DOI: 10.20103/j.stxb.202404220896

陈亚杰,王宗明,毛德华.基于密集时间序列 Sentinel 数据的湖滨湿地分布动态监测研究——以鄱阳湖为例.生态学报,2025,45(2):716-729. Chen Y J, Wang Z M, Mao D H.Dynamic monitoring of lakeshore wetland distribution based on dense time series Sentinel data: taking Poyang Lake as an example. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2):716-729.

基于密集时间序列 Sentinel 数据的湖滨湿地分布动态 监测研究

——以鄱阳湖为例

陈亚杰^{1,2},王宗明¹,毛德华^{1,*} 1中国科学院东北地理与农业生态研究所,长春 130102 2中国科学院大学,北京 100049

摘要:湖滨湿地受湖泊水位动态变化影响显著,具有范围易变、变化程度和频率时空差异明显等特点,湖滨湿地的精准监测对于 全球变化背景下湖滨生态系统的保护与管理具有重要的意义。以受气候变化和人类活动等影响显著的通江湖泊——鄱阳湖为 例,利用 GEE 平台支持下的密集时间序列 Sentinel 雷达和光学数据,利用 OTSU 算法,提出了基于淹水频率的湖滨湿地空间范 围遥感监测方法,并构建了 2019—2022 年鄱阳湖密集时间序列水体和植被数据集,结果表明:(1)构建的基于淹水频率的湖滨 湿地提取方法能够有效界定湖滨湿地与湖泊水体之间的范围,为大尺度湖滨湿地监测提供了重要的方法参考。(2)鄱阳湖水 体面积季节性波动显著,2019—2022 年间由夏季汛期峰值退至枯水警戒水位的退水速率逐年加快,湿地水文周期缩短;湖滨湿 地面积分别为 3075.83km²、2726.28km²、2953.91km²、3331.03km²,呈波动上升趋势。(3)湖滨湿地植被的生长发育受淹水状态 的显著影响,极端干旱气候下,0—20%的淹水频率对植被表现为非抑制作用,高植被覆盖频率沼泽面积显著增加。研究有助于 深入了解湖滨湿地水文、植被的时空变化及其动态响应关系,为湖泊水位调控、湖滨湿地的保护与修复提供科学依据。 关键词:Sentine-1,2;湖滨湿地;淹水频率;植被覆盖频率;时空变化

Dynamic monitoring of lakeshore wetland distribution based on dense time series Sentinel data: taking Poyang Lake as an example

CHEN Yajie^{1,2}, WANG Zongming¹, MAO Dehua^{1,*}

1 Northeast Institute of Geography And Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Lakeshore wetlands are an important component of inland wetlands globally, providing ecosystem services such as water purification, maintenance of biodiversity and climate regulation. Delineation of the dynamic borders of wetlands is the basis of wetland research and a key prerequisite for wetland ecosystem conservation, restoration and rehabilitation. Lakeshore wetlands are significantly affected by the dynamic changes of lake water level, characterized by variable range, obvious spatial and temporal differences in the degree and frequency of changes, etc. Moreover, the extent between lakeshore wetlands and lake water bodies is usually difficult to define. Improving the accuracy of lakeshore wetland monitoring is of great significance for the protection and management of lakeshore ecosystems in the context of global change. Massive, Multi-source Remote Sensing Data Provides Reliable Data Source for Accurate Monitoring of Lakeshore Wetlands. Taking Poyang Lake which connect the Yangtze River and is significantly affected by climate change and water conservancy

收稿日期:2024-04-22; 网络出版日期:2024-10-15

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42330109)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: maodehua@iga.ac.cn

activities as case study area, this study proposes a remote sensing monitoring method for the spatial extent of the lakeshore zone based on the inundation frequency by utilizing dense time-series Sentinel radar and optical data with the support of the GEE platform and OTSU algorithms. We constructed the Poyang Lake dense time series water body and vegetation dataset during 2019—2022. Results show that; the extraction method of lakeshore wetland based on inundation frequency developed in this paper can effectively define the range between lakeshore belt and lake water body, which provides an important methodological reference for monitoring lakeshore zone at a broad scale. The seasonal fluctuation in the water body area of Poyang Lake was remarkable. The receding rate from the peak of summer flood season to the dry water warning level was accelerated year by year from 2019 to 2022, whilst the hydrological cycle of wetland was shortened. The wetland area of lakeshore zone was 3075.83km², 2726.28km², 2953.91km² and 3331.03km² suggesting an overall increasing trend. The growth and development of vegetation in the lakeshore zone were strongly affected by the inundation state. Under the extreme arid climate, the water with inundation frequency of 0—20% showed a non-inhibitory effect on the vegetation, while the area of the region with high frequency of vegetation cover increased significantly. This study helps to deeply understand the spatial and temporal changes of hydrology and vegetation in the lakeshore zone and its dynamic response relationship and could provide a scientific basis for the regulation of lake water level and the protection and restoration of wetlands in the lakeshore zone.

