

三峡工程运行前后洞庭湖洲滩植被淹没时间变化对其分布格局的影响*

陈 前^{1,2,3}, 邹业爱^{1,2}, 田 恬^{1,4}, 刘 派^{1,3}, 张雨河^{1,3}, 李 峰^{1,2**}, 田茂军², 肖妮娜²

(1: 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 洞庭湖湿地生态系统观测研究站, 长沙 410125;

2: 湖南省自然资源事务中心, 洞庭湖区生态环境遥感监测湖南省重点实验室, 自然资源部洞庭湖流域生态保护修复工程技术创新中心, 长沙 410004;

3: 中国科学院大学, 北京 100049;

4: 湖南农业大学环境与生态学院, 洞庭湖区农村生态系统健康湖南省重点实验室, 长沙 410128)

摘 要: 2003 年三峡工程运行以来, 洞庭湖湿地的水文情势发生了显著变化, 进而影响了湿地植被的分布格局。然而, 有关水文情势与植被分布格局之间的关系比较复杂, 相关机制仍不清晰。本研究通过遥感解译和野外调查等方法分析了 1995—2022 年洞庭湖湿地植被格局时空演变, 并结合水文数据, 探讨了三峡工程运行前后洲滩植被淹没时间变化对其分布格局的影响及驱动机理。结果表明: 1) 东、西、南洞庭湖水位年际变化趋势总体一致。三峡工程运行后导致洞庭湖年均水位持续下降, 平均下降幅度超过 0.3 m, 年内最高水位下降超过 0.6 m, 西、南洞庭湖高水位持续时间缩短, 并逐渐向低水位转移; 2) 1995—2022 年, 洞庭湖湿地植被面积不断增加, 湿地植被整体呈正向演替趋势, 具体表现为芦苇群落侵占苔草群落, 苔草群落侵占光滩; 3) 三峡工程运行前后光滩→苔草、苔草→芦苇两个正向演替区域的淹没时间极显著下降($p < 0.01$), 而苔草→光滩与芦苇→苔草这两个逆向演替区域淹没时间变化呈增加趋势, 但变化不显著($p > 0.05$), 这表明淹没时间下降可能是洞庭湖湿地植被正向演替的关键驱动因素之一。

关键词: 湿地植被演替; 三峡工程; 时空演变; 水文变化; 遥感监测; 水文驱动机制; 水文-植被关系

The Impact of Inundation Duration Changes on the Distribution Pattern of Sandbar Vegetation in Dongting Lake Before and After the Operation of the Three Gorges Project*

Chen Qian^{1,2,3}, Zou Yeai^{1,2}, Tian Tian^{1,4}, Liu Pai^{1,3}, Zhang Yuhe^{1,3}, Li Feng^{1,2**}, Tian Maojun² & Xiao Nina²

(1: Institute of Subtropical Agriculture, Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Lake Dongting Station for Wetland Ecosystem Observation and Research, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, P. R. China)

(2: Hunan Provincial Natural Resources Department, Hunan Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Ecological Environment in Dongting Lake Area, Technology Innovation Center for Ecological Conservation and Restoration in Dongting Lake Basin, Ministry of Natural Resources, Changsha 410004, P. R. China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

(4: Hunan Agricultural University, College of Environment and Ecology, Hunan Provincial Key Laboratory of Rural Ecosystem Health in Dongting Lake Area, Changsha 410128, Hunan, P. R. China)

* 2024-09-10 收稿; 2024-11-20 收修改稿。

国家重点研发计划 (2022YFC3204103)、洞庭湖区生态环境遥感监测湖南省重点实验室开放课题基金 (DTH Key Lab.2023-01)、国家自然科学基金项目 (42171062)、湖南省杰出青年基金项目 (2022JJ10055)、湖南省科技创新平台计划 (2022PT1010) 和湖南省自然资源科技计划项目 (湘自资科 20230138ST) 联合资助。

