#### DOI: 10.5846/stxb201505110959

田艳林,刘贤赵,毛德华,王宗明,李延峰,高长春.基于 MODIS 数据的松嫩平原西部芦苇湿地地上生物量遥感估算.生态学报,2016,36(24):

Tian Y L, Liu X Z, Mao D H, Wang Z M, Li Y F, Gao C C.Remote sensing estimation of the aboveground biomass of reed wetland in the Western Songnen Plain, China, based on MODIS data. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): - .

# 基于 MODIS 数据的松嫩平原西部芦苇湿地地上生物 量遥感估算

## 田艳林1,刘贤赵1,毛德华2,\*,王宗明2,李延峰2,高长春1

1 湖南科技大学建筑与城乡规划学院,湘潭 411201

2 中国科学院东北地理与农业生态研究所,中国科学院湿地生态与环境重点实验室,长春 130012

摘要:芦苇作为湿地生态系统中重要的群落类型,其地上生物量是衡量湿地生态系统质量的关键指标。应用面向对象的土地覆盖分类技术,基于多季相 Landsat8 OLI 遥感数据,提取松嫩平原西部芦苇湿地分布信息;依托野外实测芦苇地上生物量数据 (AGB)和同期 MODIS 数据源的 NDVI、EVI、RVI、MSAVI 和 WDVI 5 种光谱植被指数,探讨不同光谱植被指数对芦苇 AGB 的敏感性,进而构建松嫩平原西部芦苇 AGB 遥感估算最优模型,并进行芦苇 AGB 遥感反演及空间格局分析。结果表明:2014 年松嫩平原西部地区芦苇总面积为 1653 km<sup>2</sup>,其中扎龙湿地自然保护区内芦苇分布面积最大(1178km<sup>2</sup>),占区域芦苇总面积的 71.3%;所选取的 5 种植被指数均与芦苇 AGB 呈极显著正相关(P<0.01),基于 EVI 构建的指数曲线模型为松嫩平原西部芦苇 AGB 反演的最优模型(*R*<sup>2</sup>=0.55)。研究区芦苇平均 AGB 为 372.1g/m<sup>2</sup>,AGB 总量为 6.14 ×10<sup>5</sup> t,其中扎龙湿地自然保护区内芦 苇 AGB 总量为 4.38 ×10<sup>5</sup> t;各保护区芦苇平均 AGB 由大到小依次为:向海保护区(469.7 g/m<sup>2</sup>)>大布苏保护区(454.1 g/m<sup>2</sup>)>莫 莫格保护区(373.0 g/m<sup>2</sup>)>扎龙保护区(372.4 g/m<sup>2</sup>)>查干湖保护区(369.8 g/m<sup>2</sup>);松嫩平原西部芦苇 AGB 总体呈现南高北低的分布格局,将为湿地生态系统管理与保护及芦苇资源的合理利用提供科学依据。

关键词:MODIS;植被指数;芦苇湿地;地上生物量(AGB);松嫩平原西部

# Remote sensing estimation of the aboveground biomass of reed wetland in the Western Songnen Plain, China, based on MODIS data

TIAN Yanlin<sup>1</sup>, LIU Xianzhao<sup>1</sup>, MAO Dehua<sup>2,\*</sup>, WANG Zongming<sup>2</sup>, LI Yanfeng<sup>2</sup>, GAO Changchun<sup>1</sup>

1 College of Architecture and Urban Planning, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

2 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

**Abstract**: Reed is one of the important community types in wetland ecosystems, and its aboveground biomass (AGB) is a key index characterizing the quality of these ecosystems. In this study, the spatial distribution of reed wetland in the Western Songnen Plain was mapped using the object-oriented classification method combined with multi-seasonal Landsat8 OLI remote sensing data. Field observed reed aboveground biomass data and five spectral vegetation indices, i. e., normalized differential vegetation index (NDVI), ratio vegetation index (RVI), enhanced vegetation index (EVI), modified soil adjusted vegetation index (MSAVI), and weighted difference vegetation index (WDVI), which were derived from moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) products, were used to determine the sensitivity of different

收稿日期:2015-05-11; 网络出版日期:2015-00-00

基金项目:国家自然科学基金项目(41401502, 41371403);吉林省科技发展计划青年科研基金项目(20150520068JH)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail:maodehua@iga.ac.cn