Key Words: Sentine-1,2; lakeshore wetlands; inundation frequency; vegetation cover frequency; temporal and spatial variation

湖滨湿地是全球内陆湿地的重要组成部分^[1],提供了水质净化、维持生物多样性、调节气候等生态系统 服务^[2-4]。湿地的动态范围界定是湿地研究的基础,也是湿地生态系统保护、恢复和重建的关键前提^[5]。湖 滨湿地受湖泊水位动态变化影响显著^[6-8],具有范围易变、变化程度和频率时空差异明显等特点,且湖滨湿地 与湖泊水体之间的范围通常难以界定,提高湖滨湿地监测的准确性对于全球变化背景下湖滨生态系统的保护 与管理具有重要的意义。变化环境下的湖泊正经历着高度动态的变化,密集时间序列的定量监测能够准确捕 捉湖泊水文的细微变化并提高湖滨湿地范围识别的准确性。

量化地表水动态的传统监测方法通常依赖于实地调查和统计外推,监测周期长,且空间覆盖范围和准确 性有限^[9]。在全球尺度上,仍然缺乏对湖泊进行精确的实地调查,特别是在偏远和道路不可达的地区^[10]。遥 感数据具有覆盖范围广,时空分辨率高,易获取等优点,近年来中高分辨率卫星的发展为湖泊精细化监测提供 了海量数据源,使得大尺度、实时动态监测湖泊面积变化成为可能。光学遥感数据驱动的地表水提取算法主 要为三大类:专题分类法^[11];单波段或多波段水体指数阈值法^[12];光谱解混或软分类法^[13];其算法精度在很 大程度上取决于遥感影像的时空分辨率,此外,由于云层的干扰,特别是在潮湿多雨的地区,光学遥感影像的 质量和可用性进一步降低,影响水体分类 。湖泊遥感监测研究大多集中在年际尺度、季节/月尺度以及多时 相变化分析,如朱鹤等^[14]利用 HK-8、Landsat 8、高分一号卫星分析了近 50 年鄱阳湖的演变特征、原因及趋 势;Jiang 等^[15]利用 Landsat 和 MODIS 数据分析了 1986 年至 2020 年月尺度鄱阳湖水域变化特征及其对气象 因素的响应;Li 等^[16]利用高分辨率历史地形图和 Landsat 影像评估了长江平原湖泊湿地在过去一个世纪的动 态变化;Luo 等^[17]利用多时相 Landsat 8 数据分析了气候变化背景下洞庭湖南部湿地蓝绿空间结构的时空变 率及其与气象因子的关系。然而,现有研究对于湖滨湿地的动态监测仍存在较大不足且粗时相监测对湖泊水 位极值不敏感。密集时间序列的遥感监测能够准确的捕捉到湖泊水文变化的重要转折点^[18],并准确界定湖 滨湿地的范围,揭示其时空变化规律。Sentinel 数据具有高时空分辨率的特点,为湖滨湿地监测提供了重要数 据源。

湿地植被作为湿地生态系统的重要组成部分,是湿地物质循环、能量转换、污染物净化等功能的基础^[19-20]。湿地植被空间分布和时空演变等受气候变化、人类活动和植被的生物学特性等多种因素共同影响,

其中湖泊的淹没动态是湿地植被演替的主要驱动因素^[21-22]。湿地的淹没动态和湿地植被的时空分布具有重要的生态效应,直接影响越冬候鸟生境、湿地生态系统生物多样性以及湖滨湿地温室气体排放等^[23-25]。在气候变化背景下,探究湿地水文动态变化影响下的湿地植被的格局变化对维护湿地生态系统的完整性和稳定性具有至关重要的作用。

鄱阳湖是典型的通江湖泊,湖泊水位具有高度的动态性,湖滨湿地植被的生长分布、越冬候鸟的栖息与湖 泊水位波动密切相关^[26]。近年来,在围湖造田、水利工程建设^[27]等人类活动和加剧的气候变化共同作用下, 干旱和洪涝灾害对湖泊生态系统的威胁越来越大^[28-29],湖泊出现汛后水位消退加速、枯水时间提前、湖泊萎 缩旱化等一系列严重的问题,严重影响了周围区域的用水安全、打破了湖滨湿地生态系统的生态平衡。在此 背景下,积极开展洪泛湿地淹没动态的时空异质性特征研究及其对湿地植被的影响,不仅对客观认识变化环 境下湖滨湿地水文过程、植被分布、群落演替的成因机理具有重要的科学意义,而且对维护湖泊水量和水生态 安全、保护和恢复湖滨湿地生态系统、保障区域可持续发展具有重要现实意义。

本研究的主要目标是集成使用 Sentinel-1/2 影像数据高时相、连续监测 2019 至 2022 年鄱阳湖水域面积 和植被覆盖的动态变化。具体内容包括:(1)基于密集时间序列数据构建基于淹没频率的湖滨湿地提取方 法;(2)分析气候变化和人类活动影响下的鄱阳湖水体、植被时空变化特征;(3)解析湖滨湿地植被对淹没状 态变化的响应特征。本研究拟通过对鄱阳湖洪泛湿地水体、植被的动态监测,分析湖滨湿地植被、水体交替出 现的时空变化特征,从而为湖滨湿地的保护与修复提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖,地处江西省北部,长江中游南岸,东经115°49′—116°46′、北纬28°24′—29°46′,是我国最大的淡水湖。湖泊承接流域内信江、赣江、饶河、抚河、修水等五大江河来水,经调蓄后由湖口汇入长江,为典型过水性、吞吐型、季节性通江浅水湖泊,如图1所示。鄱阳湖历史最高水位22.53m(2020年),面积约4000km²,最低水位6.49m(2022年),面积仅250km²,其蓄水量约在4.5亿—300亿m³之间^[30]。受季节性水位波动影响,鄱阳湖呈现出"洪水一片,枯水一线"的独特景观。



Fig.1 Overview of the study area

湖区地处亚热带季风气候,气候温暖湿润,雨量丰沛,多年平均气温 17.9℃,湖区主要站点多年平均降水 量为 1387—1795mm^[31];鄱阳湖的水域和洲滩共同组成了独特的湖泊湿地生态系统,孕育了大量的野生动植 物资源,是长江流域最为重要的野生水生生物种质资源库,同时也是亚洲最大的越冬候鸟的栖息地,1992 年 被列入《国际重要湿地名录》(编号:550)。鄱阳湖为流域提供了涵养水源、洪水调蓄、生物多样性维持以及调 节局部小气候等多种生态系统服务,对维持区域生态平衡具有至关重要的作用^[32]。

