

# 基于 NDVI 的巴音布鲁克天鹅湖 高寒湿地地上生物量的反演

杜卫平<sup>1</sup>, 徐晓龙<sup>2</sup>, 王宁宁<sup>3</sup>, 王新军<sup>3</sup>, 李先怡<sup>2</sup>, 贾宏涛<sup>3</sup>

(1.新疆轻工职业技术学院 电气技术分院,嵌入式技术应用开发实训室,乌鲁木齐 830021; 2.珠海欧比特宇航科技股份有限公司,珠海 519080; 3.新疆农业大学 草业与环境科学学院,新疆土壤与植物生态过程实验室,乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 以巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地为研究对象,基于 Landsat 8 OLI 多光谱遥感影像数据,提取植被指数(NDVI,EVI,RVI)信息,构建植被指数与地上生物量的回归模型,比较不同植被指数的拟合效果。结果表明,NDVI与地上生物量的相关性最高( $r=0.778$ ),显著大于 EVI、RVI 与地上生物量的相关性;二次多项式是 NDVI 与地上生物量构建的 4 种回归模型最优估测模型,决定系数  $R^2$  达到 0.6619;巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地 2016 年地上生物量的储量约为  $2.86 \times 10^5$  kg,地上生物量密度为  $10.25 \sim 444.99$  g/m<sup>2</sup>,均值为  $323.08 \pm 52.68$  g/m<sup>2</sup>。

**关键词:** 巴音布鲁克; 高寒湿地; 生物量反演; NDVI 植被指数

中图分类号: Q948;TP751

文献标识码:A

## Inversion of Aboveground Biomass of Alpine Wetland in Bayanbulak Swan Lake Based on NDVI

DU Wei-ping<sup>1</sup>, XU Xiao-long<sup>2</sup>, WANG Ning-ning<sup>3</sup>,  
WANG Xin-jun<sup>3</sup>, LI Xian-yi<sup>2</sup>, JIA Hong-tao<sup>3</sup>

(1.Embedded Technology Application Development Training Room,Electrical Technology School of Xinjiang Institute of Light Industry Technology,Urumqi 830021,China; 2.Zhuhai Orbita Aerospace Science & Technology Co., Ltd.,Zhuhai 519080,China; 3.Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes/College of Pratacultural and Environmental Sciences,Xinjiang Agricultural University,Urumqi 830052,China)

**Abstract:** Based on the alpine wetland of Bayinbulak Swan Lake and Landsat 8 OLI multi-spectral remote sensing image data,the paper extracted vegetation index (NDVI,EVI,RVI) information,constructed a regression model of vegetation index and aboveground biomass,and compared the fitting effects of different vegetation indices.The results showed that the correlation between NDVI and aboveground biomass was the highest ( $r = 0.778$ ), which was significantly greater than the correlation between EVI, RVI and aboveground biomass.The quadratic polynomial was the optimal estimation one among four regression models for NDVI and aboveground biomass construction. The coefficient of determination  $R^2$  reached 0.6619, the reserves of aboveground biomass in the Bayanbulak Swan Lake alpine wetland in 2016 was about  $2.86 \times 10^5$  kg,and the aboveground biomass density ranged from 10.25 to 444.99 g/m<sup>2</sup>,with an average of  $323.08$  g/m<sup>2</sup>.

**Key words:** Bayanbulak; alpine wetland; biomass inversion; NDVI vegetation index

收稿日期:2019-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(31560171);“珠海一号”卫星大数据云服务平台与应用示范(ZH0111-0405-170027

©1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net  
通讯作者:贾宏涛,E-mail:jht@xjau.edu.cn

