

鄱阳湖碟形湖泊(常湖池)春季苔草生物量遥感估算

饶滴滴^{1,2}, 于秀波¹, 李 鹏¹, 夏少霞¹, 孟竹剑¹, 刘 影²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022)

摘要: 基于Sentinel-2植被指数,应用回归分析法分析了鄱阳湖碟形子湖泊(常湖池)的苔草(*Carex*)群落生物量与植被指数的关系,并探讨了高程水位和气温变化对其的影响。研究结果表明:(1)10种常用的植被指数中,土壤调节植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI)是常湖池苔草春季生长中后期(3月22日至5月5日)地上生物量估算的最佳植被指数,SAVI构建的三次多项式是常湖池苔草地上生物量最优遥感估算模型,其均方根误差为73.91 g/m²,预测吻合度为71.90%,苔草生物量分布总体表现为自湖心到湖岸逐渐增加。(2)3月22日(春季苔草生长中期)和5月5日(春季苔草生长后期)苔草的地上总生物量分别为1.06×10⁵ kg和3.28×10⁵ kg,单位面积苔草生物量分别为77.56 g/m²和208.44 g/m²,这与鄱阳湖其他子湖单位面积生物量一般低于300 g/m²相一致。(3)常湖池苔草生长受高程、水位和气温多重要素综合影响。3月底常湖池13.47 m高程(黄海高程,参考星子站水位,下同)以下苔草植株矮小,生物量积累较少;13.47 m高程以上区域受前期低温胁迫,生物量增长缓慢。随着气温回暖,出露区域的苔草生物量逐渐积累,并随高程增加而增长。

关键词: 鄱阳湖;苔草生物量;遥感;回归分析;Sentinel-2

湿地植被生物量是指单位面积湿地范围内存在的湿地植物的总重量,通常以鲜重或干重表示^[1],是描述湿地生态系统物质循环、能量流动与评价湿地生态功能价值、湿地生产力水平的重要指标。因湿地类型复杂多样,湿地生物量动态变化大,加之湿地交通不便,导致传统生物量监测方法成本高、效率低,局限性大。因而,遥感等高效、便捷的湿地植被生物量估算方法研究具有重要应用价值。

遥感图像光谱信息因其具有良好的综合性和现势性,常用于植被长势与生存环境监测及生物量估算反演。目前,多源遥感数据源,如MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)和Landsat的植被指数产品及波段已广泛应用于湿地生物量估算。其中,MODIS增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)对鄱阳湖国家级自然保护区湿地植被的生物量反演效果显著^[2]。相较归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和差值植被指数(Difference Vegetation Index, DVI),Landsat-7 ETM+数据中的近红外波段能较好地反演鄱阳湖全湖植被生物量^[3],并且其构建的多项式模型对盐城滨海湿地地上植被生物量估算效果显著^[4]。Landsat-8中NDVI、EVI、改

收稿日期: 2019-01-04; 修订日期: 2019-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361104, 41471088, 41701212); 江西省重大生态安全问题监控协同创新中心项目(JXS-EW-00)

作者简介: 饶滴滴(1993-),女,江西广昌人,博士研究生,主要从事土地利用变化与遥感应用研究。

E-mail: raodidijxnu@163.com

通讯作者: 李鹏(1984-),男,江西永新人,博士,副研究员,主要从事资源地理与国土资源遥感研究。

E-mail: lip@igsnrr.ac.cn

进的土壤调节植被指数 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index, MSAVI)、DVI、比值植被指数 (Simple Ratio, SR) 等 10 个因子构建的多元回归模型对黄河三角洲植被生物量干重的拟合结果优于单一因子拟合^[5]。不难发现, 通过 MODIS 和 Landsat 等遥感数据构建的生物量模型为大区域湿地植被生物量估算提供了可能。然而, 由于 MODIS 和 Landsat 卫星影像空间分辨率相对不高, 小范围监测容易受混合像元影响, 造成生物量估算误差过大, 从而难以监测湿生植被生物量动态变化。鄱阳湖湿地洲滩广布, 其中苔草 (*Carex*) 群落是鄱阳湖湿地生态系统中重要的优势群落, 也是越冬雁类的主要栖息地。受季节性水位波动影响, 鄱阳湖苔草洲滩季节性变化明显, 直接导致苔草生物量季节性波动显著。因此, 利用高空间分辨率的遥感影像对鄱阳湖苔草生物量遥感估算及苔草群落生长态势定量评价、雁类栖息地生境划分的重要性不言而喻。Sentinel-2 遥感影像具有涵盖可见光、近红外和短波红外范围的 13 个波段, 波段空间分辨率最高可达 10 m, 尤其是其中三个“红边” (Red Edge) 波段为开展植被监测与小范围湿地生物量反演提供了更多选择。近期, 基于 Sentinel-2 指数产品构建的回归模型已应用于冬小麦生物量反演, 并取得显著效果, 其中基于红边叶绿素指数 (Red Edge Chlorophyll Index, Clre) 估算的生物量精度最高^[6]。比较而言, 目前基于 Sentinel-2 数据进行湿地生物量估算的研究鲜有报道。

鉴于此, 本研究选取 Sentinel-2A 植被指数产品, 结合实地样方采样, 对鄱阳湖国家级自然保护区常湖池湿地春季苔草群落生物量进行遥感估算。本文旨在确定基于 Sentinel-2A 影像开展常湖池湿地春季苔草生物量估算的最佳植被指数, 并揭示常湖池湿地春季苔草生物量时空变化特征, 为雁类栖息地生境监测提供科学依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

