应用间接排序识别盐沼植被的光谱特征： 以崇明东滩为例

高占国 张利权*

(华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘要 遥感技术已成为大尺度植被分类的重要手段,而地面植物群落特征与其光谱特征之间的关系是解译遥感影像的关键。该研究选择上海崇明东滩自然保护区的盐沼植物群落为对象,应用 ASD 地物光谱仪测定其植物群落的光谱反射率,并采用 10 个小型机载成像光谱仪(CASI)默认植被波段组,应用主分量分析法和相关分析分析了不同群落光谱特征与生态环境因子之间的关系。分析结果表明,间接排序法 PCA 能够识别盐沼植被中光滩、海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)群落、芦苇(*Phragmites australis*)群落和互花米草(*Spartina alterniflora*)等群落的光谱特征,绝大多数盐沼湿地植物群落组成与光谱特征之间有显著的相关,识别效果最好的波段组是 736~744 nm、746~753 nm、775~784 nm、815~824 nm 和 860~870 nm;对光谱反射率影响最大的生态环境因子分别是植物群落的高度和盖度,高程和其它环境因子的影响次之。研究成果可为遥感监测崇明东滩自然保护区内入侵种互花米草的空间分布和扩散规律提供技术支撑,为高光谱遥感影像的影像判读和解译分类以及盐沼湿地植被制图提供科学依据。

关键词 崇明东滩 盐沼植被 地物光谱仪 小型机载成像光谱仪 冠层反射光谱 间接排序法

IDENTIFICATION OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SALT MARSH VEGETATION USING INDIRECT ORDINATION: A CASE STUDY FROM CHONGMING DONGTAN, SHANGHAI

GAO Zhan-Guo and ZHANG Li-Quan*

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

Abstract Remote sensing is a major source of spatial information of the attributes of the earth's surface, and remote sensing technology has become a primary tool for vegetation classification at large scales. The relationship between vegetation and their spectral characteristics is key for interpreting remote sensing images. This study related characteristics of saltmarsh vegetation at the intertidal zone of Chongming Dongtan Nature Reserve, Shanghai, to patterns of their spectral reflectance. Paired measurements of saltmarsh community and spectral characteristics were carried out along three transects covering the major variations in vegetation and environment within the study area. The spectral characteristics were measured by a ground FieldSpec Pro JR spectroradiometer and the spectral data were converted to simulate the 10 bands of Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) bandset. The spectral data sets were then ordinated using Principal Component Analysis (PCA), an indirect ordination technique. The eigenvalue of the first PCA axis was 19.9, which represented 98.5% of the variation in the spectral data. A sequence of bare mudflat, *Scirpus mariqueter* community, *Spartina alterniflora* community and *Phragmites australis* community changed along the first ordination axis showed a strong correspondence with variation in the bands six to ten, i.e. the simulated CASI wavebands covering the 736 to 870 nm wavelengths. A significant relationship between the first axis PCA scores for the spectral data of quadrats and their percentage community cover and height also was identified. The second axis accounted for only 1.4% of the variation in the spectral data and it proved impossible to demonstrate any close link between any specific plant community type and a distinct set of spectral characteristics because of its low representation of the variation in the spectral data.

Our study has demonstrated that the variation in the spectral data of saltmarsh vegetation at Chongming Dongtan Nature Reserve can be identified using the indirect ordination technique of PCA and then applying correlation and regression analyses to explain the relationships between the variation in the spectral data with the vegetation and ecological data. Our results indicate that PCA is of value for identifying relationships be-

tween community types and the spectral data of CASI bandsets for saltmarsh vegetation. This could provide an effective and practical approach for classification of saltmarsh vegetation at large scales and for monitoring spatio-temporally dynamic patterns of saltmarshes at Chongming Dongtan Nature Reserve. Further work is required in order to test these conclusions. The method has been evaluated for a single season with a limited sample of saltmarsh plant communities, and the application of PCA and spectral data of CASI bandsets to other saltmarsh vegetation as well as multi-seasonal spectral data are necessary to determine whether similar patterns emerge and whether the approach has more general applicability in terms of characterizing remote sensing/spectral imagery and community types in saltmarsh vegetation.

