值。然后计算在不同微分窗口尺度下, $M_s^\omega$  与芦苇叶片含水量的相关关系。如图 3(a) 所示,随着微分窗口的逐步增加,相关系数曲线呈先下降,后急剧上升,再略有下降,最后缓慢增加的趋势。当  $\omega=1\sim 15$  时,由于窗口尺度较小,曲线波动幅度大;当  $\omega=16\sim 30$  时,曲线波动幅度小,曲线变化平缓;当  $\omega=18\sim 21$  时,相关系数处于曲线后段的底部,基本稳定在  $-0.212\sim -0.219$  之间,变化趋势稳定;当  $\omega=20$  时,相关系数取得负数的最小值  $-0.219$ ,因而在微分窗口尺度  $1\sim 30$  中, $M_s^{20}$  更适合作为特征参数表示芦苇叶片含水量变化。

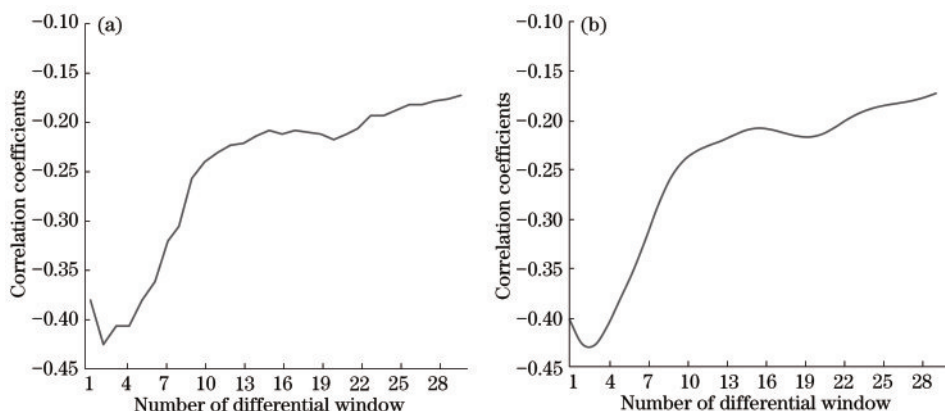


图 3 不同尺度的微分窗口对特征参数的相关系数的影响。(a)平滑前;(b)平滑后

Fig. 3 Effects of different differential window scales on the correlation coefficients of characteristic parameters. (a) Before smoothing; (b) after smoothing

#### 4.2 微分窗口尺度下平滑去噪后一阶导数光谱响应特征的影响

为了深入研究微分窗口尺度对芦苇叶片一阶导数光谱的影响,本实验对芦苇叶片原始光谱数据用 Savitzky-Golay 平滑法处理,平滑处理后再根据(1)式和(2)式,求出不同微分窗口尺度下,含水量不同的芦苇叶片的一阶导数光谱值,结果如图 4 所示。结合图 4 和图 1 比较分析,对原始光谱经平滑处理后的光谱值变换求得一阶导数光谱曲线,在不同微分窗口尺度下轮廓变得清晰、光滑;在波长范围 1374~1414 nm 内,呈现“V”形吸收谷的特征更加明显,在波长范围 1460~1500 nm 内,一阶导数光谱值对芦苇叶片含水量响应特征愈加显著。同样为了表征芦苇叶片含水量变化,将波长范围 1460~1500 nm

内原始光谱平滑处理后变换的一阶导数光谱值的平均值  $M_p^\omega$  作为特征参数,计算公式为

$$M_p^\omega = \frac{1}{41} \cdot \sum_{\lambda=1460}^{1500} D_p^\omega(\lambda), \quad (4)$$

式中: $D_p^\omega(\lambda)$ 代表原始光谱平滑处理后的光谱值经变换后,微分窗口尺寸为  $\omega$  时,波长位置  $\lambda$  处芦苇叶片一阶导数光谱值; $M_p^\omega$  代表波长范围 1460~1500 nm 内  $D_p^\omega(\lambda)$  的平均值。随后计算在不同微分窗口尺度下, $M_p^\omega$  与芦苇叶片含水量的相关关系,结果如图 3(b) 所示。结合图 3(b) 和图 3(a) 比较分析,随着微分窗口的逐步增加,相关系数曲线与图 3(a) 整体变化趋势非常一致,但是曲线波动显著减小,曲线更加光滑;当  $\omega=18\sim 21$  时,相关系数处于曲线后段的底部,基本稳定在  $-0.212\sim -0.216$  之间,变化趋势