鄱阳湖位于江西省北部, 是中国第一大淡水湖。湖区属于亚热带湿润季风气候, 温暖湿润, 年均气温 17℃左右, 雨量充沛, 年均降水量 1350~2150 mm^[7]。鄱阳湖共有鄱阳湖国家级自然保护区 (以下简称保护区) 和南矶山湿地国家级自然保护区两个国家级自然保护区, 保护区位于鄱阳湖西北角 (图 1a), 是赣江北支和修水复合三角洲前缘的洲滩湿地 (图 1b), 以保护珍稀候鸟 (如豆雁、白额雁、灰雁等) 和湿地生态环境为目标。保护区有 9 个碟形子湖及草洲, 总面积 224 km², 约占鄱阳湖总面积的 5%。碟形子湖是指鄱阳湖湖盆区内枯水季节显露于洲滩之中的季节性子湖泊, 碟形湖丰水期与鄱阳湖主湖相连, 枯水期随水位下降而逐渐与主湖相分离^[8]。初春开始 (2 月), 碟形子湖苔草群落开始进入春季生长期 (2-5 月), 其中春季苔草生长初期、中期、后期分别为 2-3 月、3-4 月、4-5 月^[9]。在鄱阳湖洲滩中, 碟形湖的植被生物量含量最大^[10]、物种多样性最丰富^[11], 苔草群落广泛分布于各个碟形子湖之中, 全湖 80% 以上的水鸟在碟形湖区域越冬。

研究区设在保护区的常湖池 (图 1b), 面积约 700 hm², 是典型的季节性浅碟形子湖泊之一。相对于其他 8 个碟形湖而言, 常湖池处于保护区核心区域, 面积适中, 且距道路近, 便于在全湖开展实地考察与观测。鄱阳湖 1:10000 高程 (黄海高程) 数据显示, 常湖池湖心高程约 12.39 m, 湖岸约 18.70 m。湖区内植被以灰化苔草和南荻群落为主, 呈明显的不规则环带状分布, 周边泥滩和草洲面积相对较大, 是大型候鸟的主要栖息地^[12]。丰/枯水季水位落差可达近 1 m。受水位影响, 常湖池苔草群落分为春秋两季, 其中, 苔

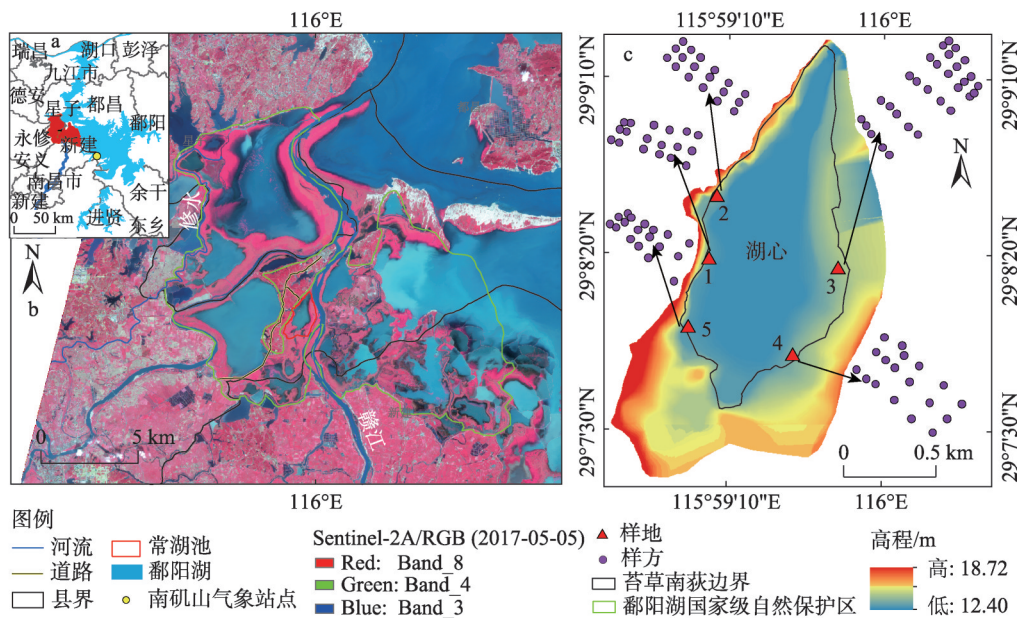


图1 研究区地理位置和样方分布

Fig. 1 Geographical location and plot distribution of the study area

草群落长势及季节分布特征与雁类栖息地生境密切相关而受到学界广泛关注^[11-12]。

1.2 数据来源

1.2.1 苔草生物量采集

常湖池内主要植被群落为苔草与南荻 (*Miscanthus lutarioriparius*)。为估算春季苔草主要生长区域的生物量,根据全湖苔草与南荻生长特征,在采样前对全湖苔草生长区域用手持GPS对南荻和苔草群落界线进行实地记录,得出全湖苔草与南荻的界限(图1c)。

2017年3月22日和5月5日,分别对常湖池春季苔草进行现场勘察、采样。根据苔草分布趋势和长势特征,在全湖通过均匀设置样方的方式采集了研究区内春季苔草地上生物量,包括布置样地、确定样方和实地采样。首先,在考察前,利用谷歌高清地图选择5块位置相对均匀分布的样地(图1c),并记录中心坐标。其次,根据样地坐标利用手持GPS (Trimble 3B)开展实地考察,在每块样地上沿常湖池湿地边缘至湖岸拉一条样线,依次设置样方,共确定102个样方;每个样方间距为12 m,样方大小为1 m×1 m,并对每个样方进行编号,其中在1号、2号、4号和5号样地分别设置18个样方;3号样地由于范围较大,布设了30个样方。最后,在样方平行方向(1 m以内)随机选取跟样方长势相近(株高和盖度相当)的苔草进行采样,采样框大小为0.25 m×0.25 m,收集所有采样框的苔草地上生物量,编号并装进信封袋,带回实验室。将所有样品置于烘箱,在60℃恒温条件下烘干48小时至恒重,称其干重。依据样方面积,计算每平方米苔草的地上生物量(AGB, g),以此作为不同样方生物量实测值。两次采样共获取204个春季苔草地上生物量实测数据,抽取164个实测数据用于构建生物量估算经验模型,另外40个实测数据(每次20个)对模型进行验证。