1.2 数据获取与预处理

本研究使用开源的 Google Earth Engine 作为研究平台, GEE 作为全球尺度的地理空间分析云平台, 存储 了海量的遥感数据,具有强大数据处理能力(https://code.earthengine.google.com/)。Sentinel-2 双星重访周期 为 5d,包含 13 个光谱波段,空间分辨率最高可达 10m, GEE 存储了 Sentinel-2 Level-2A 地表反射率产品,时间 跨度为 2017 年至今, 但早期的 L2A 级产品覆盖范围并不是全球性的^[33]。Sentinel-1 双星重访周期为 6d, GEE 平台上可直接获取干涉宽幅模式(IW)、超宽幅模式(EW)、条带模式(SM)下的 GRD 数据,数据经过边界噪声 消除、热噪声消除、辐射测量校准、地形校正等预处理^[34], 见表 1。在 Sentinel-2 数据中, 水体的反射从可见光 到中红外波段逐渐减弱, 在近红外和中红外波长范围内强吸收, 几乎无反射, 绿光可用于抑制植被噪声, 相较 于近红外波段, 中红外波段能更好的抑制裸土噪声; 在 Sentinel-1 数据中, 雷达图像的亮度值直接反映雷达的 后向散射系数, 湖泊表面通常发生镜面反射, 后向散射系数较低, 而植被、土壤则发生漫反射, 后向散射系数较 高, 双极化数据相乘可以进一步增强水体的特征。

Table 1 Satellite parameter						
卫星	波段	中心波长	空间分辨率			
Satallite	Band	Centre Wavelength/µm	Spatial Resolution/m			
哨兵2号	蓝波段 Band 2 (B2)	0.490	10			
Sentinel-2	绿波段 Band 3 (B3)	0.560	10			
	红波段 Band 4 (B4)	0.665	10			
	近红外波段 Band 8 (B8)	0.842	10			
	短红外波 Band 11 (B11)	1.610	20			
哨兵1号	垂直极化(VV)	_	10			
Sentinel-1	交叉极化(VH)	_	10			

表 1 Sentinel-1/2 卫星参数

本研究收集了 2019 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日期间的 885 幅 Sentinel-2 Level-2A 影像和 447 幅 Sentinel-1 GRD 影像。Sentinel-2 影像按低于 30% 的云覆盖率过滤,并使用嵌入到 Sentinel-2 影像中的 QA60 波段进行掩膜,以减小云/云阴影的影响;Sentinel-1 GRD 影像使用 GEE 内置的中值滤波去除噪声。时间序列 重建的 Sentinel 融合影像年内观测频次达到 51 次。

1.3 研究方法

本研究基于密集时间序列 Sentinel 数据构建了基于频率的湖滨湿地提取方法,主要包括以下三个步骤: (1)特征提取及时间序列重建;(2)基于 OTSU 算法的目标识别;(3)基于淹没频率的湖滨湿地范围提取。技术路线如图 2 所示。

1.3.1 特征提取及时间序列重建

本研究联合使用 Sentinel-1/2 数据提取双极化水体 指数 SDWI(Sentinel-1 Dual-Polarized Water Index)、改 进的归一化水体指数 mNDWI(modified Normalized Difference Water Index)和归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index),如表2,并按照 7天的步长获取覆盖整个研究区范围的合成影像,合成 影像通过每个时间节点前后7天的特征值按最大值滤 波合成。该方法能够在提高监测频率的同时,保证每次 监测的影像覆盖度。

由于 Sentinel-2 影像经过 30% 的云量筛选和 QA60

表 2 光谱指数

Table 2	2 Spectral	index
光谱指数		公式/描述
Spectral Index		Formulas/Descriptions
哨兵2号 Sentinel-2	NDVI	(<i>B</i> 8- <i>B</i> 4)/(<i>B</i> 8+ <i>B</i> 4)
	mNDWI	(<i>B</i> 3- <i>B</i> 11)/(<i>B</i> 3+ <i>B</i> 11)
哨兵1号 Sentinel-1	SDWI	$\ln(VV \times VH \times 10) - 8$

NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; mNDWI: 改进的归一化水体指数 Modified normalized difference water index; SDWI: 双极化水体指数 Sentinel-1 dual-polarized water index; B8: 近红外波段; B4: 红波段; B3: 绿波段; B11: 短波红外波段; VV: 垂直极化; VH: 交叉极化



图 2 技术路线 Fig.2 Technical route

NDVI:归一化植被指数;mNDWI:改进的归一化水体指数;SDWI:双极化水体指数;NDVI_{max}:归一化植被指数最大值合成;mNDWI_{max}:改进的 归一化水体指数最大值合成;SDWI_{max}:双极化水体指数最大值合成;OTSU:大津算法

波段的云掩膜,因此 mNDWI 水体中存在由于数据缺失和云掩膜造成的 nodata 像素,将 nodata 像素用同时间 获取的 SDWI 进行补充,得到相对完整的水体范围数据。为了量化 SAR 对地表水制图的贡献(图 3),本文定 义了以下公式:

$$C_t = \frac{S_t^1}{S_t} \times 100\% \tag{1}$$

式中, C_t 表示 SAR 的贡献率, S_t 表示在 t 时间获取的水体面积, S_t^1 表示在 t 时间 SAR 数据获取的水体面积。 **1.3.2** 基于规则的目标自动识别

