

大型沉水植物苦草的光谱特征识别

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。利用地物光谱仪在实验室和上海“梦清园”人工湿地中, 分别实测了不同盖度沉水植物苦草的反射光谱特征。结果表明随着苦草盖度的增加, 其光谱反射率也相应增加, 不同盖度苦草的光谱反射率差异主要表现在 500 ~ 650 nm 和 700 ~ 900 nm 波段范围。受水体环境影响, 实验室模拟试验与室外控制试验测得的苦草光谱反射率差异主要表现在近红外波段(700 ~ 900 nm)。分别将苦草的不同盖度与其在 QuickBird 多光谱遥感影像 4 个波段与盖度相关性最大波段处的光谱反射率进行回归分析, 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苦草盖度。研究结果可为监测沉水植物的高光谱遥感影像判读和解译分类提供技术支撑, 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; 苦草; 盖度; 光谱反射率; 地物光谱仪

文章编号: 1000-0933(2006)04-1005-07 **中图分类号:** Q14, Q178, Q948 **文献标识码:** A

Identification of the spectral characteristics of a submerged plant *Vallisneria spiralis*

YUAN Lin, ZHANG Li-Quan* (State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1005 ~ 1011.

Abstract: The relationship between land features and their spectral characteristics is a key for the interpretation of remote sensing images. In this study, the spectral characteristics of a submerged plant *Vallisneria spiralis* with varied coverage were measured with a ground sensor/radiometer, FieldSpec (tm) Pro JR spectroradiometer in the laboratory and in a constructed wetland “Mengqingyuan”, Shanghai. The results showed that the reflectance rate of *Vallisneria spiralis* increased with its increasing coverage, which exhibited both at the visible band (500 ~ 650 nm) and the near infrared band (700 ~ 900 nm). The water quality influenced the reflectance rate and the primary differences between the laboratory and field experiments mainly occurred at the near-infrared band (700 ~ 900 nm). A regression analysis was carried out between the coverage of *Vallisneria spiralis* and the reflectance rate at the wavelengths of Quick Bird 4 bands where the coverage responded the strongest, respectively. These results of regression analyses showed a clear linear relationship, and by which the coverage of *Vallisneria spiralis* 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; *Vallisneria spiralis*; coverage; reflectance rate; spectroradiometer

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。我国许多河湖虽经治理, 但尚

基金项目: 国家高技术研究发展 863 计划资助专项(2003AA601020); 国家“十五”与“211 工程”重点学科建设资助项目

收稿日期: 2005-12-15; **修订日期:** 2006-01-24

作者简介: 袁琳(1978 ~), 女, 辽宁省铁岭市人, 博士生, 主要从事景观生态学和水生生态学研究. E-mail: yuanlin-2002@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lqzhang@sklec.ecnu.edu.cn

Foundation Item: The project was supported by National high technical research “863” Project of China (No. 2003AA601020) and the State’s tenth five-year and “211 Project”-supported key academic discipline program of ECNU

Received date: 2005-12-15; **Accepted date:** 2006-01-24

Biography: YUAN Lin, Ph. D. candidate, mainly engaged in landscape ecology and aquatic ecology.

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^[1]。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^[2-4]。然而,由于受到水深、透明度、悬着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(Remote Sensing, RS)技术已成为地表覆被及其组成信息的主要来源^[5],已广泛应用于资源与环境动态监测^[6]。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^[7-13]。Jakubauskas^[14]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, Han 和 Rundquist^[15]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。本研究使用便携式地物光谱仪测定大型沉水植物苦草(*Vallisneria spiralis*)的光谱特征,其主要目的是:(1) 识别大型沉水植物的光谱特征;(2) 建立沉水植物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判读和解译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。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究选择苦草为试验材料。苦草是长江中下游湖泊和河流中常见的沉水植物优势种,为多年生沉水草本,无直立茎,具横走的匍匐茎,叶基生,叶片带状较长^[16]。苦草的耐污性和适应性强、繁殖快,同时对藻类具有抑制作用,近年来作为生态修复中常选择的沉水植物种类,被广泛用于湖泊、河流和富营养化水体的生态修复。