1.2.2 Sentinel-2影像及其预处理

Sentinel-2A光学遥感影像来源于欧洲航天局(European Space Agency, ESA, <https://>

scihub.copernicus.eu/dhus/#/home), 均为经过几何校正的大气顶反射率数据(L1C)。在此基础上, 利用欧空局提供的Sentinel Application Platform (SNAP) 软件中的Sen2cor插件对其进行大气校正, 为方便后续波段运算, 将20 m分辨率的波段重采样至10 m空间分辨率。Sentinel-2中三个红边波段中, band 5的反射率与叶绿素含量相关性优于band 6和band 7^[13], 因此, 本研究中亦选取了band 5作为红边波段进行相关指数计算。受天气影响, 采样当天影像云量较大, 就近选择可获取的无云影像时间分别为2017年3月26日(与实测日相差4天)和2017年5月5日(与实测日同天)。

将上述地表反射率数据计算成相应的植被指数, 包括: 土壤调节植被指数^[14] (Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI)、地面叶绿素指数^[15] (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index, MTCI)、EVI^[16]、比值植被指数^[17] (Simple Ratio, SR)、红边比值指数^[18] (Red-edge Simple Ratio, SRre)、NDVI^[19]、绿光叶绿素指数^[20] (Green Chlorophyll Index, Clgreen)、CIre^[20]、改进的比值指数^[21] (Modified Simple Ratio, MSR) 和改进的红边比值指数^[22] (Modified Red-edge Simple Ratio, MSRre); 其中, ρ_{blue} 为band 2, ρ_{green} 为band 3, ρ_{Red} 为band 4, $\rho_{Red-edge}$ 为band 5, ρ_{NIR} 为band 8。

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red} + 0.5} \times (1 + 0.5) \quad (1)$$

$$MTCI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red-edge}) / (\rho_{Red-edge} - \rho_{Red}) \quad (2)$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + 6\rho_{Red} - 7.5\rho_{blue} + 1} \quad (3)$$

$$SR = \rho_{NIR} / \rho_{Red} \quad (4)$$

$$SRre = \rho_{NIR} / \rho_{Red-edge} \quad (5)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (6)$$

$$Clgreen = \rho_{NIR} / \rho_{green} - 1 \quad (7)$$

$$CIre = \rho_{NIR} / \rho_{Red-edge} - 1 \quad (8)$$

$$MSR = \frac{(\rho_{NIR} / \rho_{Red} - 1)}{\sqrt{\rho_{NIR} / \rho_{Red} + 1}} \quad (9)$$

$$MSRre = \frac{(\rho_{NIR} / \rho_{Red-edge} - 1)}{\sqrt{\rho_{NIR} / \rho_{Red-edge} + 1}} \quad (10)$$

1.2.3 水文、气象和高程数据

本文采用的2017年1月1日至2017年5月5日逐日水位数据(m, 黄海高程)来自江西省水利厅, 2017年1月1日至2017年5月5日逐日气温数据(℃)来自鄱阳湖湿地与流域教育部重点实验室提供的南矶山气象站点数据, 高程数据(栅格数据格式, 比例尺为1:10000)来自鄱阳湖水利枢纽办公室。

1.3 研究方法

1.3.1 相关性分析

为准确估算鄱阳湖碟形湖(常湖池)苔草春季生长期生物量, 将常湖池苔草生长中

期(3月22日)和后期(5月5日)的苔草生物量实测数据与基于Sentinel-2A计算的10种植被指数进行双变量相关性分析,以筛选出最为显著的植被指数。

1.3.2 回归分析

考虑到苔草生长过程中生物量积累并非线性递增,在相关性分析基础上,以植被指数为自变量,苔草地上生物量作为因变量,对植被指数和生物量进行单变量回归分析,选取的回归模型包括线性、二次多项式、三次多项式、S型和指数函数5种数学模型,进而选取最优遥感估算模型。

1.3.3 模型精度验证

采用预留的样本数据对拟合的遥感估算回归模型进行精度检验,精度检验采用预测吻合度 G 和均方根误差 $RMSE$ 。其中预测吻合度作为预测精度的一个衡量指标,其值越大,表明对应的预测模型精度越大^[23];均方根误差是实测值与预测值偏差的平方和与观测次数比值的平方根,其对一组测量值中特大或特小误差表示非常敏感^[24]。因此,选取这两项指标用于生物量模型精度检验,其计算公式如下:

$$G = (1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - \hat{y}_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y})]^2}) \times 100\% \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (12)$$

式中: G 为预测吻合度; $RMSE$ 为均方根误差; y_i 为地上生物量的实测值; \hat{y}_i 为地上生物量估算值; i 为站点号; \bar{y} 为实测生物量平均值; n 为样本数量。

2 结果分析

2.1 春季苔草地上生物量与Sentinel-2A相关植被指数相关性分析

根据遥感反演的10个植被指数结果与苔草实测生物量相关性结果发现,3月22日和5月5日,苔草生物量与10个植被指数的相关性均较高(普遍大于0.7);而两个时期整合后与10个植被指数相关性差异较显著,其中 $SAVI$ 、 EVI 、 SR 、 $NDVI$ 、 CI_{green} 和 MSR 与苔草生物量相关性较强(相关系数>0.7),而 $MTCI$ 、 SR_{re} 、 MSR_{re} 和 CI_{re} 与苔草地上生物量相关性较弱。

