

doi: 10.6046/gtzyyg.2016.03.10

引用格式: 梁建平, 马大喜, 毛德华, 等. 双台河口国际重要湿地芦苇地上生物量遥感估算[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(3): 60-66. (Liang J P, Ma D X, Mao D H, et al. Remote sensing based estimation of Phragmites australis aboveground biomass in Shuangtai Estuary National Nature Reserve [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(3): 60-66.)

双台河口国际重要湿地芦苇地上生物量遥感估算

梁建平^{1,2}, 马大喜¹, 毛德华², 王宗明²

(1. 江西理工大学建筑与测绘工程学院, 赣州 341000; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102)

摘要: 基于多时相的 Landsat8 OLI 卫星遥感数据, 采用面向对象的分类方法, 提取双台河口国际重要湿地芦苇分布信息。通过对归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)等6个植被指数与野外实测芦苇地上生物量数据间的统计分析, 比较不同植被指数对芦苇地上生物量的敏感性, 构建双台河口国际重要湿地芦苇地上生物量遥感反演模型; 应用该模型对芦苇地上生物量进行遥感反演以及空间格局分析。结果表明: 双台河口国际重要湿地芦苇分布面积为 $4.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 约占该研究区总面积 32.96%; 选取的6个植被指数均与芦苇地上生物量显著相关($p < 0.05$), 其中, 以 NDVI 为变量的幂指数形式的估算模型为芦苇地上生物量遥感估算最优模型, 模拟精度为 79%, 决策系数为 0.76; 双台河口国际重要湿地芦苇地上生物量呈东高西低和北高南低的分布格局, 其平均地上生物量为 4785.5 g/m^2 , 总地上生物量为 $2.06 \times 10^6 \text{ t}$; 本研究结果可为双台河口国际重要湿地生态系统管理和生物多样性保护提供数据支持与科学指导。

关键词: 芦苇湿地; 地上生物量; 面向对象方法; 植被指数; 双台河口国际重要湿地

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2016)03-0060-07

0 引言

湿地是地球上重要的生态系统之一, 其独特的生态环境不仅为大量野生动植物提供了适宜的生存空间, 在控制水土流失、调节气候、降解污染及蓄水防旱等^[1-2]方面也发挥了不可替代的作用。芦苇是湿地生态系统的主要植被类型之一, 在我国北方常以优势群落的形式广泛分布^[3-4]。除具有湿地生态系统的典型生态功能之外, 芦苇因其较高的经济价值还可为人类的生产生活提供多种宝贵资源^[5]。然而, 由于受到人类活动和全球气候变化的叠加影响, 芦苇湿地生态系统遭到不同程度的破坏。芦苇地上生物量是湿地生态系统运行的物质基础, 是湿地科学研究中重要的生态系统质量参数之一, 可作为衡量湿地生态系统健康的重要指标, 直接反映芦苇的生长状况。由此, 如何快速且准确地估算芦苇地上生物量并进行评估分析, 为芦苇湿地生态系统的管理提供科学支撑, 是湿地科学研究中的热点话题。

随着遥感技术应用的不断深入, 基于遥感反演

和制图对湿地地上生物量进行估算的研究已经得到广泛开展^[6-14]。以往研究多数集中于湿地分布的提取和仅选择单一植被指数对湿地生物量进行估算。例如, Sophie 等^[6]利用 NOAA 数据获取归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI), 进而估算安第斯地区湿地植被生物量。多源遥感影像的不断丰富和不同植被指数的发展, 为更准确地进行湿地植被制图和生物量估算提供了有力支持。Zheng 等^[7]应用 Landsat7 ETM+ 影像数据提取 NDVI、修正土壤调整植被指数(modified soil-adjusted vegetation index, MSAVI)等5个植被指数, 对威斯康星州北部的植被进行生物量评估, 其中 NDVI 为参数的估算模型最优, 并得到研究区的总生物量为 $3.3 \times 10^6 \text{ t}$; 王庆等^[8]综合利用 Landsat TM 光学影像和 ENVISAT ASAR 雷达影像数据对湿地植被空间分布范围进行提取, 并在此基础上运用 NDVI, 比值植被指数(ratio vegetation index, RVI)和差值植被指数(difference vegetation index, DVI)3个指数进行统计回归模型建立, 对鄱阳湖湿地植被的生物量进行了反演, 获得了鄱阳湖湿地生物量。国内外学

收稿日期: 2015-04-30; 修订日期: 2015-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目“应用遥感信息定量区分气候变化和人类活动对沼泽湿地植被 NPP 的影响”(编号: 41401502)和“基于优化植被指数的草本湿地植被净初级生产力遥感估算”(编号: 41371403)共同资助。