1.2 实验室模拟试验

2005 年 5 月,选择生长一致、健壮之苦草植株(株高约为 15 cm, 3~5 个叶片)移栽到装有洗净、烘干河沙的塑料箱中,箱体容积为 32 cm × 26 cm × 18 cm,加入 1/10 的 Hoagland 营养液 15 L,使水面稍低于箱边,然后放入光照培养箱进行培养。培养时温度 26℃,光照强度 9000 lx;光暗比 16 h:8 h,温度为 26℃。每个箱中苦草的盖度分别为 10%、20%、40%、60% 和 80%,对照箱中不栽苦草或其它任何植物。培养 40d 后,于 2005 年 6 月在室内使用全光谱卤光灯作为光源进行沉水植物光谱的室内测定。

1.3 室外控制试验

室外样点设在位于上海市苏州河南岸的人工湿地示范区“梦清园”的中湖。梦清园是上海市苏州河环境综合整治二期工程重点项目的景观水体生物净化与生态修复示范基地之一,也是上海市政府 2003 年重点工程之一。该工程占地 8.6 hm²,其地形呈向北伸展三面环水半岛形。其中水生生态系统主要由种植挺水植物的芦苇(*Phragmites australis*)湿地(占地 800 m²)、种植沉水植物的下湖(占地 1000 m²)和中湖(占地 625 m²)三大部分相互联系组成。

2005 年 3 月,将生长一致、健壮之苦草植株(株高约为 15 cm, 3~4 个叶片)按照不同密度栽植到装有中湖底泥的塑料箱中,箱体大小为 45 cm × 28 cm × 23 cm,塑料箱四壁有空隙,以便水流顺利通过,使箱中的水与湖中的水能够交换。将塑料箱悬挂固定在中湖周围的栏杆上,中湖水深约 90 cm,透明度为 40 cm,使植株的冠层低于水面 10 cm,箱体上方的光照不会受到影响。2005 年 6 月 23 日,10:00~13:00,在天空晴朗、太阳几乎直射的情况下对不同苦草盖度的 6 个样方进行光谱测定,同时也测定每个样方中苦草的盖度、密度、冠层平均高度和水面下光照强度(表 1)。

1.4 光谱测定

使用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec^(TM) Pro JR 便携式地物光谱仪,直接测定不同样方中沉水植物的光谱

反射率,光谱仪的波段覆盖 350 ~ 2500nm,其光谱分辨率在 700nm 为 3nm,在 1400nm 和 2100nm 为 30nm,采样间隔在 350 ~ 1000nm 内为 1.4nm,在 1000 ~ 2500nm 内为 2nm。传感器探头全视场角(FOV)为 25°。

实验室测定前用遮光布挡住外界的自然光,用黑色棉布贴在塑料箱四壁,以消除箱壁对光的反射和吸收,利用 50W 全光谱卤光灯作为测定光源,用聚四氟乙烯(F4)漫反射参考板(反射率为 20%)进行仪器的优化,并将光谱数据转化为反射率。测定时将探头垂直置于水面 0.3m 之上进行光谱采集,不同盖度苦草的样方各测定 20 个光谱数据作平均。

室外光谱测定时,将探头垂直置于水面 0.5m 之上,对每个样方测定 20 个光谱数据作平均。每次进行光谱测定前,同样利用参考板进行优化。

1.5 数据分析

由于光谱反射信号在 400nm 之前和 900nm 波段之后受干扰的影响较大,所以在本研究中只选择 400 ~ 900nm 波段范围的光谱数据。根据 QuickBird 多光谱遥感卫星的 4 个波段范围(蓝光:450 ~ 520nm;绿光:520 ~ 600nm;红光:630 ~ 690nm;近红外:760 ~ 900nm),用 ASD 便携式光谱分析仪携带的光谱处理软件 ViewSpecTM Pro 4.02,将所测苦草群落的光谱反射率作进一步的光谱波段截取与计算,得出 4 个遥感卫星波段组的反射率值。应用 SPSS11.0 软件进行相关分析和线性回归,并用 OriginPro7.5 作图。