2.2 春季苔草地上生物量遥感估算回归模型建立与精度检验

湿生苔草生长过程并非直线性递增,为构建常湖池苔草春季生长期生物量最优遥感估算模型,将春季两个生长期实测生物量与10个植被指数构建散点图(图2)。结合相关性分析结果,选取相关性最优(相关系数>0.7)的6个植被指数($SAVI$ 、 EVI 、 SR 、 $NDVI$ 、 CI_{green} 和 MSR)与苔草实测生物量进行回归分析(线性、二次多项式、三次多项式、S型和指数函数)。结果显示:决定性系数(R^2)大于0.5的模型中, $SAVI$ 的三次多项式模型的最大,为0.83,最小的为 $NDVI$ 对应的线性模型,为0.52。

为了进一步探究生物量估算模型对常湖池苔草春季生长期的敏感性,将本次采样中3月22日(苔草春季生长中期)与5月5日(苔草春季生长后期)的实测数据与10个植被指数分别构建回归模型(图3)。结果显示:3月22日,10个植被指数与生物量构建的最优模型决定系数均较低,且各模型之间决定系数差距较小,其中 SR 指数对该时期苔草生物量拟合效果最优,模型决定系数最大($R^2=0.62$)。5月5日,10个植被指数与生物量构建的回归模型明显优于前者,模型决定系数普遍大于0.7,其中生物量遥感估算模型最

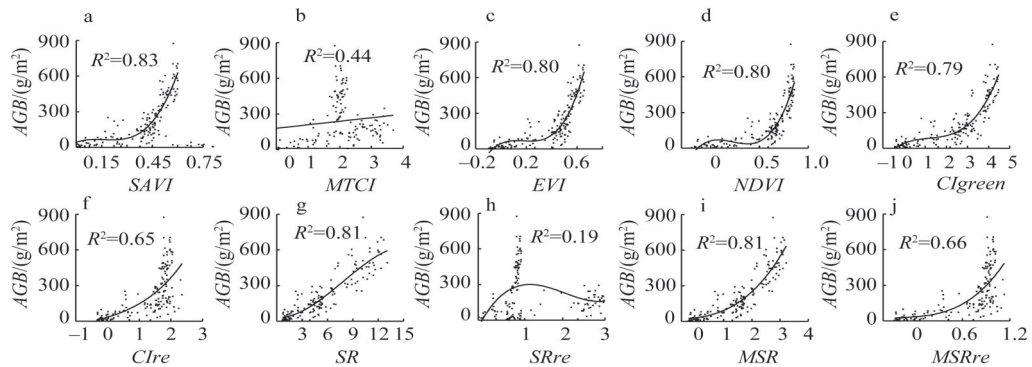


图2 不同植被指数与春季苔草地上生物量的相关性

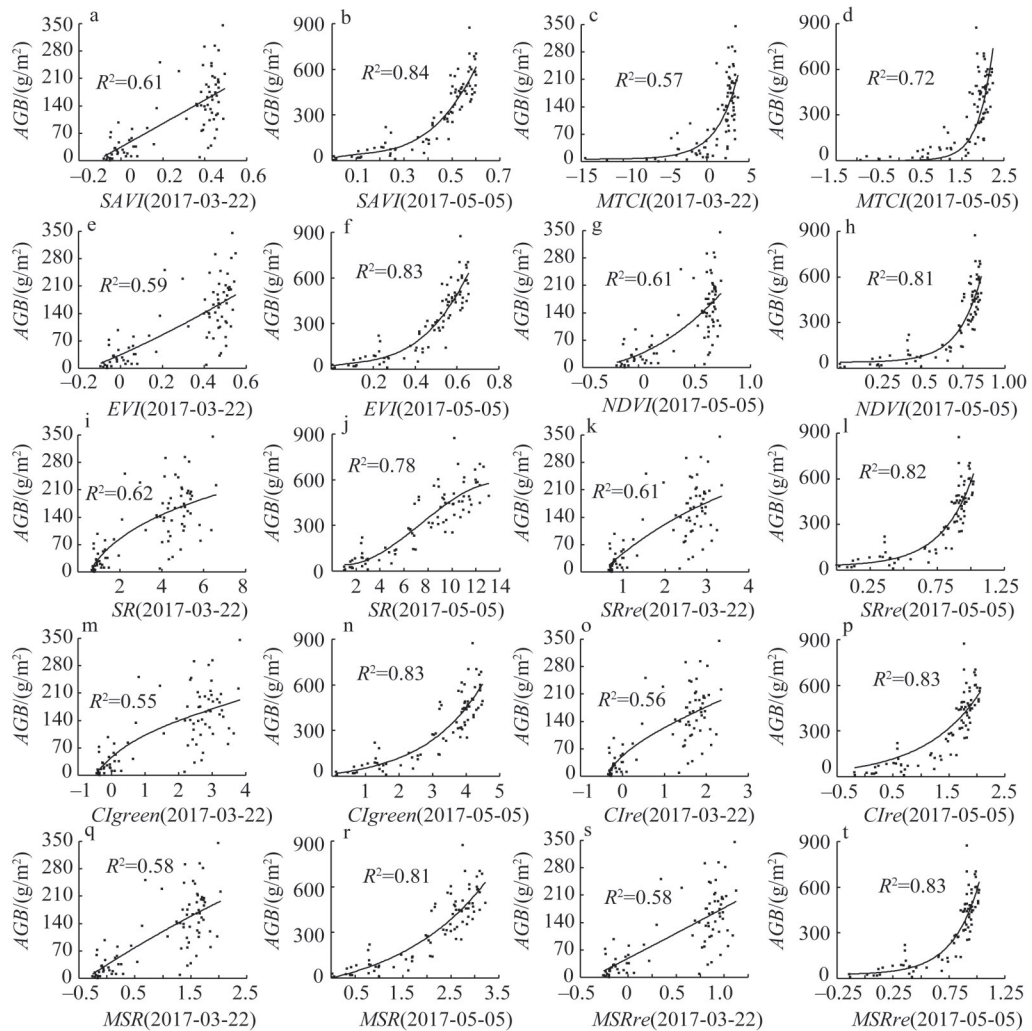
Fig. 2 Correlation between different vegetation indices and *Carex* biomass above the ground in spring