者针对不同地区的湿地植被进行生物量反演的研究逐步增多。吴涛等^[9]利用不同植被指数对双台河口的翅碱蓬进行空间分布制图和生物量反演模型构建,并在此基础上分析了翅碱蓬的变化规律,成为重要湿地植被群落遥感建模估算的典型实例。以往的研究对湿地植被的空间分布制图和生物量反演模型构建的进一步探索起到重要的推动作用,但是遥感分类方法大多采用基于像元的传统遥感分类方法,针对典型群落的湿地类型,如芦苇湿地,在遥感信息提取方面,与基于面向对象的分类方法相比具有一定的弊端。

辽宁省双台河口国际重要湿地是亚洲东北部重要的水禽栖息地。湿地植被的优势群落为芦苇,其长势关系着大量水禽和珍贵鸟类生存以及以芦苇为产业的区域经济发展。芦苇地上生物量的高低对维持区域经济可持续发展和生物多样性具有重要的意义。近年来,由于受石油工业、水产养殖及耕垦等^[15-16]人类活动和气候变化的影响,该湿地中芦苇的生长遭受了不同程度的破坏,湿地保护与经济矛盾的矛盾日渐突出。因此,如何在经济快速发展的背景下,对该区湿地资源进行合理的开发利用和保护管理,关系着区域生态平衡和安全。以往研究工作由于受到数据获取和传统基于像元分类方法的限制,对该湿地芦苇分布提取及地上生物量反演的研究相对匮乏,对区域湿地生态系统的管理和保护未能形成有效的支撑。

本文以双台河口国际重要湿地为研究区,采用2014年多时相的Landsat OLI卫星影像为遥感数据源,结合地面实测数据,应用面向对象的遥感解译方法开展研究区芦苇空间分布制图;进而比较不同植被指数对实测芦苇地上生物量的敏感性,构建芦苇地上生物量的遥感估算模型,进行芦苇地上生物量反演与分析,以期为该湿地区芦苇研究以及芦苇湿地保护提供基础数据,对区域芦苇湿地生态系统的保护与管理提供科学依据。

1 数据源及方法

1.1 研究区概况

双台河口国际重要湿地(《拉姆塞尔公约》编号:1441)在E121°23'~122°29',N40°39'N~41°27'之间,处于辽宁省盘锦市境内辽河三角洲的核心部位,辽河平原南部,濒临渤海湾,分为实验区、缓冲区和核心区(图1)。区域总面积为 $12.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,气候属于温带大陆性半湿润季风气候,年平均气温为 $8.4 \text{ }^\circ\text{C} \sim 8.6 \text{ }^\circ\text{C}$,年降水量 $611.6 \sim 640 \text{ mm}$,平均潜

在蒸发量为 1699.6 mm 。区域地势较为平坦,海拔为 $0 \sim 4 \text{ m}$ 。土壤主要有草甸土、盐土、沼泽土和水稻土等类型,主要植被类型为芦苇、菖蒲和翅碱蓬^[17]。双台河口湿地不仅拥有东北最大的苇场,为珍稀鸟类与动物提供栖息地和繁殖场所;同时是由翅碱蓬构成的全国面积最大的“红海滩”,是双台河口的主要旅游景区;该区还具有丰富的石油资源,是区域经济发展的主要类型。

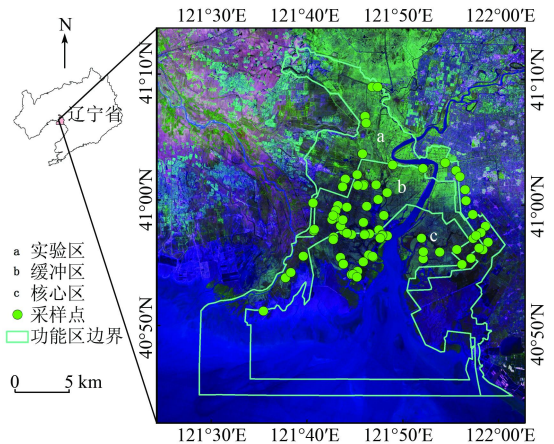


图1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

1.2 遥感数据预处理

本研究选取的遥感信息源为Landsat8卫星的OLI影像,其重访周期为16d,空间分辨率为30m。影像数据的质量是生物量反演的重要保障,选取2014年3个时相云层覆盖率为0且能覆盖整个研究区域的卫星影像,轨道号为120/031和120/032。每景影像分别选取了3个不同时相,分别为5月、8月和9月。利用ENVI软件对原始的影像进行辐射定标、运用FLAASH模块大气校正处理、几何纠正,并且控制误差在0.5个像元以内^[18]。

