

文章编号: 1007-4619(2007)04-0609-08

# 大型沉水植物狐尾藻不同盖度的光谱特征

袁 琳, 张利权

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘 要:** 地物特征与其光谱特征的关系是解译遥感影像的关键。本研究利用 ASD 便携式地物光谱仪对上海崇明国际湿地公园人工湖中的沉水植物狐尾藻的反射光谱进行了初步研究。结果表明, 随狐尾藻盖度的增加, 其光谱反射率、一阶和二阶导数红边斜率的峰值也相应增加, 不同盖度狐尾藻的光谱反射率的差异主要表现在 500—650 nm 和 700—900 nm 波段范围。分别对狐尾藻盖度与这些波段的光谱反射率及根据一阶和二阶导数获得的光谱指数进行回归分析, 得到了较好的线性关系。应用回归分析得到的线性方程, 可以根据测定的光谱反射率定量反演水体中的狐尾藻盖度。研究结果可为监测大型沉水植物的高光谱遥感影像解译和分类提供技术支撑, 为大尺度遥感监测沉水植物的分布和动态变化提供科学依据。

**关键词:** 沉水植物; 狐尾藻; 盖度; 光谱反射率; 地物光谱仪

**中图分类号:** Q14, Q178, Q48 **文献标识码:** A

## The Spectral Characteristics of a Submerged Plant *Myriophyllum Spicatum* with Varied Coverage

YUAN Lin, ZHANG Li-quan

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The relationship between land features and their spectral characteristics is important for the interpretation of remote sensing images. In this study, the spectral characteristics of a submerged plant *Myriophyllum spicatum* with varied coverage was measured with a ground sensor, radiometer, FieldSpec™ Pro JR spectroradiometer in the constructed lake of “Chongming International Wetland Park”, Shanghai. The results showed that the reflectance rate and the “red edge peak” of the first and second derivation of *Myriophyllum spicatum* rose with its increasing coverage, which was exhibited both at the visible band (500—650 nm) and the near infrared band (700—900 nm). A regression analysis was carried out respectively between the coverage of *Vallisneria spiralis* and the reflectance rate, spectral indices at the wavelengths where the coverage responded the strongest. These results of regression analyses showed a clear linear relationship, and by which the coverage of *Myriophyllum spicatum* could be quantitatively deduced from the reflectance rate measured in situ. The implications of this in terms of the ability of hyperspectral remote sensing to distinguish and monitor the distribution and dynamics of submerged vegetation on a large scale are discussed.

**Key words:** submerged plant, *Myriophyllum spicatum*, coverage, reflectance rate, spectroradiometer

收稿日期: 2006-09-01; 修订日期: 2006-10-30

基金项目: 国家高技术研究发展 863 计划专项 (编号: 2003AA601020) 和 “十一五” 国家科技重大项目 (编号: 2006BAC01A14)。

作者简介: 袁琳 (1978—), 女, 华东师范大学博士生, 主要从事景观生态学和水生生态学研究, 已发表论文 9 篇。E-mail: yuanlin2002

@163.com

## 1 引 言

国内外许多经验表明, 河流湖泊水生植被的恢复是水体环境和生态综合整治的一个重要环节, 是总体治理效果的最后实现过程, 如果缺少这个环节, 总体治理效果将会受到很大限制。中国许多河湖虽经治理, 但尚没有一个河湖能脱离富营养水平, 关键在于缺少了水生植物恢复这一重要环节<sup>[1]</sup>。通过人工或自然的繁殖和培植方法进行水生植物群落的重建, 恢复水生生态系统的功能, 将湖泊由藻型浊水状态向草型清水状态转化, 已成为水环境污染治理和整治工程中的重要内容<sup>[2-4]</sup>。然而, 由于受到水深、透明度、悬浮物浓度等水域环境的限制, 需要有合适的技术对水生植物, 尤其是沉水植物的分布与生长状况进行大尺度、快速、动态和综合监测。

遥感技术已成为地表覆被及其组成信息的主要来源<sup>[5]</sup>, 已广泛应用于资源与环境动态监测<sup>[6]</sup>。目前, 国外已有学者开始探索应用遥感技术监测沉水植物分布时空变化与生长状况<sup>[7-13]</sup>。

Jakubauskas<sup>[14]</sup>等对睡莲的盖度和光谱反射之间的关系进行了定量的研究, Har和 Rundquist<sup>[15]</sup>在试验池中研究了金鱼藻在清水和富含藻类水体的不同深度下光谱反射率的变化。目前, 国内应用遥感技术监测沉水植物分布的时空变化与生长状况研究还较少。

近年来, 随着高光谱遥感技术的发展与应用, 使遥感影像的空间分辨率和光谱分辨率得到很大提高。本项研究使用便携式地物光谱仪测定大型沉水植物狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*) 的光谱特征, 其主要目的是: (1) 识别大型沉水植物狐尾藻的光谱特征; (2) 建立狐尾藻盖度与光谱特征之间的定量关系, 以期为高光谱遥感影像的影像解译和分类以及沉水植物分布时空变化与生长状况监测提供技术支撑, 为大尺度遥感监测沉水植物的分布和动态变化提供科学依据。