稳定;当 $\omega=20$ 时,相关系数取得负数的最小值 $-0.216$ ,因而在微分窗口尺度 $1\sim 30$ 中,更适合作为特征参数表示芦苇叶片含水量变化。对比 $M_s^{20}$ 和 $M_p^{20}$ 可知,虽然两者的相关系数相差不大,但是对原

始光谱平滑处理后的 $M_p^\omega$ 与含水量相关系数曲线更加平滑,更能体现光谱一阶导数平均值对芦苇叶片含水量的响应,因而在微分窗口尺度 $1\sim 30$ 中, $M_p^{20}$ 更适合作为特征参数指示芦苇叶片含水量变化。

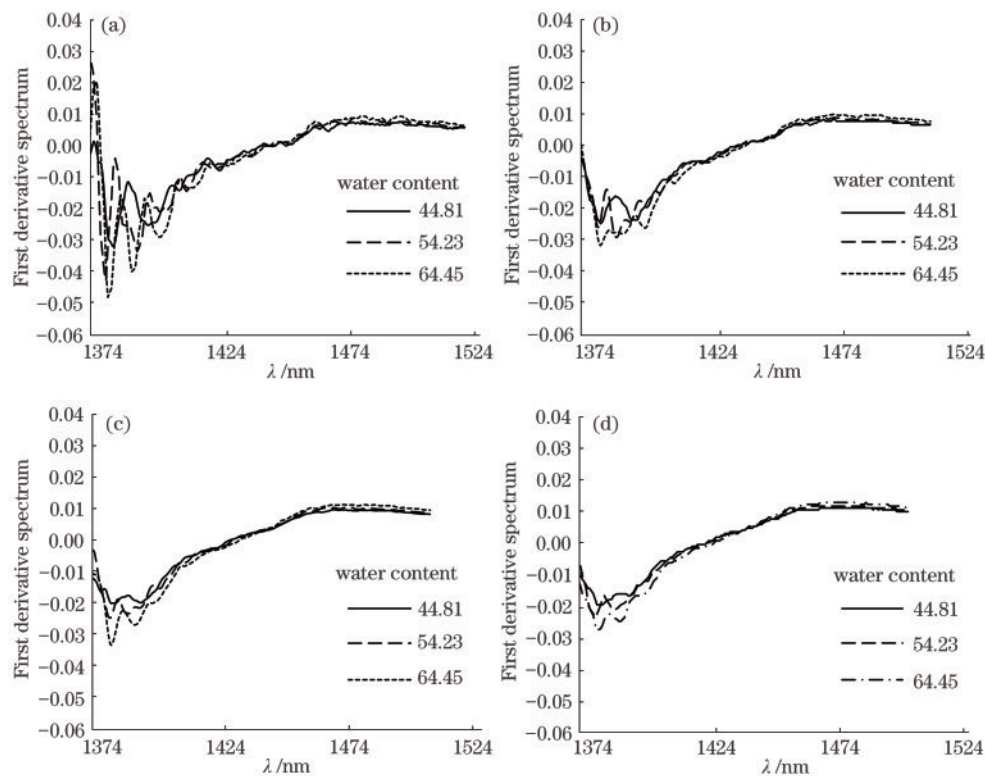


图 4 不同尺度的微分窗口对平滑后芦苇叶片一阶导数光谱响应特征的影响。(a)  $\omega=5$ ; (b)  $\omega=10$ ; (c)  $\omega=15$ ; (d)  $\omega=20$   
Fig. 4 Effects of different differential window scales on the first derivative spectral response characteristics of reed leaves after smoothing. (a)  $\omega=5$ ; (b)  $\omega=10$ ; (c)  $\omega=15$ ; (d)  $\omega=20$