图3 不同植被指数与3月22日、5月5日苔草地上生物量的相关性

Fig. 3 Correlation between different vegetation indices and *Carex* biomass above the ground on March 22 and May 5, 2017

优指数为 *SAVI*, 且对生物量估算保持较高敏感性, 最优估算模型为 *SAVI* 构建的指数函数, 决定系数 $R^2=0.84$ 。苔草春季生长中期的生物量低于生长后期, 生物量较低时 *SR* 的确对生物量估算较敏感, 但 *SAVI* 在此期间对生物量的估算亦较为敏感, 模型决定系数 $R^2=0.61$, 两个指数对苔草生物量敏感性差异微弱。因此, *SAVI* 指数在常湖池苔草生长中期和后期对生物量敏感性均较高。

此外, 结合采样时预留的 40 个样点实测数据, 采用预测吻合度和均方根误差指标, 对 *SAVI*、*EVI*、*SR*、*NDVI*、*CIgreen* 和 *MSR* 等 6 个植被指数构建的估算模型进行精度验证(表 1), 其中均方根误差越小, 预测吻合度越高, 表明模型精度越高, 预测结果越准确。

从表 1 可知, 6 个植被指数的估算值与实测值之间的误差均值为 78.15 g/m^2 , 预测吻合度均值为 68.29% , 对比各生物量预测模型的均方根误差和预测吻合度, *SAVI* 指数的估算值与实测值之间相差在 5 个模型中最小, 吻合度最大。由此, *SAVI* 构建的三次多项式为常湖池苔草春季生长期苔草地上生物量最优估算模型, 其公式为:

$$y = 43.028 + 511.383x - 3434.35x^2 + 7004.632x^3 \quad (13)$$

式中: y 表示估算的生物量; x 为 *SAVI*。

表 1 不同模型精度验证

Table 1 Accuracy validation of different models

植被指数	生物量估算模型	RMSE/(g/m ²)	G/%	Sig.
<i>SAVI</i>	$y = 43.028 + 511.383x - 3434.35x^2 + 7004.632x^3$	73.91	71.7	0
<i>EVI</i>	$y = 45.387 + 484.841x - 3010.645x^2 + 5615.665x^3$	75.48	70.5	0
<i>MSR</i>	$y = 31.228 + 26.014x + 27.86x^2 + 6.957x^3$	77.06	69.2	0
<i>SR</i>	$y = 30.783 - 2.678x + 7.915x^2 - 0.338x^3$	78.28	68.2	0
<i>CIgreen</i>	$y = 41.818 + 72.929x - 46.658x^2 + 13.189x^3$	80.83	66.1	0

2.3 常湖池春季地上苔草生物量时空分布特征分析

研究区内 2017 年 3 月 22 日和 5 月 5 日的植被地上生物量干重分布如图 4 所示, 常湖池苔草春季生长期分布总体呈现自湖心(由于湖心主要为水域和泥滩地, 无植被分布)到湖岸逐渐增加, 常湖池苔草春季生长中期和后期地上总生物量分别为 $1.06 \times 10^5 \text{ kg}$ 和 $3.28 \times 10^5 \text{ kg}$, 单位面积苔草生物量分别为 77.56 g/m^2 和 208.44 g/m^2 , 生长后期比生长中期生物量增加了 2.1 倍, 与已有研究结果^[2]所得鄱阳湖子湖泊单位面积生物量低于 300 g/m^2 相一致。

鄱阳湖苔草群落的空间分布及其生长发育过程与水文要素密切相关^[7], 不同水文条件下, 苔草通过调整自身生理机能来适应水文环境, 形成相应生境条件下的生理生态特征^[25]。对常湖池苔草分布区以 0.54 m 为单位梯度, 按高程从低到高等间距离分为 6 个区间, 并统计对应高程的苔草生物量(图 5)。结果表明: 3 月 22 日至 5 月 5 日, 苔草生物量在 $12.93 \sim 13.47 \text{ m}$ 高程区间内达到峰值, 受常湖池水位影响(图 6a), 研究期内常湖池 13.47 m 高程以下区域长期处于淹水状态, 导致苔草生长受到水分条件抑制, 植株矮小, 生物量积累较少。与此同时, 苔草对温度的变化表现为正相关响应, 湿生苔草对气温比较敏感且对发芽温度要求高, 日平均温度低于 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 湿生苔草会由于低温停止萌发或生长^[26]。鄱阳湖气象统计结果显示(图 6b), 2017 年 1 月 1 日至 3 月 22 日, 气温低于 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的时间累积有 44 天, 其中 2 月 1 日到 3 月 22 日气温低于 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的时间累积有 20 天, 常湖池 13.47 m 高程以上苔草虽出露较早但考虑到长期受低温胁迫, 导致植株生长缓慢, 生物量