## 2 研究区域

研究区域位于上海崇明东滩外围的崇明国际湿地公园, 约 2 km宽、10 km长的狭长地带, 总占地面积达到 24 km<sup>2</sup>, 是自然保护区和外界的缓冲带 (图 1)。上海崇明东滩自然保护区 (31° 25′

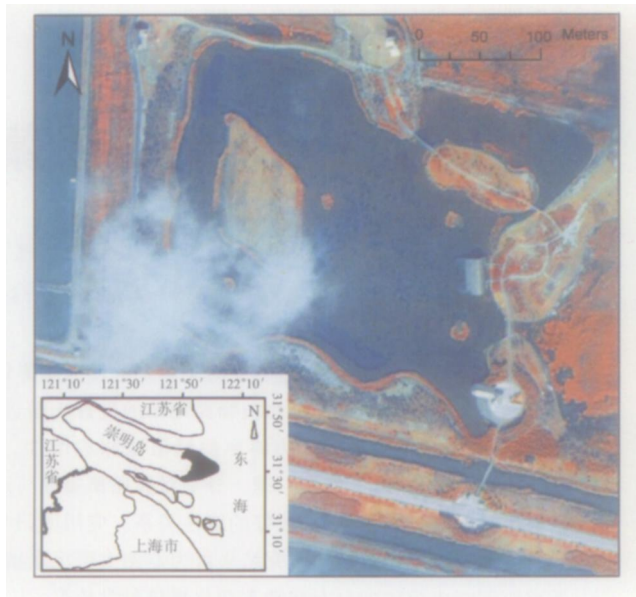


图 1 上海崇明国际湿地公园位置与 2005 年 9 月 QuickBird 卫星影像

Fig 1 The location of the constructed lake of International Wetland Park and the QuickBird satellite image in September 2005

31° 38′ N, 121° 50′ - 122° 05′ E) 是东亚最大的候鸟保护区之一, 位于亚太地区候鸟迁徙路线东线中段, 是国际迁徙鸟类必需的栖息地。属北亚热带海洋性气候, 年平均气温 15.3°C, 夏季平均气温 27.5°C, 冬季平均气温 3°C, 年平均降雨量为 1117.1 mm。东滩湿地于 1992 年列入《中国保护湿地名录》, 2001 年正式列入“拉姆萨国际湿地公约”的国际重要湿地名录。

大型沉水植物的光谱特征在湿地公园的人工湖进行测定。整个人工湖是由 9 个鱼塘改建而成, 占地 6 ha。最大水深约 3 m, 大部分区域水深约 1 m 为浅水区。湖水透明度、叶绿素浓度和悬浮物浓度分别为 60 cm, 20.1 μg/l 和 28.4 mg/l。水生植被是在人工湖建成后人工种植的, 主要沉水植物种类为狐尾藻。

## 3 研究方法

### 3.1 光谱测定

使用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec<sup>TM</sup> Pro JR 便携式地物光谱仪, 直接测定不同盖度沉水植物狐尾藻的光谱反射率, 光谱仪的波段覆盖 350—2500 nm, 其光谱分辨率在 700 nm 为 3 nm, 在 1400 nm 和 2100 nm 为 30 nm, 采样间隔在 350—1000 nm 内为 1.4 nm, 在 1000—2500 nm 内为 2 nm。传感器探头全

视场角 (FOV) 为  $25^\circ$ 。

2005 年 9 月, 10:30—14:30 在天空晴朗、太阳几乎直射的情况下对每个样点的光谱反射率进行测定, 每个样点测定 20 个光谱数据作平均。测定时, 将探头垂直置于水面 1 m 之上, 实际光谱采集样方大小为直径 0.44 m 的圆形区域。使用 AshTech Z-X Tronem GPS Receiver System 记录代表不同盖度沉水植物样点的位置 (经纬度)。每次进行光谱测定前, 利用漫反射参考板 (反射率为 98%) 进行仪器的优化, 并将光谱数据转化为反射率。

### 3.2 数据分析

利用 ASD 便携式光谱分析仪携带的光谱处理软件 ViewSpec<sup>TM</sup> Pro4.02 将所测每个样点狐尾藻群落的光谱反射率作进一步的光谱波段截取与计算, 由于光谱反射信号在 400 nm 之前和 900 nm 波段之后受干扰的影响较大, 所以在本研究中只选择 400—900 nm 波段范围的光谱数据。应用 SPSS11.0 软件进行相关分析和线性回归, 并用 OriginPro 9.5 作图。

