

基于连续统去除法的水生植物提取及其时空变化分析——以官厅水库库区为例

汪 星 官兆宁* 井 然 张 磊 金点点

首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048; 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048; 北京市城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048

摘 要 光谱特征变量的筛选作为水生植物识别的重要手段之一, 在水生植物种类识别研究中应用广泛。该研究将实测光谱特征提取与多时相Landsat 8 OLI影像数据分析相结合, 找到一种有效识别不同种类水生植物的特征变量。在水生植物反射光谱特征分析中引入矿质分析中普遍使用的连续统去除法, 对光谱重采样结果作连续统去除处理后提取光谱吸收深度特征。采用单因素方差分析法对比7个光谱重采样波段和3个连续统去除吸收深度敏感波段, 发现经连续统去除处理的短波红外1波段(SWIR1CR)对于不同类型的水生植物区分效果最佳。将连续统去除法应用到遥感影像处理上, 发现SWIR1CR波段能较好区分沉水植物和挺水植物; 结合影像归一化植被指数和SWIR1CR波段可较好区分三类水生植物。结合特征波段筛选结果采用支持向量机分类方法, 得到水生植物的分类结果精度为86.33%, 对比全生长期12期影像提取的水生植物分布图, 发现水生植物主要分布于官厅水库库区南北岸浅水区, 水生植物面积最大时约占库区总面积的35.13%; 其中沉水植物年内生长分布变化幅度较大, 6月上旬开始迅速生长; 10月份水生植物开始衰减; 11月份水生植物占库区面积的20%, 沉水、浮水植物大幅衰减消失。

关键词 连续统去除; 光谱吸收深度; 单因素方差分析; 时空变化; 短波红外1波段

汪星, 官兆宁, 井然, 张磊, 金点点 (2018). 基于连续统去除法的水生植物提取及其时空变化分析——以官厅水库库区为例. 植物生态学报, 42, 640–652. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0240

Extraction of aquatic plants based on continuous removal method and analysis of its temporal and spatial changes—A case study of Guanting Reservoir

WANG Xing, GONG Zhao-Ning*, JING Ran, ZHANG Lei, and JIN Dian-Dian

College of Resource Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Beijing 100048, China; Key Laboratory of Resources Environment and GIS of Beijing Municipal, Beijing 100048, China; Base of the State Laboratory of Urban Environmental Processes and Digital Modeling, Beijing 100048, China

Abstract

Aims Screening of spectral characteristic variables is one of the important means for aquatic plant recognition, and it is widely applied in aquatic plant species identification. In this paper, a method for identifying aquatic plants species was constructed by combining extracted spectral feature information with the multi-temporal Landsat 8 OLI image data analysis.

Methods In analyzing reflectance spectra of aquatic plants, the method of continuum removal for mineral analysis was introduced. The spectral resampling was performed on the measured spectral curve, and the spectral absorption depth was characterized by the continuous removal of the spectral resampling results. One-way ANOVA method was used to compare the seven spectral resampling bands and the three continuum removal absorption depth sensitive bands. Then the characteristic bands with significant differentiation of different aquatic plants were selected. The continuum removal was applied on remote sensing image processing. The results of the spectroscopic analysis were used to guide the identification of aquatic plants in using Landsat 8 OLI. The classification of aquatic plants was carried out by using support vector machine (SVM) classification.

Important findings The results of the measured spectrum resampling are similar to the atmospheric calibration of Landsat 8 OLI in the same position, and the results of the measured spectral curves can be used to guide the classification of Landsat 8 OLI. The one-way ANOVA method was used to compare seven spectral resampling

收稿日期Received: 2017-09-13 接受日期Accepted: 2018-04-04

基金项目: 国家国际科技合作专项资助项目(2014DFA21620)。Supported by the International Science & Technology Cooperation Program of China (2014DFA21620)。

* 通信作者Corresponding author (gongzhn@163.com)

bands and three continuous systems in absorbing sensitive wavelengths. The results showed that the short wave infrared 1 band, which was processed by continuum removal (SWIR1CR), was the best in distinguishing different types of aquatic plants. In this paper, the continuum removal was applied on remote sensing image processing, and it was found that the SWIR1CR band can better distinguish the submerged plants and the emergent plants. The normalized differential vegetation index and SWIR1CR band were well capable of identifying submerged plants, floating plants and emergent plants. Based on the SVM classification method, the classification accuracies of aquatic plants were 86.33%. The distribution of aquatic plants showed that the aquatic plants were mainly distributed in shallow water areas of the south north bank of Guanting reservoir. When the aquatic plant distribution area reached the peak, it accounted for about 35.13% of the total area of the reservoir. The growth distribution of submerged plants changed significantly during a year. The stem and leaves of submerged plants began to emerge in early June. Aquatic plants began to wither in October, and aquatic plants accounted for only 20% of the total area in November.

Key words continuum removal; spectral absorption depth; one-way ANOVA; spatiotemporal variation; the short wave infrared I band

Wang X, Gong ZN, Jing R, Zhang L, Jin DD (2018). Extraction of aquatic plants based on continuous removal method and analysis of its temporal and spatial changes—A case study of Guanting Reservoir. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 640–652. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0240

湿地水生植被具有净化水质、保护湿地环境等生态功能, 对内陆水体的物理和化学环境具有显著改善作用, 是湖泊生态系统平衡的重要调控者(杨清心, 1998; 李俊生等, 2009)。作为湿地资源的一个重要的组成部分, 水生植物数量和范围的变化直接影响湿地生境质量, 因此定量地研究水生植物的变化对于湿地的保护具有重要意义(林川等, 2010)。

监测水生植物的传统方法受水域环境影响通常较大, 调查范围虽小, 但费时费力。遥感以其快速、实时、大面积监测技术优势, 已在湿地资源研究中获得广泛应用。最近20多年来, 国内外许多学者已经在湿地资源调查上做了大量的研究工作。Wang等(2017)研究不同水盐梯度对植物光谱的影响, 对高光谱遥感数据进行分数阶导数定量分析, 为植被遥感研究与应用提供新的方法; Schmidt和Skidmore(2003)使用便携式地物光谱仪测量了荷兰27种盐沼湿地植被的反射光谱, 并利用统计检验法、连续统去除法分析了光谱间差异, 最终选出了6个区分度最好的波段。通过分析实测光谱的谱间差异进行湿地植物分类研究, 对高光谱遥感影像在湿地植被分类中的应用提供了基础。

在利用中等分辨率影像进行水生植物种类提取研究方面, 游海林等(2016)以1973–2013年鄱阳湖湿地秋季分辨率较高的遥感影像为基础, 通过定量遥感解译技术和多元统计分析方法, 探明鄱阳湖湿地景观分类特征、湿地植被类型空间分布格局及演替趋势。侍昊等(2016)以Landsat 8 OLI多光谱遥感影像

为主要数据源, 运用光谱指数和图像变换构建多个特征变量, 结合随机森林(RF)模型, 提取太湖水生植被的空间分布。Oyama等(2015)使用Landsat/ETM+影像, 结合视觉蓝藻指数(VCI)和浮藻指数(FAI)监测蓝藻的水平。张寿选等(2008)基于比值植被指数(RVI)和归一化植被指数(NDVI)对TM影像进行水生植物种类提取。

目前利用水生植物实测光谱特征分析直接指导中等分辨率多光谱遥感影像分类的研究较少。本文将光谱连续统去除方法引入到水生植物光谱特征分析和Landsat 8 OLI影像处理中, 结合光谱重采样技术实现实测光谱数据指导Landsat 8 OLI影像水生植物分类。通过光谱特征筛选出在Landsat 8 OLI影像上有效识别不同水生植物的特征波段, 并利用该特征波段进行多时相影像的水生植物提取, 研究官厅水库库区水生植物的年内生长变化, 为该区域水生植物监测提供技术支持。

1 数据获取

1.1 研究区概况

官厅水库位于河北省张家口市怀来县和北京市延庆县界内, 周边山峦环抱, 丘陵盆地相间分布, 是新中国成立后修建的第一座大型水库。官厅水库面积可达280 km², 常年水面面积为130 km²。设计总库容为41.6亿m³, 控制流域面积为42 500 km², 是根治永定河的重点工程(甄姿等, 2012; 朱晓磊等, 2016)。水库运行40多年来, 在防洪、发电、灌溉、