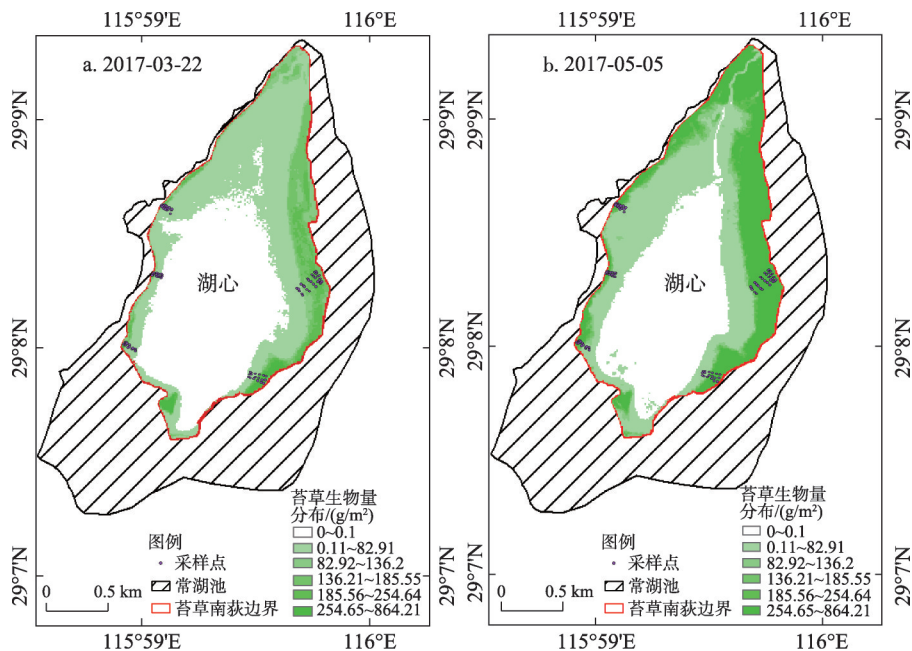


图4 常湖池苔草生物量干重空间分布

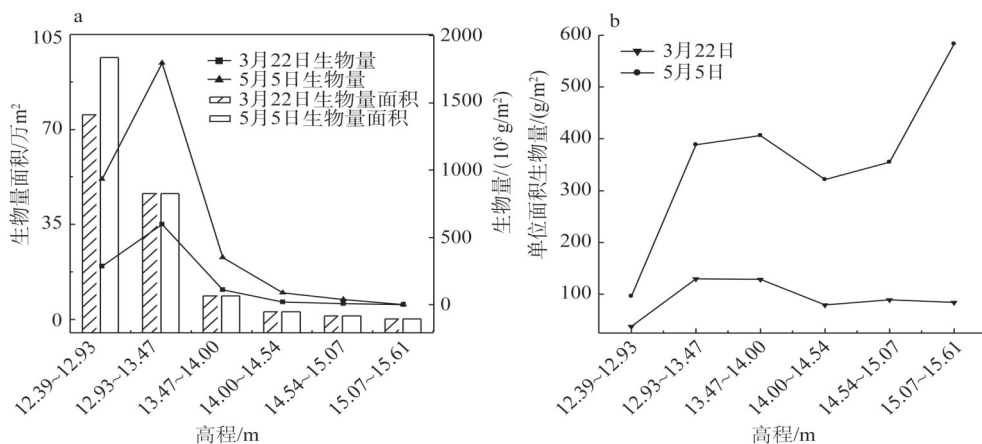
Fig. 4 Spatial distribution of dry weight of *Carex* biomass in Changhuchi Lake

图5 苔草生物量沿不同高程分布情况

Fig. 5 Distribution of *Carex* biomass at different elevations

积累小。综合分析,受水位和气温胁迫,3月22日常湖池单位面积苔草生物量在整个高程梯度内均积累较少。3月22日以后,水位缓慢上升但仍不超过13.54 m,随着气温回升,苔草生长加速,直至5月5日单位面积生物量随高程增加明显且远高于3月22日(生长中期)。

3 结论与讨论

本研究利用Sentinel-2A多光谱遥感数据提取植被指数并与常湖池苔草春季生长期地上生物量建立回归模型,提取了常湖池春季生长期苔草地上生物量。主要结论如下:(1)常

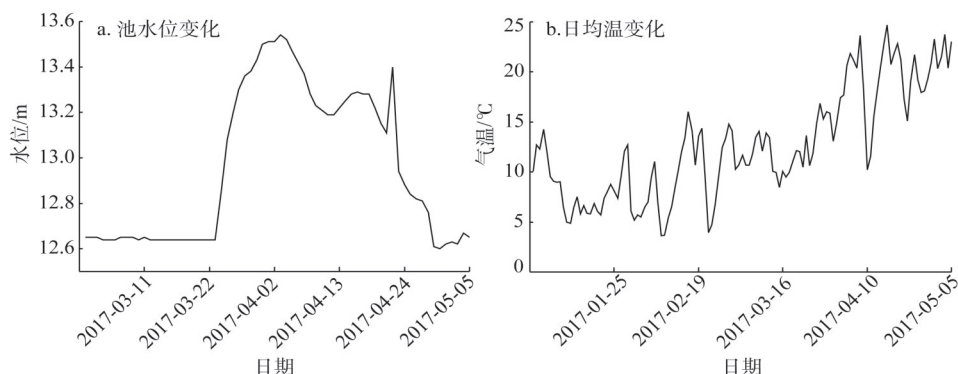


图6 常湖池水位和日均温变化

Fig. 6 Change in water level and daily average temperature in Changhuchi Lake

湖池苔草春季生长期的生物量与植被指数拟合以三项式方程为最优模型, 其中土壤调节植被指数(SAVI)对常湖池苔草生长长期生物量估算精度最高, 均方根误差与预测吻合度分别为 73.91 g/m^2 、 71.90% ; (2) 常湖池苔草春季生长中期和后期的生物量总量分别为 $1.06\times 10^5\text{ kg}$ 和 $3.28\times 10^5\text{ kg}$, 生长后期比生长中期增加了2.1倍; (3) 水位和气温变化是鄱阳湖碟形子湖苔草生物量变化的重要因素, 并直接导致苔草生物量时空分布差异。