** 通信作者; Email: lifeng@isa.ac.cn

Abstract: Since the operation of the Three Gorges Project in 2003, the hydrological regime of the Lake Dongting wetlands has undergone significant changes, subsequently affecting the distribution pattern of wetland vegetation. However, the relationship between the hydrological regime and vegetation distribution is complex, and the underlying mechanisms remain unclear. This study analyzed the spatial and temporal evolution of the Lake Dongting wetland vegetation pattern from 1995 to 2022 through remote sensing interpretation and field investigations, combined with hydrological data to explore the changes in inundation duration of sandbar vegetation before and after the Three Gorges Project and the driving mechanisms behind these changes. The results showed that: 1) The interannual variation trends of water levels in East, West, and South Lake Dongting were generally consistent. The operation of the Three Gorges Project led to a continuous decline in the annual average water level of Lake Dongting, with an average decrease of over 0.3 m and a maximum annual water level decrease exceeding 0.6 m. The duration of high water levels in West and South Lake Dongting shortened, shifting gradually toward lower water levels; 2) From 1995 to 2022, the overall trend of vegetation succession in the Lake Dongting wetlands has been positive, with a continuous expansion in wetland vegetation area, specifically characterized by the encroachment of *Phragmites australis* communities on *Carex brevicuspis*, and *C. brevicuspis* communities on bare mudflats. 3) Changes in inundation duration before and after the operation of the Three Gorges Dam were significant in areas undergoing positive succession ($p < 0.01$), from bare mudflats to *C. brevicuspis* and from *C. brevicuspis* to *P. australis*, whereas the changes were not significant in areas experiencing regressive succession ($p > 0.05$), from *C. brevicuspis* to bare mudflats and from *P. australis* to *C. brevicuspis*. This suggests that reductions in inundation duration are a key driving factor promoting the positive succession of wetland vegetation in Lake Dongting.

Keywords: Wetland Vegetation Succession; Three Gorges Reservoir; Hydrological Changes in Lake Dongting; Remote Sensing Monitoring; Hydrological Driving Mechanism; Hydrology-Vegetation Relationship

植被格局可反映一定空间内不同类型植被的分布状况,是决定陆地生态系统组成及功能的重要因素之一^[1]。湿地作为具有多种独特功能的生态系统,其独特的地理和水文条件使得湿地植被格局具有复杂性和多变性^[2]。研究湿地植被格局不仅对掌握湿地植被的演替规律及方向具有重要意义,还能反映其对外界环境的响应,为生态治理及评价提供科学依据。因此,探究湿地植被的分布格局及变化对保护洞庭湖湿地和恢复退化湿地起到重要作用^[3]。

湿地植被格局的演变受多个相互关联因素的共同驱动,包括气候^[4]、土壤性质^[5; 6]、水文因子^[7-10]及人类干预^[11-13]等。在湿地生态系统中,水文因子是影响湿地植被生长的重要条件^[14; 15]。水文因子的改变能直接影响湿地植物的空间分布和生长过程,还能通过改变湿地的水土理化性质,间接影响湿地植被的物种组成和群落结构^[3; 8]。当前关于水文因子与湿地植被格局的研究主要集中于水位变化对植被格局的影响上,研究在宏观尺度上,借助 landsat 等卫星遥感影像解译及相关水位数据,发现在鄱阳湖、莫莫格湿地等湿地生态系统,水位波动的幅度和频率对湿地植被覆盖和分布有显著影响,高水位通常会减少芦苇、扁秆荆三棱等植物群落的覆盖,而低水位则可能促进这些群落的扩张,但这些变化具有时间滞后效应,需要数年才能完全显现出来^[16-18]。微观尺度上,通过室内模拟实验发现,水位变化对湿地植被的抗氧化酶、叶绿素含量等生长或生理指标以及生长状况产生了显著的影响,且对不同海拔下的植物影响存在差异,进而决定不同湿地植被的分布状况^[19-22]。

除水位外,水文因子还包括淹没时间、降水量等其它指标。其中,淹没时间表达了植被被水体完全覆盖下的时间,相较于水位、降水量等传统水文因子,淹没时间可以提供更稳定和连续的水文压力评估。在淹没条件下,植被光合作用以及呼吸作用被抑制,植被在水体覆盖下的真实生长状态与其耐水性、适应性以及群落结构有较高的相关性,因此在决定湿地多个生态过程中发挥至关重要的作用^[23; 24]。Qin 等人^[25]通过设置淹没时间来研究不同淹没条件下洞庭湖水蓼、苔草和芦苇的生长响应和非结构性碳水化合物变化,发现植被体内的可溶性糖和淀粉含量会随着淹没时间增加而显著下降且下降速率在物种间存在显著差异,其中芦苇表现出较低的耐淹性。然而,当前有关淹没时间和植被格局的研究主要通过室内控制实验来进行,虽能精确控制淹没时间,但无法反映空间尺度下植被淹没与植被格局关系。