Key words Chongming Dongtan, Saltmarsh vegetation, Spectroradiometer, CASI, Canopy reflectance, Indirect ordination

遥感影像中目标地物特征是地物电磁辐射差异在遥感影像上的典型反映,遥感技术已成为大尺度植被分类的重要手段(刘纪远等,1998;杨存建等,2004)。地物特征与其光谱特征的关系是解译遥感影像的关键,然而一些外形具有相似特征或者在遥感影像上具有相似色调、形状和纹理的物种和群落,给遥感影像识别、解译和植被分类造成了一定的困难(Armitage *et al.*, 2004)。

近年来,随着小型机载成像光谱仪的发展与应用,使得遥感影像的空间分辨率和光谱分辨率得到很大提高。同时,许多学者应用地物光谱仪对地面植被的群落特征与其光谱特征之间的关系进行了研究,对遥感影像的解译与植被分类起到促进作用。Thomas 等(2002)使用植物群落数据和其光谱特征进行了航空遥感图像的分类,其中运用多元分析的方法,分析了植被生态学中分类原理和实践与遥感中用于植被制图的影像分类之间的关系,取得了较好的效果。Demarey(2002)采用控制试验方法,使用便携式地物光谱仪测量了人工湿地中 5 种北美温带湿地植物的光谱特征,多元分析的结果显示实验室控制试验还不能达到野外湿地植被光谱特征的准确识别。Armitage 等(2004)使用便携式地物光谱仪测量了英国半自然高地植被的光谱特征,并运用多元分析方法,显示了半自然高地植被的种类组成与其光谱特征之间存在显著的相关性,为遥感影像判读和用于植被制图的影像分类提供了一定的基础。Schmidtlein 和 Sassin(2004)使用高光谱遥感影像制作了连续植被梯度图,建立了偏最小平方(Partial least squares)的回归模型。该模型模拟的植被梯度与地面观测的植被梯度之间显示出相当的一致性,从而增强了植被生态学遥感技术之间的联系,提高了对植被中的物种识别。王艳荣和雍世鹏(2004)利用多时相近地面反射波谱特征,采用多元分析等方法对不同等级草原植被进行了分析研究,得出不

同等级草原植被的最佳识别时间及波段组合。然而,目前对盐沼湿地植被的种类组成与其光谱特征之间关系的研究尚属空白。

互花米草(*Spartina alterniflora*)隶属禾本科米草属的多年生草本植物,原产美洲大西洋东沿岸和墨西哥海湾,目前已成为全球性的入侵种。我国于 1979 年从美国引进了互花米草,现已广泛分布于我国大部分沿海省市的沿岸地区,形成了规模较大的互花米草人工盐沼(孙书存等,2004)。自 1995 年上海崇明东滩人工引种互花米草以来,互花米草逐渐在东滩定居和扩散,主要出现在芦苇(*Phragmites australis*)带,其分布下限可达到海三棱草(*Scirpus mariqueter*)带。目前在崇明东滩,互花米草与芦苇和海三棱草形成了强烈的竞争态势(左本荣等,2003;陈中义等,2004)。本项研究将使用便携式地物光谱仪测定崇明东滩盐沼湿地植被的光谱特征,并且测定各植物群落的生态与环境因子;应用多元分析方法分析各植物群落光谱特征与生态环境因子之间的关系,以期对遥感监测入侵种互花米草的空间分布和扩散规律提供技术支撑,为高光谱遥感影像的影像判读和解译分类以及盐沼湿地植被制图提供科学依据。

1 研究地区

上海崇明东滩鸟类自然保护区(图 1),位于 31°25'~31°38'N, 121°50'~122°05'E 之间,属北亚热带海洋性气候,温和湿润,四季分明。年均日照时数 2 138 h,太阳总辐射量为 4 300~4 600 MJ·m⁻²,年均气温 15.3℃,最热月为 7~8 月,月平均气温 26.8~26.9℃,最冷月为 1~2 月,月平均气温在 3.0~3.9℃。全年平均无霜期为 320 d 左右,年平均降雨量 1 022 mm,相对湿度 82%。崇明东滩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。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。