spectral vegetation indices to reed AGB and further to develop an optimal remote sensing model for reed AGB estimation and inversion. The results showed that, the total area of reeds in 2014 was 1653 km<sup>2</sup> in the Western Songnen Plain, and Zhalong Wetland Nature Reserve had the largest reed area (1178 km<sup>2</sup>) among the five wetland natural reserves. Additionally, strong correlations were found between each of the five vegetation indices and reed AGB (P < 0.01). The exponential curve model established using EVI was the optimal model ( $R^2 = 0.55$ ) for reed AGB estimation and inversion. In the Western Songnen Plain, the mean reed AGB based on the exponential curve model was estimated to be 372.1 g/m<sup>2</sup> and the total reed AGB to be 6.14 ×10<sup>5</sup> t. The maximum reed AGB was observed in Zhalong Nature Reserve with a value of 4.38 ×10<sup>5</sup> t. The averaged reed AGB for each of the five wetland natural reserves can be listed in a decreasing order as Xianghai Natural Reserve (469.7 g/m<sup>2</sup>) > Dabusu Natural Reserve (454.1 g/m<sup>2</sup>) > Momoge Natural Reserve (373.0 g/m<sup>2</sup>) > Zhalong Natural Reserve (372.4 g/m<sup>2</sup>) > Chagan Lake Natural Reserve (369.8 g/m<sup>2</sup>). Higher AGB values were found in the southern area than in the northern. Results from this study could contribute to the protection and management of reed wetland, and the utilization of reed resource.

Key Words: MODIS; vegetation index; reed wetland; aboveground biomass (AGB); Western Songnen Plain

湿地作为一种重要的生态系统类型,约占地球表面积的 6.2%—7.6%<sup>[1]</sup>,是自然界最富生物多样性的生态景观和人类最重要的自然资源之一。它不仅可以维护地区和全球的生态平衡,同时也为多种动植物提供重要的栖息地<sup>[2]</sup>。湿生植被作为湿地生态系统的重要组成部分,其地上生物量(aboveground biomass,AGB)是表征生态环境质量的关键指标<sup>[3]</sup>。芦苇湿地是一种适应性广、抗逆性强的独特湿地生态系统,在维系湿地生态系统稳定、保护珍稀鸟类资源等方面具有举足轻重的作用<sup>[4-5]</sup>。对区域芦苇湿地地上生物量进行定期监测和定量评估,对湿地生态系统管理和湿地资源可持续利用,具有重要意义<sup>[6]</sup>。

随着遥感技术的发展,国内外学者利用各种遥感数据进行湿地监测和湿地植被生物量估算研究<sup>[7-10]</sup>。如 童庆禧等<sup>[11]</sup>在利用高光谱图像定量提取植被生理参数的基础上,对鄱阳湖湿地植被生物量进行了估算; Schmid 等<sup>[12]</sup>结合多源遥感影像,实现了湿地的分类和动态变化监测;李凤秀等<sup>[13]</sup>建立了洪河自然保护区苔 草湿地植被生物量估算模型。目前多数研究都是基于单一时相遥感影像,利用像元分类方法提取湿地信息, 并未考虑湿地植被的季相差异,使分类结果难以满足精度要求;湿地植被生物量的估算研究也多是基于同一 生物量估算模型进行不同植被类型生物量的拟合。当前,对于芦苇湿地这一重要湿地类型,根据不同光谱植 被指数对生物量的敏感性差异而建立遥感估算模型的研究尚不多见。因此,基于多时相中等空间分辨率遥感 影像,进行芦苇湿地空间分布信息提取,比较不同光谱植被指数对芦苇 AGB 的敏感性,选择最优植被指数进 行芦苇 AGB 遥感估算的工作十分必要。

我国的芦苇湿地主要分布在东北、华北、西南和青藏高原等地区<sup>[14-15]</sup>。松嫩平原西部地处我国东北核心 区域,是我国芦苇湿地的重要分布区<sup>[16]</sup>,其作为水陆之间的生物保护带,不仅为东亚候鸟南北迁徙提供了重 要的栖息场所,而且在调蓄洪水、防洪排涝、美化环境、丰富社会自然资源等方面具有重要作用。然而,目前对 松嫩平原生物量的研究多集中在草地生产力和芦苇生态学方面<sup>[17-18]</sup>,针对该区芦苇湿地分布信息提取及地 上生物量反演与估算的报道十分匮乏。本文基于 Landsat8 OLI 影像和 MODIS 数据,进行松嫩平原西部芦苇 湿地空间分布信息提取,并进行湿地植被 AGB 遥感估算,以期为区域湿地生态系统管理和芦苇湿地资源的合 理利用提供科学依据。

#### 1 数据获取与研究方法

#### 1.1 研究区概况

松嫩平原西部(44°00′—48°35′N,121°36′—126°36′E)位于中国东北地区中部的半干旱半湿润的农牧过 渡带<sup>[19]</sup>,行政区划上包括黑、吉两省西部共22个市县(图1),总面积1.01×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,属中温带季风气候。温度

在空间上呈现自北向南的递增趋势<sup>[20]</sup>,年均温度4—6℃,无霜期136—163 d;年降水量350—650 mm,降水集中在6—8月,且自东向西递减,年均蒸发量(1923 mm)远大于降水量。该区地貌类型以山前倾斜平原、低平原以及部分河谷平原为主;植被类型主要有草原、草甸、疏林草原和沼泽湿地<sup>[14]</sup>。研究区内有扎龙、莫莫格、查干湖、向海和大布苏5个国家级湿地自然保护区,其中扎龙湿地和向海湿地在1992年分别被列为国际重要湿地名录(NO.549和NO.548),莫莫格湿地在2013年被列为国际重要湿地(NO.2188)。上述保护区为典型的盐碱化沼泽湿地,湿地内部的河流沿岸、水库及湖泊周围芦苇广布。