供水等方面一直发挥巨大作用。20世纪80年代后期,由于城市化和经济发展,库区水体受到严重污染,不符合国家规定的饮用水源标准,水体富营养化不断恶化,于1997年被迫退出城市饮用水体系(袁博宇, 2000; 杜桂森等, 2004)。

该地区属于淡水湿地,气候类型属于温带大陆性季风气候,是暖温带与中温带、半干旱到半湿润过渡地带。冬春冷冽干燥,盛行西北风,持续时间长;夏季酷暑高温,降水集中,形成雨热同季(林川等, 2010)。在特殊的地理环境和气候条件下,植物群落经过长期的演替变化和相互作用,官厅水库生长了大面积的水生植物,尤其是水域广阔和水深梯度较为明显的上游库区的水生植物分布最为典型(图1);该区域水生植物在空间上呈梯度分布,随着水深形成不同类型湿地植物的带状分布,如沉水植物、浮水植物和挺水植物等(陈卫等, 2007)。故本文选择上游库区作为官厅水库典型研究区域进行水生植物识别研究。

沉水植物的特点是大部分生活周期内营养体全部淹没水中,有性繁殖部分可沉水、浮水或挺立于水面(Wetzel, 1983)。研究区中比较典型的沉水植物

有篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)等。穗状狐尾藻为多年生沉水草本,根状茎生于泥中,节部生多数须根,茎软,细长,圆柱形,多分枝。篦齿眼子菜为多年生沉水草本,茎丝状,淡黄褐色,通常呈二叉分枝状;花期一般5–6月,果期7–9月(陈卫等, 2007; 徐景先, 2009; 吴振斌, 2011)。

浮水植物包括漂浮植物和浮叶植物,它的特点是茎和叶一部分沉于水中,一部分浮于水面,根扎在淤泥中或不扎在淤泥中。研究区中比较典型的浮水植物是两栖蓼(*Polygonum amphibium*),两栖蓼有横走的根块茎,节部生根,花期5–9月,果期7–10月(陈卫等, 2007; 徐景先, 2009; 吴振斌, 2011)。

挺水植物的特点是茎的上半部挺立于水面之上,茎的下半部浸于水中,根扎在近岸浅水处淤泥里;研究区中比较典型的挺水植物有芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha orientalis*)。芦苇为多年生湿生高大禾草,具匍匐根状茎,以根茎繁殖为主,花果期8–12月。香蒲为多年生落叶、宿根性挺水型单子叶植物,喜温暖、光照充足的环境,花果期5–8月(陈卫等, 2007; 徐景先, 2009; 吴振斌, 2011)。

1.2 实测数据获取

数据采集时间选择在2016年7月上旬,该段时间气候条件适宜,光照充足,湿地植被生长状况良好,属于采集光谱的最佳时期。对官厅水库区域湿地植物进行光谱数据采集,沉水、浮水和挺水植物各布设20个光谱采样点(图1),采集不同水环境和生长状态下的水生植物光谱。采样位置选择水深较浅,方便到达,便于开展光谱数据采集工作的地方。测量仪器采用FieldSpec 3背挂式野外高光谱辐射仪(ASD, Westborough, USA),光谱范围为350–2 500 nm,其中350–1 000 nm光谱采样间隔为1.4 nm,光谱分辨率为3 nm,1 000–2 500 nm光谱采样间隔为2 nm,光谱分辨率为10 nm,数据采集间隔1 nm,光纤前视场角为25°。光谱数据的采集均定于晴朗、无云、无风或者微风的天气,测量时间选择光照条件最好的10:00–14:00,太阳高度角大于45°。根据天气条件变化情况及时进行标准白板的优化校正。测量时光谱仪的探头垂直向下,光谱采样样方大小为0.5 m × 0.5 m,相应探头高度为1 m。每个采样点记录10条采样光谱曲线(林川等, 2010; 刘克等, 2010)。采样选

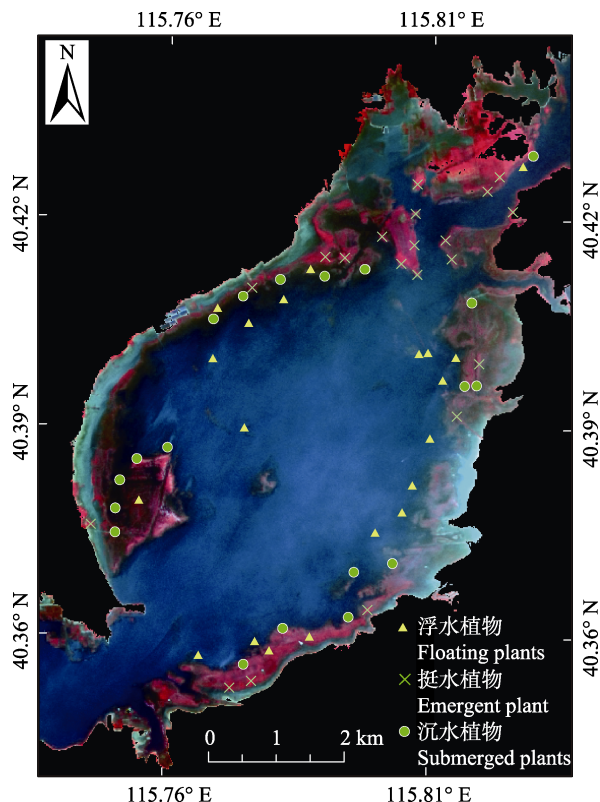


图1 研究区概况图(2016-7-7 Landsat 8 OLI影像)。
Fig. 1 Map of the study area (2016-7-7 Landsat 8 OLI images).

择的湿地植物种类及采样数量如表1所示, 水体光谱测量参考唐军武等(2004)的方法。

1.3 影像数据获取

Landsat 8卫星携带有两个主要传感器: OLI (Operational Land Imager, 运营性陆地成像仪)和TIRS (Thermal Infrared Sensor, 热红外传感器)。OLI传感器采用的是EO-1卫星的ALI传感器的推进扫描方式, 相比以往的Landsat系列卫星传感器具有更高的信噪比(Ungar *et al.*, 2003)。与Landsat ETM+相比, Landsat OLI增加了波段数量且缩减了波段宽度, 这使得OLI影像对地物的响应更加敏感(郑兴明等, 2014)。表2给出了Landsat 8 OLI波段基本参数。

官厅水库典型水生植物的生长期一般是4月到11月(徐景先, 2009), 本文为研究全生长期官厅水库的水生植物生长时空变化, 选择2016年4月到11月期间14景云量较少、质量较高的Landsat 8 OLI数据(成像时间: 2016-04-25、2016-05-04、2016-06-05、2016-06-21、2016-07-07、2016-07-23、2016-08-08、2016-08-31、2016-09-09、2016-10-11、2016-11-03、

2016-11-19), 进行水生植物识别。Landsat 8 OLI影像可免费获取且时间分辨率较好, 适用于官厅水库年内水生植物生长时序性研究。

2 研究方法

2.1 实测光谱处理

实测光谱由于受到外部环境和目标本身光谱特性及仪器等多种因素的影响, 获取的光谱数据中包含地物光谱数据和噪声两部分。通过光谱数据预处理可以有效消除噪声并且突出地物光谱特征。光谱数据预处理主要包括光谱平滑去噪、水汽吸收波段剔除及光谱曲线均值处理(林川等, 2013)。

本文选择将所测光谱中前后10个波段的平均值作为滤波后的光谱值以平滑波形。由于大气中的水汽的强烈吸收, 地物光谱在1 350–1 450 nm、1 800–2 000 nm以及2 350–2 500 nm水汽吸收波段基本上都是噪声, 因此剔除该范围内光谱值。将每个采样点测的10条光谱进行均值处理, 得到该采样点的光谱反射曲线。

为了检验Landsat 8 OLI影像大气校正的效果和便于应用实测光谱分析结果指导多光谱影像Landsat 8 OLI进行水生植物识别研究, 本研究根据野外实测ASD波谱, 利用Landsat 8 OLI波谱响应函数, 即基于Landsat 8 OLI各个波段的最大值一半处的波宽(FWHM)的波长中心和高斯滤波函数, 把ASD波谱重采样到Landsat 8 OLI对应的波段, 重采样公式(袁金国等, 2009)如下:

$$\rho = \sum_{\lambda=1}^N (\beta(\lambda) \times \rho(\lambda)) / \sum_{\lambda=1}^N (\beta(\lambda)) \quad (1)$$