崇明东滩自然保护区总面积为 32 610 hm²，其中大堤外滩涂面积 24 600 hm²，包括吴淞标高 0 m 线以上的滩涂 10 000 hm² 和 0 m 线以外宽度 3 000 m 的水面 14 600 hm²。崇明东滩属于淤涨型潮滩，平均每年向外伸长 150 ~ 300 m，东滩潮滩最宽处为 13 km，自陆向海依次可划分为高、中、低潮滩(图 1)。崇明东滩滩涂湿地自然植被分布及演替的一般趋势可归纳为：中潮滩下缘和低潮滩的盐渍藻类带(光滩)，高程低于 2 m，潮水淹没时间长，无高等植物分布；中潮滩的上半部分和高潮滩为海三棱 草或草(*Scirpus triqueter*)带，高程位于 2 ~ 2.9 m；高潮滩上半部分为芦苇带，高程一般在 2.8 m 以上。此外还散生着一些白茅(*Imperata cylindrica*)、碱蓬(*Suaeda*

glauca)、糙叶苔草(*Carex scabrifolia*)和野灯芯草(*Juncus setchuensis*)等斑块状群落。自 1995 年人工引种互花米草以来，互花米草逐渐在东滩定居和扩散，主要出现在芦苇带，其分布下限可达到海三棱草带。

2 研究方法

2.1 植被与环境因子调查

滩涂植被与环境因子调查于 2004 年 6 月进行，我们在崇明东滩自然保护区设置了 3 条调查样带，其中 A 样带设置于保护区北部的芦苇和互花米草区域，反映受干扰较少的自然生境梯度，主要是高程；B 样带设置于沿 98 大堤从东旺沙芦苇和互花米草带向受干扰较大(牛群放牧、啃食和踩踏)的团结沙的芦苇 + 海三棱 草 + 糙叶苔草带，反映生境受

图 1 上海崇明东滩自然保护区位置与 2003 年 8 月 Landsat-TM 卫星影像图
Fig. 1 The location of Chongming Dongtan Nature Reserve, Shanghai, and the Landsat-TM satellite image of August, 2003

干扰的梯度；C 样带设置于团结沙的海三棱 草 + 糙叶苔草区域，反映受干扰区域内的高程生境梯度（图 1）。样方大小按照 1 m × 1 m，样带长短不同，所包含样方的数量也不同。样方调查内容包括植物群落调查、测定群落的光谱反射率和生态环境因子，共调查样方 53 个，其中芦苇群落样方 13 个，互花米草群落的样方 11 个，芦苇与互花米草混合群落样方 6 个，芦苇 + 海三棱 草 + 糙叶苔草混合群落样方 4 个，海三棱 草群落样方 17 个，光滩样方 2 个。

生态环境因子测定主要包括高程、群落高度、群落盖度、土壤含水量、pH 值、氧化还原电位和土壤盐度。高程使用 Ashtech Z-Xtreme™ GPS Receiver System 测定。群落盖度指单位面积内植物所占的面积百分比，采用网格估算。pH 值、氧化还原电位采用土壤原位测定仪测定；土壤含水量和土壤盐度采用 DALTA-T WET 土壤速测仪测定。

2.2 光谱测定

本研究应用了美国 ASD 公司生产的 Field-Spec™ Pro JR 便携式地物光谱仪，直接测定植物群落的光谱反射率，光谱仪的波段覆盖 350 ~ 2 500 nm，其光谱分辨率在 700 nm 为 3 nm，在 1 400 和 2 100 nm 为 30 nm，采样间隔在 350 ~ 1 000 nm 内为 1.4 nm，在 1 000 ~ 2 500 nm 内为 2 nm，漫反射参考板采用中国科学院安徽精密光学机械研究所生产的白板，白板反射率为 98%。测定于 6 月下旬进行，测定光谱时根据天气条件进行优化，至多每 20 min 进行一次优化。光谱仪探头全视场角为 25°，测定光谱时探头垂直向下，距植物群落冠层的高度为 1.5 m。每个样方测定 20 个数据作平均。从 10:30 ~ 14:30，在阳光几乎直射的时段内进行测定。