本研究利用洞庭湖长时间水文数据资料结合 1995—2022 年 Landsat 和 Sentinel-2 卫星影像, 综合遥感影像解译和实地调查分析洞庭湖水文特征变化规律, 探究湿地植被格局的空间变化趋势并揭示淹没时间和植被格局变化的作用机制, 以期对洞庭湖湿地保护和管理提供相关科学依据。

1 数据与方法

1.1 区域概况

洞庭湖(28°42'N ~ 29°31'N, 111°53'E ~ 113°9'E)位于湖南省东北部(图 1), 地处长江荆江段南岸, 承纳湘、资、沅、澧四水而吞吐长江, 是兼具蓄、泄功能的通江湖泊, 具有调节水文、净化水质以及生物多样性保护等功能。以洞庭湖的地理位置和水文特征为依据, 可划分为东、西、南洞庭湖这三个区域。洞庭湖区域气候温暖且降水充沛, 年平均气温为 16.4 ~ 17°C, 年降水量为 1200 ~ 1400mm, 湿地内现有 72 科 306 种植物, 鱼类 20 科 112 种, 已记录鸟类更是达到 305 种, 是重要的生物多样性保育地和国际重要湿地^[26]。

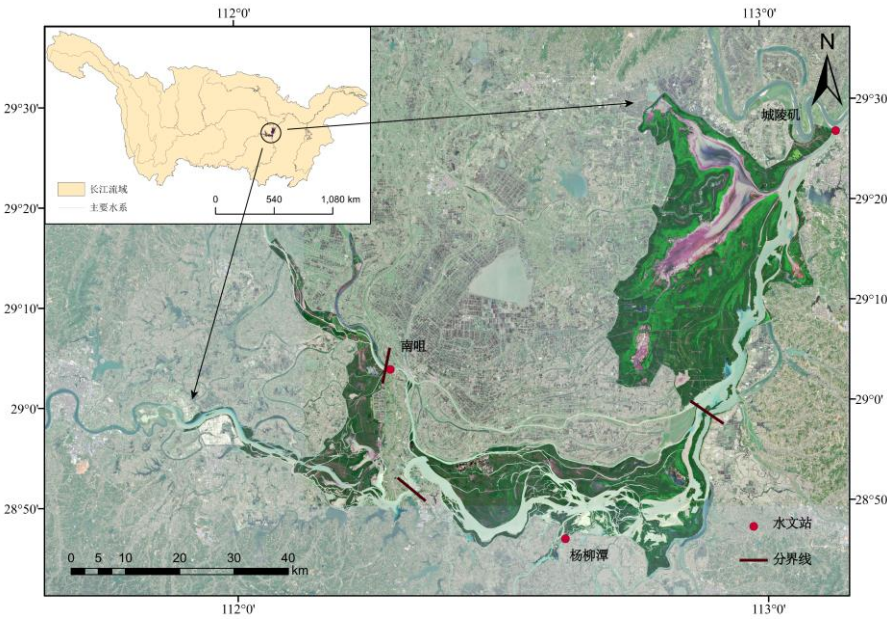


图 1 洞庭湖地理位置及水系分布

Fig. 1 Geographical location and river system distribution of Lake Dongting

1.2 数据获取

遥感数据:本文选取 2017—2022 年的 Sentinel-2(空间分辨率 10 m)无云遥感影像数据(23 期), 1995—2021 年间的 Landsat TM/OLI(空间分辨率 30 m)无云遥感影像数据(29 幅)。为避免高水位下部分植被图像被水体遮盖, 对影像植被进行分类时, 影像的水位需低于 22m^[25]。洞庭湖植被在 10 月份基本完全出露, 芦苇和荻于 12 月份开始收割, 次年 2-3 月份开始发芽。杨树的萌芽期位于 3 月下旬至 4 月下旬, 在每年的 12 月份逐渐进入休眠期, 因此, 本文通过生长周期以及光谱差异区分不同湿地植被。本文所用的遥感数据的获取方式及获取时间见表 1。