其中, ρ 和 $\rho(\lambda)$ 分别代表重采样后对应的Landsat 8 OLI影像波段反射率和野外ASD波谱反射率, $\beta(\lambda)$ 代表不同波段对应的光谱响应函数权重值。

2.2 影像预处理

由于电磁波在传输过程中会受到光照、大气、太阳位置等影响, 使得卫星传感器接收地物的反射率相对于真实地物反射率发生了改变(王婷婷等, 2015)。这就需要对影像进行大气校正处理消除大气影响, 还原真实地表反射率。本研究使用ENVI 5.3软件对Landsat 8 OLI影像进行大气校正、影像融合、几何校正等预处理。大气校正使用的是基于MODTRAN辐射传输模型的FLAASH大气校正算法(Cooley *et al.*, 2002)。影像融合使用的是Gram-Schmidt

表1 官厅水库湿地植物类型及光谱数

Table 1 Wetland vegetation types and spectra numbers of Guanting Reservoir

植物类型 Vegetation types	典型湿地植物 Typical wetland plant	光谱数 Number of spectrum
沉水植物 Submerged plants	鳃齿眼子菜 <i>Potamogeton pectinatus</i>	9
	穗状狐尾藻 <i>Myriophyllum spicatum</i>	8
	狸藻 <i>Utricularia vulgaris</i>	3
	两栖蓼 <i>Polygonum amphibium</i>	20
浮水植物 Floating plants		
挺水植物 Emergent plants	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	10
	香蒲 <i>Typha angustifolia</i>	10

表2 Landsat 8 OLI 波段参数设置

Table 2 Spectral bands setting of Landsat 8 OLI

波段名称 Band names	波长 Wavelength (μm)	空间分辨率 Spatial resolution (m)
海岸 Coastal	0.433–0.453	30
蓝 Blue	0.450–0.515	30
绿 Green	0.525–0.600	30
红 Red	0.630–0.680	30
近红外 NIR	0.845–0.885	30
短波红外1 SWIR1	1.560–1.660	30
短波红外2 SWIR2	2.100–2.300	30
全色 Pan	0.500–0.680	15
卷云 Cirrus	1.360–1.390	30

(GS)变换融合方法,是一种高保真的融合方法(李存军等, 2004; 于海洋等, 2007)。

2.3 光谱吸收深度特征提取

连续统去除通过将反射光谱吸收强烈部分的波段特征进行转换,在一个共同基线的基础上比较反射光谱的吸收特征,从而进行光谱吸收特征分析和光谱特征波段选择(Zhang, 2010)。根据连续统去除处理的曲线,进一步得到吸收位置(WP)、吸收深度(DEP)等光谱吸收特征参数,计算公式(Meer, 2004)如下:

$$DEP = 1 - CR_{\min} \quad (2)$$

$$WP = \lambda_{(CR_{\min})} \quad (3)$$

式中, CR_{\min} 为吸收谷内连续统去除后的最小值, $\lambda_{(CR_{\min})}$ 为吸收谷连续统去除后最小值对应的波长。

2.4 单因素方差分析

用单因素方差分析可研究一个控制变量的不同水平是否对观测变量产生了显著影响(薛薇, 2013)。利用单因素方差分析可以对选择的光谱特征变量进行筛选,找出显著区分不同植被类型的光谱特征变量。单因素方差分析采用的统计推断方法是计算 F 统计量,进行 F 检验。计算公式(林川等, 2013)如下所示:

$$SSA = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (5)$$

$$F = \frac{SSA / (k - 1)}{SSE / (n - k)} \quad (6)$$

式中, SSA 为组间离差平方和,反映了控制变量的影响; SSE 为组内离差平方和,反映了数据抽样误差大小程度。 F 的比统计量是平均组间平方和与平均组内平方和的比, k 为水平数, n_i 为第 i 个水平下的样本容量。

2.5 支持向量机分类

Vapnik等根据统计学习的相关知识提出了支持向量机(SVM),该方法在解决小样本、非线性问题上表现出特有的优势,已经广泛应用到遥感图像分类的研究中(Vapnik *et al.*, 1997; Brown *et al.*, 2000; Foody & Mathur, 2004)。SVM的基本思想是寻找一个分类超平面使得训练样本中的样本能被分开,并且距离该平面尽可能远(贾萍等, 2008)。

SVM模型的分类是基于对训练样本数据进行

训练而得到的分类模型进行的,根据有限样本信息对训练样本的学习精度,寻求识别任意样本的推广能力,一般分为一对一SVM,一对多SVM,二叉树SVM和有向无环图SVM (Guyon *et al.*, 2002)。本研究采用一对多SVM进行水生植物分类研究,利用遥感图像处理软件ENVI 5.3监督分类的SVM模块实现。

3 结果和讨论

3.1 实测光谱预处理分析

不同种类的水生植物实测光谱曲线都呈现出典型的植物光谱特征,并与水体光谱差异明显(图2A–2C)。由于叶绿素的反射作用增强,水生植物光谱曲线在560 nm附近形成明显的反射“绿峰”;在红光波段(670 nm为中心)附近有较强的吸收,光谱曲线形成明显的吸收谷;在680–740 nm之间的反射率增高最快,出现“红边”效应;由于叶细胞结构对近红外光强烈的反射作用,水生植物光谱在740–1300 nm之间光谱反射率较高(Carter, 1993)。研究发现随着植物叶含水量增加,将使其整个光谱反射率降低(田永超等, 2005; 林川等, 2011)。沉水植物茎叶浸于水中,入射能量被水吸收,受水体影响相比浮水和挺水植物较大,结合实测数据发现其光谱反射率比浮水、挺水植物低,尤其是在800 nm以后的近红外和短波红外区域,三者的反射率高低差异较为明显。在小范围水域内,水体组分变化不大,冠层水深就成为水体影响沉水植物的光谱反射率的一个重要因素;邹维娜等(2012)以沉水植物竹节水松(*Cabomba caroliniana*)为例研究沉水植物的光谱特征,发现冠层水深会影响沉水植物的光谱反射率,冠层水深增加,沉水植物的光谱反射率明显下降。图2B、2D为ASD实测高光谱重采样结果,可利用重采样光谱曲线模拟Landsat 8 OLI多光谱影像地物光谱曲线,进行不同生活型的水生植物特征识别研究。

3.2 光谱吸收特征分析

对采集的光谱曲线进行连续统去除可以更加直观地发现不同植物在特定波段的吸收特征差异。由于采集的光谱曲线剔除水汽干扰较大的波段后不连续,短波红外波段范围连续统去除效果不佳。可根据Landsat 8 OLI影像波段所在中心波长范围(表2),剔除水汽干扰范围,选择可见光和近红外(350–1000 nm)波长范围利用ENVI5.3软件Continuum