盘锦地区3—4月份冰雪开始融化,5月份湿地具有大量的积水,此时利用红外图像可快速准确区分出湿地与非湿地的界限,9月份影像湿地植被与其他植被的光谱差异明显。本研究采用5月与9月份的影像相结合来进行湿地分布信息提取。8月份是芦苇生长最旺盛的季节,所以8月份影像主要用于生物量建模与反演。

1.3 实测芦苇地上生物量数据获取与处理

本研究于2014年8月对研究区预设采样点,对区域芦苇地上生物量进行样本采集。具体方法为:每个样地随机选取3个样点,利用取样框随机取得 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方,利用GPS记录采样点的经度、纬度和高程。齐地面进行收割样方内的所有芦苇,然后进行装袋标记称重,统计湿生物量。后期实验室

处理时将样品放入对应标记牛皮纸袋中,在 65℃ 环境下烘干至恒重,称量每个样品的干生物量。将 3 个小样方的干生物量取平均值,作为样地芦苇地上生物量。利用 ArcGIS 将采集的 41 个样地的地上生物量数据录入到对应的 GPS 点中,生成点图层,建立地理空间数据库。其中,结合空间分布情况随机选取 30 个实测数据作为建模训练样本,剩余的 11 个实测数据作为模型验证样本。

1.4 芦苇分布信息提取

研究区的主要湿地类型为人工湿地与自然湿地。人工湿地包括水库/坑塘、运河/水渠和水田。自然湿地包括河流、芦苇湿地和翅碱蓬湿地。利用野外实地调查数据、依据《湿地公约》的规定,并参照现有研究^[6,9]的做法,结合研究区的土地覆盖类型与本次研究的目的,建立了该区的土地覆盖分类系统:建设用地、芦苇湿地、翅碱蓬湿地、旱地、水田、居住地、交通过地、运河/水渠、水库/坑塘。

以 2014 年覆盖研究区的多时相影像作为主要数据源,利用面向对象分类软件 eCognition 对研究区的芦苇分布信息进行提取。应用面向对象湿地分类方法^[19]主要可以分为以下 3 个步骤:①基于面向对象的分类软件,利用多尺度分割(multi-resolution segmentation)算法,得到同质对象;②区分湿地与其他地物,提取湿地分布信息;③对湿地进行详细区分,提取芦苇沼泽分布信息。

结合野外实地调查数据(210 个)和从 Google Earth 的高空间分辨率(大于 2.5 m)的图像上获取的 169 个覆盖所有土地覆盖类型验证点。从中随机选取 260 个,参照分割后的影像将其导入 eCognition 软件中,通过验证点对应的地物提取不同地物类型的参数信息,反复该过程,直到获得能准确地区分出芦苇与其他地物的阈值为止。本文利用归一化差值植被指数(NDVI)、归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)^[20]、OLI 影像的第 3 波段(B3)和第 4 波段(B4)反射率及二者的比值(B4/B3)构建分类规则集,结合目视人工解译对芦苇湿

地分布信息进行提取,具体流程如图 2 所示。

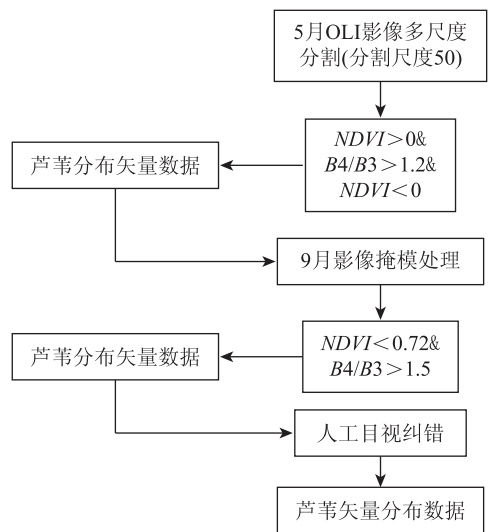


图 2 芦苇分布信息提取流程图

Fig. 2 Flowchat of extraction of phragmites austrakis information

混淆矩阵^[21]是评价图像解译结果精度的主要算法。本研究通过建立混淆矩阵方法来评估芦苇信息提取的精度。

1.5 遥感反演方法

参考国内外提取生物量的研究方法,结合研究区域内的植被覆盖特点,选取与生物量相关的 6 个常用植被光谱指数:NDVI, DVI, RVI, MSAVI, 增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)和优化土壤调整植被指数(optimized soil adjusted vegetation index, OSAVI)。计算公式如表 1 所示。利用 ArcGIS 软件提取各样地中心点周围 3 像元 × 3 像元的不同植被指数的平均值,将选取建模训练样本的芦苇生物量实测数据与相应的植被指数进行相关分析和回归分析,比较不同植被指数对生物量数据的敏感性。基于相关系数和可决系数(R²)选择最佳植被指数和最优回归曲线,进行芦苇地上生物量反演建模;用选取的模型验证样本数据进行模型评价和验证。