湿地是地球上水体与陆地相互作用下所形成的一种独特的生态系统<sup>[1,2]</sup>,是水生植物重要的生存环境,且与人类生存发展紧密相连<sup>[3]</sup>,同时对防洪抗旱、气候调节、生物多样性保护等方面具有不可替代的作用<sup>[4]</sup>。湿地生态系统健康状况常以地上生物量这一重要指标来衡量,湿地植被群落生物量的研究为湿地生态系统物质循环、能量流动和生产力分析提供了理论基础<sup>[5]</sup>。近些年来,在人类活动影响下,对湿地资源大量开发和生态环境恶性污染,致使湿地组成结构、生态功能、以及动植物生存环境受到严重破坏,导致湿地资源不断丧失,生态环境不断退化,生产力急速下降<sup>[6]</sup>。因此,对于湿地植被生物量的反演可以间接地实时监测湿地生态系统的动态变化,同时对于理解湿地的生态过程和生态功能具有重要的理论意义<sup>[7,8]</sup>,为湿地生态系统恢复、管理提供大范围、多尺度的数据支撑。李凤秀等<sup>[9]</sup>运用 FDRVI 和 FDNVI 微分光谱植被指数,估算洪河自然保护区苔草水上鲜生物量和干生物量,结果表明具有较高的预测精度;韩颖等<sup>[10]</sup>利用同步的 TM 数据建立了洪河湿地地上生物量遥感反演模型,结果表明多元回归模型是洪河湿地地上生物量估算的精度最优模型;刘菊等<sup>[11]</sup>基于 SAR 数据,采用后向反馈神经网络(BP)算法,反演了鄱阳湖湿地植被生物量,研究结果表明后向反馈神经网络(BP)算法降低生物量反演误差;黎夏等<sup>[12]</sup>以 SAR 数据为数据源,利用雷达后向散射系数构建红树林湿地植被生物量估算模型,研究结果表明雷达后向散射系数模型能提高植被生物量估算的精度;吴天君等<sup>[13]</sup>基于 CBERS 2B 卫星 CCD 多光谱遥感影像和地面实测植被生物量信息,采用回归算法构建黄河湿地郑州段反演模型,结果表明 CBERS 2B 卫星 CCD 多光谱遥感影像可满足植被生物量的反演需求。目前,关于我国典型的干旱区高寒湿地植物群落地上生物量反演的相关研究较为薄弱。

新疆巴音布鲁克高寒湿地作为开都河和孔雀河的水源地,对南疆地区的水资源调节等方面起着不可替代的作用<sup>[14]</sup>。现以地处干旱区的巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地为研究对象,基于 Landsat 8 OLI 多光谱遥感影像,提取 NDVI、EVI、RVI 植被指数,并与相对应的地上生物量进行相关性分析,建立植被指数与地上生物量最优回归模型,筛选出最优植被指数指标;另外,基于 NDVI 与地上生物量估测最优模型,可明确植被指数和地上生物量的空间分布,准确估算研究区的地上生物量储量。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地(42°35′~43°00′N,83°40′~84°40′E)位于巴音布鲁克草原大尤勒都斯山间盆地,四面环山,海拔 2 270~2 496 m,东西长 60 km,南北宽 20 km,面积约为 833.59 km<sup>2</sup>,属国家级自然保护区。多年平均气温为-4.25℃,最高气温 28.0℃,极端最低气温-48.1℃;10月中旬至翌年 5 月中旬,地表均被积雪覆盖,全年积雪日长达 150~180 d;多年平均降水量为 274.39 mm,5~9 月为全年降水主要月份;地表多年平均蒸发量为 1 250 mm;空气多年平均相对湿度为 69.73%;地下水位深在 0.5~1.0 m,属于典型的干旱区高寒湿地<sup>[8,15,16]</sup>。湿地水资源主要源于高山冰雪融水和自然降水补给,为开都河、孔雀河两大内流河的源流区<sup>[17]</sup>。黑花苔草(*Carex melanantha*)、细果苔草(*C. stenocarpa*)、大穗苔草(*C. rhynchoophysa*)、单行苔草(*C. divisa*)、早熟禾(*Poa* sp.)和线叶嵩草(*Obresia capillifolia*)等为湿地的主要植被类型<sup>[17,18]</sup>。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 数据来源及预处理

为准确估算研究区地上生物量,尽量选择植被生长较好的月份(7月下旬至8月下旬),以利于建立地上生物量与植被指数最优估测模型;此外,根据影像的质量和可获取日期,最终选取 2013 年 8 月 26 日、2015 年 7 月 15 日、2016 年 7 月 17 日空间分辨率为 30 m 的 OLI 影像为数据源,其轨道号均为 145/030(来源于 USGS 和地理空间数据云)。影像均经过几何精校正(平均误差控制在 0.5 个像元以内)、辐射校正、影像裁剪,统一投影坐标系(地图投影:UTM),选取多光谱影像中的 1~7 可见光波段(空间分辨率 30 m)和全色波段(空间分辨率 15 m)进行图像融合等预处理。