2 结果与分析

2.1 实验室模拟试验

实验室模拟试验结果显示,不同盖度苦草的光谱反射曲线表现出典型的植被光谱特征。在 400 ~ 500nm(绿光波段)和 600 ~ 700nm(红光波段)处有较强的吸收,形成两个吸收谷,在可见光波长 550nm 处形成了反射“绿峰”,当波长大于 700nm 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 1)。在近红外波段的 700 ~ 900nm 范围内;反射率随苦草盖度的降低而下降,反射率的大小从低到高依次为:0% 盖度 < 10% 盖度 < 20% 盖度 < 40% 盖度 < 60% 盖度 < 80% 盖度。在 525 ~ 575nm 波段范围内,随着苦草盖度的降低,其光谱反射率也有所下降,但幅度较小。当苦草盖度为 0% 时,反射光谱曲线虽然在 750 ~ 950nm 波段范围内也有较强的吸收,但在可见光范围内没有典型的植被光谱“绿峰”特征。不同盖度苦草的光谱反射率之间的差异主要表现在 500 ~ 600nm 和 700 ~ 900nm 这两个波段范围。

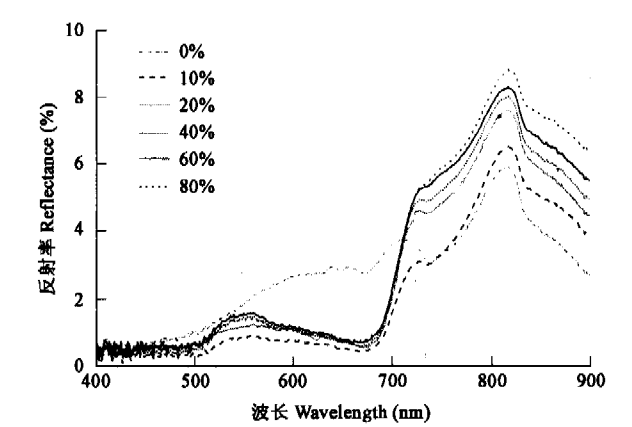


图 1 实验室模拟试验中不同盖度苦草的光谱特征
Fig.1 Reflectance measured in the laboratory for *Vallisneria spiralis* with varied coverage

表 1 测定样方的苦草生长状况及其环境因子
Table 1 The growth status of *Vallisneria spiralis* in the samples measured and their environmental factors

序号 No.	盖度 Coverage (%)	密度(株/样方) Density (No./Sample)	冠层平均高度 Average height(cm)	冠层处光照强度 Light intensity (lx)
1	0	0	—	20000
2	20	15	23	22100
3	30	20	28	22000
4	50	40	20	21700
5	70	50	23	22000
6	80	65	27	20800

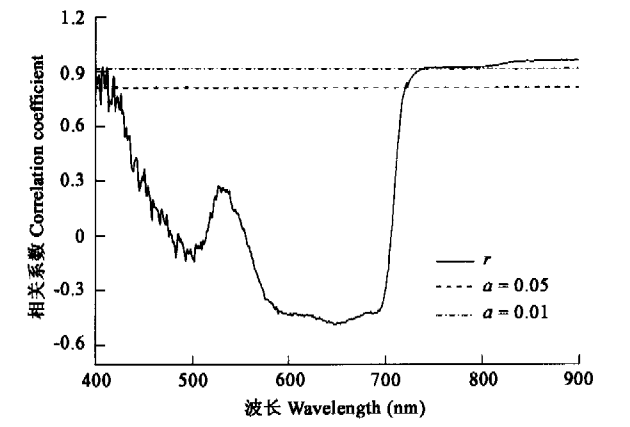


图 2 实验室模拟试验不同盖度苦草与其光谱反射率之间的相关性
Fig.2 Correlation coefficients between the *Vallisneria spiralis* of varied coverage and their reflectance measured in the laboratory

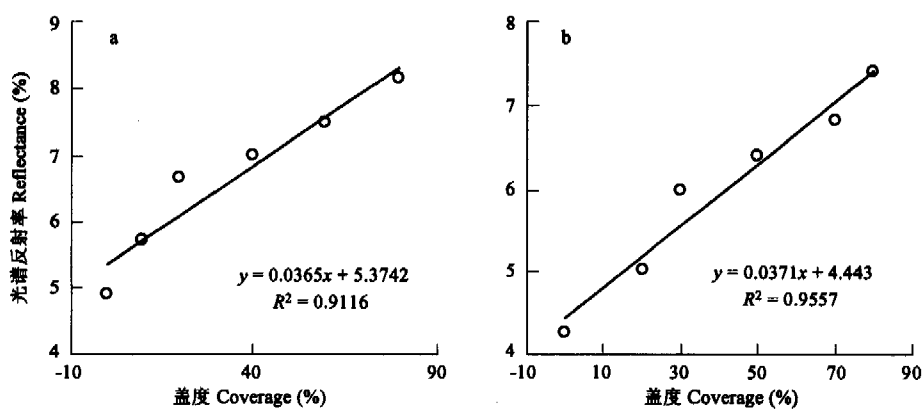


图3 实验室模拟试验中苦草盖度与其反射率的回归分析

Fig.3 Regression analysis between the coverage of *Vallisneria spiralis* and their reflectance measured in the laboratory
a) 830nm 处 at 830nm; b) QuickBird 遥感卫星近红外波段(760 ~ 900nm) at the QuickBird band 4 (760 ~ 900nm)