表 1 研究中采用的植被指数^[12,22]

Tab. 1 Vegetation indices used in this study

植被指数	公式 ^①
归一化植被指数	$NDVI = (R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red})$
增强型植被指数	$EVI = 1.1(R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + 9.5R_{red} - 2R_{blue} + 0.5)$
比值植被指数	$RVI = R_{nir} / R_{red}$
修正土壤调整植被数	$MSVI = 0.5[2R_{nir} + 1 - \sqrt{(2R_{nir} + 1)^2 - 8(R_{nir} - R_{red})}]$
优化土壤调整植被指数	$OSAVI = 1.05(R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red} + 1.05)$
差值植被指数	$DVI = R_{nir} - R_{red}$

①式中: R_{nir}表示近红外波段反射率值; R_{red}表示红光波段反射率值; R_{blue}表示蓝光波段反射率值。

2 结果与分析

2.1 芦苇分布信息提取及制图分析

2.1.1 芦苇信息提取精度评价

基于预留的119个地面实际调查点与遥感提取的土地覆盖类型结果建立混淆矩阵。验证芦苇提取信息精度的结果显示:芦苇的制图精度为90%,用户精度为92%;研究区土地覆盖类型总体分类精度为87%,Kappa系数为0.82。说明本研究的分类精度较好,实现分类参数的阈值对芦苇分布信息提取有较好的效果,能够满足本研究的需求。

2.1.2 芦苇空间分布及统计特征

基于Landsat OLI遥感影像,利用面向对象的分类方法提取研究区土地覆盖信息,结果如图3所示。研究区域内的湿地植被主要为芦苇,其主要沿着双台河道两侧分布,西侧明显多于东侧。统计结果显示:2014年芦苇面积为 $4.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。其中核心区内的芦苇面积为 $1.36 \times 10^4 \text{ hm}^2$,缓冲区内的面积为 $1.74 \times 10^4 \text{ hm}^2$,实验区芦苇面积为 $1.27 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

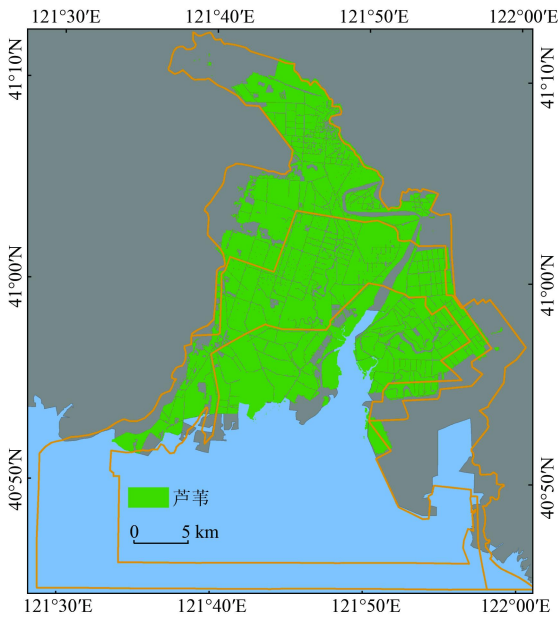


图3 2014年辽宁双台河口国际重要湿地芦苇分布

Fig.3 Distribution of phragmites australis in Shuangtai Estuary National Nature Reserve in 2014

2.2 芦苇地上生物量反演模型构建与评价

2.2.1 基于不同植被指数比较的芦苇地上生物量

统计分析方法具有简单、快捷和精度较高的特性。利用统计分析进行植被指数与生物量之间建立估算模型的方法已经得到广泛应用。利用SPSS软件^[23]分析实测地上生物量与提取的6个变量之间的相关,验证与生物量之间关系程度最密切的自变