机器学习方法依赖于训练样本的选取,与建筑、植被等不同,洪泛湿地由于水位波动显著,地表覆盖变化迅速,训练样本获取困难。而基于规则的方法是基于目标和背景的先验知识,而不是已知的样本数据。光谱指数突出了背景中感兴趣对象的像素,并且可以使用二进制阈值来描绘对象区域,这有利于时间序列和大规模分析。光谱指数和基于二进制阈值的方法由于易于实现、计算效率高,被广泛使用。

水指数的直方图具有代表对象和背景的双峰分布特征,因此使用自动阈值提取水体具有较好的效果。 OTSU 算法^[35]也称最大类间差算法,是一种用于图像分割的自适应阈值选择方法。算法基于图像的灰度分布 特性,将图像分成背景和目标两部分,使得这两个类别之间的方差最大,这意味着错分概率最小,该方法不受 图像亮度和对比度的影响,在数字图像处理领域得到了广泛应用;10—11 月鄱阳湖处于枯水期,湖区内地表 覆盖类型丰富,其 NDVI 的直方图呈三峰分布,依次对应水体、泥滩和植被,三峰分布的直方图不能直接使用 OTSU 算法,然而针对泥滩—植被两个峰值则适用,该处谷值处代表的阈值意味着相邻两个峰之间较大的类 间方差和较小的类内方差。经直方图分析,泥滩与植被之间的谷值均位于 0.3 左右(图 4),因此,本文将 0.3 做为分割阈值,NDVI>0.3 定义为植被,NDVI <0.3 定义为非植被。蔺亚玲等^[19]进行鄱阳湖湿地植被分类时, 使用 NDVI=0.3 为阈值,划分泥滩和植被,取得了较好的识别效果。通过目视判读可知 0.3 对不同季节的植 被均有较好的识别效果(图 4)。



57 85 113 141 169 197 225 253 281 309 337 365 1 29 57 85 113 141 169 197 225 253 281 309 337 365 29 日序Day of year













在改进的归一化水体指数 mNDWI 中, 植被与建筑物均得到抑制, 能够比较准确地区分阴影和水体^[36], mNDWI已被证明在水体提取中具有普适性和稳定性,计算公式为:

mNDWI = (GREEN-SWIR)/(GREEN+SWIR)

1

式中,GREEN 代表 Sentinel-2 影像中的绿光波段;SWIR 代表 Sentinel-2 影像中的短波红外波段。

双极化水体指数 SDWI 利用双极化数据相乘来增强水体的这一特征,同时减弱土壤和植被的特征^[37],计 算公式为:

$$SDWI = \ln(VV \times VH \times 10) - 8$$
(3)

式中, W 代表 Sentinel-1 影像中的垂直极化特征; VH 代表 Sentinel-1 影像中的交叉极化特征。

归一化植被指数 NDVI 为表征植被状况的指标,它与植被覆盖度、生长状况、生物量等密切相关,能够客 观反应研究区植被覆盖信息^[38]。利用水体与植被在可见光和近红外波段的反射率差异巨大,NDVI 可用于进 一步去除水体中的植被噪声。

NDVI 计算公式为:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$
(4)

式中,NIR 代表 Sentinel-2 影像中的近红外波段;RED 代表 Sentinel-2 影像中的红光波段。

利用 OTSU 算法自动获取每幅合成图像的 mNDWI、SDWI 最佳分割阈值 Th 并分割水体和背景,并使用 NDVI 合成影像掩膜掉 NDVI>0 的部分以去除植被噪声。用经验阈值的方法获取研究区内的植被覆盖信息。 1.3.3 时空变化信息提取

Savitzky-Golay 滤波器(简称为 S-G 滤波器)是一种在时域内基于局域多项式最小二乘法拟合的滤波方法,该方法能够在滤除噪声的同时较好地保留局部特征^[39]。本研究逐期计算湖泊水域面积、植被覆盖面积,并利用 S-G 滤波对密集时序面积进行平滑去噪,以得到湖泊水域、植被覆盖面积随时间的变化趋势。其表达式为:

$$Y_{j}^{*} = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_{i} Y_{j+i}}{N}$$
(5)

以水域面积为例,式中, *Y_i**为滤波后的水域面积值(km²);*m*为滑动窗口大小; *C_i*为第*i*期滤波系数; *Y_{i+j}*为原始湖泊水域面积值;*j*为原始水域面积数组的系数;*N*为迭代次数。

淹没频率反映了一个像素在一年中被标记为水体的次数占总识别次数的百分比。计算公式为:

$$IF_{i} = \frac{\sum_{m=1}^{n} W_{i}}{n} \times 100\%, W_{i} = \begin{cases} 0, \# \% \& \\ 1, \% \& \end{cases}$$
(6)

式中,IF;为像元 i 的淹没频率,W;为二值化影像,n 为 i 像元一年中的影像覆盖数。

同理可以获取相应的植被覆盖面频率 VF。

湖滨湿地位于最高水位线和最低水位线之间的水位变幅区^[40],随季节性水位波动呈周期性淹没,本研究 将淹没频率大于 80%的区域定义为永久性水体,淹没频率小于 80%的区域定义为湖滨湿地。

2 结果与分析

2.1 2019—2022 年鄱阳湖水体与湖滨植被时序变化特征

都阳湖水域面积季节性波动显著,年内水域面积变化呈双峰型,3—4月春季涨水期出现小峰值,6—8月 夏季洪水期水域面积达到一年中的最大值,随后出现汛后水域面积迅速收缩的过程(图5)。2019—2022年 湖泊由最大水面下降至枯水警戒水位(2020年至最低水位)的退水过程分别持续了147d、107d、70d、56d,退 水速度逐年加快,尤其是2022年,退水日期提前至7月2日,极端枯水期从8月13日持续至12月17日。