光谱曲线的一阶导数有助于直观地确定光谱弯曲点的波长位置, 其计算公式为:

$$R'(\lambda) = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{2\Delta\lambda};$$

$$R''(\lambda) = \frac{R'(\lambda_{i+1}) - R'(\lambda_{i-1})}{2\Delta\lambda}$$

式中,  $\lambda_i$  为每个波段的波长,  $R'(\lambda)$  和  $R''(\lambda)$  为  $\lambda_i$  的一阶和二阶导数,  $R'(\lambda_{i+1})$  是在波长  $\lambda_{i+1}$  的一阶导数,  $R(\lambda_{i+1})$  和  $R(\lambda_{i-1})$  是波长  $\lambda_{i+1}$  和  $\lambda_{i-1}$  处的反

射率,  $\Delta\lambda$  是波长  $\lambda_{i+1}$  或  $\lambda_{i-1}$  到  $\lambda$  的波长间隔。

同时根据光谱曲线特征新建两个光谱指标, 包括 EGFR 和 ddRE, 具体计算公式为:

$$\text{EGFR} = \frac{\text{一阶导数红边与绿波段最大值的比率}}{\text{二阶导数红边最大值}}$$

$$\text{ddRE} = \text{二阶导数红边最大值}$$

## 4 结果与分析

湿地公园人工湖中不同盖度狐尾藻的光谱反射曲线表现出典型的植被光谱特征。在 400—500 nm (绿光波段) 和 675 nm (红光波段) 附近有较强的吸收, 形成两个吸收谷, 在可见光波长 550 nm 处形成了反射“绿峰”。当狐尾藻盖度大于 20%, 波长大于 700 nm 时, 光谱的反射率增强, 形成了水生植物在近红外波段的反射高原区 (图 2)。从图 2 中还可以看出, 当狐尾藻盖度变化时, 其光谱反射率也相应地发生改变, 反射率随狐尾藻盖度的降低而下降, 尤其在近红外区域, 反射率从 0.14 (盖度为 100%) 下降到 0.02 (盖度为 0)。同时, 在近红外波段 720 nm 和 830 nm 附近形成了两个反射峰。当狐尾藻盖度为 0 (100% 水体) 时, 反射光谱曲线虽然在 750—950 nm 波段范围内也有较强的吸收, 但在 400—900 nm 范围内没有典型的植被光谱“绿峰”特征。不同盖度狐尾藻的光谱反射率之间的差异主要表现在 500—650 nm 和 700—900 nm 这两个波段范围。

为了更好地了解狐尾藻盖度和光谱反射率之间的关系, 对光谱反射率和盖度进行了相关分析。相

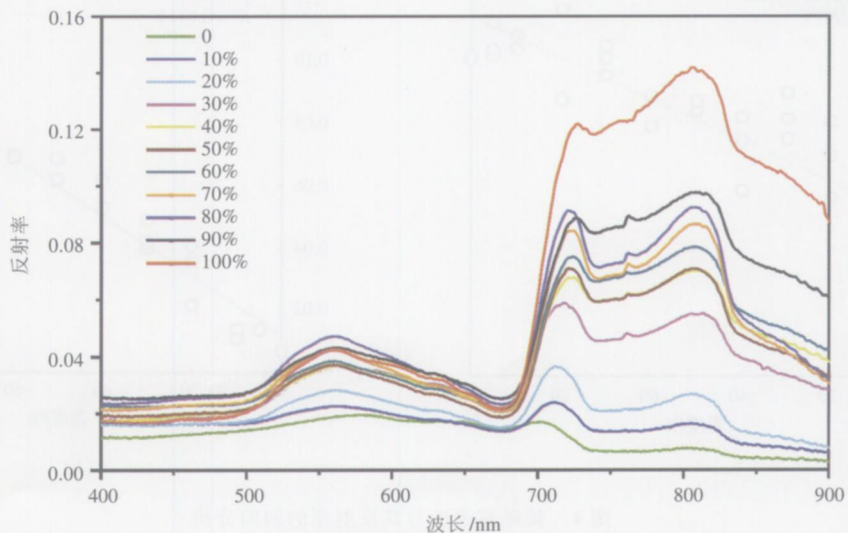


图 2 不同盖度狐尾藻的光谱特征

Fig 2 Reflectance of *Myriophyllum spicatum* with varied coverage

关性分析结果显示,不同盖度狐尾藻与其在可见光波段 415—655 nm和近红外波段 682—900 nm处的光谱反射率的相关性达到显著水平 ( $P < 0.05$ ),其中在 430—640 nm和 690—900 nm范围内到极显著水平 ( $P < 0.01$ ),最高的相关性位于 550 nm ( $r = 0.758$ )和 761 nm ( $r = 0.970$ )处 (图 3)。