2.3 数据分析

本研究参考了英国自然环境研究委员会(UK Natural Environment Research Council, NERC)应用的 10 个小型机载成像光谱仪(The Compact Airborne Spectrographic Imager, CASI)默认植被波段组(表 1)(Armitage *et al.*, 2004)。ASD 便携式光谱分析仪携带的光谱处理软件 ViewSpec™ Pro 4.02 可以对光谱进行

波段的修复、截取、平均值计算以及多个波谱曲线的平均值计算，所测各类植物群落的光谱反射率进一步用该软件进行光谱波段的截取与计算，最后得出 10 个 CASI 波段组的反射率值。

使用 PC-ORD 4.3 软件中的主分量分析(Principal component analysis, PCA)对各样方 10 个 CASI 波段组的光谱特征数据进行排序分类。植物群落光谱特征数据集中每一样方都有每个 CASI 波段组的测定值，其量纲相同，因此向量积矩阵选择了非中心化选项。然后应用 SPSS11 软件进行相关分析，分析检验平行测定的各样方种类组成和生态环境因子与其光谱特征数据排序结果的关系。

3 结果与分析

3.1 湿地植物群落反射光谱的 PCA 排序

对所有样方群落冠层的 10 个 CASI 波段组光谱特征数据的主分量分析结果表明，PCA 排序的第一和第二轴可以解释光谱特征数据中 99.9% 的变差，其中第一排序轴的特征值为 19.9，解释了光谱特征数据中 98.5% 的变差。图 2 显示了所有样方群落冠层的 10 个 CASI 波段组光谱特征数据的 PCA 第一和第二轴的排序图，其中 a 表示芦苇单优势群落，b 表示互花米草单优势群落，c 表示海三棱 草单优势群落，d 表示海三棱 草 + 糙叶苔草混合群落，ab 表示芦苇与互花米草混合群落，da 表示海三棱 草 + 糙叶苔草群落 + 芦苇混合群落，e 表示光滩。PCA 排序图直观地显示了崇明东滩盐沼植被的分布状况，用 PCA 排序对盐沼植被光谱数据组进行排序，可以识别出沿着第一轴的群落变化顺序，其基本格局是光滩出现于排序图的右上角，独立成一类群，海三棱 草、芦苇和互花米草群落自右向左沿 PCA 第一排序轴分布。也有个别样方的分布与此格局不符，如 b1、b3、b4、b5、b6、b9、b10 属于互花米草群落样方，da1、da2、ad2 属于海三棱 草 + 糙叶苔草群落 + 芦苇的混合群落样方，但是这些样方却与海三棱 草群落有较大范围的重叠；ab5 属于芦苇 + 互花米草的混合群落，却与芦苇群落出现重叠。这些结

表 1 小型机载成像光谱仪(CASI)默认植被波段组和波长范围
Table 1 The Compact Airborne Spectrographic Imager(CASI)default vegetation handset and the wavelength ranges

CASI 波段 CASI band	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
波长 Wavelengths (nm)	441 ~ 461	548 ~ 557	666 ~ 674	694 ~ 703	705 ~ 711	736 ~ 744	746 ~ 753	775 ~ 784	815 ~ 824	860 ~ 870

图3 10个CASI波段组的变化格局与PCA第一和第二排序轴的关系,按比例的圈点代表了每一样方中每一波段组的测定值,较大的圈点代表了较高的测定值

Fig.3 Patterns of variation in the 10 CASI wavebands in relation to the first two axes of the PCA ordination, proportional circles correspond to values for each waveband in each quadrat with higher values corresponding to larger circles

表2 10个CASI波段组光谱特征数据与PCA排序第一和第二轴的相关性分析

Table 2 The correlation between the spectral data sets of 10 CASI wavebands and the first two axes of PCA