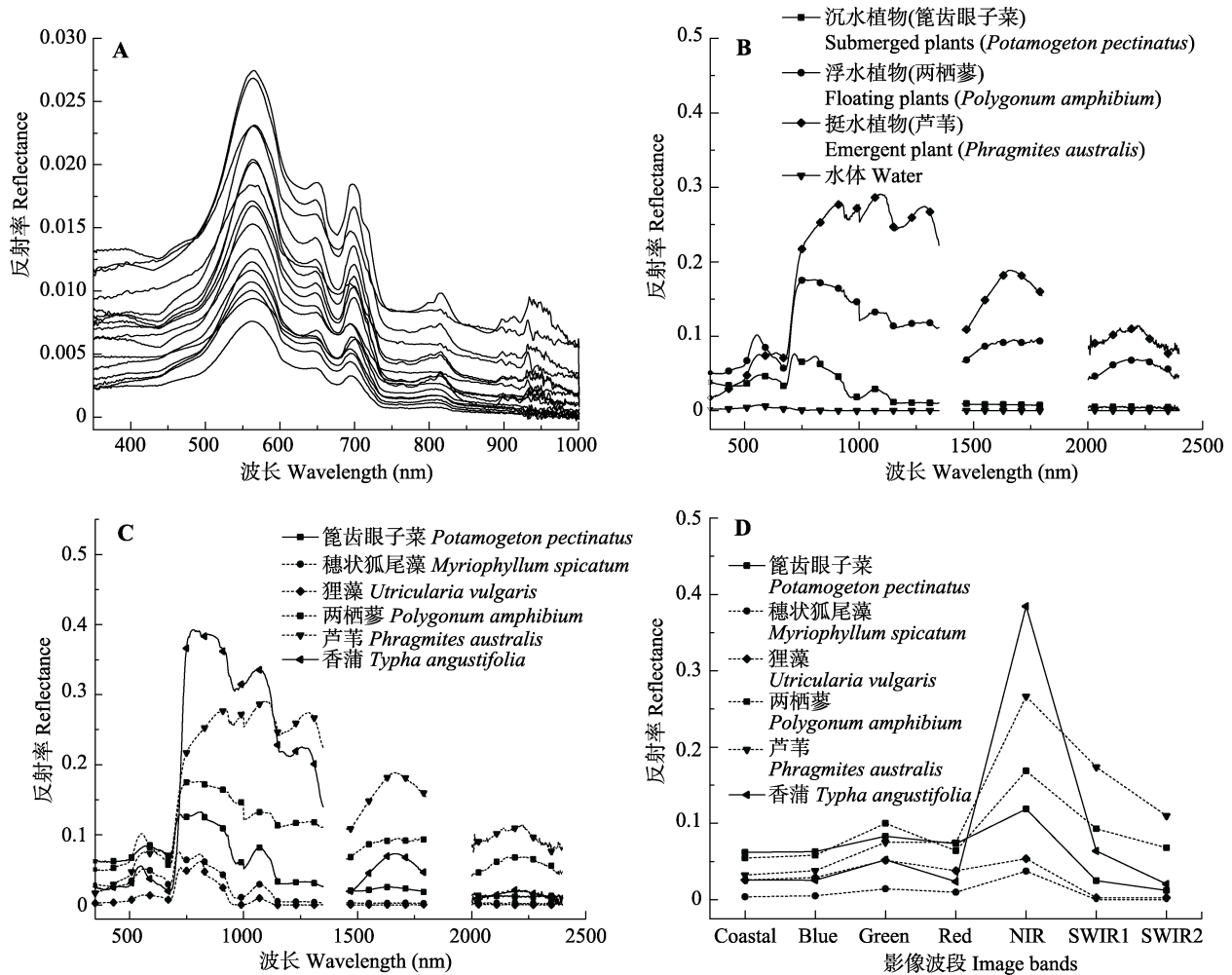


图2 A, 实测水体样点光谱曲线图。B, 典型代表性沉水植物、浮水植物、挺水植物和水体样点光谱曲线对比图。C, 官厅水库典型水生植物种类光谱曲线图。D, 水生植物光谱重采样结果图。

Fig. 2 A, Measured water sample spectral curve. B, Typical representative submerged plants, floating plants, emergent plants, and waters comparison of sample points spectrum curves. C, Guanting Reservoir typical aquatic plant species spectral curve. D, Aquatic plant spectrum resampling results.

Removal模块对ASD实测光谱数据进行连续统去除, 处理结果如图3A所示。从连续统去除值可以直观地发现3种生活型植物均在496、675和955 nm附近呈现较明显的吸收的特征, 对全部实测光谱曲线进行统计发现, 在可见光范围, 沉水植物的吸收特征最弱, 496 nm、675 nm平均吸收深度仅为0.430 7、0.584 9。而在近红、短波红外范围, 沉水植物的吸收特征最强, 955 nm附近平均吸收深度为0.649 9。

光谱重采样避开了噪声波段, 光谱曲线呈一条连续的曲线, 补充了短波红外波段范围的光谱, 对其进行连续统去除, 选择3种典型的植被种类处理结果如图3B所示。3种生活型植物均在Blue、Red、SWIR1波段呈现较明显的吸收特征, 实测光谱的496和675 nm分别对应了Blue和Red波段所在波谱

范围。为了更好地结合实测光谱特征筛选结果指导Landsat 8 OLI影像水生植物识别, 选择重采样后光谱曲线进行光谱特征筛选。选取3种生活型植物的重采样光谱曲线, 对其光谱连续统去除后吸收深度特征参数统计结果如表3所示。

结合图3和表3可以发现, 沉水植物在可见光波长范围内光谱吸收特征最弱, 而在SWIR1波段处吸收特征最强。三种生活型水生植被的连续统去除值在Blue、Red和SWIR1波段处的吸收深度都具有较好的差异性。利用实测光谱重采样光谱曲线样本进行单因素方差分析, 验证重采样光谱曲线的7个波段和光谱连续统去除后的蓝波段(BlueCR)、光谱连续统去除后的红波段(RedCR)和光谱连续统去除后的短波红外1波段(SWIR1CR)是否能够较好的区分3种

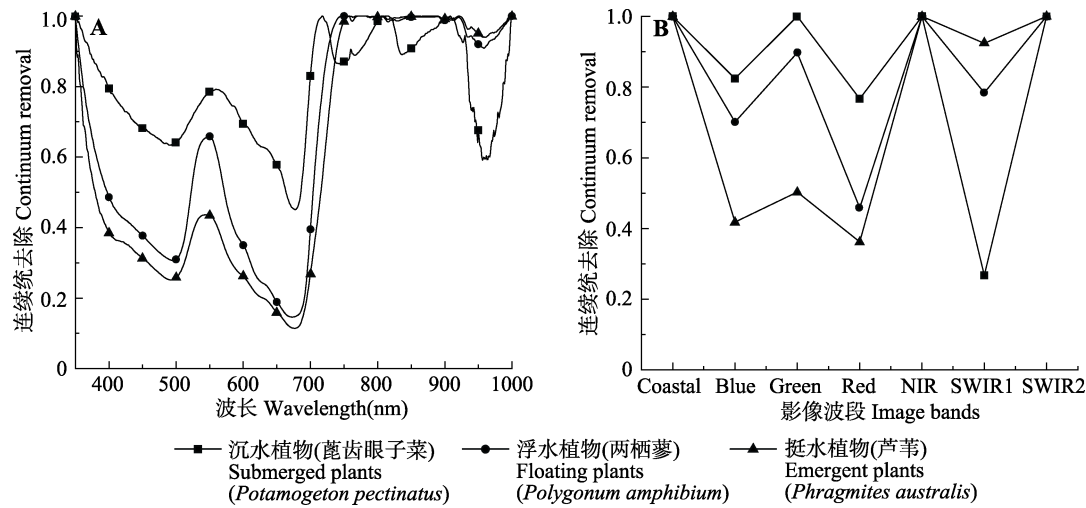


图3 连续统去除结果。A, 高光谱辐射计实测光谱。B, 光谱重采样结果。
Fig. 3 Continuous removal result. A, Spectroradiometer measured spectrum. B, The result of spectral resampling.

表3 官厅水库3种湿地植物类型吸收特征参数统计
Table 3 Statistics of parameters of absorption characteristic in 3 types of wetland vegetation types in Guanting Reservoir

植物类型 Vegetation type	光谱数 Number of spectra	Blue处吸收深度平均值 Blue absorption depth average	Red处吸收深度平均值 Red absorption depth average	SWIR1处吸收深度平均值 SWIR1 absorption depth average
沉水植物 Submerged plants	20	0.320 2	0.357 9	0.797 7
浮水植物 Floating plants	20	0.595 5	0.774 0	0.216 7
挺水植物 Emergent plants	20	0.727 2	0.846 6	0.354 2

生活型水生植被。组间差异性较强光谱变量可以有效区分3种生活型水生植物,而不同生活型水生植物光谱变量组内又存在差异性,主要是在同一生活型水生植物中不同物种及其环境特征的光谱差异。单因素方差法可以有效筛选出组间差异性较强的变量,减小组内差异的干扰,找到有效区分3种生活型水生植物的光谱变量。单因素方差分析结果如图4所示,SWIR1CR在3种不同水生植被类型中存在显著差异;其次是在NIR波段,也存在较强的差异性。Coastal、Blue和Red波段在3种植被类型中差异不显著,不适合作为区分不同生活型水生植物的特征波段。

3.3 影像特征分析

为了使得地面实测光谱与影像数据相匹配,利用Landsat 8 OLI传感器的光谱响应函数,将实测光

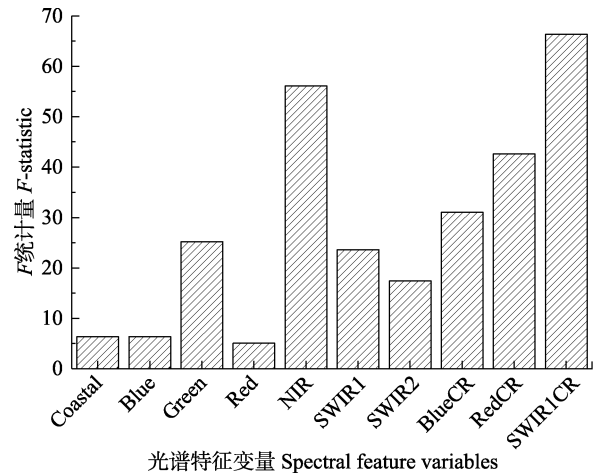


图4 光谱特征变量单因素方差分析结果。
Fig. 4 One-way ANOVA results of spectral characteristic variables.