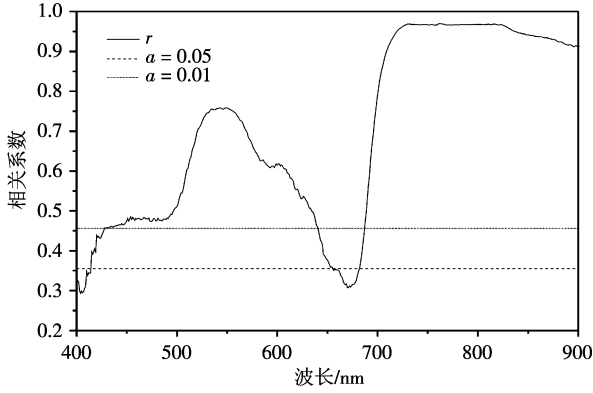
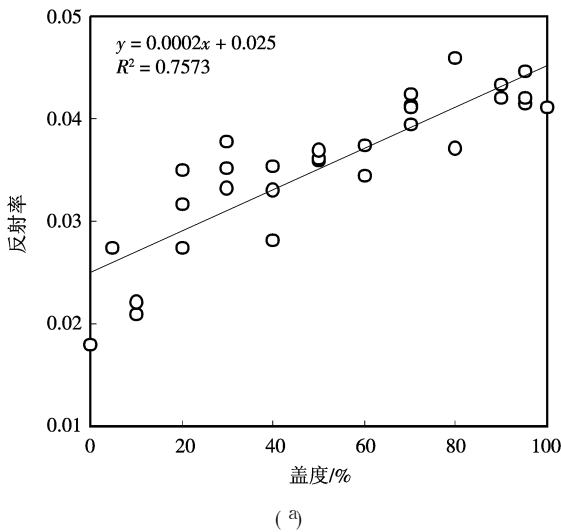


图 3 不同盖度狐尾藻与其光谱反射率之间的相关性  
Fig 3 Correlation coefficients between the Myriophyllum spicatum of varied coverage and their reflectance

因此,分别对不同狐尾藻盖度与其在 550 nm和 761 nm处的光谱反射率进行回归分析。结果显示,狐尾藻盖度与其在 550 nm(判定系数  $R^2 = 0.7573$ )和 761 nm(判定系数  $R^2 = 0.9411$ )处反射率之间的关系均可以较好地用线性关系表示 (图 4),表明沉水植物盖度与光谱反射率之间存在着显著的相关性,利用该回归方程可以较好地解释总变量的变化

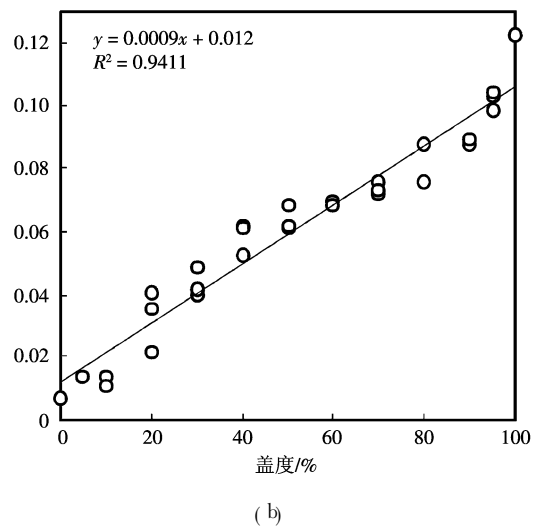


(a)

情况。因此,可以应用回归分析得到的线性方程,根据所测得的光谱反射率来定量反演水体中的狐尾藻盖度。

在对沉水植物光谱进行研究时,进行一阶导数和二阶导数分析,可以减少低频背景(土壤和水)噪声,提高重叠光谱分辨率<sup>[16]</sup>。图 5 显示的是不同盖度狐尾藻的一阶导数和二阶导数。一阶导数结果显示,在波长 550 nm左右有明显的“绿峰”,“红边”位置主要在 689—702 nm范围,红边处的斜率峰值随盖度增加而增大,最大斜率峰值为 0.0035 (705 nm处, 100%盖度),而在 400—500 nm, 580—680 nm, 750—800 nm和 850—900 nm这几个波段,斜率值接近 0。从二阶导数的结果可以看出,550 nm左右已没有明显的绿峰,但在红波段 680—705 nm(二阶导数  $> 0$ )和 705—750 nm(二阶导数  $< 0$ )有明显的峰。而没有狐尾藻生长样方(0%盖度)的反射光谱二阶导数值从 400—900 nm都接近 0 明显有别于有狐尾藻生长样方的反射光谱二阶导数特征。

利用一阶导数和二阶导数,计算了两个在可见光和近红外波段与光合和保护色素有关的光谱指数,包括 EGFR(一阶导数红边与绿波段最大值的比率)和 ddRE(二阶导数红边最大值)。并分别对 EGFR, ddRE和盖度进行了回归分析 (图 6)。结果显示,盖度和 EGFR(判定系数  $R^2 = 0.7954$ ), ddRE(判定系数  $R^2 = 0.5577$ )的关系均可以较好地用线性关系表示。