相关性分析结果显示,不同盖度苦草与其在可见光波段 400 ~ 421nm 和近红外波段 700 ~ 900nm 处的光谱反射率的相关性达到显著水平($p < 0.05$),其中在 741 ~ 900nm 范围内到极显著水平($p < 0.01$),最高的相关性位于 830nm 处($r = 0.955$)(图 2)。因此,分别对不同苦草盖度与其在 830nm 波段处和 QuickBird 遥感影像近红外波段(760 ~ 900nm)的光谱反射率与进行回归分析。其结果显示,苦草盖度与其在 830nm 处反射率之间的关系可以较好地用线性关系表示, $r^2 = 0.9116$,与其在 QuickBird 遥感影像近红外波段(760 ~ 900nm)的光谱反射率之间的关系也可以用线性关系表示, $r^2 = 0.9557$ (图 3),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。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苦草盖度。

2.2 室外控制试验

室外控制试验结果同样表明,当苦草盖度变化时,其光谱反射率也相应地发生改变,反射率随苦草盖度的降低而下降(图 4)。随着苦草盖度的降低,探头视场范围内水域面积所占比例逐渐增多,在 400 ~ 900nm 波段范围内的反射率均有所下降。在可见光到近红外波段,反射率的大小从低到高依次为:0% 盖度 < 20% 盖度 < 30% 盖度 < 50% 盖度 < 70% 盖度 < 80% 盖度。

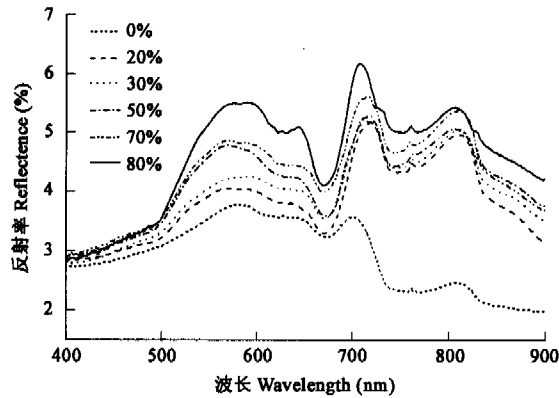


图4 室外控制试验中不同盖度苦草的光谱特征

Fig.4 Reflectance of *Vallisneria spiralis* with varied coverage in the field experiment

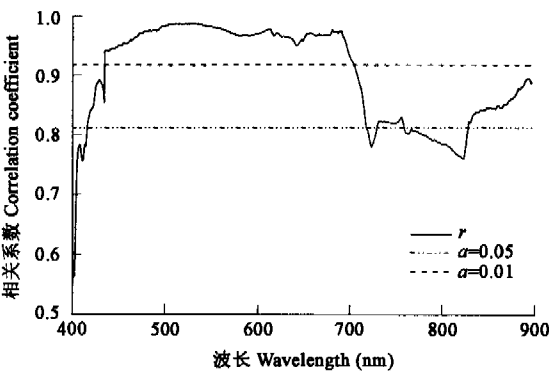


图5 室外控制试验中不同盖度苦草与其光谱反射率之间的相关性

Fig.5 Correlation coefficients between the *Vallisneria spiralis* of varied coverage and their reflectance in the field experiment

不同盖度苦草与其光谱反射率之间相关性分析的结果显示,苦草盖度与其光谱反射率之间的相关性在 450 ~ 710nm 和 830 ~ 900nm 这两个波段范围较显著,均呈显著相关($p < 0.05$),其中在 450 ~ 700nm 可见光波段

的相关性达到了极显著的水平($p < 0.01$) (图 5)。在可见光波段和近红外波段中,533nm 和 895nm 处的相关最高,分别为($r = 0.988$) 和 ($r = 0.894$)。因此,分别对不同盖度苦草与其在 533nm、895nm 和 QuickBird 遥感影像 4 个波段的光谱反射率进行回归分析。