#### 1.2.2 野外调查

于 2013 年 8 月(16 个)、2015 年 8 月(16 个)、2016 年 8 月(28 个)实地选择 60 个 30 m×30 m 典型采样地,其中草甸样地 16 个,草原样地 26 个,沼泽样地 18 个,每个样地布设 10 个 1 m×1 m 样方<sup>[19]</sup>(图 1)。采用常规方法,观测并记录每个样方位置地形(坐标、坡向、坡度、海拔等)、植被盖度、植被高度、植被频度、植被名称等。剪取样方中的植被并收取样方中的凋落物装入信封内,编号整理带回室内实验室,105℃杀青 30 min,65℃条件下烘干

至恒重,电子天平称重获取样方点生物量数据<sup>[20]</sup>。

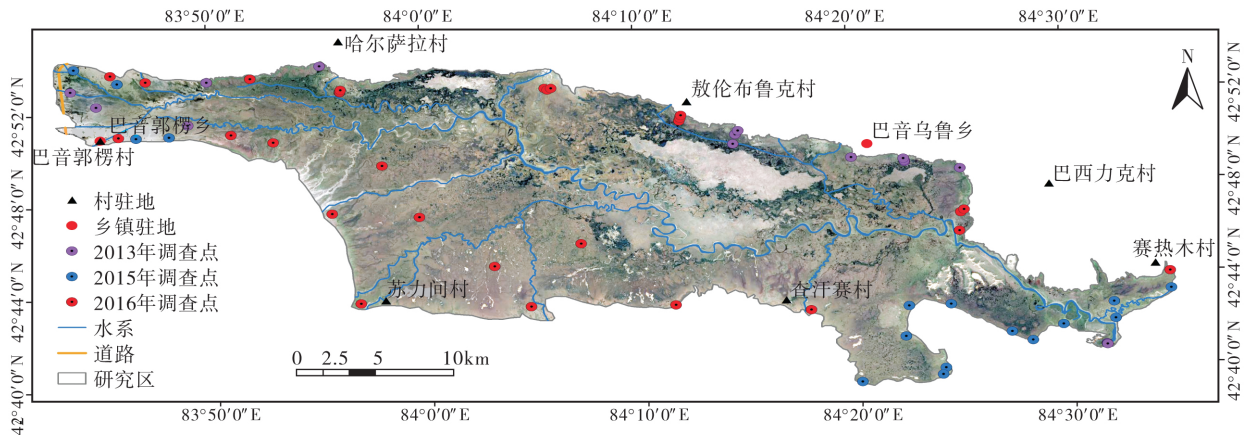


图 1 研究区示意图及采样点

Fig. 1 The location of the experimental site in Bayanbulak Swan Lake alpine wetland

### 1.2.3 植被指数

植被指数是基于多光谱或高光谱数据中两个或两个以上波段范围内的反射率值,采用线性或非线性的方法进行组合、运算获得<sup>[21,22]</sup>。地表植被覆盖度、生物量可以通过植被指数与其建立线性或非线性统计模型来表示,以此达到区域植被生物量、植被覆盖度的估算<sup>[23,24]</sup>。参考湿地植被生物量反演研究相关文献<sup>[25-27]</sup>,选取归一化植被指数(NDVI)、增强植被指数(EVI)、比值植被指数(RVI)等 3 种常用植被指数作对比,筛选出能反演巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地植被生物量最佳植被指数。

归一化植被指数(NDVI)<sup>[28]</sup>:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$$

式中:  $\rho_{NIR}$  为近红外波段的反射率;  $\rho_R$  为红波段的反射率。

增强植被指数(EVI)<sup>[29]</sup>:

$$EVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + C_1\rho_R - C_2\rho_B + L}(1 + L)$$