(b)

图 4 狐尾藻盖度与其反射率的回归分析

(a) 550 nm; (b) 761 nm

Fig 4 Regression analyses between the coverage of Myriophyllum spicatum and their reflectance

(a) 550 nm; (b) 761 nm

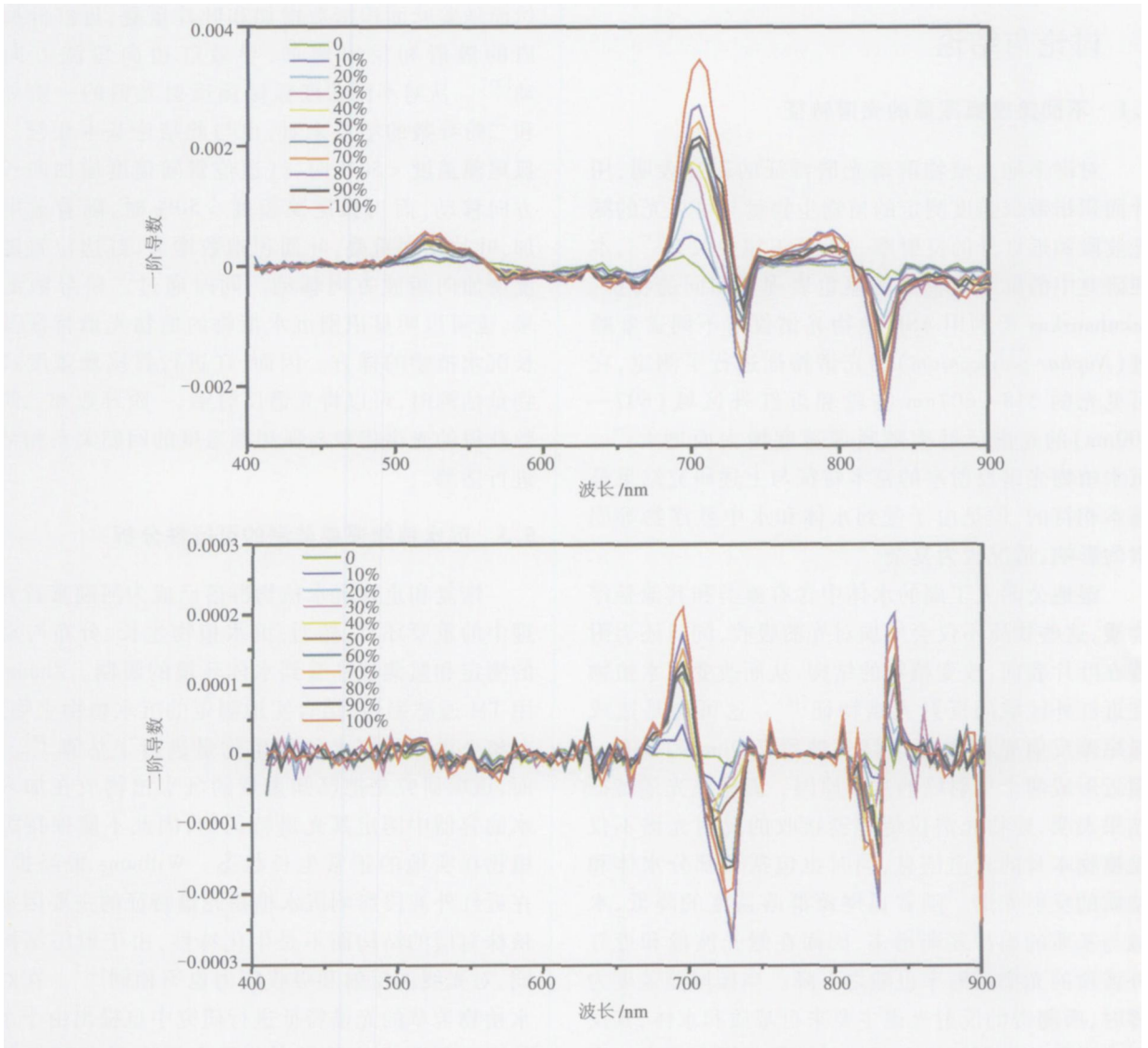


图 5 不同盖度狐尾藻反射光谱的一阶导数和二阶导数

Fig 5 First derivative curves of reflectance of *Myriophyllum spicatum* with varied coverage