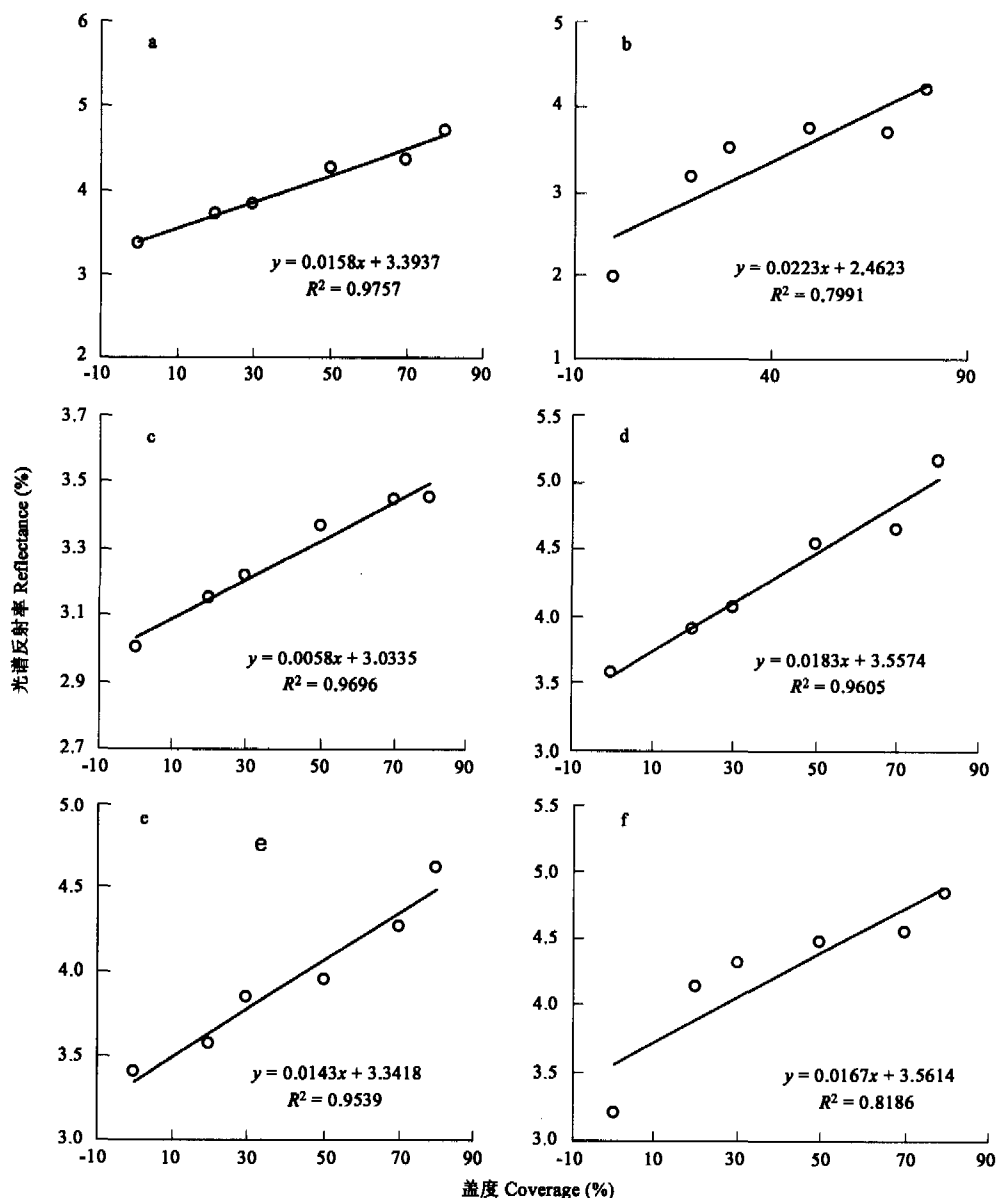


图 6 室外控制试验中苦草盖度与其反射率之间的回归分析

Fig. 6 Regression analysis between the Vallisneria spiralis with varied coverage and their reflectances in the field experiment

a) 533nm 处 at 533nm; b) 895nm 处 at 895nm; c) QuickBird 波段 1 (450 ~ 520nm) at the QuickBird band 1 (450 ~ 520nm); d) QuickBird 波段 2 (520 ~ 600nm) at the QuickBird band 2 (520 ~ 600nm); e) QuickBird 波段 3 (630 ~ 690nm) and f) QuickBird 波段 4 (760 ~ 900nm) at the QuickBird band 3 (630 ~ 690nm) and f) at the QuickBird band 4 (760 ~ 900nm)