量,并与生物量进行一元回归或者多元线性回归。具体方法如下:从41个采样点中挑出选好的建模训练样本(30个),利用样点对应的生物量与其对应的各个变量进行回归模型构建:分别构建了线性模型、指数模型、幂指数模型。对比出最优的模型,并对其进行验证。最后,通过绝对误差、相对误差和估算精度对选取的模型精度进行评价^[24]。通过对比分析后得出NDVI指数与生物量之间的相关性最好,如表2所示。通过回归分析选出最优的双台河口芦苇生物量的拟模型为

$$y = 686.32e^{3.029NDVI}, R^2 = 0.7882 \quad (1)$$

与此相似,牛婷等^[25]以NDVI植被指数对塔里木河下游的芦苇生物量进行评估,发现其估算精度高达82.07%,说明NDVI更适合芦苇生物量的反演研究。李延峰等^[26]利用植被指数对东北地区芦苇地上生物量建模得出NDVI与地上生物量拟合较好,二者呈线性关系

$$y = 4029.6NDVI - 433.71 \quad (2)$$

可能是地区与降水量不同的影响,导致芦苇长势存在差异。

表2 基于植被指数的芦苇生物量的反演模型

Tab.2 Models for phragmites australis aboveground biomass based on vegetation indexes

方程类型	植被指数	拟合方程	R ²	样本数
线性模型	NDVI	$y = 11495x - 2503.1$	0.7616	30
	DVI	$y = 1.8187x + 594.079$	0.6313	30
	OSAVI	$y = 9448.3x - 1833.7$	0.5722	30
	EVI	$y = 1902.5x - 2109.6$	0.5559	30
	MSVI	$y = 2.0093x - 713.29$	0.5418	30
	RVI	$y = 734.61x + 1452.8$	0.4156	30
指数模型	NDVI	$y = 686.32e^{3.029x}$	0.7882	30
	DVI	$y = 1534.8e^{0.0005x}$	0.6406	30
	OSAVI	$y = 871.82e^{2.3604x}$	0.6174	30
	EVI	$y = 77.62e^{0.4931x}$	0.5747	30
	MSVI	$y = 1162.7e^{0.0005x}$	0.5668	30
	RVI	$y = 1826.4e^{0.2105x}$	0.4800	30
幂指数模型	NDVI	$y = 9903.3x^{1.6351}$	0.7561	30
	DVI	$y = 7.0945x^{0.8393}$	0.6523	30
	OSAVI	$y = 7357.2x^{1.3269}$	0.5904	30
	EVI	$y = 623.19x^{1.5649}$	0.5887	30
	MSVI	$y = 0.5623x^{1.139}$	0.5868	30
	RVI	$y = 1813.9x^{0.6271}$	0.5197	30

2.2.2 芦苇生物量反演模型精度评价

将模型验证样本(11个)的NDVI值带入最优模型,得到对应点的生物量的模拟值。将模拟值与实测值进行对比后,计算相对误差结果为20.73%,说明模型的估算精度可以达到79%,模型估算的效果相对较好(图4),可以用来估算保护区芦苇的生

物量空间格局分布。

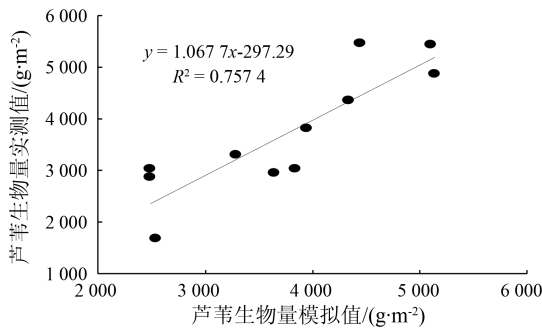


图 4 2014 年盘锦双台河口国际重要湿地模拟芦苇地上生物量精度验证

Fig. 4 Accuracy validation for simulating biomass in Shuangtai Estuary National Nature Reserve in 2014