谱重采样以模拟Landsat 8 OLI多光谱数据。实测光谱重采样结果与相同地理位置的影像反射光谱对比结果如图5所示。官厅水库库区沉水、挺水植物分布面积较大,影像像元较好地表现出二者的光谱信息。二者曲线相似,光谱重建效果较好,前文光谱特征分析结果可应用指导二者的多光谱影像分类提取研究。浮水植物分布面积较小,在融合后的15 m空间分辨率影像上,浮水植物的光谱信息受其他水生植物和水体影响较大。它的影像光谱特征与实测光谱特征产生差异,对于3类水生植物在影像上的类型区分,需结合影像进一步分析。

在影像上选取不同类型水生植物样本进行灰度直方图统计如图6所示。在结合植被指数的遥感影

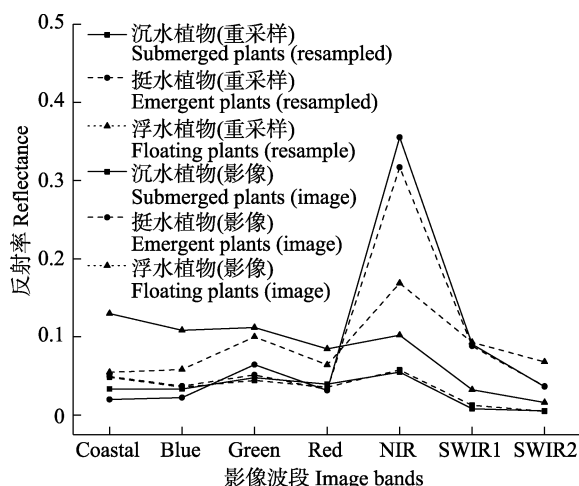


图5 Landsat 8 OLI影像反射率光谱和实测光谱重采样结果对比。

Fig. 5 Comparison between the reflectance spectra of Landsat 8 and the measured spectral resampling.

像植被类型提取的研究中, 包含NIR波段特征信息的归一化植被指数(NDVI)应用广泛, 也取得了不错的效果(徐德兰等, 2013; 李瑶等, 2016)。但是在结合官厅水库库区野外实测样点和遥感影像分析发现, 2016年7月官厅水库部分区域沉水植物长势较好, 植被盖度较高。该区域沉水植物的影像NDVI值与挺水植物相近, 易出现混分。而浮水植物的NDVI值与盖度较低的沉水植物的NDVI值存在交叉部分。NDVI指数在本研究中对于浮水、挺水植物的区分效果较好。遥感影像的连续统去除同样采用ENVI 5.3软件Continuum Removal模块进行, 在SWIR1CR波段灰度影像上, 沉水植物与挺水植物的区分效果较好。综合考虑图6A、6B结果, 选择SWIR1CR和NDVI

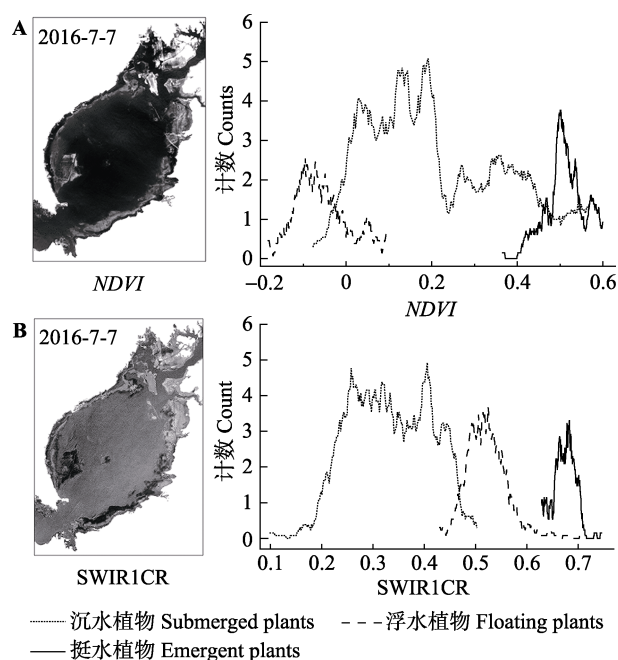


图6 不同类型水生植物影像灰度直方图统计结果。A, 归一化植被指数(NDVI)灰度影像。B, 连续统去除后短波红外1波段(SWIR1CR)灰度影像。

Fig. 6 The results of histogram of the gray histogram of different types of aquatic plants. A, Normalized differential vegetation index (NDVI) grey image. B, Short wave infrared 1 band, which was processed by continuum removal (SWIR1CR) grey image.

相结合进行3类水生植物的区分。结合多时相遥感影像3种水生植物样点的NDVI和SWIR1CR的时间序列曲线(图7A, 7B)可以发现, NDVI和SWIR1CR相结合可较好的区分不同时相的3类水生植物。

3.4 分类提取和精度验证

结合光谱特征分析和影像特征分析结果, 选择影像NDVI和SWIR1CR作为特征波段, 提取沉水植

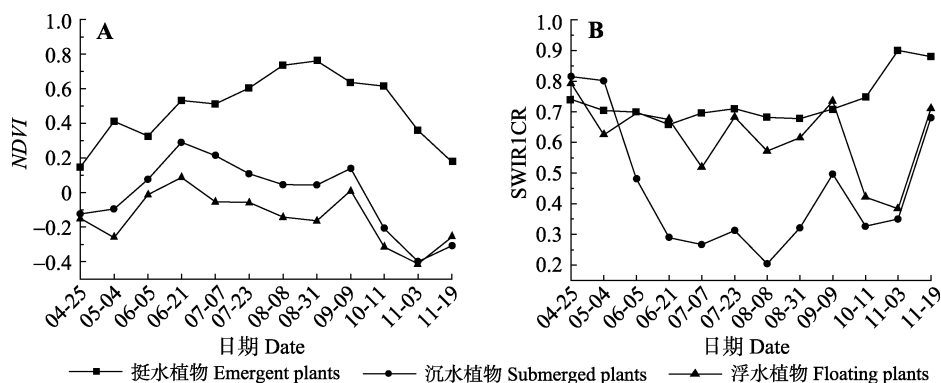


图7 多时相遥感影像3种水生植物样点的归一化植被指数(NDVI)(A)和连续统去除后短波红外1波段(SWIR1CR)时间序列曲线(B)。

Fig. 7 Time series curves of normalized differential vegetation index (NDVI)(A) and short wave infrared 1 band, which was processed by continuum removal (SWIR1CR)(B) for three types of aquatic plants in multitemporal remote sensing images.

物、浮水植物和挺水植物。选择研究区2016-07-07影像为分类对象,水体、沉水、浮水和挺水植物各选取20个样点进行SVM训练分类。对于分类结果,选择研究区2016-07-03 WorldView_2影像进行精度验证,混淆矩阵的计算采用ENVI5.3软件的Confusion Matrix-Using Ground truth ROIS,结果如表4所示。高分辨率影像上沉水、浮水和挺水植物三者在纹理和光谱特征上均有明显差异(图8)。

3.5 时空变化分析

利用筛选的特征波段进行的SVM分类,经混淆矩阵精度验证,水生植物分类总体精度达到86.33%。结合特征波段和SVM分类方法对各时相影像进行水生植物分类,得到12幅不同生长期官厅水库库区水生植物分类结果,如图9所示。

根据年内不同生长期水生植物分类结果(图9)和水生植物年内分布面积变化统计(图10),可以发现官厅水库库区挺水植物年内时空分布变化幅度较小,沉水植物时空变化幅度较大。沉水植物的分布面积于7月份达到最大,沉水植物和挺水植物的分布面积最高约占库区总面积的35.13%。从库区水生植物的NDVI时间序列曲线(图7A)可以看出,库区挺水植物自6月中下旬进入生长旺盛期,并于9月上旬长势最盛。而从水生植物分布面积变化统计结果看,