湿地植被的生长发育与淹没动态密切相关,随着水域面积的季节性波动,植被覆盖面积呈现出与水域面 积相反的峰谷变化,在春季涨水期和夏季洪水期的两个峰值之间以及汛期退水之后,植被面积显著增加,湖区 内呈现水体—植被交替出现的独特生态景观(图5)。2022年8月13日持续至12月17日期间鄱阳湖水域面 积不足1000km²,水面严重萎缩,水深变浅,地势较高的洲滩土壤含水量不足,水生动植物生存空间减少,旱生 植被迅速扩张。



图 5 水体-植被面积时序曲线 Fig.5 Water body-vegetation area time series curves

2.2 鄱阳湖湖滨湿地的时空变化特征

都阳湖作为典型的通江湖泊,枯-丰季水域面积相差极大,这就导致了湖区内淹水频率的空间异质性显著(图 6)。淹没频率较高的区域主要集中在南部湖区、北部通江河道及东北部湖湾区,平均淹水频率分别为0.74,0.64 和 0.60,局部可达永久性淹没的状态。碟形湖区平均淹没频率仅为 0.38,由于碟形湖与主湖通过堤坝相隔,水文连通性较差,其内部基本处于常年淹没状态。中央湖区的水文连通性好,淹没季节性显著。

2019—2022 年湖滨湿地面积 3075.83km²、2726.28km²、2953.91km²、3331.03km²,呈波动上升趋势。永久 性水体面积为 990.63km²,1340.17km²,1112.55km²,735.43km²,2020 年和 2022 年作为典型的洪-旱年,其永久 性水体相差近 1 倍(图 7)。在极端干旱气候下,永久性水体向湖滨湿地转换。

2期



图 6 2019—2022 年鄱阳湖淹水频率空间分布图

Fig.6 Spatial distribution map of inundation frequency of Poyang Lake from 2019 to 2022

1-5分别代表北部入江河道、中央湖区、碟形湖区、东北部湖湾区和南部湖区五个子区域,直方图代表五个子区域四年的平均淹水频率

2.3 湖滨湿地植被覆盖变化特征及其对淹没动态的响应

本文根据植被覆盖频率将湖滨湿地划分为滩涂(VF<10%)和草本沼泽(10% <VF <100%),并将草本沼泽按照 VF 三等分的方法划分为低植覆盖频率(10% <VF<40%)、中植覆盖频率(40% <VF<70%)、高植覆盖频率(70% <VF <100%)三类。2019 至 2022 年各种地表覆盖类型的面积如表 3 所示,高植被覆盖频率沼泽面积波动显著,丰水年(2020)和枯水年(2022)相差近 10 倍,极端干旱气候导致周期性淹水区域的植被旱化。由图 8 可知,湖滨湿地植被多围绕永久性水体分布,碟形湖周围和河道两侧植被覆盖率较高,中心湖区的植被覆盖率较低。

湖滨湿地植被年均 NDVI 与淹水频率 IF 密切相关(图 9),高淹水频率对湿地植被具有一定的抑制作用,而 在极端干旱年 0—20%的淹水频率对湿地植被则表现为非抑制作用,极端干旱条件下适当淹水促进植被生长。

Table 3 Area of marsh at different vegetation cover frequencies in lakeshore wetlands						
植被覆盖类型 Vegetation cover type	2019 年	2020年	2021 年	2022 年		
滩涂 Mudflat	958.29	730.69	1080.51	1292.24		
低植被沼泽 Low vegetation swamp	617.71	609.47	466.24	609.37		
中植被沼泽 Medium vegetation swamp	1085.06	1282.49	1097.47	404.61		
高植被沼泽 High vegetation swamps	414.75	103.62	309.68	1024.79		

表3 湖滨湿地不同植被覆盖频率沼泽面积/km²

3 讨论

3.1 精度评估

本文结合 GEE 云平台的高分辨率影像和 Sentinel-2 数据共选取 270 个样本点,分别对 2022 年丰水期和



图 7 鄱阳湖湿地空间分布图 Fig.7 Spatial distribution of wetlands in Poyang Lake 直方图代表 2019—2022 年湖滨湿地和永久性水体的面积统计结果

枯水期的两期的植被、水体识别结果进行精度评估(表 4),总体精度为 97.04%, Kappa 系数为 0.9546,结果表明本研究采用的方法对水位变化高度动态的鄱阳湖地区的水体、植被具有较好的识别效果。

JRC GSW^[41]数据提供了全球范围内的月尺度表水 覆盖数据,空间分辨率为 30m,数据更新至 2021 年,本 文获取 2019—2021 年鄱阳湖地区的地表水数据与研究 结果进行对比,两者的空间分布与时间变化趋势具有较 好的一致性,本研究的地表水识别结果在时空分辨率和 数据质量上明显优于 GSW;蔺亚玲等^[19]分析了年际鄱 阳湖植被群落的空间分布格局;张成等^[42]分析了不同 水位下鄱阳湖湿地草洲的景观分布格局;本文基于植被

表 4 混淆矩阵							
	Table 4 Confusion matrix						
地表覆盖类型 Surface cover type		水体 Water	植被 Vegetation	其他 Other			
水体 Water		110	2	3			
植被 Vegetation		1	89	1			
其他 Other		1	0	63			