CASI 波段 CASI band	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PCA 第一排序轴 PCA axis 1	0.25	-0.24	0.38*	0.01	-0.51*	-0.99*	-0.99*	-0.99*	-0.99*	-0.99*
PCA 第二排序轴 PCA axis 2	0.79*	0.43*	0.88*	0.65*	0.15	-0.74*	-0.79*	-0.78*	-0.78*	-0.78*

* : $p < 0.01$

表 3 光谱特征数据的 PCA 排序与生态环境因子的相关性分析
Table 3 The correlation between the first two axes of PCA and the ecological and environmental factors

	群落高度 Community height	群落盖度 Community cover	高程 Elevation	土壤含水量 Soil water content
PCA 第一排序轴 PCA axis 1	- 0.830 **	- 0.685 **	- 0.292 *	- 0.078
PCA 第二排序轴 PCA axis 2	- 0.790 **	- 0.842 **	- 0.298 *	- 0.234

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

4 讨论与结论

4.1 群落光谱特征与 PCA 排序

植物群落光谱特征数据是完整的,数据集中每一样方都有每个 CASI 波段组的测定值,更接近满足线性假设,因此适合应用间接排序法 PCA。应用间接排序法 PCA 对崇明东滩湿地植物群落光谱特征数据进行分析,其所显示的结果与应用间接排序法对其它群落光谱特征数据的研究具有相似的格局。Canas 和 Barnett (1985)应用 PCA 排序对 TM 数据的分析表明,PCA 排序第一轴代表了所有波段反射率的加权总和,有时称为“亮度(Brightness)”。Trodd (1996)应用 PCA 排序对采集于半自然石南灌丛的模拟 ATM 数据分析结果也显示了相同的趋势。Morton (1986)对英国威尔士半自然高地植被 MSS 数据的光谱特征研究结果表明,PCA 排序第一轴代表了反射率的变化,而不是总“亮度”的变化。Armitage 等(2004)使用便携式地物光谱仪测定了英国半自然高地植被的光谱特征,并运用 CCA 排序法研究了英国半自然高地植被的种类组成与其光谱特征之间关系,得出了与 Morton 相同的结论。本研究的结果与后两者相同,显示了近红外波段即 CASI 波段组中的 6 ~ 10 与 PCA 排序第一轴显著相关($r = 0.99, p < 0.01$),而与 CASI 波段组中的 1 ~ 5 的相关却低得多或不相关(表 2)。

以往应用间接排序法对植物群落光谱特征的一些研究表明,PCA 排序第二轴反映了可见光与近红外反射率之间的差别,该第二轴有时被称为“绿度(Greenness)”轴(Crist & Cicone, 1984a, 1984b; Canas & Barnett, 1985)。本项研究显示,虽然 PCA 排序第二轴与 CASI 波段组中除了 5 波段外都显著相关($p < 0.01$),但并不符合近红外波段组具有最高相关性而可见光波段组具最低相关性的“绿度”轴格局。同时,由于 PCA 排序第二轴只解释了光谱特征数据中 1.4% 的变差,因此解释其变化格局显得较困难。我们的结果和结论与 Armitage 等(2004)的基本相同。

4.2 群落光谱特征与群落类型分布

对比图 2 和图 3,可以发现 PCA 排序图上自左向右排列着海三棱 草群落、芦苇群落和互花米草群落或互花米草 + 芦苇混合群落,其反射率在近红外波段部分基本遵循自左向右逐渐增高的变化格局。因此,通过 PCA 等多元分析方法,分析植物群落冠层光谱反射 CASI 波段组中的 6 ~ 10 波段在整体上的差异,可以识别滩涂盐沼植被中的海三棱 草群落、芦苇群落以及互花米草 + 芦苇混合群落的分布格局。在光谱特征上,光滩明显区别于具有植被的区域,因此更易于被识别。