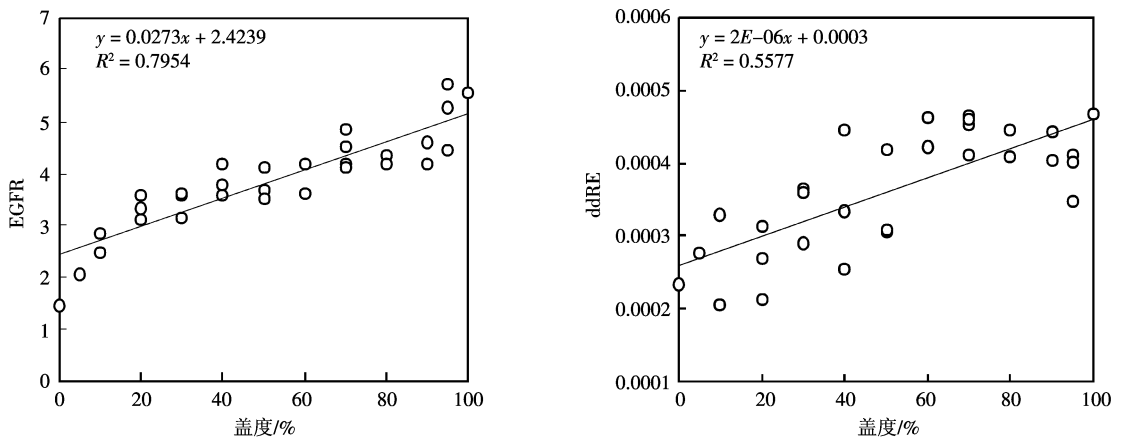


图 6 狐尾藻盖度与光谱指数的回归分析

Fig 6 Regression analyses between the coverage of *Myriophyllum spicatum* and spectral indices

## 5 讨论与结论

### 5.1 不同盖度狐尾藻的光谱特征

对许多陆上植物群落光谱特征的研究表明,用叶面积指数或盖度测定的植物生物量与可见光的绿光波段和近红外的反射率一般呈正相关关系<sup>[17]</sup>,本项研究中的沉水植物狐尾藻也表现了相同的特征。Jakubauskas等利用 ASD地物光谱仪对不同盖度睡莲 (*Nuphar polysepalum*)的光谱特征进行了测定,在可见光的 518—607 nm波段和近红外区域 (697—900 nm)的光谱反射率随睡莲盖度增大而增大<sup>[14]</sup>。沉水植物光谱反射率的基本特征与上述研究结果是基本相符的,但是由于受到水体和水中悬浮物等因素的影响,情况较为复杂。

湿地公园人工湖的水体中含有藻类和其他悬浮物质,这些物质不仅会增加对光的吸收,同时还会附着在叶片表面,改变植物的结构,从而改变沉水植物在近红外区域的反射光谱特征<sup>[18]</sup>。这可能是造成狐尾藻反射光谱中在近红外波段 720 nm和 830 nm附近形成两个反射峰的主要原因。狐尾藻光谱特征结果表明,地物光谱仪传感器接收的反射光谱不仅是植物本身的光谱信息,同时也包括了部分水体和基质的反射光谱。随着狐尾藻群落盖度的降低,水域与基质的面积逐渐增多,因而在绿光波段和近红外波段的光谱反射率也随之下降。当狐尾藻盖度为零时,所测得的反射光谱主要来自基质和水体,其反射光谱虽然在可见光和近红外波段范围内仍有一定的吸收,但却不具有典型的植物光谱吸收特征<sup>[15, 19]</sup>。本研究中,不同盖度狐尾藻的光谱反射率之间的差异主要表现在 500—650 nm和 700—900 nm波段范围,因而可以通过这些波段的光谱反射率来较好地估测狐尾藻盖度或生物量。

### 5.2 不同盖度狐尾藻导数光谱特征

高光谱分辨率导数能获得更多的光谱信息,而这些信息是不能从传统的宽波段光谱指数或者比值指数中获得的。导数光谱在消除土壤背景方面作用显著,已经成为减少低频背景噪声和提高重叠光谱分辨率的既定技术<sup>[20, 21]</sup>。

研究表明,一阶导数获得的红边可能是单个叶片叶绿素含量的较好的评价器,二阶导数冠层光谱反射率则是冠层叶绿素较好的指示器<sup>[22]</sup>。叶绿素含量高,红光区域吸收增加,导致红边向长波移动。

然而随着叶面积指数增加和叶片重叠,近红外反射肩的散射和反射增加,导致红边向短波方向移动<sup>[23]</sup>。从对不同盖度狐尾藻反射光谱的一阶导数和二阶导数的结果来看,也与此结论基本相符。当狐尾藻盖度 < 50%时,红边位置随盖度增加向长波方向移动,而当狐尾藻盖度 > 50%时,随着盖度增加,叶片出现重叠,叶面积指数增大,红边位置随盖度增加向短波方向移动。同时通过二阶导数的结果,也可以明显识别沉水植物的地物光谱特征及生长沉水植物的样方。因而,在进行狐尾藻盖度或生物量估测时,可以将光谱反射率、一阶导数和二阶导数获得的光谱指数与狐尾藻盖度的回归关系相结合进行估测。