覆盖频率视角获取了鄱阳湖湿地植被空间分布格局,整体的植被分布格局与现有研究保持一致。

3.2 湖相变化与湿地植被的相互关系及生态效应

都阳湖湿地植被与湖泊水位相互作用,形成"水进草退,此消彼长"的独特景观格局,退水后的草洲是鄱 阳湖湿地重要的陆生生境,提供了多种生态系统服务,湿地植被的分布与演替高度依赖于湖泊的淹没动态。

一般来说,淹没频率对湿地植被的影响为线性的。淹没频率 IF 越低,草洲暴露时间越长,其生长周期相对完整,NDVI 均值越大;而 IF 越高,草洲的淹没时间越长,不利于植被生长,NDVI 均值越低(图9)。洪涝灾 害导致的水位过高和水淹时间延长对湿地植被生长表现为抑制作用。然而,在干旱化趋势加剧的影响下,IF 对湿地植被 NDVI 的影响则是非线性的(图9)。一方面,高水位维持时间减少,退水速度加快,草洲裸露时间

45 卷



Fig.8 Spatial distribution of vegetation cover frequency 百方图代表不同植被覆盖频率的湿地面积统计结果

提前,这为退水后草洲的第二次生长提供了充足的时间,加之夏季充足的光热条件,植被 NDVI 均值显著升高,湿生植被的覆盖频率提高,耐旱植被面积迅速扩张^[43-44],此时淹没频率 IF 对湿地植的生长表现为抑制作用;另一方面,由于洲滩裸露时间的延长,高位洲滩地势较高,淹没频率低,长时间缺水,土壤含水量急剧下降, 植被出现枯萎、死亡的现象,高位洲滩植被的 NDVI 降低,此时淹没频率对湿地植被的生长呈促进作用,即随 着土壤水分的增加,植被枯萎、死亡的现象得到缓解。

水文因素引起的湿地植被空间格局的变化会进一步影响湿地生态系统的稳定性,对越冬候鸟生境、生物 多样性以及温室气体排放等产生影响^[42,45-46]。越冬雁类对栖息地的利用与水文因素息息相关,湿地中的浅 水区域和低草草洲是越冬雁类适宜的栖息地类型^[47],水位波动的时间及范围会影响越冬雁类栖息面积和有 效食物资源,进而影响越冬雁类的分布;水文情势是影响洲滩植被结构的重要驱动力^[48],尤其是中低滩位水 位波动频繁,植被受淹没动态胁迫大,结构单一^[49],洲滩的提前出露减小了植被的淹水胁迫风险,促进生物多 样性,持续的高水位则会抑制植被生长,降低生物多样性。此外,极端干旱气候也导致浮游动物物种数、丰度 和生物量等显著降低^[50];长期水淹和厌氧环境以及其周期性的裸露导致湿地成为重要的温室气体排放源,研 究表明,在一定的水分含量范围内,CO₂、CH₄等温室气体的排放量与土壤水分含量呈明显相关关系^[51-52]。淹 没频率的变化直接影响洲滩的出露时间及土壤含水量,进而影响温室气体排放。鄱阳湖湖区淹没频率的时空 异质性显著,淹没动态对湿地温室气体排放的影响是一个复杂过程。在全球气候变化背景下,鄱阳湖湿地水 文调控和湿地生态系的保护意义重大。

3.3 优势及不足

Sentinel-2数据受云的影响严重,构建密集时间序列影像堆栈时,按照 30% 云量筛选及 QA60 波段掩膜后



图 9 年均 NDVI 与淹水频率的关系



存在大量 Nodata 像素。本研究利用 SAR 影像填补 Nodata 像素,进一步提高密集时间序列影像堆栈的质量。2019—2022 年水域面积 C,值分别为 29.85%,31.52%,45.46%,31.90%,SAR 影像可以有效的提高地表水数据 集空间覆盖的完整性和时间序列的密集性。

周期性淹没是湖滨湿地提取的最大挑战。Ma 等利用 Landsat 时序数据和淹没频率反演潮间带地形^[53]; 程丽娜等利用最大光谱指数合成算法(MSIC)和大津算法(OTSU)构建了基于最大-最小水面的潮间带提取方 法^[54];现有研究对潮位周期性涨落的潮间带地区具有较好的识别效果。本文利用密集时间序列 Sentinel 数据 构建了基于淹没频率的湖滨湿地提取方法,有效区分了湖滨湿地与湖泊水体,为湖滨湿地监测提供了有效的 方法支撑。

本研究构建了高质量密集时间序列影像堆栈,但仍难以保证监测到湖泊绝对最高水位和最低水位;本研究所用的湖滨湿地植被提取阈值依赖于研究区 NDVI 频率直方图的分布情况,对于其他研究区域是否具有普适性还有待讨论;植被覆盖信息的提取仅使用了 Sentinel-2 数据,不能保证所有像元都含有充足的无云观测, 若引入 Landsat 8 数据可提高密集时间序列中每一期合成影像的覆盖度,从而减少实验误差。

4 结论

(1)基于淹没频率的湖滨湿地提取方法能准确界定湖滨湿地的空间范围,为湖滨湿地监测提供了重要的 方法参考。

(2)鄱阳湖水域面积季节性波动显著,2019—2022年由夏季汛期峰值退至枯水警戒水位的退水速率逐年加快,湿地水文周期缩短;2019—2022年湖滨湿地面积为 3075.83km²、2726.28km²、2953.91km²、3331.03km²,

呈波动上升趋势。

(3)鄱阳湖湿地植被的生长发育受淹水状态的显著影响,表现为抑制作用。在极端干旱年,0—20%的淹水频率对植被的生长表现为非抑制作用,2022年高植被覆盖频率沼泽面积显著增加,湿地植被旱化。