深入分析图 2 发现,群落光谱特征的 PCA 排序图中出现的部分互花米草群落样方和海三棱 草 + 糙叶苔草群落 + 芦苇混合群落样方与海三棱 草群落重叠现象,其原因是这些样方属于刚扩散到海三棱 草带的早期互花米草群落,其群落高度和盖度都较低,致使其光谱反射率与海三棱 草群落相近。而海三棱 草 + 糙叶苔草群落 + 芦苇混合群落样方出现在受放牧干扰较大的地区,群落的高度和盖度都较低,其中芦苇所占比例仅为 5% ~ 10% 左右,生长旺季时糙叶苔草的叶片形态及生长高度与海三棱 草基本相似,与海三棱 草的光谱特征也相似,因此在 PCA 的排序中出现与海三棱 草群落的重叠现象。芦苇群落 + 互花米草混合群落出现的重叠现象,主要取决于这些样方中芦苇和互花米草数量的相对比例。例如图 2 中的芦苇群落 + 互花米草混合群落 ab5,其芦苇盖度为 40%,互花米草盖度为 35%,因此其群落光谱反射率更接近于芦苇群落。这些结果也反映了,不仅植物群落在种类组成上的不同,而且相同群落在结构和生物量、土壤背景等特征上的不同,也会导致植被反射波谱特征表现出差异(王艳荣和雍世鹏, 2004)。

4.3 群落光谱特征与生态环境因子关系

我们的分析结果表明,群落光谱特征的 PCA 排序轴与群落高度、群落盖度和高程呈显著相关,其中与 PCA 排序第一轴相关最大的是群落高度,与 PCA

排序第二轴相关最大的是群落盖度。一些研究表明,用叶面积指数测定的植物生物量与近红外的反射率一般呈正相关关系(Curran, 1983; Ihse & Granéli, 1985; Armitage *et al.*, 2004; 王艳荣和雍世鹏, 2004)。崇明东滩的盐沼植物群落以禾本科的草本植物为主,群落的高度和盖度越大,其生物量也越高。这与上述各位学者的研究结果完全相符。

上海地区滩涂湿地自然植被分布及演替的一般趋势为高潮滩的芦苇群落、中潮滩的海三棱 草群落和低潮滩的光滩,盐沼植物群落的高度和盖度也表现为随地面高程逐渐降低(张利权和雍学葵, 1992)。互花米草群落的生态位比芦苇宽,其分布下限可达到海三棱 草带。上述反映在 A 样带和 C 样带上环境因子梯度直接影响盐沼植物群落分布和群落的高度与盖度,因此也显示了与群落光谱反射率的显著相关。

本研究的 B 样带设置在沿大堤的高潮滩(高程 3 m 以上),反映了放牧和踩踏产生的干扰梯度。上海地区滩涂从光滩向高潮滩芦苇群落演替过程中,主要受以高程为主的环境影响以及自然与人为的干扰,如动物牧食、火烧干扰和人类活动等的影响,有可能加快演替或改变演替方向,甚至导致逆向的演替过程。崇明东滩团结沙的海三棱 草 + 糙叶苔草 + 芦苇混合群落区域虽然其高程已具备了演替为芦苇群落的条件,然而牛群的啃食和踩踏等干扰因素显著影响了其演替过程,导致该区域长期停留在海三棱 草 + 糙叶苔草 + 芦苇混合群落阶段,其群落的高度和盖度以及光谱特征与海三棱 草群落基本相似,因此在光谱特征数据的 PCA 排序中出现与海三棱 草群落的重叠现象。

本研究运用主分量分析方法,对崇明东滩自然保护区的盐沼植被的地面近距高光谱反射率进行分析,在此基础上应用相关分析法分析了不同群落光谱特征与生态环境因子之间的关系,得出以下结论:

1)植物光谱特征数据的 PCA 排序轴可以显示盐沼群落种类组成由光滩-海三棱 草群落-互花米草和芦苇群落的变化顺序。

2)选择的 10 个 CASI 波段组中,对崇明东滩盐沼植被群落排序识别效果最好的是 6 ~ 10 波段组,即 736 ~ 744 nm、746 ~ 753 nm、775 ~ 784 nm、815 ~ 824 nm 和 860 ~ 870 nm。