回归分析结果表明,不同盖度苦草与其在 533nm 和 895nm 处的反射率之间的关系可以用线性关系描述,其决定系数分别为 $r^2 = 0.9757$ 和 $r^2 = 0.7991$ (图 6a、b)。不同盖度苦草与 QuickBird 遥感影像 4 个波段所截取的光谱反射率之间的关系也可以用线性关系描述,在蓝光波段(450 ~ 520nm)、绿光波段(520 ~ 600nm)、红光波段(630 ~ 690nm)和近红外波段(760 ~ 900nm)的决定系数分别为 $r^2 = 0.9696$ 、 $r^2 = 0.9605$ 、 $r^2 = 0.9539$ 和 $r^2 = 0.8186$ (图 6c ~ f)。因此,应用这些线性方程也可以定量反演水体中的苦草盖度。

3 讨论

3.1 不同盖度苦草的光谱特征

许多陆上植物群落的光谱特征研究表明,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^[17],本研究中的沉水植物苦草也表现了相同的这些特征。苦草为多年生沉水草本,群落的高度和盖度越大,其生物量也越高。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 ~ 607nm 波段和近红外区域(697 ~ 900nm)的光谱反射率随睡莲盖度增大而^[14]。与浮叶植物睡莲相比,沉水植物的光谱反射率受到水体和水中悬浮物等因素的影响,情况较为复杂。然而,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。

实验室模拟试验和室外控制试验的结果表明,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。随着苦草群落盖度的降低,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。当苦草盖度为零时,所测得的反射光谱主要来自基质和水质,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^[15, 18]。本研究中,不同盖度苦草的光谱反射率之间的差异主要表现在 500 ~ 650nm 和 700 ~ 900nm 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苦草盖度或生物量。

3.2 实验室模拟试验与室外控制试验结果比较

实验室模拟试验和室外控制试验的主要差别在于水体环境和基质的不同。与实验室模拟试验结果相比,室外控制试验中不同盖度苦草的光谱反射率在可见光范围的差异较大,而在近红外波段的红边则不如实验室模拟试验明显。这主要是由于在近红外波段,沉水植物的结构特征和水体环境是影响光谱反射率的主要因素^[14]。室外控制试验的水体中富含藻类和其它悬浮物质,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,从而降低了在近红外波段的光谱反射率,因此在近红外波段的光谱反射率最高值明显低于实验室模拟试验的最高值。室外控制试验中,苦草盖度与其光谱反射率的相关性在可见光范围有较明显的表现,而在近红外波段的相关性则不如实验室模拟试验的明显,而且在近红外波段基质的光谱反射率变化也不如实验室模拟试验清水中的明显。这些现象说明,实验室测定的沉水植物光谱特征在野外实际应用中必须考虑这些因素的影响。

3.3 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^[19]。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。结果表明,沉水植物群落的冠层结构和植株状态在实验室模拟试验中可能发生改变,难以准确反映不同生物量沉水植物的光谱反射率实际情况。Williams 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^[20]。

本项研究应用地物光谱仪同时在实验室模拟试验和室外控制试验中测定了不同盖度苦草的反射光谱,通过分析比较,得出不同盖度苦草与其反射光谱的特征和关系。在对高光谱数据进行截取和 Lambda 积分时,选择了 QuickBird 多光谱遥感影像的 4 个波段,因为该遥感影像的波段划分与 TM 和 SPOT 等遥感影像波段比较接近,具有一定的推广性和实用性。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,再结合遥感影像进行解译、分析和反演。然而,在野外实际监测中,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。

4 结论

本项研究应用地物光谱仪同时在实验室模拟试验和室外控制试验中测定了不同盖度沉水植物苦草的反

射光谱。结果表明,沉水植物苦草光谱反射率的基本特征主要体现在可见光和近红外波段,可以通过苦草盖度与这些波段光谱反射率的回归分析,来定量反演水体中的苦草盖度。沉水植物的光谱特征还受水体环境的影响,实验室测定的沉水植物光谱特征在野外实际应用中必须考虑这些因素。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。