1.2 数据来源及研究方法

1.2.1 芦苇湿地分布信息提取及精度验证

在对研究区不同季相遥感影像特征进行比较分析的基础上,确定各地物类型存在显著季相差异的多季相 影像组合。通常 3—4 幅影像(多分布在 5—10 月份)即可区分大部分地物类型<sup>[21]</sup>。本文选取 3 期美国地质 调查局(USGS)(http://glovis.usgs.gov/)发布的空间分辨率为 30 m 的 Landsat8 OLI 影像(时间分别是 2014 年 6 月 4 日、2014 年 8 月 7 日和 2014 年 9 月 24 日),采用遥感图像处理软件 ENVI5.1,对影像进行辐射定标、大 气校正(FLAASH 模块)处理,并以研究区 1:10 万地形图为底图,进行几何精校正(校正误差控制在 0.5 个像 元内)之后,利用 8 月份生物量旺季的影像区分湿地植被与其他地物类型,同时根据 6 月初和 9 月末芦苇与其 他湿地植被的明显差异区分出芦苇信息,在 eCognition8.6 软件的支持下对影像进行多尺度分割,经反复尝试 确定最佳分割尺度;然后通过野外获取的验证点所对应的地物斑块,提取不同地物类型的各种分类参数(各 种指数、波段反射率等)信息。以此为依据,确定区分湿地植被与其他地物类型的分类参数组合(NDVI、NDWI 和纹理特征等)及其阈值,基于此建立规则集,结合目视判读法,提取景观类型信息,并根据研究需要对提取 的地物类型进行归并,得到芦苇空间分布信息。最后,利用 2013—2014 年 5—9 月在松嫩平原西部野外采集 获得的 427 个土地覆盖野外调查验证点(其中湿地芦苇验证点 224 个),通过混淆矩阵法对松嫩平原西部提取 的地物类型信息进行精度验证,验证点分布如图 2 所示。





本研究中,芦苇 AGB 取样于 2014 年 7—8 月,在芦苇生长的最大生物量季节进行。即先根据研究区芦苇

分布特征及生长密度分割结果,选取 91 个代表一个 MODIS 像元大小范围的典型样地进行采样,每个样地即 为一个样点。具体方法为:每个样点利用取样框随机取得 3 个 1 m×1 m 的样方,齐地割下样方内所有芦苇植 株的地上部分,并用手持 GPS 接收仪测定每个样点的经纬度,并记录采样点的环境背景情况(如有无明显人 为干扰等);然后将样品带回实验室自然风干 1 d 后,放置于 65℃温度下烘干至恒重,并以精度为 0.02 克的电 子秤称重,将 3 个小样方的干生物量取平均值,计算芦苇单位面积的干物质量,作为该样点的芦苇地上生 物量。

#### 1.2.3 遥感植被指数的选取及处理

根据研究区特点,参考国内外植被地上生物量遥感反演的相关成果<sup>[22-24]</sup>,本研究选取归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)、比值植被指数(ratio vegetation index,RVI)、修改型土壤调整植被指数(modified soil adjusted vegetation index,MSAVI)、增强型植被指数(enhanced vegetation index,EVI)和加权差分植被指数(weighted difference vegetation index,WDVI)来参与反演研究区内芦苇的地上生物量。为使所用的植被指数与采样时间同步,这里采用 2014 年 7 月 28 日—8 月 13 日 NASA/EOSLPDAAC 数据分发中心(https://wist.echo.nasa.gov)开发的 MOD13Q1 数据集(空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d)。利用MODIS 处理软件 MODIS Reprojection Tools(MRT)对原始数据集进行投影变换、格式转换和拼接处理后,根据NASA/MODIS 提出的统一算法式(1)、式(2),计算 NDVI 和 EVI,RVI、MSAVI 和 WDVI 利用 MODIS 光谱带中的红色波段和近红外波段反射率数据,分别按式(3)—式(5)进行计算:

$$NDVI = \frac{\rho_{NR} - \rho_R}{\rho_{NR} + \rho_R} \tag{1}$$

$$EVI = \frac{2.5(\rho_{NIR} - \rho_R)}{\rho_{NIR} + 6.0\,\rho_R - 7.5\,\rho_B + 1}$$
(2)

$$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_R} \tag{3}$$

$$MSAVI = 0.5 \times \left[ 2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_R)} \right]$$
(4)

$$WDVI = \rho_{NIR} - 1.06 \rho_R \tag{5}$$

1.2.4 AGB 反演模型构建与精度验证

从植被指数数据和样点实测 AGB 量数据所组成的样本序列中,随机选取 71 个样点数据(总样点 91 个) 利用统计软件 SPSS19.0 进行相关分析和一元曲线回归分析,得到以各植被指数为自变量的芦苇 AGB 遥感估 算一元曲线回归模型(SCRM),通过比较决定系数 *R*<sup>2</sup>,筛选出最优模型进行芦苇 AGB 遥感估算。然后,利用 预留的 20 个实测样点 AGB 数据与建立的遥感估算模型计算的 AGB 进行比较,通过均方根误差(RMSE)和估 算精度(Accuracy)对模型进行精度分析。RMSE 和 Accuracy 的计算公式如下:

RMSE = 
$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_i - Y'_i)^2}{N}}$$
 (6)

Accuracy = 
$$\left(1 - \frac{RMSE}{\bar{Y}}\right) \times 100\%$$
 (7)

式中:RMSE 为均方根误差;Accuracy 为估算精度; $Y_i$ 为实测芦苇地上生物量( $g/m^2$ ); $Y_i'$ 为芦苇地上生物量估 算值( $g/m^2$ ); $\overline{Y}$ 为实测芦苇地上生物量平均值( $g/m^2$ );N 为样点数。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 芦苇分布提取与格局分析

在面向对象的多季相遥感分类方法的基础上,通过比较研究区不同季相的影像特征,提取得到松嫩平原

西部芦苇分布信息。利用野外采集的验证点与提取的信息通过混淆矩阵法对提取结果进行分析,发现松嫩平 原西部土地覆盖分类的总体精度为 86.89%,其中湿地芦苇分类准确的样点为 201 个,芦苇信息提取的用户精 度和制图精度均达到较高水平,能满足本研究的需要(表1)。

		u use / cover classification	i ioi uie v	Western Songhen I la	in, Ciina	
	地表真实类型 Ground Truth					
分类结果 Classification Results	水体 Water	草本湿地 (非芦苇) Herb Wetland (not-reed)	芦苇 Reed	其他植被 Other vegetation	合计 Total	用户精度 User accuracy/%
水体Water	56	2	0	0	58	96.55
早本湿地(非戶韦)Herb Wetland (not- reed)	0	72	13	4	89	80.90
芦苇 Reed	0	21	201	2	224	89.73
其他植被 Other Vegetation	0	5	9	42	56	75.00
合计 Total	56	100	223	48	427	
制图精度 Producer Accuracy/%	100	72.00	90.13	87.50		
总体精度 Overall Accuracy/% 86.89	Kappa =	0.7966				

表1 松嫩平原西部地区土地分类结果的混淆矩阵

Table 1 Confusion Matrix of land use (asymptotication for the Western Songnon Plain Ching

松嫩平原西部芦苇分布如图 3 所示,芦苇主要分布于研究区北部的扎龙湿地自然保护区,在研究区的南 部分布相对稀少;且在沿河流及湖泊等水量充足的区域,芦苇分布最为集中,而在距离河、湖偏远的地区,芦苇 分布相对较少。

结果表明,松嫩平原西部芦苇总面积为1653 km<sup>2</sup>,5 个典型湿地保护区内的芦苇分布面积达1313 km<sup>2</sup>,约 占松嫩平原西部芦苇总面积的 79.5%,其中分布在研究区中北部的扎龙湿地,现有芦苇面积占 71.3%(表 2)。

Table 2 Statistics of disparate reed	area in the Western Songnen Plain,	China
区域 Region	面积 Area/km <sup>2</sup>	比例 Proportion/%
扎龙自然保护区 Zhalong Nature Reserve	1178	71.3
莫莫格自然保护区 Momoge Nature Reserve	59	3.6
查干湖自然保护区 Chagan Lake Nature Reserve	51	3.1
向海自然保护区 Xianghai Nature Reserve	22	1.3
大布苏自然保护区 Dabusu Nature Reserve	3	0.2
其他区域 Other regions	340	20.6
松嫩平原西部 Western Songnen Plain	1653	100

表 2 松嫩平原西部芦苇分布面积分区统计

#### 2.2 芦苇 AGB 反演模型构建与评价

#### 2.2.1 不同光谱植被指数对芦苇 AGB 的敏感性分析

通过对不同光谱植被指数与芦苇 AGB 进行相关分析(71 个样本),结果发现;芦苇 AGB 与其同期的 5 种 植被指数均极显著相关(表3),但不同的植被指数与 AGB 之间的相关程度不同,即不同的植被指数对 AGB 变化表现出不同的敏感性。其中,芦苇 AGB 与 RVI、EVI 间的相关系数均达到 0.68 以上,表明 RVI、EVI 指数 对芦苇 AGB 的敏感性较强,能很好的反映芦苇 AGB 的变化情况。5 种植被指数敏感性由大到小依次为:RVI > EVI > WDVI > NDVI> MSAVI,这意味着选择合适的植被指数可用于芦苇 AGB 遥感反演模型的构建。