3)盐沼植被种类组成、结构和生物量、土壤背景等特征上的明显不同,会导致群落反射波谱特征表

现出显著差异。在崇明东滩,对光谱反射率影响最大的生态因子是群落的高度和盖度以及放牧干扰,高程的影响次之,而其它环境因子的影响相对较小。

4)有研究表明,随着群落类型和季相不同,波谱特征的差异程度各异,而本项研究只是在生长旺季的 6 月进行。应利用多季相的植被波谱反射特征,以实现盐沼群落进行高精度鉴别的目的。

参 考 文 献

- Armitage RP, Kent M, Weaver RE (2004). Identification of the spectral characteristics of British semi-natural upland vegetation using direct ordination: a case study from Dart moor, UK. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 3369 – 3388.
- Canas ADD, Barnett ME (1985). The generation and interpretation of false color composite principal component images. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 867 – 881.
- Chen ZY (陈中义), Li B (李博), Chen JK (陈家宽) (2004). Ecological consequences and management of *Spartina* spp. invasions in coastal ecosystems. *Biodiversity Science* (生物多样性), 12, 280 – 289. (in Chinese with English abstract)
- Crist EP, Cicone RJ (1984a). A physical based transformation of Thematic Mapper data—the TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 22, 256 – 263.
- Crist EP, Cicone RJ (1984b). Application of the Tasseled Cap concept to simulated Thematic Mapper data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50, 343 – 352.
- Curran PJ (1983). The problems of remote sensing of vegetation canopies for biomass estimates. In: Fuller RM ed. *Ecological Mapping from Ground, Air and Space*. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge, 83 – 100.
- Demarey DM (2002). *Discrimination of Wetland Vegetation Using Close-Range Remote Sensing*. Ph.D. dissertation of University of Nebraska.
- Ihse M, Granéli W (1985). Estimation of reed (*Phragmites australis*) biomass through spectral reflectance measurements. *Biomass*, 8, 59 – 79.
- Liu JY (刘纪远), Zhuang DF (庄大方), Ling YR (凌扬荣), Awaya Y (1998). Vegetation integrated classification and mapping using remote sensing and GIS techniques in Northeast China. *Journal of Remote Sensing* (遥感学报), 2, 285 – 291. (in Chinese with English abstract)
- Morton AJ (1986). Moorland plant community recognition using Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, 20, 291 – 298.
- Schmidtlin S, Sassini J (2004). Mapping of continuous floristic gradients in grasslands using hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 92, 126 – 138.
- Sun SC (孙书存), Zhu XB (朱旭斌), Lü CQ (吕超群) (2004). Function of assessment and ecological controls on alien species cordgrass. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志),

23(3),93 – 98. (in Chinese with English abstract)

Thomas V, Treitz P, Jelinski D, Miller J, Lafleur P, McCaughey JH (2002). Image classification of a northern peatland complex using spectral and plant community data. *Remote Sensing of Environment*, 84, 83 – 99.

Trodd NM (1996). Analysis and representation of heathland vegetation from near-ground level remote sensing. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 5, 206 – 216.

Wang YR (王艳荣), Yong SP (雍世鹏) (2004). The use of multitemporal near-ground spectral reflectance to discriminate among degraded grasslands. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 28, 406 – 413. (in Chinese with English abstract)

Yang CJ (杨存建), Liu JY (刘纪远), Luo JC (骆剑承) (2004). Correlation analysis of landsat TM data and its derived data, meteorological data and topographic data with the biomass of different aged tropical forests. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 28, 862 – 867. (in Chinese with English abstract)

Zhang LQ (张利权), Yong XK (雍学葵) (1992). Studies on phenology and spatial distribution pattern of *Scirpus mariqueter* population. *Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学学报), 16, 43 – 51. (in Chinese with English abstract)

Zuo BR (左本荣), Chen J (陈坚), Hu S (胡山), Chen DH (陈德辉), Yuan JF (袁峻峰) (2003). Study on the angiosperm flora in the Chongming Dongtan Nature Reserve of birds. *Journal of Shanghai Teachers University* (Natural Sciences Edition) (上海师范大学学报(自然科学版)), 32, 77 – 82. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 周广胜 责任编辑: 张丽赫