式中:  $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_R$ 、 $\rho_B$  分别代表近红外、红、蓝波段的反射率;  $L$  为背景调节参数;  $C_1$ 、 $C_2$  为大气校正参数。

比值植被指数(RVI)<sup>[30]</sup>:

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

式中:  $\rho_{NIR}$  为近红外波段的反射率;  $\rho_R$  为红波段的反射率。

### 1.2.4 模型构建与精度验证

从巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地 2013 年、2015 年、2016 年植被指数(NDVI、EVI、RVI)数据与对应的样点实测地上生物量数据所组成的样本序列中,

随机选取 45 个样点数据(总样点 60 个),利用 SPSS19.0 统计软件将植被指数(NDVI、EVI、RVI)值与相对应的像元点地上生物量值进行相关性分析,并逐步建立 NDVI 与研究区域地上生物量常见的一元回归模型,通过比较决定系数  $R^2$ ,筛选出最优模型进行研究区域地上生物量遥感估算。然后,利用预留的 15 个实测样点地上生物量数据与建立的遥感估算模型计算的地上生物量进行比较,通过均方根误差和估算精度对模型进行精度分析<sup>[31]</sup>。

均方根误差(RMSE)

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

估算精度(Accuracy)

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

式中:  $RMSE$  为均方根误差;  $Accuracy$  为估算精度;  $Y_i$  为实测研究区地上生物量( $g/m^2$ );  $Y'_i$  为研究区地上生物量估算值( $g/m^2$ );  $\bar{Y}$  为实测研究区地上生物量平均值( $g/m^2$ );  $N$  为样点数。

## 2 结果与分析

### 2.1 湿地地上生物量反演模型构建与评价

#### 2.1.1 植被指数提取与地上生物量的相关性分析

通过对植被指数(NDVI、EVI、RVI)值与相对应的样点地上生物量值进行相关性分析(45 个样点)。结果表明,NDVI、EVI、RVI 与地上生物量均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),但不同的植被指数与地上生物量之间的相关程度也不同,即不同的植被

指数对地上生物量变化表现出不同的敏感性。其中,NDVI与地上生物量的相关性最高,相关系数  $r = 0.778$ , 显著大于 EVI ( $r = 0.708$ )、RVI ( $r = 0.710$ )与地上生物量的相关性;EVI、RVI与地上生物量的相关性大致相同。从相关性分析结果可以看出,与 EVI、RVI相比,NDVI 更适合用于巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地地上生物量遥感反演模型的构建。

2.1.2 植被指数与地上生物量估算模型选择及精度评价

通过对 NDVI 与地上生物量进行常见的线性、二次多项式、指数、幂函数等一元回归模型拟合,得到各估测方程模型的决定系数和相关显著性。结果表明,NDVI 植被指数与地上生物量均呈极显著的关系(表 1),说明以 NDVI 植被指数为自变量构建的一元回归方程估测模型均达到较好的拟合效果,其中,以 NDVI 为自变量建立的二次多项式模型是最优估测模型,拟合方程的决定系数达到 0.661 9;以 NDVI 为自变量建立的幂函数模型拟合效果较差,拟合方程的决定系数为 0.572 8;4 种估测方程模型的拟合度依次表现为:幂函数方程模型 < 指数方程模型 < 线性方程模型 < 二次多项式方程模型。

表 1 地上生物量与 NDVI 估测模型对比

Table 1 Comparison between aboveground biomass and NDVI prediction model

回归模型	估测方程	决定系数
线性	$y = 434.87x + 10.126$	0.621 3
二次多项式	$y = 610.83x^2 - 345.3x + 247.59$	0.661 9
指数	$y = 107.91e^{1.4914x}$	0.619 1
幂函数	$y = 422.61x^{0.8541}$	0.572 8

注:模型样本  $n = 45$ 。

针对拟合效果最好的 NDVI 二次多项式模型,利用预留的 15 个实测样点地上生物量数据与建立  $y = 610.83x^2 - 345.3x + 247.59$  的遥感估算模型计算的地上生物量进行比较,通过均方根误差和估算精度对模型进行精度评价,研究区地上生物量实测值与地上生物量估算值对比结果见图 2,实测值与