库区水生植物面积自6月初开始迅速增长,7月中旬分布面积最广;自10月初开始逐渐减少,进入衰落期。

在考虑水质环境不会发生较大改变的情况下,认为库区水位变化会是水生植物分布面积变化的原因,尤其对是分布面积变化最显著的沉水植物的影响。沉水植物的生长主要受到光补偿深度的影响,光补偿深度是水体透明度的1.5倍,在光补偿深度小于水深的水域,沉水植物无法存活(和田健, 1989)。根据北京市水务局2016年官厅水库水位统计数据(图10A),库区水位从7月上旬到8月下旬增长迅速,水位增加近0.5 m; 8月下旬至9月上旬,水位增长速度放缓; 9月中下旬至11月中旬,水位增长迅速,增长近0.6 m。水位的迅速增长,短时间内会增加沉水植物的冠层水深高度,降低沉水植物冠层反射率(邹维娜等, 2012); 对于水位增长前冠层水深较大处的沉水植物,水位迅速增长后,遥感影像上该处光谱信息由水体主导,沉水植物影像监测到的沉水植物面积减少。水位增长放缓后,处于生长旺盛期的沉水植物冠层接近水面,影像上该处的光谱信息会重新由沉水植物所主导,监测到的沉水植物面积增加。而在长期高水位的情况下,达不到所需的光补偿深度的水域,沉水植物会因光照不足而开始消

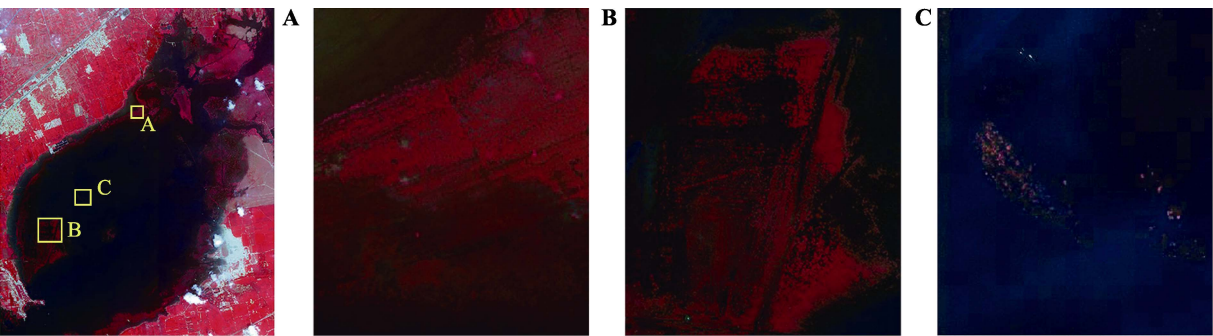


图8 官厅水库库区WorldView_2影像图和局部水生植物影像特征展示。A, 挺水植物。B, 沉水植物。C, 浮水植物。
Fig. 8 The WorldView_2 image of the reservoir area and the display of local aquatic plant image features. A, Emergent plants. B, Submerged plants. C, Floating plants.

表4 分类精度验证
Table 4 Classification accuracy test

地物类型 Category	水体 Water body	沉水植物 Submerged plants	浮水植物 Floating plants	挺水植物 Emergent plants
水体 Water body	820	312	186	15
沉水植物 Submerged plants	47	2 969	9	86
浮水植物 Floating plants	11	0	76	8
挺水植物 Emergent plants	39	14	1	731
总体精度 Overall accuracy	86.33%	Kappa系数 Kappa coefficient	0.76	

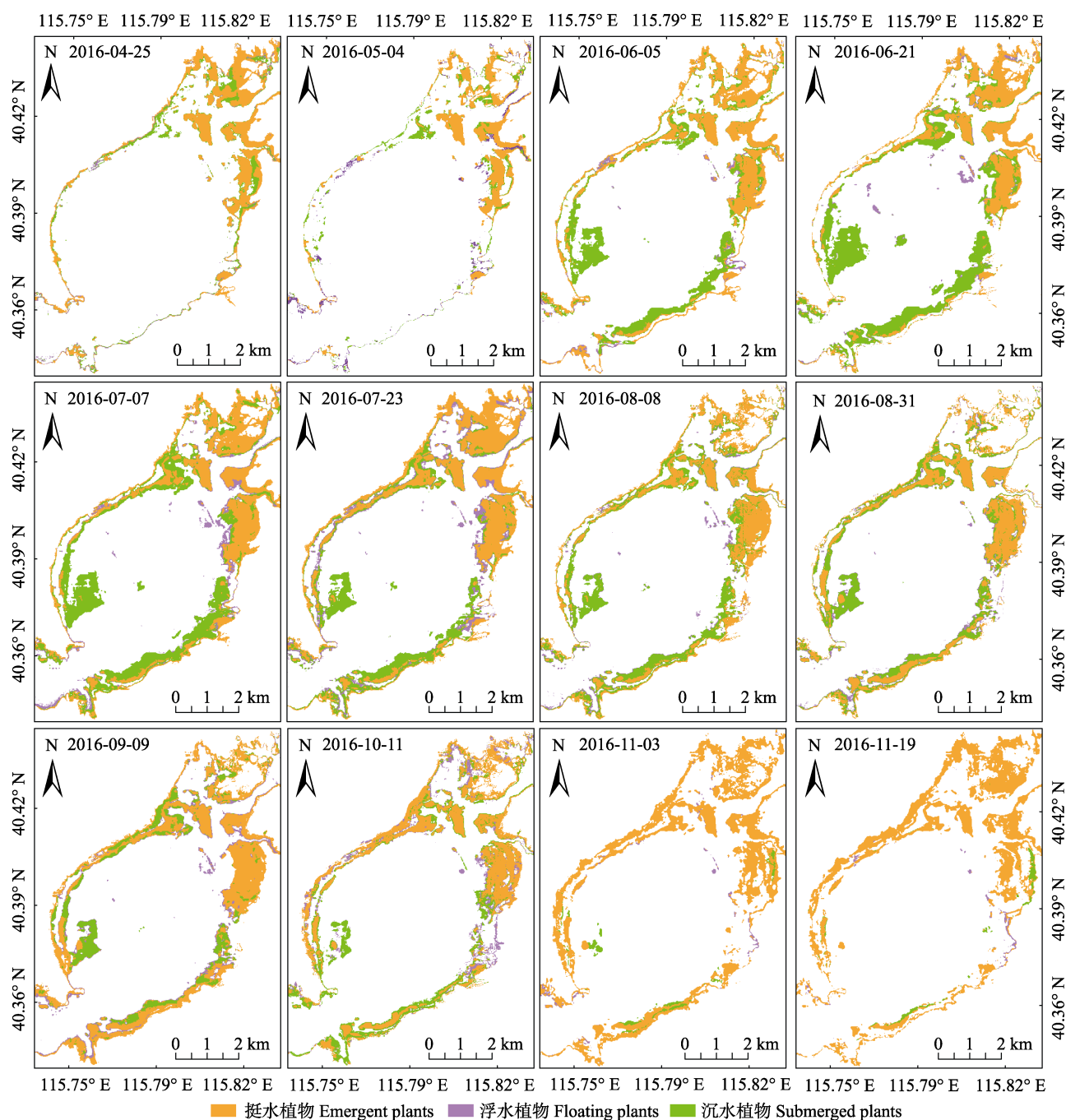


图9 不同生长期官厅水库库区水生植物分类结果图。

Fig. 9 Aquatic plant classification results of different growth stage in Guanting Reservoir.