### 5.3 沉水植物遥感监测的可行性分析

恢复和重建沉水植物群落已成为河湖富营养治理中的重要环节,然而,沉水植物生长、分布与动态的测定和监测往往受到水体环境的限制。Zhang利用 TM遥感影像,结合实地测定的沉水植物生物量,对整个洪湖的沉水植物生物量进行了估算<sup>[24]</sup>。然而,该项研究是把已知重量的沉水植物放在加入湖水的容器中测定其光谱特征的,因此不能保持沉水植物在实地的正常生长状态。William曾经提出,在近红外波段影响沉水植物光谱特征的主要因素是植株冠层的结构而不是生化特性,由于冠层结构不同,对光线的反射和吸收能力也不相同<sup>[25]</sup>。在对沉水植物苦草的光谱特征进行研究中也提出由于水体的影响所造成的反射率差异主要表现在近红外波段<sup>[26]</sup>。在实际监测中,沉水植物的光谱特征往往还受到水体理化特性、环境条件和浮游生物的影响,因此水体环境对沉水植物光谱特征所产生的影响还有待进一步研究。

传统的宽波段遥感数据(如 SPOT TM)研究植被时由于波段数少、光谱分辨率低,仅限于监测沉水植物分布时空变化与生长状况。而高光谱遥感具有高分辨率、波段多、数据量丰富等特点,如美国 EO1 卫星 Hyperion传感器具有 242 个波段,在 350—2500 nm波长范围内具有 234 个波段。利用高光谱分辨率导数能在减少低频背景噪声的同时,获得更多的光谱信息,提高重叠光谱分辨率。因此,高光谱遥感的发展为定量监测沉水植物的生物量和盖度提供可能。在实际应用中,可先对遥感影像进行辐射校正,消除由传感器本身产生的内部误差和由环境影响——大气和地形影响引起的外部误差,将遥

感影像的 DN 值转化为地表反射率。在此基础上,结合本研究得到的地面光谱反射率、光谱指数与沉水植物盖度的回归关系,利用空间建模技术,可以实现对整个湖域沉水植物的盖度和生物量的估算及水生植物的大面积监测,从而进行大尺度遥感监测沉水植物的分布和动态变化。

#### 5.4 结论

本研究应用地物光谱仪对不同盖度沉水植物狐尾藻的反射光谱、一阶导数和二阶导数进行了初步研究。结果表明,沉水植物狐尾藻光谱反射率的基本特征主要体现在可见光和近红外波段,可以通过狐尾藻盖度与这些波段光谱反射率及根据一阶导数和二阶导数获得的光谱指数的回归分析,来定量反演水体中的狐尾藻盖度。通过对光谱曲线进行一阶导数和二阶导数分析,可以减少背景噪声,提高光谱分辨率,并从中获得用来监测植被生长的光谱指数,如“红边”。在实际应用中,可利用地物光谱仪测定沉水植物盖度或生物量与其光谱特征的关系,再结合高光谱遥感影像进行解译、分析和反演,从而进行大尺度遥感监测沉水植物的分布和动态变化。