本研究在时间上处于常湖池晚春, 为苔草生长中后期, 此时苔草底部水分含量较多, 苔草叶缘枯黄, 由于红边植被指数对叶绿素含量的敏感性易受土壤湿度的变化而改变^[27-28], 叶绿素含量下降, 导致红边“陡坡”效应不明显, 近红外波段处的反射率亦明显降低^[29]。需要说明的是, 此次研究部分指数的构建是基于高光谱数据发展而来, 但由于宽波段指数与高光谱指数反射率位置不能保证完全相同, 使二者在生物量估算方面表现出差异, 进而影响估算精度。受采样样本的限制和遥感影像云量覆盖影响, 本次研究缺乏对苔草秋季生长长期和春季生长早期生物量的估算, 之后将在实地采样和影像搜集方面继续完善, 增加实地采样的频率, 希望对苔草整个生长期内的生物量进行完整估算, 进一步增强生物量估算模型的普适性, 为鄱阳湖碟形子湖生物量估算与雁类栖息地生境监测提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 王树功, 黎夏, 周永章. 湿地植被生物量测算方法研究进展. 地理与地理信息科学, 2004, 20(5): 104-109. [WANG S G, LI X, ZHOU Y Z. Progress of method for wetland vegetation biomass. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(5): 104-109.]
- [2] 叶春, 赵晓松, 吴桂平, 等. 鄱阳湖自然保护区植被生物量时空变化及水位影响. 湖泊科学, 2013, 25(5): 707-714. [YE C, ZHAO X S, WU G P, et al. Vegetation biomass spatial-temporal variations and the influence of the water level in Poyang Lake National Nature Reserve. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(5): 707-714.]
- [3] 李仁东, 刘纪远. 应用Landsat ETM数据估算鄱阳湖湿地植被生物量. 地理学报, 2001, 56(5): 532-540. [LI R D, LIU J Y. An estimation of wetland vegetation biomass in the Poyang Lake using Landsat ETM data. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(5): 532-540.]
- [4] 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. 自然资源学报, 2013, 28(12): 2044-2055. [TAN Q M, LIU H Y, ZHANG H B, et al. An estimation of aboveground vegetation biomass in coastal wetland of Yancheng Natural Reserve. Journal of Natural Resources, 2013, 28(12): 2044-2055.]
- [5] 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. 生态学报, 2017, 37(13): 4346-4355. [LIU L, HAN M, LIU Y B, et al. Spatial distribution of wetland vegetation biomass and its influencing factors in the Yellow River Delta Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4346-4355.]