2.3 芦苇地上生物量空间制图与分析

通过最优模型与 NDVI 数据进行反演和制图得出研究区内芦苇地上生物量的空间分布图(图 5)。

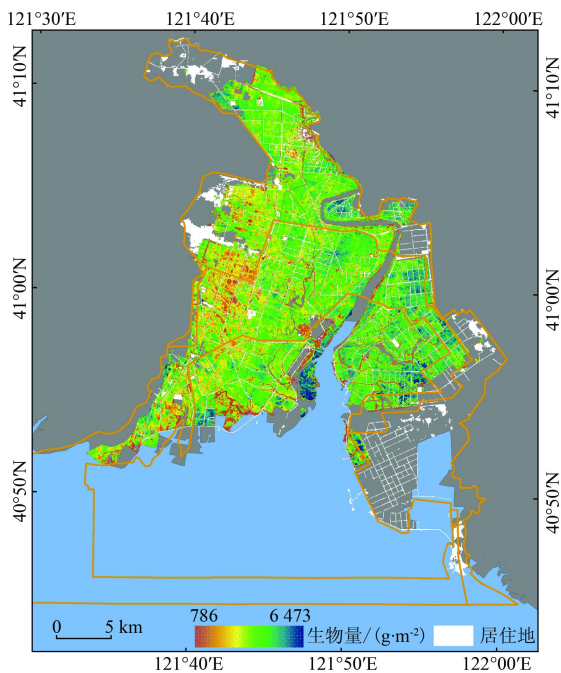


图 5 2014 年辽宁双台河口国际重要湿地芦苇生物量反演分布图

Fig. 5 Retrieval of phragmites australis biomass in Shuangtai Estuary National Nature Reserve in 2014

芦苇地上生物量分布特征为东北高于西南。芦苇生物量较高的地方主要分布在东北部,原因在于双台河从北部流经研究区,为湿地提供较为充足的水源,也为芦苇生长提供了良好的保障;从图中可以看出,芦苇长势较好的地区无人居住;道路分布较为稀少;几乎没有油田的分布。而生物量相对较低的西南部位远离双台河主河道;分布比较密集道路和油田。由于道路以及油田的存在对湿地整体景观格局造成严重破坏,阻碍了湿地格局的能量相互传递;

而且该部位靠近含盐量较高的海边,具有大量的水产养殖用地,旅游景区“红海滩”也分布在沿海地区,给湿地带来较大的负面影响;石油大量的开采也会导致石油污染,对该区的芦苇生长具有较大抑制作用;因而该部位的生物量相对较低^[15]。

研究区芦苇平均地上生物量为 $4\ 785.5\ \text{g/m}^2$,而王丹等^[27]对苏州太湖湿地的芦苇生物量研究,发现太湖的芦苇生物量为 $2\ 219.5\ \text{g/m}^2$,可能是降水量、水深和地域不同对芦苇生长的影响会有所不同^[28]。研究区内芦苇总生物量为 $2.06 \times 10^6\ \text{t}$,核心区芦苇平均地上生物量为 $4\ 808.02\ \text{g/m}^2$;缓冲区芦苇平均地上生物量为 $4\ 782.427\ \text{g/m}^2$;实验区芦苇平均地上生物量为 $4\ 764.66\ \text{g/m}^2$ 。由此看出核心区的芦苇长势最好,其次是缓冲区,最后为实验区。

3 结论

本文利用多时相遥感影像数据,采用面向对象的方法对芦苇湿地信息进行提取,分析植被指数与芦苇地上生物量之间的敏感性,利用最敏感的植被指数对研究区内的芦苇进行空间反演,取得了较好效果,并得出以下主要结论:

1)采用面向对象的分类方法对双台河口国际重要湿地的土地覆盖信息进行提取,结合分类参数阈值选取与人工目视解译方法的精度较高,其精度达到 90% 以上。

2)2014 年双台河口国际重要湿地内芦苇面积为 $4.39 \times 10^4\ \text{hm}^2$,其中核心区内芦苇面积为 $1.36 \times 10^4\ \text{hm}^2$;缓冲区内的面积为 $1.74 \times 10^4\ \text{hm}^2$;实验区内的芦苇面积为 $1.27 \times 10^4\ \text{hm}^2$ 。

3)比较实测地上生物量值与不同光谱植被指数间的相关性,发现 NDVI 与生物量所拟合的模型为双台河口国际重要湿地芦苇地上生物量遥感估算最优模型。该区平均地上生物量为 $4\ 785.5\ \text{g/m}^2$,总地上生物量为 $2.06 \times 10^6\ \text{t}$,呈现出东高西低、北高南低的分布特征。

参考文献(References):

[1] 江波,欧阳志云,苗鸿,等. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价[J]. 生态学报,2011,31(8):2236-2244.
Jiang B, Ouyang Z Y, Miao H, et al. Ecosystem services valuation of the Haihe River basin wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8):2236-2244.

[2] Keddy P A. Wetland Ecology: Principles and Conservation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

[3] 刘兴土. 东北湿地[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Liu X T. Northeast Wetland[M]. Beijing: Science Press, 2005.