亡。水位的影响解释了沉水植物分布面积在7月下旬减少(图10B)和 $NDVI$ 值出现波动的原因(图7A)。

4 结论和展望

由于水生植物包括沉水植物和挺水植物在物种水平和生存环境的不同, 其光谱特征也存在差异。本文根据2016-07-07日官厅水库库区现场采集的水生植物的光谱曲线, 采用光谱重采样和光谱连续统

去除法提取其能够区分不同类型水生植物的光谱特征波段指导Landsat 8 OLI影像分类。选定重采样后的7个波段和经连续统去除后的蓝、红、SWIR1波段共计10个特征波段。利用单因素方差法, 筛选其中对于不同水生植物类型差异性显著的光谱特征波段, 结果表明SWIR1CR对于官厅水库库区不同水生植物类型的区分效果最佳。

结合影像和野外实测点发现种群盖度高且冠层

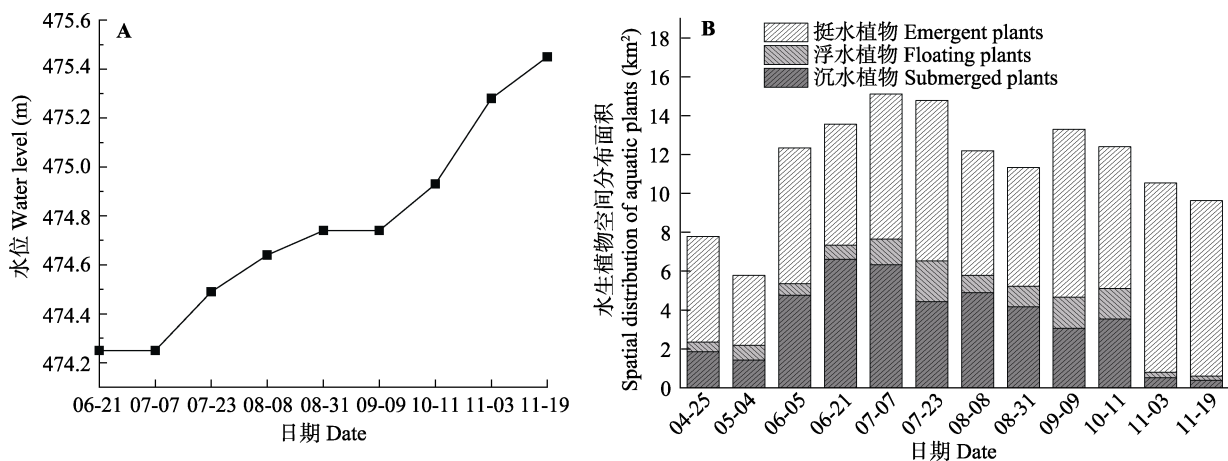


图10 官厅水库2016年水位统计结果(A)和年内水生植物空间分布面积变化统计(B)。

Fig. 10 The statistical results of the water level in Guanting Reservoir in 2016 (A) and the spatial distribution of aquatic plants in the year (B).

水深较小的沉水植物与挺水植物影像 $NDVI$ 光谱特征相近,简单的利用 $NDVI$ 提取水生植物类型,容易造成挺水植物与沉水植物的混分。结合前文光谱特征分析结果,对不同类型水生植物在 $NDVI$ 和 $SWIR1CR$ 上的影像灰度值分布进行统计,发现在实际运用遥感影像识别3类水生植物时, $SWIR1CR$ 波段和 $NDVI$ 相结合效果较好。

基于光谱特征分析和影像特征分析结果,选取 $SWIR1CR$ 和 $NDVI$ 作为特征波段,采用支持向量机的方法对官厅水库库区的水生植物进行提取,经验证2016-07-07单幅影像提取精度达到86.33%。使用此方法对12期影像进行水生植物提取进而研究官厅水库库区水生植物年内生长期时空分布变化情况。根据分类结果分析发现,库区的沉水植物年内生长分布变化幅度较大;4月份库区开始出现一定面积的水生植物,6月份库区水生植物生长迅速,分布面积大幅度增长,7月份水生植物分布面积最广,约占库区面积的35.13%。水生植物生长旺盛期从6月初一直持续到9月中下旬,10月份开始衰减,11月份水生植物分布面积仅占库区面积的20%。研究发现库区水位变化对于沉水植物的生长分布影响较大,生长旺盛期的沉水植物会因水位的迅速增长,而在影像中表现出分布面积减少的情况。短期的水位增长对库区挺水植物影响不大。

本研究应用地物光谱仪实测水生植物光谱并筛选种类识别特征,指导宽波段多光谱影像Landsat 8 OLI水生植被种类遥感识别。在实际应用中,可利用实测光谱数据特征筛选指导遥感影像解译、分析,

从而进行大尺度遥感监测水生植物的分布和动态变化。本文研究虽然取得较为理想的结果,但是仍然存在不足之处,中等分辨率影像空间分辨率较低,存在混合像元现象,本研究采用基于像素的分类方法,分类方法有待改进;对于遥感数据源单一的问题和复杂水环境影响的问题,结合多源遥感数据的水生植物识别研究和设计光谱控制实验研究将是下一步开展的研究工作。另外,官厅水库属于水库型湿地,水质条件较好,水生植被呈明显梯度空间分布,相对于内陆湿地来说不具有典型代表性,未来应补充对于湖泊型湿地及水质条件较差的水域水生植物识别研究,验证本方法的适用性。

致谢 感谢阿多博士,杜博、谷金芝和孙伟东同学对本文野外采样工作的支持与帮助!

参考文献

- Brown M, Lewis HG, Gunn SR (2000). Linear spectral mixture models and support vector machines for remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 38, 2346–2360.
- Carter GA (1993). Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. *American Journal of Botany*, 80, 239–243.
- Chen W, Hu D, Fu BQ, Gong ZN, Gao W, Hong JM, Du GS (2007). *Study on Wetland Biodiversity in Beijing*. Science Press, Beijing. 46–58. [陈卫, 胡东, 付必谦, 宫兆宁, 高武, 洪剑明, 杜桂森 (2007). 北京湿地生物多样性研究. 科学出版社, 北京. 46–58.]
- Coolley T, Anderson GP, Felde GW, Hoke ML (2002). FLAASH, a MODTRAN4-Based Atmospheric Correction Algorithm, its application and validation. IEEE, Toronto,

- Canada. DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1026134.
- Du GS, Wang JT, Zhang WH, Feng LQ, Liu J (2004). On the nutrient status of Guanting Reservoir. *Journal of Lake Sciences*, 16, 277–281. [杜桂森, 王建厅, 张为华, 冯伶亲, 刘静 (2004). 官厅水库水体营养状况分析. 湖泊科学, 16, 277–281.]
- Foody GM, Mathur A (2004). A relative evaluation of multi-class image classification by support vector machines. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 42, 1335–1343.
- Guyon I, Weston J, Barnhill S, Vapnik V (2002). Gene selection for cancer classification using support vector machines. *Machine Learning*, 46, 389–422.
- He TJ (1989). *Water Environment Indicators*. China Environmental Science Press, Beijing. [合田健 (1989). 水环境指标. 中国环境科学出版社, 北京.]
- Jia P, Li HT, Lin H, Gu HY, Han YS (2008). Research on multi-source remote sensing image classification based on SVM. *Science of Surveying and Mapping*, 33(4), 21–22. [贾萍, 李海涛, 林卉, 顾海燕, 韩颜顺 (2008). 基于SVM的多源遥感影像分类研究. 测绘科学, 33(4), 21–22.]
- Li CJ, Liu LY, Wang JH, Wang RC (2004). Comparison of two methods of fusing remote sensing images with fidelity of spectral information. *Journal of Image & Graphics*, 9, 1376–1385. [李存军, 刘良云, 王纪华, 王人潮 (2004). 两种高保真遥感影像融合方法比较. 中国图象图形学报, 9, 1376–1385.]
- Li JS, Wu D, Wu YF, Liu HX, Shen Q, Zhang H (2009). Identification of algae-bloom and aquatic macrophytes in Lake Taihu from *in-situ* measured spectra data. *Journal of Lake Sciences*, 21, 215–222. [李俊生, 吴迪, 吴远峰, 刘海霞, 申茜, 张浩 (2009). 基于实测光谱数据的太湖水华和水生高等植物识别. 湖泊科学, 21, 215–222.]
- Li Y, Zhang LF, Huang CP, Wang JN, Cen Y (2016). Monitor of cyanobacteria bloom in Lake Taihu from 2001 to 2013 based on MODIS temporal spectral data. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 36, 1406–1411. [李瑶, 张立福, 黄长平, 王晋年, 岑奕 (2016). 基于MODIS植被指数时间谱的太湖2001年—2013年蓝藻爆发监测. 光谱学与光谱分析, 36, 1406–1411.]
- Lin C, Gong ZN, Zhao WJ (2010). The extraction of wetland hydrophytes types based on medium resolution TM data. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 6460–6469. [林川, 宫兆宁, 赵文吉 (2010). 基于中分辨率TM数据的湿地水生植被提取. 生态学报, 30, 6460–6469.]
- Lin C, Gong ZN, Zhao WJ (2011). Hyperspectral estimation models for plant community water content at both leaf and canopy levels in Wild Duck Lake wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 6645–6658. [林川, 宫兆宁, 赵文吉 (2011). 叶冠尺度野鸭湖湿地植物群落含水量的高光谱估算模型. 生态学报, 31, 6645–6658.]
- Lin C, Gong ZN, Zhao WJ, Fan L (2013). Identifying typical plant ecological types based on spectral characteristic variables: A case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 1172–1185. [林川, 宫兆宁, 赵文吉, 樊磊 (2013). 基于光谱特征变量的湿地典型植物生态类型识别方法——以北京野鸭湖湿地为例. 生态学报, 33, 1172–1185.]
- Liu K, Zhao WJ, Guo XY, Hu DY, Gong ZN, Long J (2010). Spectral bands of typical wetland vegetation in the Wild Duck Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 5853–5861. [刘克, 赵文吉, 郭逍宇, 胡德勇, 宫兆宁, 龙娟 (2010). 野鸭湖典型湿地植物光谱特征. 生态学报, 30, 5853–5861.]
- Meer FVD (2004). Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 5, 55–68.
- Oyama Y, Fukushima T, Matsushita B, Matsuzaki H, Kamiya K, Kobinata H (2015). Monitoring levels of cyanobacterial blooms using the visual cyanobacteria index (VCI) and floating algae index (FAI). *International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation*, 38, 335–348.
- Schmidt KS, Skidmore AK (2003). Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland. *Remote Sensing of Environment*, 85, 92–108.
- Shi H, Li XW, Niu ZC, Li JY, Li Y, Li N (2016). Remote sensing information extraction of aquatic vegetation in Lake Taihu based on Random Forest Model. *Journal of Lake Sciences*, 28, 635–644. [侍昊, 李旭文, 牛志春, 李继影, 李杨, 李宁 (2016). 基于随机森林模型的太湖水生植被遥感信息提取. 湖泊科学, 28, 635–644.]
- Tang JW, Tian GL, Wang XY, Wang XM, Song QJ (2004). The methods of water spectra measurement and analysis I: Above-water method. *Journal of Remote Sensing*, 8, 37–44. [唐军武, 田国良, 汪小勇, 王晓梅, 宋庆君 (2004). 水体光谱测量与分析I: 水面以上测量法. 遥感学报, 8, 37–44.]
- Tian YC, Cao WX, Jiang D, Zhu Y, Xue LH (2005). Relationship between canopy reflectance and plant water content in rice under different soil water and nitrogen conditions. *Acta Phytoecologica Sinica*, 29, 318–323. [田永超, 曹卫星, 姜东, 朱艳, 薛利红 (2005). 不同水氮条件下水稻冠层反射光谱与植株含水率的定量关系. 植物生态学报, 29, 318–323.]
- Ungar SG, Pearlman JS, Mendenhall JA, Reuter D (2003). Overview of the earth observing one (EO-1) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 1149–1159.
- Vapnik V, Golowich SE, Smola A (1997). Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 9, 281–287.
- Wang TT, Li SS, Li A, Feng XX, Wu YW (2015). Land cover classification in Beijing using Landsat 8 image. *Journal of*