References:

- [1] Jin X C. Technologies of Lake Eutrophication Control and Management. Beijing: Chemistry Industry Press, 2001. 112 ~ 124.
- [2] Pu P M, Wang G X, Li Z K, *et al.* The degradation and restoration of healthy aquatic ecology——theory, technique and application. Journal of Lake Sciences, 2001, 13(3):193 ~ 203.
- [3] Qiu D R, Wu Z B, Liu B Y, *et al.* The research of aquatic plant community restoration experiment. Journal of Lake Sciences, 1997, 9(2):168 ~ 174.
- [4] Zhong Y X, Hu H Y, Qian Y. Advances in utilization of macrophytes in water pollution control. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, 2(4):36 ~ 40.
- [5] Roughgarden J, Running S, Matson P. What does remote sensing do for ecology. Ecology, 1991, 72:1981 ~ 1922.
- [6] Xu G H, Tian G L, Wang C, *et al.* The progress and prospect of remote information science. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(5):385 ~ 397.
- [7] Ackleson S G, and Klemas V. Remote sensing of submerged aquatic vegetation in Lower Chesapeake Bay: a comparison of Landsat MSS to TM imagery. Remote Sensing of Environment, 1987, 22, 235 ~ 248.
- [8] Jensen J R. Measurement of seasonal and yearly aquatic macrophyte changes in a reservoir using multirate SPOT panchromatic data. Technical Papers, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1992, 1:167 ~ 176.
- [9] Jensen J R, Narumalani S, Weatherbee O, *et al.* Measurement of seasonal and yearly cattail and waterlily changes using multirate SPOT panchromatic data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993, 59:519 ~ 525.
- [10] Kirkman H. Baseline and monitoring methods for seagrass meadows. J. Environ. Mgmt., 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. Vegetatio, 1991, 97:125 ~ 136.
- [12] Welch R, Remillard R R, and Slack R B. Remote sensing and geographic information system techniques for aquatic resource evaluation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54:177 ~ 185.
- [13] Orth R J and Moore K A. Chesapeake Bay: an unprecedented decline in submerged aquatic vegetation. Science, 1983, 222:51 ~ 53.
- [14] Jakubauskas M, Kindscher K, Fraser A, *et al.* Close-range remote sensing of aquatic macrophyte vegetation cover. International Journal of Remote Sensing, 2000, 18(21):3533 ~ 3538.
- [15] Han L, and Rundquist D C. The response of both surface reflectance and the underwater light field to various levels of suspended sediments: Preliminary results. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994, 60:1463 ~ 1471.
- [16] Yan S Z. The Scheme of Chinese Aquatic Macrophytes. Beijing: Science Press, 1983. 237 ~ 239.
- [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. Acta Phytocologica Sinica, 2006, 32(2):252 ~ 260.
- [18] Goodin D, Han L, Fraser R N, *et al.* Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. Photogrammetric Engineering and Remote sensing, 1993, 59:505 ~ 510.
- [19] 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. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(1): 11 ~ 20.
- [20] Williams D J, Rybicki N B, Lombana A V, *et al.* Preliminary investigation of submerged aquatic vegetation mapping using hyperspectral remote sensing. Environ Monit. Assess, 2003, 81:383 ~ 92.

参考文献:

- [1] 金灿旭(主编). 湖泊营养化控制和管理技术. 北京. 化学工业出版社, 2001. 112 ~ 124.
- [2] 濮培民, 王国祥, 李正魁, 等. 健康水生态系统的退化及其修复——理论、技术及应用. 湖泊科学, 2001, 13(3):193 ~ 203.
- [3] 邱东茹, 吴振斌, 刘保元, 等. 武汉东湖水生植物的恢复试验研究. 湖泊科学, 1997, 9(2):168 ~ 174.
- [4] 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. 环境污染治理技术与设备, 2003, 2(4):36 ~ 40.
- [6] 徐冠华, 田国良, 王超, 等. 遥感信息科学的进展和展望. 地理学报, 1996, 51 (5) : 385 ~ 397.
- [16] 颜素珠. 中国水生高等植物图说. 北京. 科学出版社, 1983. 237 ~ 239.
- [17] 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. 植物生态学报, 2006, 32(2):252 ~ 260.