- [4] 吕宪国,王升忠,姜明,等. 中国湿地与湿地研究[M]. 石家庄:河北科学技术出版社,2008.
Lyu X G, Wang S Z, Jiang M, et al. Study on Wetland and Wetland in China[M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing House, 2008.
- [5] 王莉雯,卫亚星. 盘锦湿地净初级生产力时空分布特征[J]. 生态学报,2012,32(19):6006-6015.
Wang L W, Wei Y X. Variation analysis about net primary productivity of the wetland in Panjin region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(19):6006-6015.
- [6] Moreau S, Bosseno R, Gu X F, et al. Assessing the biomass dynamics of Andean bofedal and totora high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(4):516-529.
- [7] Zheng D L, Rademacher J, Chen J Q, et al. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA[J]. Remote Sensing of Environment, 2004,93(3):402-411.
- [8] 王庆,廖静娟. 基于 Landsat TM 和 ENVISAT ASAR 数据的鄱阳湖湿地植被生物量的反演[J]. 地球信息科学学报,2010,12(2):2282-2291.
Wang Q, Liao J J. Estimation of wetland vegetation biomass in the Poyang Lake area using Landsat TM and ENVISAT ASAR data[J]. Journal of GEO-Information Science, 2010,12(2):2282-2291.
- [9] 吴涛,赵冬至,康建成,等. 辽东湾双台子河口湿地翅碱蓬(Suaeda salsa)生物量遥感反演研究[J]. 生态环境学报,2011,20(1):24-29.
Wu T, Zhao D Z, Kang J C, et al. Suaeda salsa dynamic remote monitoring and biomass remote sensing inversion in Shuangtaizi River estuary[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011,20(1):24-29.
- [10] 李旭文,季耿善,杨静. 太湖梅梁湖湾蓝藻生物量的遥感估算[J]. 遥感信息,1995(1):35-38.
Li X W, Ji G S, Yang J. Estimating cyanophyta biomass standing crops in meiliang gulf of Lake Taihu by satellite remote sensing[J]. Remote Sensing Information, 1995(1):35-38.
- [11] Moreau S, Le Toan T. Biomass quantification of Andean wetland forages using ERS satellite SAR data for optimizing livestock management[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,84(4):477-492.
- [12] Van T K, Rayachhetry M B, Center T D. Estimating above-ground biomass of Melaleuca quinquenervia in Florida, USA[J]. Journal of Aquatic Plant Management, 2000,38(1):62-67.
- [13] 黎夏,叶嘉安,王树功,等. 红树林湿地植被生物量的雷达遥感估算[J]. 遥感学报,2006,10(3):387-396.
Li X, Ye J A, Wang S G, et al. Estimating mangrove wetland biomass using radar remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2006,10(3):387-396.
- [14] 高明亮,赵文吉,宫兆宁,等. 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究[J]. 生态学报,2013,33(2):542-553.
Gao M L, Zhao W J, Gong Z N, et al. The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(2):542-553.
- [15] 徐东霞,章光新. 人类活动对中国滨海湿地的影响及其保护对策[J]. 湿地科学,2007,5(3):282-288.
Xu D X, Zhang G X. Impact of human activities on coastal wetlands in China[J]. Wetland Science, 2007,5(3):282-288.
- [16] 陈克林,张小红,吕咏. 气候变化与湿地[J]. 湿地科学,2003,1(1):73-77.
Chen K L, Zhang X H, Lyu Y. Climate change and wetland[J]. Wetland Science, 2003,1(1):73-77.
- [17] 李延峰,毛德华,王宗明,等. 双台河口国家级自然保护区芦苇叶面积指数遥感反演与空间格局分析[J]. 湿地科学,2014,12(2):163-169.
Li Y F, Mao D H, Wang Z M, et al. Remote sensing retrieval and spatial pattern analysis of leaf area index of Phragmites australis in Shuangtai estuary national nature reserve[J]. Wetland Science, 2014,12(2):163-169.
- [18] 孙俊杰,马大喜,任春颖,等. 基于多时相环境卫星数据的南瓮河流域湿地信息提取方法研究[J]. 湿地科学,2013,11(1):60-67.
Sun J J, Ma D X, Ren C Y, et al. Method of extraction of wetlands information in Nanweng River Basin based on multi-temporal environment satellite images[J]. Wetland Science, 2013,11(1):60-67.
- [19] 谢静,王宗明,毛德华,等. 基于面向对象方法和多时相 HJ-1 影像的湿地遥感分类——以完达山以北三江平原为例[J]. 湿地科学,2012,10(4):429-438.
Xie J, Wang Z M, Mao D H, et al. Remote sensing classification of wetlands using object-oriented method and multi-season HJ-1 images: A case study in the Sanjiang Plain north of the Wandashan Mountain[J]. Wetland Science, 2012,10(4):429-438.
- [20] 宋小宁,赵英时. 应用 MODIS 卫星数据提取植被-温度-水分综合指数的研究[J]. 地理与地理信息科学,2004,20(2):13-17.
Song X N, Zhao Y S. Study on vegetation-temperature-water synthesis index using MODIS satellite data[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004,20(2):13-17.
- [21] 贾明明,王宗明,张柏,等. 综合环境卫星与 MODIS 数据的面向对象土地覆盖分类方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2014,39(3):305-310.
Jia M M, Wang Z M, Zhang B, et al. Land cover classification of compositing HJ-1 and MODIS data based on object-based method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014,39(3):305-310.
- [22] Ji L, Wylie B K, Nossov D R, et al. Estimating aboveground biomass in interior Alaska with Landsat data and field measurements[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012,18:451-461.
- [23] 卢纹岱. SPSS 统计分析[M]. 4版. 北京:电子工业出版社,2010.
Lu W D. SPSS Statistical Analysis[M]. 4th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2010.
- [24] 罗玲,王宗明,任春颖,等. 基于 MODIS 数据的松嫩草原产草量遥感估算模型与空间反演[J]. 农业工程学报,2010,26(5):182-187.
Luo L, Wang Z M, Ren C Y. Models for estimation grassland production and spatial inversion based on MODIS data in Songnen Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(5):182-187.