- Image and Graphics*, 20, 1275–1284. [王婷婷, 李山山, 李安, 冯旭祥, 吴业炜 (2015). 基于Landsat 8卫星影像的北京地区土地覆盖分类. *中国图象图形学报*, 20, 1275–1284.]
- Wang X, Zhang F, Hsiang-Te K, Yu H (2017). Spectral response characteristics and identification of typical plant species in Ebinur lake wetland national nature reserve (ELWNNR) under a water and salinity gradient. *Ecological Indicators*, 81, 222–234.
- Wetzel RG (1983). *Limnology*. 3rd ed. Academic Press, Cambridge, USA.
- Wu ZB (2011). *Aquatic Plants and Water Ecological Restoration*. Science Press, Beijing. [吴振斌 (2011). 水生植物与水体生态修复. 科学出版社, 北京.]
- Xu DL, Zhang DD, Zhang CY, Wan L, Han BP (2013). Distribution and change of macrophytes in Luoma Lake for 3 periods. *Wetland Science*, 11, 320–325. [徐德兰, 张东东, 张翠英, 万蕾, 韩宝平 (2013). 3个时期骆马湖大型水生植物的分布及变化. *湿地科学*, 11, 320–325.]
- Xu JX (2009). *Wetland Plants in Beijing*. Beijing Science and Technology Press, Beijing. [徐景先 (2009). 北京湿地植物. 北京科学技术出版社, 北京.]
- Xue W (2013). *SPSS Statistical Analysis Method and Application*. Electronic Industry Press, Beijing. [薛薇 (2013). SPSS统计分析方法及应用. 电子工业出版社, 北京.]
- Yang QX (1998). Ecological functions of aquatic vegetation in East Taihu Lake and its reasonable regulation. *Journal of Lake Sciences*, 10, 67–72. [杨清心 (1998). 东太湖水生植被的生态功能及调节机制. *湖泊科学*, 10, 67–72.]
- You HL, Xu LG, Liu GL, Wu YM, Liu LZ, Jiang JH (2016). Change of wetland landscape at Poyang Lake and its response to water level fluctuation. *Chinese Journal of Ecology*, 35, 2487–2493. [游海林, 徐力刚, 刘桂林, 吴永明, 刘丽贞, 姜加虎 (2016). 鄱阳湖湿地景观类型变化趋势及其对水位变动的响应. *生态学杂志*, 35, 2487–2493.]
- Yu HY, Yan BK, Gan FP, Chi WX, Wu FD (2007). Hyperspectral image fusion by an enhanced Gram Schmidt spectral transformation. *Geography and Geo-Information Science*, 23(5), 39–42. [于海洋, 闫柏琨, 甘甫平, 迟文学, 武法东 (2007). 基于Gram Schmidt变换的高光谱遥感图像改进融合方法. *地理与地理信息科学*, 23(5), 39–42.]
- Yuan BY (2000). Analysis of water quality status and tendency of Guanting Reservoir. *Beijing Water*, (5), 29–31. [袁博宇 (2000). 官厅水库水质现状及趋势分析. *北京水务*, (5), 29–31.]
- Yuan JG, Niu Z, Wang XP (2009). Atmospheric correction of Hyperion hyperspectral image based on FLAASH. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 29, 1181–1185. [袁金国, 牛铮, 王锡平 (2009). 基于FLAASH的Hyperion高光谱影像大气校正. *光谱学与光谱分析*, 29, 1181–1185.]
- Zhang M (2010). Spectral indices for estimating ecological indicators of karst rocky desertification. *International Journal of Remote Sensing*, 31, 2115–2122.
- Zhang SX, Duan HT, Gu XH (2008). Remote sensing information extraction of hydrophytes based on the retrieval of water transparency in Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 20, 184–190. [张寿选, 段洪涛, 谷孝鸿 (2008). 基于水体透明度反演的太湖水生植被遥感信息提取. *湖泊科学*, 20, 184–190.]
- Zhen Z, Gong ZN, Zhao WJ (2012). Analysis of hydrophytes for spatial evolution pattern in Guanting Reservoir, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 31, 1586–1595. [甄姿, 宫兆宁, 赵文吉 (2012). 官厅水库库区水生植物演变格局时空变化特征分析. *农业环境科学学报*, 31, 1586–1595.]
- Zheng XM, Ding YL, Zhao K, Jiang T, Li XF, Zhang SY, Li YY, Wu LL, Sun J, Ren JH, Zhang XX (2014). Estimation of vegetation water content from Landsat 8 OLI data. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34, 3385–3390. [郑兴明, 丁艳玲, 赵凯, 姜涛, 李晓峰, 张世轶, 李洋洋, 武黎黎, 孙建, 任建华, 张宣宣 (2014). 基于Landsat 8 OLI数据的玉米冠层含水量反演研究. *光谱学与光谱分析*, 34, 3385–3390.]
- Zhu XL, Zhang H, Lei P, Zhang BZ, Shan BQ, Shi MW (2016). Historical distribution characteristics of major elements in Guanting Reservoir sediment. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 36, 442–449. [朱晓磊, 张洪, 雷沛, 张伯镇, 单保庆, 史密伟 (2016). 官厅水库沉积物中大量元素的历史分布特征. *环境科学学报*, 36, 442–449.]
- Zou WN, Yuan L, Zhang LQ, Chen WY (2012). Impacts of coverage and canopy water depth on the spectral characteristics for a submerged plant *Cabomba caroliniana*. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 706–714. [邹维娜, 袁琳, 张利权, 陈万逸 (2012). 盖度与冠层水深对沉水植物水盾草光谱特性的影响. *生态学报*, 32, 706–714.]

责任编辑: 张扬建 责任编辑: 李 敏



扫码加入读者圈
听语音, 看问答