估算值的回归系数为 0.630 6 ( $P < 0.01$ ),其预测误差为 37.55  $g/m^2$ ,预测精度达到 88.55%。综合考虑 NDVI 指数对巴音布鲁克天鹅湖地上生物量的敏感程度,以 NDVI 植被指数为自变量构建的二次多项式估算模型  $y = 610.83x^2 - 345.3x + 247.59$  来反演巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地植被地上生物量是可行的,可应用于巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地植被地上生物量的遥感定量估算。

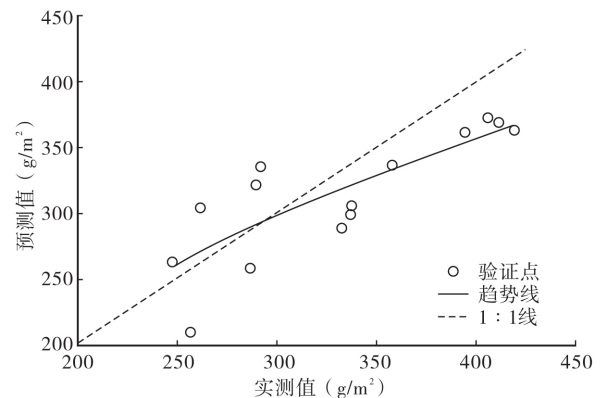


图 2 巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地地上生物量拟合精度验证

Fig.2 Verification of fitting accuracy of aboveground biomass in Bayanbulak Swan Lake alpine wetland

2.2 湿地归一化植被指数(NDVI)特征

利用 ArcGIS10.2 软件中重分类工具对提取后的 NDVI 栅格图像进行遵循自然断点重分类,再利用制图工具分别对巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地 2013 年、2015 年和 2016 年 NDVI 指数绘图,得出相对应的植被指数分级图(图 3、图 4、图 5),发现 2013 年 NDVI 偏小值(0.004~0.373)主要分布研究区西北方向,且偏小值范围比 2015 年、2016 年偏小值范围要大;随着年份变化,研究区西北方向的 NDVI 值逐渐增大,由 0.004~0.373(2013 年)范围增为 0.725~0.793(2016 年),说明研究区西北方向植被长势转好。通过对研究区 2013 年、2015 年和 2016 年提取的 NDVI 指数特征值统计(表 2),发现研究区在研究时间段 NDVI 值总和、平均值逐年递增,说明研究区总体上植被长势逐年变好。

表 2 巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地 NDVI 值特征

Table 2 The eigenvalues of NAVI in Bayanbulak Swan Lake alpine wetland

年份	最小值	最大值	总和	平均值	标准差
2013	0.003 9	1.000 0	584 281.164 7	0.660 1	0.158 2
2015	0.000 1	0.961 8	608 606.771 0	0.683 6	0.116 4
2016	0.003 5	1.000 0	635 922.202 1	0.717 8	0.120 9



### 2.3 湿地地上生物量估算

基于 NDVI 指数与地上生物量最优的二次多项式估测模型,运用 ArcGIS10.2 软件中栅格计算器工具,对巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地遥感影像地上生物量进行栅格计算,将计算出的地上生物量遵循自然断点分级法进行分类,得出 2016 年地上生物量分级图(图 6),发现研究区地上生物量大量级主要分布在南、北方向边缘以及东、西方向两端,中部核心区地上生物量值偏小。

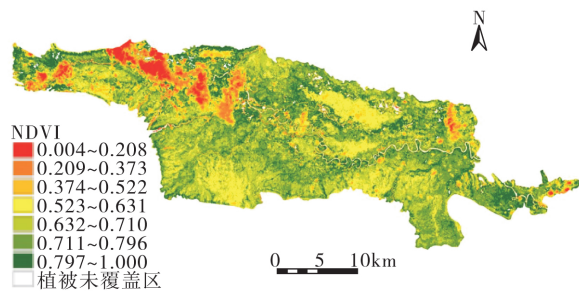


图 3 巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地 2013 年 8 月 NDVI 分布图

Fig.3 The NDVI distribution of Bayanbuluk Swan Lake alpine wetland in August, 2013