水文数据:本文选择洞庭湖城陵矶、杨柳潭、南咀水文站 1985—2022 年日尺度水位资料(吴淞高程基准), 以 2003 年为节点, 划分三峡工程运行前(1985—2003 年)、三峡工程运行后(2004—2022 年)2 个时期。将城陵矶、杨柳潭和南咀每日 8 时水位数据分别用于代表东、南、西洞庭湖每日的水文情况。

野外实测数据:于 2022 年 7 月至 2023 年 7 月对洞庭湖的植被分布、生长状况等状况进行野外实地调查。野外实地验证共 240 个点, 覆盖东、西、南洞庭湖(含横岭湖), 涵盖所有湿地类型, 每种类型的验证点不低于 50 个, 记录各验证点的湿地类型、地理坐标、群落名称等信息, 用于遥感影像解译精度验证。

表 1 卫星影像数据源信息								
Tab. 1 Information on satellite image data sources								
年份	日期及城陵矶水位情况						传感器类型	分辨率
	时间	城陵矶水位 (m)	时间	城陵矶水位 (m)	时间	城陵矶水位 (m)		
1995	1995/12/5	21.49	1995/12/28	20.46			TM	30m
1998	1998/4/17	26.03					TM	30m
2001	2001/3/8	21.49					TM	30m
2003	2003/4/15	24.32	2003/12/27	20.53			TM	30m
2004	2004/11/2	24.1	2004/12/13	21.99			TM	30m
2005	2005/4/20	23.05					TM	30m
2006	2006/6/10	27.34	2006/11/1	23.79			TM	30m
2007	2007/5/3	24.85					TM	30m
2008	2008/5/21	24.48					TM	30m
2009	2009/3/14	24.3	2009/4/15	23.5	2009/4/22	25.66	TM	30m
2010	2010/12/5	20.76					TM	30m
2013	2013/4/26	23.95	2013/10/10	25.36	2013/12/6	20.62	OLI_TIRS	30m
2014	2014/1/23	21.11	2014/4/4	22.63			OLI_TIRS	30m
2015	2015/4/16	24.46	2015/10/25	23.74			OLI_TIRS	30m
2016	2016/11/28	22.37	2016/12/5	21.81			OLI_TIRS	30m
2017	2017/3/27	26.02	2017/12/17	20.37	2017/12/24	20.01	OLI_TIRS	30m
	2017/4/28	25.23	2017/9/15	26.59	2017/10/30	27.18	MSI	10m
2018	2018/9/15	24.77					MSI	10m
2019	2019/5/23	28.9	2019/8/16	29.56	2019/9/30	24.52	MSI	10m
	2019/11/9	23.14						
2020	2020/8/5	33.57	2020/8/15	32.52	2020/11/8	25.37	MSI	10m
	2020/11/13	24.26						
	2021/6/6	30.27	2021/7/31	29.26	2021/8/30	30.33		
2021	2021/9/4	30.37	2021/9/9	30.17	2021/9/24	29.77	MSI	10m
	2021/10/4	29.03	2021/11/13	23.66	2021/11/18	23.03		
2022	2022/3/8	23.88	2022/3/28	23.1			MSI	10m

1.3 遥感影像解译

对遥感影像进行预处理，主要包括辐射定标和大气校正、几何校正、影像镶嵌与裁剪等，以上处理步

骤基于 ENVI 5.3 平台进行。通过目视解译和实地调查数据, 将洞庭湖湿地景观分为 5 类, 包括水体、光滩、苔草群落(苔草、蔺草、菱蒿等)、芦苇群落(芦苇、南荻等)以及杨树群落(杨树、柳树)。利用支持向量机算法(Support Vector Machine, SVM)进行影像分类提取湿地植被信息。由于早期影像的分辨率较低, 算法不完善, 还有云雾干扰以及各植被生长周期的不同, 需对同一阶段不同时间的影像分别进行监督分类, 提高分类的精确程度。首先通过 SVM 分类将图像主要分为水体、光滩以及植被三类^[25]。然后基于植被不同的生发育周期, 以及人为收割芦苇的影响, 选取 3—4 月以及 12 月的影像来进一步提取芦苇群落和杨树群落。