- [6] 郑阳, 吴炳方, 张森. Sentinel-2数据的冬小麦地上干生物量估算及评价. 遥感学报, 2017, 21(2): 318-328. [ZHENG Y, WU B F, ZHANG M. Estimating the above ground biomass of winter wheat using the Sentinel-2 data. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(2): 318-328.]
- [7] 张全军, 于秀波, 胡斌华. 鄱阳湖南矶湿地植物群落分布特征研究. 资源科学, 2013, 35(1): 42-49. [ZHANG Q J, YU X B, HU B H. Research on the characteristics of plant communities in the Poyang Nanji Wetlands, China. Resources Science, 2013, 35(1): 42-49.]
- [8] 胡振鹏, 张祖芳, 刘以珍, 等. 碟形湖在鄱阳湖湿地生态系统的作用和意义. 江西水利科技, 2015, 41(5): 317-323. [HU Z P, ZHANG Z F, LIU Y Z, et al. The function and significance of the shallow-lakes in the Poyang Lake wetland ecosystem. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2015, 41(5): 317-323.]
- [9] 张广帅, 于秀波, 刘宇, 等. 鄱阳湖碟形湖泊植物分解和水位变化对水体碳、氮浓度的叠加效应. 湖泊科学, 2018, 30(3): 668-679. [ZHANG G S, YU X B, LIU Y, et al. Accumulation effect of litter decomposition and water level on carbon and nitrogen in shallow lake water of Lake Poyang. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(3): 668-679.]
- [10] 黄金国, 郭志永. 鄱阳湖湿地生物多样性及其保护对策. 水土保持研究, 2007, 14(1): 305-306. [HUANG J G, GUO Z Y. The wetland biodiversity and its conservation countermeasures in the Poyang Lake. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(1): 305-306.]
- [11] 葛刚, 纪伟涛, 刘成林, 等. 鄱阳湖水利枢纽工程与湿地生态保护. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 606-613. [GE G, JI W T, LIU C L, et al. Hydraulic project and wetland ecological protection in Poyang Lake. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(6): 606-613.]
- [12] 熊舒, 纪伟涛, 伍旭东, 等. 气温与水位对鄱阳湖越冬雁属鸟类数量变化影响分析: 以大湖池、常湖池和朱市湖为例. 南方林业科学, 2011, (1): 1-5. [XIONG S, JI W T, WU X D, et al. Analysis of effect of temperature & water level on the number variation of the over-wintering Anser species in Poyang Lake: A case study in Dahuchi Lake, Changhuchi Lake and Zhushihu Lake. South China Forestry Science, 2011, (1): 1-5.]
- [13] 吴朝阳, 牛铮. 基于辐射传输模型的高光谱植被指数与叶绿素浓度及叶面积指数的线性关系改进. 植物学通报, 2008, 25(6): 714-721. [WU C Y, NIU Z. Improvement in linearity between hyperspectral vegetation indices and chlorophyll content, leaf area index based on Radiative Transfer Models. Chinese Bulletin of Botany, 2008, 25(6): 714-721.]
- [14] HUETE A R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 1988, 69(25): 295-309.
- [15] DASH J C P J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(23): 5403-5413.
- [16] HUETE A, DIDAN K, MIURA T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1): 195-213.
- [17] JORDAN C F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. Ecological Society of America Stable. 1969, 50(4): 663-666.
- [18] SIMS D A, GAMON J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(2): 337-354.
- [19] ROUSE J W JR H R H S. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Proceedings of the 3rd ERTS-1 Symposium. Washington DC: NASA, 1974: 309-317.
- [20] GITELSON A A. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. Geophysical Research Letters, 2005, 32(8), L08403, Doi: 10.1029/2005GL022688.
- [21] CHEN J M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. Canadian Journal of Remote Sensing, 1996: 22(3): 229-242.
- [22] WU C, NIU Z, TANG Q, et al. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(8-9): 1230-1241.
- [23] 沈掌泉, 周斌, 孔繁胜, 等. 应用广义回归神经网络进行土壤空间变异研究. 土壤学报, 2004, 41(3): 471-475. [SHEN Z Q, ZHOU B, KONG F S, et al. Study on spatial variety of soil properties by means of generalized regression neural network. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(3): 471-475.]
- [24] 马玉良, 许明珍, 余青山, 等. 基于自适应阈值的脑电信号去噪方法. 传感技术学报, 2014, 27(10): 1368-1372. [MA Y L, XU M Z, SHE Q S, et al. De-Noising method of the EEG based on adaptive threshold. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(10): 1368-1372.]
- [25] 谭志强, 张奇, 李云良, 等. 鄱阳湖湿地典型植物群落沿高程分布特征. 湿地科学, 2016, 14(4): 506-515. [TAN Z Q, ZHANG Q, LI Y L, et al. Distribution of typical vegetation communities along elevation in Poyang Lake Wetlands. Wetland Science, 2016, 14(4): 506-515.]
- [26] 吉文丽, 李卫忠, 王成吉, 等. 苔草属植物种子休眠与萌发研究现状. 草原与草坪, 2009, (2): 98-102. [JI W L, LI W Z, WANG C J, et al. A review: Seeds dormancy and germination of genus *Carex* speices. Grassland and Turf, 2009, (2): 98-102.]

- [27] VINCINI M, CALEGARI F, CASA R. Sensitivity of leaf chlorophyll empirical estimators obtained at Sentinel-2 spectral resolution for different canopy structures. *Precision Agriculture*, 2016, 17(3): 313-331.
- [28] 方圣辉, 乐源, 杨光. 基于HyperScan成像光谱数据的植被叶绿素反演. *国土资源遥感*, 2013, 25(4): 40-47. [FANG S H, LE Y, YANG G. Inversion of chlorophyll content based on HyperScan imaging spectral data. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2013, 25(4): 40-47.]
- [29] 方灿莹, 王琳, 徐涵秋. 不同植被红边指数在城市草地健康判别中的对比研究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(10): 1382-1392. [FANG C Y, WANG L, XU H Q. A comparative study of different red edge indices for remote sensing detection of urban grassland health status. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(10): 1382-1392.]

Remote sensing estimation of spring *Carex* biomass in Changhuchi Lake, a shallow sub-lake of Poyang Lake

RAO Di-di^{1,2}, YU Xiu-bo¹, LI Peng¹, XIA Shao-xia¹, MENG Zhu-jian¹, LIU Ying²

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: The relationship between community biomass of spring *Carex* and Sentinel-2 derived vegetation indices (VIs) was analyzed using regression analysis in one of dish-shaped lakes (i.e. Changhuchi) of Poyang Lake. In addition, the effects of elevation, water level, and temperature changes on community biomass were also examined. The results showed that: (1) Among the 10 commonly used VIs, Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) is the most appropriate VI for spring *Carex* biomass estimation of Changhuchi Lake from March 22nd to May 5th. The cubic polynomial parameterized by SAVI was an optimal biomass estimation model with the root mean square error of 73.91 g/m² and the predicted coincidence of 71.90%. Spatially, the biomass of spring *Carex* community generally increased from the central part to lakeshore. (2) On March 22nd (normally in the middle of growth) and May 5th (the end of growth), the total aboveground biomass of spring *Carex* grass was 1.06×10^5 kg and 3.28×10^5 kg, respectively, along with the biomass per unit area of 77.56 g/m² and 208.44 g/m², respectively. Our estimates were basically in line with the previously reported upper limit of 300 g/m² in other sub-lakes within Poyang Lake. (3) The growth of spring *Carex* in Changhuchi Lake is jointly affected by elevation, water level and air temperature. At the end of March, the area below 13.47 m (Yellow Sea Datum) in Changhuchi Lake is generally flooded, hence with dwarf plants and less biomass accumulation. For the regions above 13.47 m, the biomass is also at a low level due to low temperature and short dormancy. As the temperature rises, the biomass of spring *Carex* in the whole exposed area of Changhuchi Lake gradually accumulates with larger per unit area biomass at the higher elevations.

Keywords: Poyang Lake; *Carex* biomass; remote sensing; regression analysis; Sentinel-2