参考文献(References):

- [1] 李冰, 万荣荣, 杨桂山, 谭志强, 王殿常, 吴兴华. 近百年鄱阳湖湿地格局演变研究. 湖泊科学, 2022, 34(3): 1018-1029.
- [2] 张琍, 罗文庭, 张皓寰, 殷秀琬, 李斌. 时序 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据支持下的鄱阳湖湿地草本植物群落制图分类. 遥感学报, 2023, 27(6): 1362-1375.
- [3] Covino T. Hydrologic connectivity as a framework for understanding biogeochemical flux through watersheds and along fluvial networks. Geomorphology, 2017, 277: 133-144.
- [4] Li Y L, Zhang Q, Cai Y J, Tan Z Q, Wu H W, Liu X G, Yao J. Hydrodynamic investigation of surface hydrological connectivity and its effects on the water quality of seasonal lakes: insights from a complex floodplain setting (Poyang Lake, China). The Science of the Total Environment, 2019, 660: 245-259.
- [5] 罗茗, 宫兆宁, 张园. 水位波动条件下不同类型内陆湿地动态范围的精准识别. 遥感学报, 2023, 27(6): 1348-1361.
- [6] 谭志强,李云良,张奇,郭宇菲,王晓龙,李冰,万荣荣,王殿常,吴兴华.湖泊湿地水文过程研究进展.湖泊科学,2022,34(1):18-37.
- [7] Khandelwal A, Karpatne A, Ravirathinam P, Ghosh R, Wei Z H, Dugan H A, Hanson P C, Kumar V. ReaLSAT, a global dataset of reservoir and lake surface area variations. Scientific Data, 2022, 9: 356.
- [8] Huang Z J, Xu J H, Zheng L L. Long-term change of lake water storage and its response to climate change for typical lakes in arid Xinjiang, China. Water, 2023, 15(8): 1444.
- [9] Palmer S C J, Kutser T, Hunter P D. Remote sensing of inland waters: challenges, progress and future directions. Remote Sensing of Environment, 2015, 157: 1-8.
- [10] Lawford R, Strauch A, Toll D, Fekete B, Cripe D. Earth observations for global water security. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(6): 633-643.
- [11] Sun D L, Yu Y Y, Goldberg M D. Deriving water fraction and flood maps from MODIS images using a decision tree approach. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2011, 4(4): 814-825.
- [12] Wang X, Ling F, Yao H Y, Liu Y L, Xu S N. Unsupervised sub-pixel water body mapping with sentinel-3 OLCI image. Remote Sensing, 2019, 11(3): 327.
- [13] Wang X, Atkinson P M, Zhang Y H, Li X D, Zhang K R. Automatic mapping of 500m daily open water body fraction in the American continent using GOES-16 ABI imagery. Remote Sensing of Environment, 2024, 304: 114040.
- [14] 朱鹤,黄诗峰,杨昆,杨永民,李蓉.鄱阳湖近五十年变迁遥感监测与分析.卫星应用,2019(11):29-35.
- [15] Jiang F Y, Kuang R Y, Xia A X, Feng Q Y, Zhou M. Variation characteristics of Poyang Lake water area and its response to meteorological factors in the past 35 years. Journal of Water and Climate Change, 2023, 14(8): 2706-2718.
- [16] Li B, Wan R R, Yang G S, Yang S, Dong L F, Cui J L, Zhang T. Centennial loss of lake wetlands in the Yangtze Plain, China: impacts of land use changes accompanied by hydrological connectivity loss. Water Research, 2024, 256: 121578.
- [17] Luo Q, Li Y, Cao X Y, Jiang S F, Yu H B. The spatial and temporal variability of the blue-green spatial structures of the South Dongting Lake wetland areas amidst climate change, including its relationship with meteorological factors. Water, 2024, 16(2): 209.
- [18] Kovács G M, Horion S, Fensholt R. Characterizing ecosystem change in wetlands using dense earth observation time series. Remote Sensing of Environment, 2022, 281: 113267.
- [19] 蔺亚玲,李相虎,谭志强,宋炎炎,徐铖宇.基于遥感时空融合的都阳湖洪泛湿地植物群落动态变化特征.湖泊科学,2023,35(4): 1408-1422.
- [20] 韩新星, 艾金泉, 叶子君, 牛春妹, 唐鑫涛. 基于遥感云计算的鄱阳湖湿地植被群落分类研究. 人民长江, 2023, 54(7): 55-60.
- [21] 王洪铸,刘学勤,王海军.长江河流-泛滥平原生态系统面临的威胁与整体保护对策.水生生物学报,2019,43(S1):157-182.
- [22] 罗世祺. 鄱阳湖草洲植被时空演变及其对淹没过程的响应研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2022.
- [23] 张超,李言阔,任琼,单继红,王贤芳,方彭军,邵瑞清,申锦,钱磊,李安梅,塔旗.鄱阳湖夏季极端水位条件下越冬水鸟多样性、空间 分布及其保护对策.湖泊科学,2022,34(5):1584-1599.
- [24] 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.
- [25] 朱丽丽. 鄱阳湖典型苔草湿地 CH4 释放特征[D]. 南昌: 江西师范大学, 2013.
- [26] 徐力刚,谢永宏,王晓龙.长江中游通江湖泊洪泛湿地生态环境问题与研究展望.中国科学基金,2022,36(3):406-411.
- [27] 曹宇贤, 徐力刚, 范宏翔, 毛智宇, 程俊翔, 王殿常, 吴亚坤. 1960年以来气候变化与人类活动对鄱阳湖流域生态径流改变的影响. 湖泊 科学, 2022, 34(1): 232-246.
- [28] Wurtsbaugh W A, Miller C, Null S E, DeRose R J, Wilcock P, Hahnenberger M, Howe F, Moore J. Decline of the world's saline lakes. Nature Geoscience, 2017, 10: 816-821.