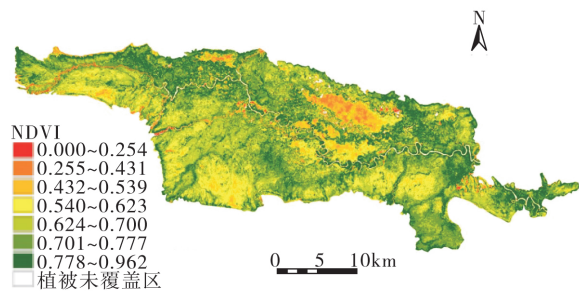


图 4 巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地 2015 年 7 月 NDVI 分布图

Fig.4 The NDVI distribution of Bayanbuluk Swan Lake alpine wetland in July, 2015

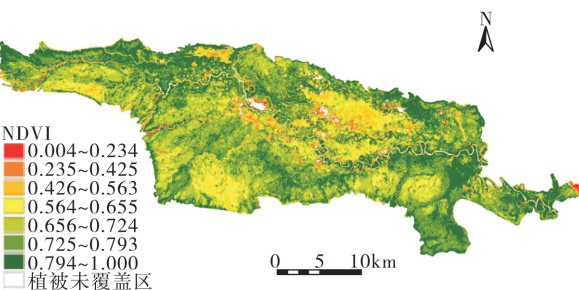


图 5 巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地 2016 年 7 月 NDVI 分布图

Fig.5 The NDVI distribution of Bayanbuluk Swan Lake alpine wetland in July, 2016

通过对研究区 2016 年地上生物量进行分类统计,将未被植被覆盖的区域(水体、裸土、岩石等)的

值通过设置为空值,使其不参与栅格计算,最终得出巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地的地上生物量数据(图 6)。结果表明,巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地 2016 年地上生物量的储量约为  $2.86 \times 10^5$  kg,地上生物量密度变化差异较大,其范围为  $10.25 \sim 444.99$  g/m<sup>2</sup>,平均值为  $323.08 \pm 52.68$  g/m<sup>2</sup>。

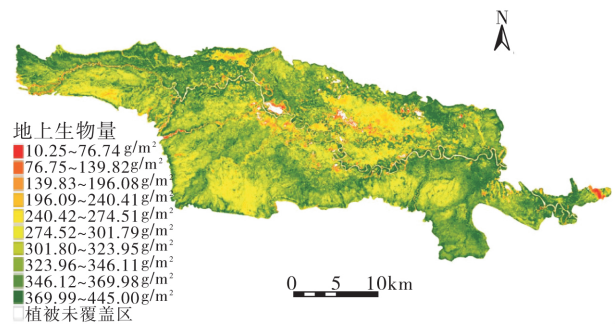


图 6 巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地地上生物量分级图

Fig.6 The distribution of aboveground biomass in Bayanbuluk Swan Lake alpine wetland

### 3 讨论

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>[31,32]</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。梁建平等<sup>[33]</sup>基于 Landsat8 OLI 卫星遥感数据,运用 NDVI 等 6 种植被指数构建双台河口湿地芦苇地上生物量的回归模型,发现 NDVI 构建的芦苇地上生物量回归模型优于其他指数构建的模型;李素英等<sup>[34]</sup>基于 TM 影像数据,运用 NDVI 等 5 种植被指数构建中国北方地区的典型草原植物地上生物量的回归模型,发现用 NDVI 构建的植物生物量回归模型优于其它植被指数构建的模型;Mutanga 等<sup>[35]</sup>基于 WorldView-2 影像数据,利用 NDVI 指数预测了 Simangaliso 湿地公园的植物生物量;陆琳莹<sup>[36]</sup>基于 Landsat8 OLI 遥感影像数据,运用 NDVI 等 6 个植被指数及波段信息构建浙江省滨海湿地互花米草生物量估测回归模型,发现用 NDVI 构建的互花米草生物量估测回归模型优于其他植被指数构建的模型;这些研究结果与本研究结果具有一致性。此外,田艳林等<sup>[31]</sup>基于多季相 Landsat8 OLI 遥感数据,分析选用了 NDVI 等 5 种植被指数对松嫩平原西部芦苇湿地地上生物量敏感性,发现 RVI、EVI 指数对湿地芦苇地上生物量的敏感性较好,NDVI 指数对湿地芦苇地上生物量的敏感性一般,这与本研究发现 NDVI 相比 EVI、