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Jin X C. Technologies of Lake Eutrophication Control and Management[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2001 [ 金相灿. 湖泊营养化控制和管理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. ]
- [ 2 ] Pu P M, Wang G X, Li Z K. The Degradation and Restoration of Healthy Aquatic Ecology: theory, Technique and Application [ J ]. Journal of Lake Sciences, 2001, 13( 3 ): 193—203 [ 濮培民, 王国祥, 李正魁. 健康水生态系统的退化及其修复——理论、技术及应用 [ J ]. 湖泊科学, 2001, 13( 3 ): 193—203 ]
- [ 3 ] Qiu D R, Wu Z B, Liu B Y. The Research of Aquatic Plant Community Restoration Experiment [ J ]. Journal of Lake Sciences, 1997, 9( 2 ): 168—174 [ 邱东茹, 吴振斌, 刘保元. 武汉东湖水生植物的恢复试验研究 [ J ]. 湖泊科学, 1997, 9( 2 ): 168—174 ]
- [ 4 ] Zhong Y X, Hu H Y, Qian Y. Advances in Utilization of Macrophytes in Water Pollution Control [ J ]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, 2( 4 ): 36—40 [ 钟云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展 [ J ]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 2( 4 ): 36—40 ]
- [ 5 ] Roughgarden J, Running S, Mason P. What does Remote Sensing do for Ecology [ J ]. Ecology, 1991, 72: 1981—1992
- [ 6 ] Xu G H, Tian G L, Wang C. The Progress and Prospect of Remote Information Science [ J ]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51( 5 ): 385—397 [ 徐冠华, 田国良, 王超. 遥感信息科学的进展和展望 [ J ]. 地理学报, 1996, 51( 5 ): 385—397 ]
- [ 7 ] Ackleson S G, Klemas V. Remote Sensing of Submerged Aquatic Vegetation in Lower Chesapeake Bay: a Comparison of Landsat MSS to TM Imagery [ J ]. Remote Sensing of Environment, 1987, 22: 235—248
- [ 8 ] Jensen J R. Measurement of Seasonal and Yearly Aquatic Macrophyte Changes in a Reservoir Using Multisate SPOT Panchromatic Data [ J ]. Technical Papers American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1992, 1: 167—176
- [ 9 ] Jensen J R, Narumalani S, Weatherbee O. Measurement of Seasonal and Yearly Cattail and Waterlily Changes Using Multisate SPOT Panchromatic Data [ J ]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993, 59: 519—525
- [ 10 ] Kirkman H. Baseline and Monitoring Methods for Seagrass Meadows [ J ]. Journal of Environmental Management, 1996, 47: 191—201
- [ 11 ] Nohara S. A Study on Annual Changes in Surface Cover of Floating-leaved Plants in a Lake Using Aerial Photography [ J ]. Vegetatio, 1991, 97: 125—136
- [ 12 ] Welch R, Remillard R R, Slack R B. Remote Sensing and Geographic Information System Techniques for Aquatic Resource Evaluation [ J ]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54: 177—185
- [ 13 ] Orth R J, Moore K A. Chesapeake Bay: an Unprecedented Decline in Submerged Aquatic Vegetation [ J ]. Science, 1983, 222: 51—53
- [ 14 ] Jakubauskas M, Kirdscher K, Fraser A. Close-range Remote Sensing of Aquatic Macrophyte Vegetation Cover [ J ]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 18( 21 ): 3533—3538
- [ 15 ] Han L, Rundquist D C. The Response of both Surface Reflectance and the Underwater Light Field to Various Levels of Suspended Sediments: Preliminary Results [ J ]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994, 60: 1463—1471
- [ 16 ] Demetades Shah T H, Steven M D, Clark J A. High Resolution Derivative Spectra in Remote Sensing [ J ]. Remote Sensing of Environment, 1990, 33: 55—64
- [ 17 ] Gao Z G, Zhang L Q. Identification of the Spectral Characteristics of Natural Saltmarsh Vegetation Using Indirect Ordination: a Case Study from Chongming Island, Shanghai, China [ J ]. Acta Phytocologica Sinica, 2006, 30( 2 ): 252—260 [ 高占国, 张利权. 应用间接排序识别湿地植被的光谱特征: 以崇明东滩为例 [ J ]. 植物生态学报, 2006, 30( 2 ): 252—260 ]
- [ 18 ] Zhang J H, Wang K, Wang R C. Study on Hyperspectral Remote Sensing in Estuarine Vegetation Leaf Chlorophyll Content [ J ]. Journal of Shanghai Jiaotong University ( Agricultural Science ), 2003, 21( 1 ): 74—80 [ 张金恒, 王珂, 王人潮. 高光谱评价植被叶绿素含量的研究进展 [ J ]. 上海交通大学学报 ( 农业科学版 ), 2003, 21( 1 ): 74—80 ]
- [ 19 ] Goodin D, Han L, Fraser R N. Analysis of Suspended Solids in

- Water Using Remotely Sensed High Resolution Derivative Spectra [ J. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993, **59**: 505—510
- [ 20] Filella J P. The Red Edge Position and Shape as Indicators of Plant Chlorophyll Content, Biomass and Hydric Status [ J. International Journal of Remote Sensing, 1994, **15**(7): 1459—1470
- [ 21] George A B. Quantifying Chlorophylls and Carotenoids at Leaf and Canopy Scales: An Evaluation of Some Hyperspectral Approaches [ J. Remote Sensing of Environment, 1998, **66**: 273—285.
- [ 22] Josep P, John A G, Kevin L G. Assessing Community Type, Plant Biomass, Pigment Composition, and Photosynthetic Efficiency of Aquatic Vegetation from Spectral Reflectance [ J. Remote Sensing of Environment, 1993, **46**: 110—118
- [ 23] Horler D N H, Dockry M, Barber J. The Red Edge of Plant Leaf Reflectance [ J. International Journal of Remote Sensing, 1983, **4**: 273—288
- [ 24] Zhang X Y. On the Estimation of Biomass of Submerged Vegetation Using Landsat Thematic Mapper ( TM ) Imagery: a Case Study of the Honghu Lake, PR China [ J. International Journal of Remote Sensing, 1998, **19**(1): 11—20
- [ 25] Williams D J, Rybicki N B, Lombana A V. Preliminary Investigation of Submerged Aquatic Vegetation Mapping Using Hyperspectral Remote Sensing [ J. Environmental Monitoring and Assessment, 2003, **81**: 383—392
- [ 26] Yuan L, Zhang L Q. Identification of the Spectral Characteristics of a Submerged Plant Vallisneria Spiralis [ J. Acta Ecologica Sinica, 2006, **26**(4): 1005—1011. [袁琳, 张利权. 大型沉水植物苦草的光谱特征识别 [ J. 生态学报, 2006, **26**(4): 1005—1011 ]