2.2.2 最优估算模型选择及精度评价

表 4 列出基于 5 种植被指数与芦苇 AGB 拟合的一元回归模型。从表 4 中可以看出,利用 EVI、WDVI、 RVI、NDVI 等植被指数拟合的一元曲线回归模型(SCRM)均达到较好的拟合效果。在所选的线性模型、指数 模型、二次项模型和幂指数模型中,5种植被指数与芦苇 AGB 拟合的指数模型效果较好。其中,EVI 的拟合效





图 3 松嫩平原西部芦苇湿地分布格局

#### Fig.3 Distribution of reed wetlands in the Western Songnen Plain, China

#### 果最好,其决定系数 R<sup>2</sup>达 0.55; WDVI 次之, R<sup>2</sup>为 0.52, 拟合效果最差的是 MSAVI, R<sup>2</sup>系数仅为 0.43。

表 3	不同植被指数与芦苇地上生物量的相关系数

Table 2	The correlation	anofficient between	different	vogetation	indiana and	mood ACP
Table 5	The correlation	coefficient between	unterent	vegetation	mulces and	Teeu AGD

植被指数 Vege	etation indices	EVI	MSAVI	NDVI	WDVI	RVI
芦苇地上生物量	相关性 Correlation	0.683 **	0.538 **	0.605 **	0.670 **	0.689 **
Reed AGB	显著性 Significance	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

\*\*表示在 .01 水平上显著相关;EVI 增强型植被指数 Enhanced vegetation index;MSAVI 修改型土壤调整植被指数 Modified soil adjusted vegetation index;NDVI 归一化差异植被指数 Normalized difference vegetation index;WDVI 加权差分植被指数 Weighted difference vegetation index;RVI 比值植被指数 Ratio vegetation index

Table 4      Models for estimating reed aboveground biomass with vegetation indexes						
方程类型	植被指数	回归模型	决定系数(R <sup>2</sup> )	样本数		
Function type	Vegetation index	Regression model	Decision coefficient	Sample number		
线性模型	EVI	y = 1457.4x + 8.5	0.47	71		
Linear model	WDVI	y = 2491.4x + 47.755	0.45	71		
	RVI	y = 94.265x + 89.43	0.48	71		
	NDVI	y = 1070.9x - 168.36	0.37	71		
	MSAVI	y = 966.2x - 231.38	0.29	71		
指数模型	EVI	$y = 166.4 e^{2.99x}$	0.55	71		
Exponential model	WDVI	$y = 181.72e^{5.0616x}$	0.52	71		

#### 表4 基于植被指数的芦苇 AGB 估算模型

٨

0

С

36卷

续表				
方程类型	植被指数	回归模型	决定系数(R <sup>2</sup> )	样本数
Function type	Vegetation index	Regression model	Decision coefficient	Sample number
	RVI	$y = 204.13 e^{0.1843x}$	0.51	71
	NDVI	$y = 105.61e^{2.3413x}$	0.49	71
	MSAVI	$y = 84.002e^{2.2324x}$	0.43	71
二次项模型	EVI	$y = 3288.4x^2 - 568.53x + 280.31$	0.51	71
Quadratic term model	WDVI	$y = 8119.3x^2 - 265.95x + 250.35$	0.48	71
	RVI	$y = 2.162x^2 + 73.642x + 132.34$	0.48	71
	NDVI	$y = 2513.4x^2 - 1518.4x + 426.44$	0.46	71
	MSAVI	$y = 2175.8x^2 - 1499.6x + 351.96$	0.40	71
幂指数模型	EVI	$y = 1026.1 \ x^{0.6998} x^{0.6998}$	0.49	71
Power index model	WDVI	$y = 1507.8x^{0.6703}$	0.47	71
	RVI	$y = 175.03x^{0.69}$	0.51	71
	NDVI	$y = 721.41x^{0.9073}$	0.41	71
	MSAVI	$y = 561.31x^{0.6642}$	0.27	71

800

600

400

200

0

0

估算值 Estimated value/(g/m<sup>2</sup>)

针对拟合效果最好的 EVI 指数模型,利用预留的 验证点,通过预测误差(均方根误差)和预测精度(估算 精度)进行精度评价,实测值与估算值对比结果如图4, EVI 指数拟合的指数模型达到较高的估算精度,实测值 与估算值的回归系数达 0.85(P<0.01),其预测误差为 60.9g/m<sup>2</sup>, 预测精度达到 86.7%。综合考虑 5 种植被指 数对生物量的敏感程度,可以认为利用 EVI 植被指数 构建的遥感估算指数模型 y = 166.4e<sup>2.99×EVI</sup>y = 166.4 e2.99 \* EVI 具有较好、较稳定的估算能力,可应用于松 嫩平原西部芦苇 AGB 的遥感定量估算。