- [29] 张若旭,李小涛,江威,张丽萍,邓清海,宋小宁.多源雷达遥感协同的鄱阳湖流域洪水淹没历时估算.中国科学院大学学报,2023,40 (4):486-495.
- [30] 熊斌,卓云强,许崇育,熊立华,陈泽强,田逸飞.1956—2022 年鄱阳湖枯水情势演变及驱动机制分析.水利学报,2024,55(03):313-324.
- [31] 张全军,张广帅,于秀波,刘宇,夏少霞,孟竹剑,许策,胡斌华,万松贤.鄱阳湖湿地优势植物枯落物的分解速率及碳、氮、磷释放动态 特征[J].生态学报,2020,40(24):8905-8916
- [32] 陈旻坤,徐昔保.近 30 年来鄱阳湖生态系统服务变化.湖泊科学, 2021, 33(1): 309-318.
- [33] Louis J, Debaecker V, Pflug B, Main-Knorn M, Gascon F. Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users//Proceedings living planet symposium 2016. Spacebooks Online, 2016: 1-8.
- [34] 郭山川, 杜培军, 蒙亚平, 王欣, 唐鹏飞, 林聪, 夏俊士. 时序 Sentinel-1A 数据支持的长江中下游汛情动态监测. 遥感学报, 2021, 25 (10): 2127-2141.
- [35] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [36] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [37] 贾诗超,薛东剑,李成绕,郑洁,李婉秋. 基于 Sentinel-1 数据的水体信息提取方法研究. 人民长江, 2019, 50(2): 213-217.
- [38] 王建邦, 赵军, 李传华, 朱钰, 康重阳, 高超. 2001—2015年中国植被覆盖人为影响的时空格局. 地理学报, 2019, 74(3): 504-519.
- [39] 周惠慧, 王楠, 黄瑶, 王晋年, 张立福. 不同时间间隔下的遥感时间序列重构模型比较分析. 地球信息科学学报, 2016, 18(10): 1410-1417.
- [40] 柴培宏,代嫣然,梁威,成水平,吴振斌.湖滨带生态修复研究进展.中国工程科学,2010,12(6):32-35.
- [41] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, Belward A S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature, 2016, 540: 418-422.
- [42] 张成,陈文波,黄芳芳. 鄱阳湖草洲景观连通性对植物多样性的影响. 地理学报, 2024, 79(1): 259-278.
- [43] Han X X, Feng L, Hu C M, Chen X L. Wetland changes of China's largest freshwater lake and their linkage with the Three Gorges Dam. Remote Sensing of Environment, 2018, 204: 799-811.
- [44] Wan R R, Yang G S, Dai X, Zhang Y H, Li B. Water security-based hydrological regime assessment method for lakes with extreme seasonal water level fluctuations: a case study of Poyang Lake, China. Chinese Geographical Science, 2018, 28(3): 456-469.
- [45] Wu Q, Yao B, Zhu L L, Xing R, Huai Q. Seasonal variation in plant biomass of Carex cinerascens and its carbon fixation assessment in a typical Poyang Lake marshland. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(2): 215-219.
- [46] 熊丽黎,刘建新,李宽意,闵翔,吴召仕,郭玉银,王仕刚,邓燕青,欧阳千林.近 60 年鄱阳湖东部湖湾水文连通变化及其对湿地植物 与候鸟的影响.湖泊科学,2023,35(1):313-325.
- [47] 王晨溪,夏少霞,余定坤,于秀波,龚磊强.鄱阳湖越冬雁类时空分布特征及热点区域识别.湖泊科学,2024,36(3):836-845.
- [48] 郭宇菲,万荣荣,龚磊强,秦风约,王经波,王晓龙.鄱阳湖湿地中低滩典型植物群落的生物多样性及影响因子.湖泊科学,2023,35 (4):1370-1379.
- [49] Xu X L, Zhang Q, Tan Z Q, Li Y L, Wang X L. Effects of water-table depth and soil moisture on plant biomass, diversity, and distribution at a seasonally flooded wetland of Poyang Lake, China. Chinese Geographical Science, 2015, 25(6): 739-756.
- [50] 沈玉莹,程俊翔,徐力刚,李仁英,游海林,杨海.极端水文干旱下鄱阳湖浮游动物群落结构特征及其影响因素.生态学报,2023,43 (24):10399-10412.
- [51] 杨紫唯, 陈克龙, 张乐乐, 蒋莉莉, 左弟召.青海湖流域两种不同高寒湿地类型 CO₂、CH₄和 N₂O 排放通量对模拟降水的响应.生态科学, 2022,41(2):211-219.
- [52] 胡启武,幸瑞新,朱丽丽,吴琴,尧波,刘影,胡斌华.鄱阳湖苔草湿地非淹水期 CO2 释放特征.应用生态学报,2011,22(6):1431-1436.
- [53] Ma S X, Wang N, Zhou L L, Yu J, Chen X, Chen Y Y. Inversion of tidal flat topography based on the optimised inundation frequency method—a case study of intertidal zone in Haizhou Bay, China. Remote Sensing, 2024, 16(4): 685.
- [54] 程丽娜,钟才荣,李晓燕,贾明明,王宗明,毛德华. Sentinel-2 密集时间序列数据和 Google Earth Engine 的潮间带湿地快速自动分类. 遥 感学报, 2022, 26(2): 348-357.