### 4.3 讨论

芦苇叶片原始光谱与含水量的相关系数在 $1374\sim 1534$  nm 内为 $-0.33\sim 0.01$ ,相关系数小,不适用于提取特征波段和芦苇叶片含水量的估算。进行微分窗口的导数变换,可以提高光谱数据与含水量的相关性,但是选取合适的微分窗口尺度,是从一阶导数光谱中提取特征参数定量检测芦苇叶片含水量的重要前提。经过微分窗口变换,光谱与叶片含水量的相关性有所提高,在 $\omega=20$ 窗口下相关系数为 $-0.54\sim 0.40$ ,可以用于提取特征波段对芦苇叶片含水量的估算。对于芦苇叶片含水量的光谱估算,在中国知网进行检索,未能找到相关文献。但根据同实验室人员对胡杨叶片含水量的高光谱估算研究可知<sup>[20]</sup>,原始光谱及 6 种不同微分变换后与胡杨叶片含水量的相关系数也多在 $-0.40\sim 0.40$  范围内,运用多元逐步回归方法建立胡杨叶片含水量高光谱估算模型效果较好,但其建立的估算

模型所用波段为剔除水分 $350\sim 2500$  nm 范围内的光谱,所建 7 个估算模型的入选波段数均为 9 个,模型自变量多,较为复杂。为了减少从 $350\sim 2500$  nm 全范围内提取特征的波动,本研究提取了芦苇叶片含水量的特征波段范围。

## 5 结 论

本文提出一种提取最优的光谱特征参数来表征植物含水量的方法。通过对芦苇叶片原始光谱及其平滑处理后的光谱进行导数的变换,分析了在不同微分窗口尺度下芦苇叶片一阶导数对含水量变化的响应特征,同时提取光谱特征参数表征芦苇叶片含水量。随着微分窗口的扩大,芦苇叶片光谱噪声得到了有效去除,并得到了芦苇叶片含水量的光谱的波段范围,提高了表征叶片含水量的光谱的精确性,减少了提取特征波段数量,提升了建立叶片含水量与光谱特征响应的效率。

今后进行芦苇叶片含水量的高光谱估算可以选取 1460~1500 nm 内的光谱数据用于建立估算模型。采用一元线性回归、多元线性逐步回归方法和偏最小二乘法方法建立芦苇叶片含水量高光谱估算模型,通过精度对比确定适合芦苇叶片含水量的最优模型,为芦苇叶片含水量定量遥感估算提供有效支撑,这将是下一步研究工作的重点。