2.3 芦苇 AGB 遥感估算及空间格局

2.3.1 松嫩平原西部芦苇 AGB 遥感估算

西部芦苇 AGB 进行估算,得到芦苇 AGB 统计结果如表



 $= 2.6653x^{0.8357}$ 

 $R^2 = 0.85$ 

5 所示: 从整个研究区来看, 2014 年 8 月该区芦苇总产量为 6.14×10<sup>5</sup> t, 芦苇平均 AGB 为 372.1 g/m<sup>2</sup>, 区域内 最大值与最小值变幅达 831.3 g/m<sup>2</sup>。对于各保护区而言, 芦苇 AGB 最大值和最小值均出现在大布苏保护区, 变幅最小的为向海保护区。各保护区芦苇平均 AGB 差异较小,除查干湖平均 AGB 略低于整个区域的平均水 平外,其他几个保护区的平均 AGB 均在整个区域的平均值之上。扎龙自然保护区芦苇总产量最大,为 4.38× 10<sup>5</sup> t,占整个松嫩平原西部地区芦苇总产量的71.3%;而大布苏保护区总产量最小,仅为0.1×10<sup>5</sup> t(表5)。 2.3.2 松嫩平原西部芦苇 AGB 分布格局

基于 EVI 所构建的最优地上生物量遥感估算模型  $\gamma = 166.4 e^{2.99 \times EVI}$  反演得到松嫩平原西部芦苇 AGB,空 间分布制图如图 5。结合松嫩平原西部芦苇分布面积(图 3),可以发现:研究区北部的芦苇 AGB 总量大于南 部。在5个自然保护区中,扎龙保护区内的芦苇 AGB 总量最高,且平均 AGB 从西北向东南呈现出递减的趋 势,即在西北部单位面积内的芦苇长势较好;查干湖保护区内芦苇平均 AGB 值整体偏低,AGB 较高的地区多 分布在查干湖南部;莫莫格保护区的北部和西部芦苇 AGB 较高,表明芦苇长势较好,而在莫莫格中部和南部 地区芦苇 AGB 相对偏低:向海保护区和大布苏保护区内芦苇 AGB 普遍较高,表明这些地区的芦苇生长旺盛, 但在向海保护区的中部和大布苏保护区的边缘,芦苇 AGB 较低,这可能与边缘地区受到的人为活动干扰较强 有关。

24 期

验证点

趋势线 1:1线

表 5 不同区域芦苇 AGB 估算结果						
Table 5      Estimated disparate reed AGB in the Western Songnen Plain						
区域	最小值	最大值	变幅	平均值	总量	
Region	$Min/(g/m^2)$	$Max/(g/m^2)$	Range/ $(g/m^2)$	$Mean/(g/m^2)$	Amount/(×10 <sup>4</sup> t)	
扎龙自然保护区 Zhalong Nature Reserve	155.5	736.4	581.0	372.4	43.8	
莫莫格自然保护区 Momoge Nature Reserve	184.1	679.0	494.9	373.0	2.1	
查干湖自然保护区 Chagan Lake Nature Reserve	147.9	706.7	558.8	369.8	1.9	
向海自然保护区 Xianghai Nature Reserve	205.9	695.2	489.3	469.7	1.0	
大布苏自然保护区 Dabusu Nature Reserve	147.6	866.8	719.2	454.1	0.1	
松嫩平原西部 Western Songnen Plain	135.1	966.3	831.3	372.1	61.4	



图 5 松嫩平原西部芦苇 AGB 空间分布 Fig.5 Spatial pattern of reed AGB in the Western Songnen Plain

### 3 讨论

目前,湿地遥感分类的传统方法分类精度通常不高,常用的湿地分类方法(如最大似然法)分类精度大多只有 30%—60%<sup>[25-26]</sup>。尽管许多新的分类方法使分类效果明显提高,但大多数仍停留在只利用光谱信息,而

对目标地物在遥感影像上的其他特征(如形状、纹理等)未能充分利用<sup>[27]</sup>,并且普遍存在模型参数多、运算复杂等缺陷,从而在实际应用过程中出现"同物异谱"和"异物同谱"的现象。本文采用面向对象的遥感分类方法,借助对象光谱特征及空间特征,并利用多季相影像上不同植被特征的季相差异,较好地提取了松嫩平原西部芦苇湿地空间分布信息,其制图精度达90.13%。本研究的结果表明,利用面向对象的方法,对中等空间分辨率影像进行分类,可以有效提取芦苇空间分布信息,能够满足精度要求。