- [25] 牛 婷,李 霞,林海军,等. 塔里木河下游芦苇生物量遥感估算模型研建[J]. 国土资源遥感,2011,23(4):42-45. doi:10.6046/gtzyyg.2011.04.08.
Niu T, Li X, Lin H J, et al. The construction of the remote sensing estimation models for reed biomass in the lower reaches of the Tarim River[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2011, 23(4):42-45. doi:10.6046/gtzyyg.2011.04.08.
- [26] 李延峰. 东北典型区芦苇分布提取与地上生物量遥感估算[D]. 长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2014.
Li Y F. Phragmites Australis Extraction and Aboveground Biomass Estimation in Typical Regions of Northeast China, Using Remote Sensing Technology[D]. Changchun:Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [27] 王 丹,张银龙,庞 博,等. 苏州太湖湿地芦苇生物量与水深的动态特征研究[J]. 环境污染与防治,2010,32(7):49-54.
Wang D, Zhang Y L, Pang B, et al. Study on dynamic characteristics between the biomass of Phragmites communis and water depth at Taihu wetland in Suzhou[J]. Environmental Pollution and Control, 2010, 32(7):49-54.
- [28] 赵文智,常学礼,李启森,等. 荒漠绿洲区芦苇种群构件生物量与地下水埋深关系[J]. 生态学报,2003,23(6):1138-1146.
Zhao W Z, Chang X L, Li Q S, et al. Relationship between structural component biomass of reed population and ground water depth in desert oasis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(6):1138-1146.

Remote sensing based estimation of Phragmites australis aboveground biomass in Shuangtai Estuary National Nature Reserve

LIANG Jianping^{1,2}, MA Daxi¹, MAO Dehua², WANG Zongming²

(1. Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: With the object-oriented classification method, the spatial distribution of Phragmites australis was obtained based on multi-temporal Landsat8 OLI data covering Shuangtai Estuary National Nature Reserve. By analyzing the sensitivity between different vegetation indexes and aboveground biomass (AGB) of Phragmites australis, the retrieval model of AGB for Phragmites australis was developed. Furthermore, the spatial pattern of AGB for Phragmites australis was observed. The results showed that the area of Phragmites australis was 4.39×10^4 hm², accounting for 32.96% of the study area of the Shuangtai Estuary National Nature Reserve. Selecting NDVI as the variable for the power function, the authors formulated the optimal model for estimating AGB of Phragmites australis with an estimation accuracy of 79%. Average AGB of Phragmites australis was 4 785.5 g/m² and total AGB was 2.06×10^6 t. High values of AGB were observed in the northeast part, while low AGB values in the southwest. The results obtained in this study would provide data to support wetland ecosystem management and scientific guidance for Shuangtai Estuary National Nature Reserve.

Keywords: Phragmites australis wetland; aboveground biomass; object-oriented classification; vegetation index; Shuangtai Estuary National Nature Reserve

第一作者简介: 梁建平(1992-),男,硕士研究生,主要从事湿地生态遥感的研究。Email: liangxiao318@sina.cn。

通信作者: 毛德华(1987-),男,助理研究员,主要从事湿地生态遥感的研究。Email: maodehua@iga.ac.cn。

(责任编辑: 李 瑜)