### 参 考 文 献

- [1] Yan C G, Zhang M X. Wetland vegetation in China and its conservation advices [J]. *Wetland Science*, 2005, 3(3): 210-215.  
严承高, 张明祥. 中国湿地植被及其保护对策 [J]. *湿地科学*, 2005, 3(3): 210-215
- [2] Dong Z W, Zhao X Y, Gao X, et al. Dynamic of plant community in rehabilitating wetland: a case study in Jinghe River Estuary [J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(3): 426-430.  
董正武, 赵晓英, 高翔, 等. 退化湿地恢复中植物群落的变化: 以艾比湖精河入湖口为例 [J]. *草业科学*, 2011, 28(3): 426-430.
- [3] Chen S J, Hou P, Li W H. Ebinur lake wetland nature reserve scientific expedition and research [M]. Urumqi: Xinjiang Science & Technology Press, 2006.  
陈蜀江, 侯平, 李文华. 新疆艾比湖湿地自然保护区综合科学考察 [M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2006.
- [4] Zhang J H, Fu C B, Wang C Y. A study of region crop yield model influenced by water deficit based on remote sensing information and crop photosynthetic physiological characteristic [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 2000, 24(5): 683-693.  
张佳华, 符淙斌, 王长耀. 遥感信息结合植物光合生理特性研究区域作物产量水分胁迫模型 [J]. *大气科学*, 2000, 24(5): 683-693.
- [5] Li Y X, Yang W N, Tong L, et al. Remote sensing quantitative monitoring and analysis of fuel moisture content based on spectral index [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1403-1407.  
李玉霞, 杨武年, 童玲, 等. 基于光谱指数法的植被含水量遥感定量监测及分析 [J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1403-1407.
- [6] Tanner C B. Plant temperatures 1 [J]. *Agronomy Journal*, 1963, 55(2): 210-211.
- [7] Zhang R H. A new model for estimating crop water deficiency based on infrared information [J]. *Science in China B*, 1987, 30(4): 413-425.
- [8] Idso S B, Jackson R D, Reginato R J. Canopy temperature as a crop yields [J]. *Water Resource Research*, 1981, 17(11): 33-38.
- [9] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator [J]. *Water Resources Research*, 1981, 17(4): 1133-1138.
- [10] Zhao Z, Li X, Yin Y B, et al. Analysis of spectral features based on water content of desert vegetation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(9): 2500-2503.  
赵钊, 李霞, 尹业彪, 等. 荒漠植物含水量的光谱特征分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(9): 2500-2503.
- [11] Tian Q J, Gong P, Zhao C J, et al. Feasibility analysis of the water status of wheat leaves diagnosed by the spectral reflectance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(24): 2645-2650.  
田庆久, 宫鹏, 赵春江, 等. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析 [J]. *科学通报*, 2000, 45(24): 2645-2650.
- [12] Wang J H, Zhao C J, Guo X W, et al. Study on the water status of the wheat leaves diagnosed by the spectral reflectance [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(1): 104-107.  
王纪华, 赵春江, 郭晓维, 等. 用光谱反射率诊断小麦叶片水分状况的研究 [J]. *中国农业科学*, 2001, 34(1): 104-107.
- [13] Zhang X H, Tian Q J, Shen R P. Analysis of directional characteristics of winter wheat canopy spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(6): 1600-1605.  
张雪红, 田庆久, 沈润平. 冬小麦冠层光谱的方向性特征分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(6): 1600-1605.
- [14] Umut H, Mamat S, Ma C Y. Hyperspectral estimation of wheat leaf water content using fractional differentials and successive projection algorithm-back propagation neural network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 153002.  
吾木提·艾山江, 买买提·沙吾提, 马春玥. 基于分数阶微分和连续投影算法-反向传播神经网络的小麦叶片含水量高光谱估算 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 153002.
- [15] Cai L H, Ding J L. Inversion of soil moisture content based on hyperspectral multi-scale decomposition [J]. *Laser & Optoelectronics*



- Progress, 2018, 55(1): 013001.
- 蔡亮红, 丁建丽. 基于高光谱多尺度分解的土壤含水量反演[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 013001.
- [16] Bao Q L, Ding J L, Wang J Z. Prediction of soil moisture content by selecting spectral characteristics using random forest method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 113002.
- 包青岭, 丁建丽, 王敬哲. 利用随机森林方法优选光谱特征预测土壤水分含量[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 113002.
- [17] Liu W, Chang Q R, Guo M, et al. Analysis on derivative spectrum feature for SOM under different scales of differential window [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(4): 316-321.
- 刘炜, 常庆瑞, 郭曼, 等. 不同尺度的微分窗口下土壤有机质的一阶导数光谱响应特征分析[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(4): 316-321.
- [18] He S B, Hu W G, Jin X T, et al. Diversity and community structure of ammonia oxidizing archaea in rhizosphere soil of reed in Ebinur Lake Wetland [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2019, 59 (8) : 1576-1585.
- 贺帅兵, 胡文革, 靳希桐, 等. 艾比湖湿地芦苇根际土壤氨氧化古菌的多样性和群落结构[J]. 微生物学报, 2019, 59(8): 1576-1585.
- [19] Fang G S, He H Y. Statistics [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2017: 137.
- 方国松, 何海燕. 统计学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2017: 137.
- [20] Song Y, Tashpolat T, Li C B, et al. Spectral characteristics model of desert populus euphratica leaves' water content [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2016, 25(2): 311-316.
- 宋玉, 塔西甫拉提·特依拜, 李崇博, 等. 荒漠胡杨叶片含水率的高光谱反演[J]. 西北农业学报, 2016, 25(2): 311-316.