植被指数是一种简单而有效的光谱信号,不同光谱通道所获得的植被信息与植被的不同要素或某种特征状态的相关性不同<sup>[28]</sup>。因而,建立植被指数与植物生物量的数学模型,可以实现植物长势动态遥感监测和估产。王正兴等<sup>[29]</sup>对不同植被指数进行研究发现 MODIS- EVI 同时减少了大气和土壤噪音的影响,明显改善了高植被覆盖区内,植被指数与不同覆盖程度植被的线性关系。李红军等<sup>[30]</sup>应用数理统计和地统计学方法对 NDVI 和 EVI 比较分析表明 EVI 很好的克服了 NDVI 在植被生长旺盛期容易达到饱和这一缺陷,比较真实地反映了植被的生长变化过程及研究区内植被的空间差异。本文选用了 NDVI、EVI、RVI、MSAVI、WDVI 5 种植被指数对芦苇 AGB 做敏感性分析,结果显示:不同的植被光谱指数对芦苇 AGB 的敏感性较好,相关系数均达到 0.68 以上;WDVI、NDVI 的敏感反应一般; MSAVI 对芦苇 AGB 的敏感性较好,相关系数均达到 0.68 以上;WDVI、NDVI 的敏感反应一般; MSAVI 对芦苇 AGB 的敏感性较好,相关系数均达到 0.68 以上;WDVI、NDVI 的敏感反应一般; MSAVI 对芦苇 AGB 的敏感性和时效性有关<sup>[28]</sup>,如研究区内芦苇生长的环境土壤水分含量较高,受土壤水分的影响,不同植被光谱指数在使用时具有不同的局限性<sup>[31]</sup>,从而对植被生物量表现出不同的敏感反应;且研究区内芦苇分布较为集中,在高覆盖区,EVI 对植被变化的敏感性更强。

本文根据研究区芦苇分布集中的特点,选取 91 个典型性的样地,每个样地即为 1 个样点,每个样点均划 定 3 个有代表性的样方,按照这一原则进行采样,以降低地面测量尺度与被验证像元尺度之间的不匹配问题 对生物量反演精度的影响。在对不同植被指数与生物量之间构建的线性模型、指数模型、二次项模型和幂指 数模型进行比较分析的基础上,选取最优模型对芦苇 AGB 进行估算和反演。结果显示,松嫩平原西部芦苇 AGB 具有明显的南高北低的空间分布差异。这可能与以下几个因素有关:(1)松嫩平原西部气温受纬度影响 由北向南递增,降水量平均值呈现由东北向西南递减的空间分布格局,研究区内气候特点的差异,在一定程度 上导致了芦苇 AGB 在空间上南高北低的分布格局;(2)不同地区河流、湖泊水位状况不同,使其土壤的养分 存在一定差异,因而影响芦苇的长势;(3)芦苇长势的空间差异在一定程度上也受人类活动的影响,如围垦开 荒、石油污染、工业废水、道路修建等,而不同地区人为活动的干扰程度不同。

#### 4 结论

本文以松嫩平原西部为研究区,利用多季相 Landsat 遥感影像实现了芦苇分布信息的精确提取;基于 MODIS 数据和野外实测数据,构建芦苇 AGB 遥感估算模型并进行芦苇 AGB 遥感反演。主要结论如下:(1) 基于多季相遥感数据和面向对象分类方法提取研究区芦苇分布信息,松嫩平原西部芦苇分布面积为 1653 km<sup>2</sup>,提取精度满足研究的需要。(2)基于 MODIS 数据源计算的 5 种植被指数,与芦苇 AGB 存在极显著相关 性(*P*<0.01),但不同植被指数对地上生物量的敏感程度不同。受研究区内土壤水分以及芦苇集中分布的影 响,使得 EVI 植被指数建立的指数回归模型(*y*=166.4e<sup>2.99×EVI</sup>)具有较好的拟合效果,估算精度达 86.7%,表明 利用合适的植被指数对芦苇 AGB 进行遥感反演可以达到较为理想的效果。(3)芦苇 AGB 遥感估算和反演的 空间分布格局表明,松嫩平原西部芦苇 AGB 总量为 6.14×10<sup>5</sup>t。芦苇平均 AGB 存在明显的空间差异,高值区 主要分布在向海保护区和大布苏保护区内,整体呈现南高北低的分布格局。以上结果说明,基于多季相影像 数据,采用面向对象的方法提取湿地芦苇信息,能够有效提高分类精度,是一种低成本且行之有效的湿地信息 提取方法;利用植被指数开展景观尺度的芦苇 AGB 估算,对于区域湿地资源管理和科学利用具有重要的支撑 作用。