RVI对地上生物量更为敏感不一致,可能原因是植被光谱受到植被本身、生长环境、大气状况等多种因素影响,表现出明显的地域差异性<sup>[32,37]</sup>。

当前,遥感技术在湿地植被生物量估算研究中已大量报导,其中,大多数的研究是基于遥感数据或其植被指数与实测生物量数据,通过回归方程拟合,建立经验统计模型进行反演。本研究同样通过建立经验统计模型进行反演,得到比较好的反演结果。虽然这些方法能方便快速地获取一定成效,但由于野外采样历时较长,不能与遥感影像数据获取完全同步,导致野外采样数据和遥感图像成像时间有一定时间间隔,信息无法完全匹配,可能为研究结果带来一定的误差<sup>[38]</sup>。另外,经验统计模型有其自身不可抹去的劣势,易受研究区域的植被类型以及非植被因素如大气条件、土壤背景、地形和地表二向性反射特性的影响,模型涉及的参数需要不断地重新拟合和调整<sup>[39,40]</sup>。因此,后续研究可以考虑利用数据同化技术和高像元级地表数据信息,这样可获取更加精确的连续分布目标参数的信息,进而能更为准确的反演植被地上生物量,更有利于推进植被生物量反演研究持续发展。另外,本研究只选择常见的几个植被指数(NDVI、EVI、RVI)与地上生物量进行敏感分析,虽然得到了较好的结果,但是否还存在更好的指数,还需后期加强研究。同时,在模型构建时,只是对NDVI指数与地上生物量进行常见的一元回归模型拟合,是否存在更好的其他回归模型,还需后期加以验证,进一步去挖掘。

## 4 结论

以Landsat8 OLI多光谱遥感影像为数据源,采用遥感技术,提取植被指数信息,构建植被指数与地上生物量估测模型,比较不同植被指数的拟合效果,最终选取NDVI为生物量反演的最佳指标。

二次多项式是NDVI与地上生物量构建的4种回归模型最优估测模型,决定系数达到0.6619。

巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地2016年地上生物量的储量约为 $2.86 \times 10^5$  kg,地上生物量密度范围在 $10.25 \sim 444.99$  g/m<sup>2</sup>,平均值为 $323.08 \pm 52.68$  g/m<sup>2</sup>。

### 参考文献:

[1] Zhao W Z, Liu B, Zhang Z H. Water requirements of maize in the middle Heihe River Basin, China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(2): 215-223.

[2] 张敏,宫兆宁,赵文吉,等.近30年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制[J].生态学报,2016,36(15): 4780-4791.

[3] Copeland H E, Tessman S A, Giryetz E H, et al. A geospatial assessment on the distribution, condition, and vulnerability of Wyoming's wetlands[J]. Ecological Indicators, 2010, 10(4): 869-879.

[4] 沈国状,廖静娟,郭华东,等.基于ENVISAT ASAR数据的鄱阳湖湿地生物量反演研究[J].高技术通讯, 2009, 19(6): 644-649.

[5] 王树功,黎夏,周永章.湿地植被生物量测算方法研究进展[J].地理与地理信息科学, 2004, 20(5): 104-109.

[6] 谷东起,付军,闫文文,等.盐城滨海湿地退化评估及分区诊断[J].湿地科学, 2012, 10(1): 1-7.

[7] 赵天舸,于瑞宏,张志磊,等.湿地植被地上生物量遥感估算方法研究进展[J].生态学杂志, 2016, 35(7): 1936-1946.

[8] 徐晓龙,王新军,朱新萍,等.1996-2015年巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地景观格局演变分析[J].自然资源学报, 2018, 33(11): 1897-1911.

[9] 李凤秀,张柏,刘殿伟,等.洪河自然保护区乌拉苔草生物量高光谱遥感估算模型[J].湿地科学, 2008, 6(1): 51-59.

[10] 韩颖,裴亮,杜嘉.洪河湿地植被地上生物量遥感反演研究[J].遥感技术与应用, 2014, 29(2): 224-231.

[11] 刘菊,廖静娟,沈国状.基于全极化SAR数据反演鄱阳湖湿地植被生物量[J].国土资源遥感, 2012, 24(3): 38-43.

[12] 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.

[13] Li Xia, Ye Jiaan, Wang Shugong, et al. Estimating Mangrove Wetland Biomass Using Radar Remote Sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(3): 387-396.

[14] 吴天君,张曦文,赫晓慧.基于CBERS的黄河湿地生物量反演研究[J].测绘与空间地理信息, 2012, 35(5): 18-19.

[15] 包振宗,侯艳艳,朱新萍,等.干湿交替和模拟氮沉降对巴音布鲁克高寒湿地土壤CO<sub>2</sub>排放的影响[J].农业环境科学学报, 2018, 37(3): 598-604.

[16] 韩东亮,朱新萍,胡毅,等.不同水分条件下巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地土壤有机碳特征[J].湿地科学, 2017, 14(5): 509-515.

[17] 徐娜,姚艳玲,王铭,等.新疆巴音布鲁克高寒沼泽湿地植物群落空间分布与环境解释[J].湖泊科学, 2017, 29(2): 409-419.

[18] 王铭,曹议文,王升忠,等.水位和草丘微地貌对巴音布鲁克高寒沼泽植物群落多样性的影响[J].湿地科学, 2016, 14(5): 635-640.

- [19] 谭清梅,刘红玉,张华兵,等.盐城海滨湿地植被地上生物量遥感估算研究[J].自然资源学报,2013,28(12):2044-2055.
- [20] 刘莉.黄河三角洲自然保护区湿地植被生物量空间分布及其影响因素[D].济南:山东师范大学,2015.
- [21] 王宁宁.巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地生态系统有机碳库格局[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.
- [22] 熊育久.湖南省EOS/MODIS植被指数时空变化研究[D].长沙:中南林业科技大学,2006.
- [23] 程红芳,章文波,陈锋.植被覆盖度遥感估算方法研究进展[J].国土资源遥感,2008,(1):13-18.
- [24] 王鹏,万荣荣,杨桂山.基于多源遥感数据的湿地植物分类和生物量反演研究进展[J].湿地科学,2017,15(1):114-124.
- [25] 解平静.高原湿地植被地上生物量遥感估算方法及时空变化研究[D].成都:电子科技大学,2012.
- [26] 刘莉,韩美,刘玉斌,等.黄河三角洲自然保护区湿地植被生物量空间分布及其影响因素[J].生态学报,2017,37(13):4346-4355.
- [27] 赵天舸,于瑞宏,张志磊,等.湿地植被地上生物量遥感估算方法研究进展[J].生态学杂志,2016,35(7):1936-1946.
- [28] Rouse J W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation[J]. Nasa, 1974, 23: 1-17.
- [29] Huete A, Justice C, Liu H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 224-234.
- [30] Birth G S, Mcvey G. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrometer [J]. Agronomy Journal, 1968, 60: 640-643.
- [31] 田艳林,刘贤赵,毛德华,等.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[J].生态学报,2016,36(24):8071-8080.
- [32] 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,2013,3(2):542-533.
- [33] 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.
- [34] 李素英,李晓兵,莺歌,等.基于植被指数的典型草原区生物量模型—以内蒙古锡林浩特市为例[J].植物生态学报,2007,31(1):23-31.
- [35] Mutanga O, Adam E, Cho M A. High density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression algorithm[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18: 399-406.
- [36] 陆琳莹.浙江滨海湿地互花米草生物量空间分布及其影响因素研究[D].北京:中国林业科学研究院,2018.
- [37] Holzman M E, Rivas R, Piccolo M C. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 28(5): 181-192.
- [38] 郭锐.植被指数及其研究进展[J].干旱气象,2003,21(4):71-75.
- [39] 李德仁,王长委,胡月明,等.遥感技术估算森林生物量的研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2012,37(6):631-635.
- [40] 沈国状,廖静娟.SAR数据湿地植被生物量反演方法研究进展[J].遥感信息,2016,31(3):1-8.