#### 参考文献(References):

- Lehner B, Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. Journal of Hydrology, 2004, 296(1/4):
  1-22.
- [2] 樊玉清,王秀海,孟庆生.辽河口湿地芦苇群落退化过程中土壤营养元素和含盐量变化.湿地科学,2013,11(1):35-40.
- [3] 张德君,高航,杨俊,席建超,李雪铭.基于 GIS 的南四湖湿地生态脆弱性评价.资源科学,2014,36(4):874-882.
- [4] 程嘉伟,邓昶身,鲁长虎.苏州太湖湖滨人工种植和原生芦苇湿地鸟类群落.动物学杂志,2014,49(3):347-356.
- [5] 唐娜, 崔保山, 赵欣胜. 黄河三角洲芦苇湿地的恢复. 生态学报, 2006, 26(8): 2616-2624.
- [6] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究.生态学报,1999,19(5):607-613.
- [7] 陈建, 王世岩, 毛战坡. 1976-2008 年黄河三角洲湿地变化的遥感监测. 地理科学进展, 2011, 30(5): 585-592.
- [8] 任玉环, 刘亚岚, 许华, 刘旭东, 尹球. 基于环境一号小卫星 CCD 图像的滨海湿地监测研究. 遥感信息, 2011, (3): 27-32, 37-37.
- [9] Salem F, Kafatos M, El-Ghazawi T, Gomez R, Yang R X. Hyperspectral image assessment of oil-contaminated wetland. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(4): 811-821.
- [10] Hirano A, Madden M, Welch R. Hyperspectral image data for mapping wetland vegetation. Wetlands, 2003, 23(2): 436-448.
- [11] 童庆禧,郑兰芬,王晋年,王向军,董卫东,胡远满,党顺行.湿地植被成象光谱遥感研究.遥感学报,1997,1(1):50-57,82-83,85-85.
- [12] Schmid T, Koch M, Gumuzzio J, Mather P M. A spectral library for a semi-arid wetland and its application to studies of wetland degradation using hyperspectral and multispectral data. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(13): 2485-2496.
- [13] 李凤秀,张柏,刘殿伟,宋开山.洪河自然保护区乌拉苔草生物量高光谱遥感估算模型.湿地科学,2008,6(1):51-59.
- [14] 刘兴土. 东北湿地. 北京: 科学出版社, 2005:263-300.
- [15] 吕宪国,刘晓辉.中国湿地研究进展——献给中国科学院东北地理与农业生态研究所建所 50 周年.地理科学, 2008, 28(3): 301-308.
- [16] Yu X F, Grace M, Zou Y C, Yu X F, Lu X G, Wang G P. Surface sediments in the marsh-sandy land transitional area: sandification in the western Songnen Plain, China. PLoS One, 2014, 9(6): e99715.
- [17] 罗玲, 王宗明, 任春颖, 宋开山, 李晓燕. 基于 MODIS 数据的松嫩草原产草量遥感估算模型与空间反演. 农业工程学报, 2010, 26(5): 182-187.
- [18] 杨允菲,李建东.松嫩平原不同生境芦苇种群分株的生物量分配与生长分析.应用生态学报,2003,14(1):30-34.
- [19] Wang Z M, Song K S, Zhang B, Liu D W, Ren C Y, Luo L, Yang T, Huang N, Hu L J, Yang H J, Liu Z M. Shrinkage and fragmentation of grasslands in the West Songnen Plain, China. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 129(1/3): 315-324.
- [20] Wang Z M, Huang N, Luo L, Li X Y, Ren C Y, Song K S, Chen J M. Shrinkage and fragmentation of marshes in the West Songnen Plain, China, from 1954 to 2008 and its possible causes. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(3): 477-486.
- [21] 谢静. 基于多季相遥感信息的三江平原湿地信息提取[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013.
- [22] Lu D S, Chen Q, Wang G X, Liu L J, Li G Y, Moran E. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. International Journal of Digital Earth, 2014, (13): 1-43, doi: 10.1080/17538947.2014.990526.
- [23] Zhang G, Ganguly S, Nemani R R, White M A, Milesi C, Hashimoto H, Wang W L, Saatchi S, Yu Y F, Myneni R B. Estimation of forest aboveground biomass in California using canopy height and leaf area index estimated from satellite data. Remote Sensing of Environment, 2014, 151 (8): 44-56.
- [24] Mao D H, Wang Z M, Li L, Ma W H. Spatiotemporal dynamics of grassland aboveground net primary productivity and its association with climatic pattern and changes in Northern China. Ecological Indicators, 2014, 41(6): 40-48.
- [25] Macalister C, Mahaxay M. Mapping wetlands in the Lower Mekong Basin for wetland resource and conservation management using Landsat ETM images and field survey data. Journal of Environmental Management, 2009, 90(7): 2130-2137.
- [26] Ozesmi S L, Bauer M E. Satellite remote sensing of wetlands. Wetlands Ecology and Management, 2002, 10(5): 381-402.
- [27] 史泽鹏,马友华,王玉佳,马中文,黄勤,黄艳艳.遥感影像土地利用/覆盖分类方法研究进展.中国农学通报,2012,28(12):273-278.
- [28] 高明亮, 赵文吉, 宫兆宁, 赫晓慧. 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究. 生态学报, 2013, 33(2): 542-553.
- [29] 王正兴, 刘闯, Huete A. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
- [30] 李红军,郑力, 雷玉平, 李春强, 周戡. 基于 EOS/MODIS 数据的 NDVI 与 EVI 比较研究. 地理科学进展, 2007, 26(1): 26-32.
- [31] Holzman M E, Rivas R, Piccolo M C. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 28(5): 181-192.