分类完成后选取 91 卫图影像以及实地调查数据与分类结果进行比较, 2022 年分类结果则与实地调查数据进行比较, 计算 Kappa 指数和总体准确性 (Kappa 指数为 0.91、总体准确性为 93.72%), 以评估植被分类的准确性。后期处理基于 ArcGIS 10.2 平台进行计算, 最终得到湿地植被面积及分布信息。

1.4 洞庭湖淹没时间的获取与计算

用 OTSU 算法选取各年水体数据并分别计算每年影像上的各个像素点显示为水体的天数, 淹没时间以显示淹没的天数除以当年的有效数据数的百分比来表示^[28]。通过 GEE (Google Earth Engine) 平台对 1987—2022 年 Sentinel 和 Landsat 卫星所有影像进行处理分析, 获得历年洞庭湖的植被淹没时间分布图。由于杨树等乔木群落植被格局变化主要受人为干扰的影响, 本研究重点分析三峡工程运行前后光滩→苔草、苔草→光滩、苔草→芦苇、芦苇→苔草这四类演替区域的淹没时间变化, 最后计算 1995-2022 年三峡工程运行前后演替区域淹没时间的年平均值。

2 结果与分析

2.1 水文情势变化

2.1.1 年际水位 1985-2022 年洞庭湖各湖区平均水位年际波动变化明显(图 2), 东洞庭湖年均水位波动在 23-27 m 之间。东洞庭湖的多年水位均值由三峡工程运行前的 25.3 m 降至三峡工程运行后的 24.9 m, 降幅 0.31 m。南洞庭湖年均水位波动在 28-30 m, 三峡工程运行前、后, 其年均水位分别为 29.21 m 和 28.88 m, 降幅 0.43 m。西洞庭湖年均水位主要在 29-31 m 之间波动, 在三峡工程运行前, 西洞庭湖的多年水位均值为 29.21 m; 运行后, 其多年水位均值下降了 0.34 m。

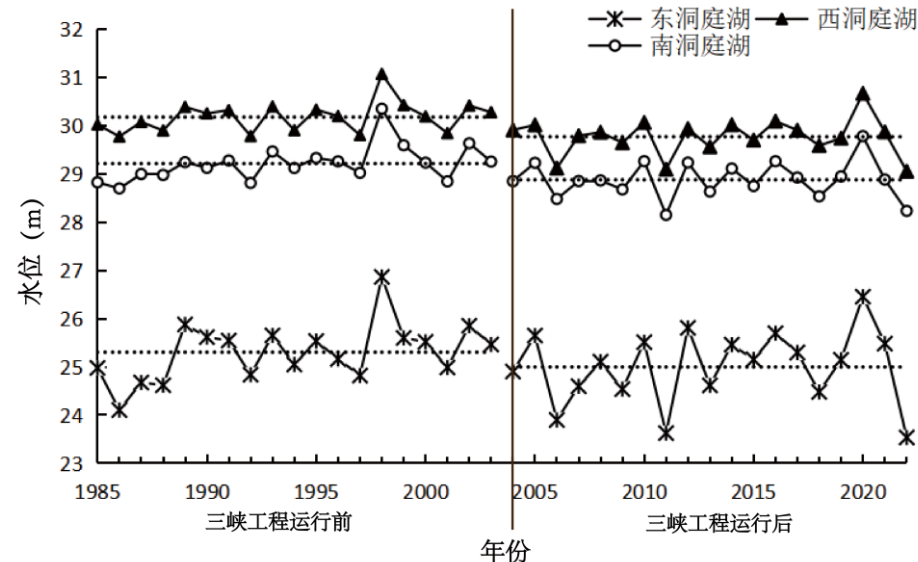


图 2 1985-2022 年洞庭湖各区域水文站年水位图 (虚线代表多年年均水位均值)

Fig. 2 Annual water levels at hydrological stations in different regions of Lake Dongting from 1985 to 2022(dashed line represents the multi-year average annual water level)

2.1.2 年内水位的变化 洞庭湖东、西、南各区域三峡工程运行前后年内水位总体变化趋势基本一致(图 3), 均是先升后降, 1 月至 7 月水位呈显著上升趋势, 在 7 月到达峰值后逐渐下降。各湖区三峡工程运行后最高月均水位均发生下降, 下降幅度约为 0.6 m。

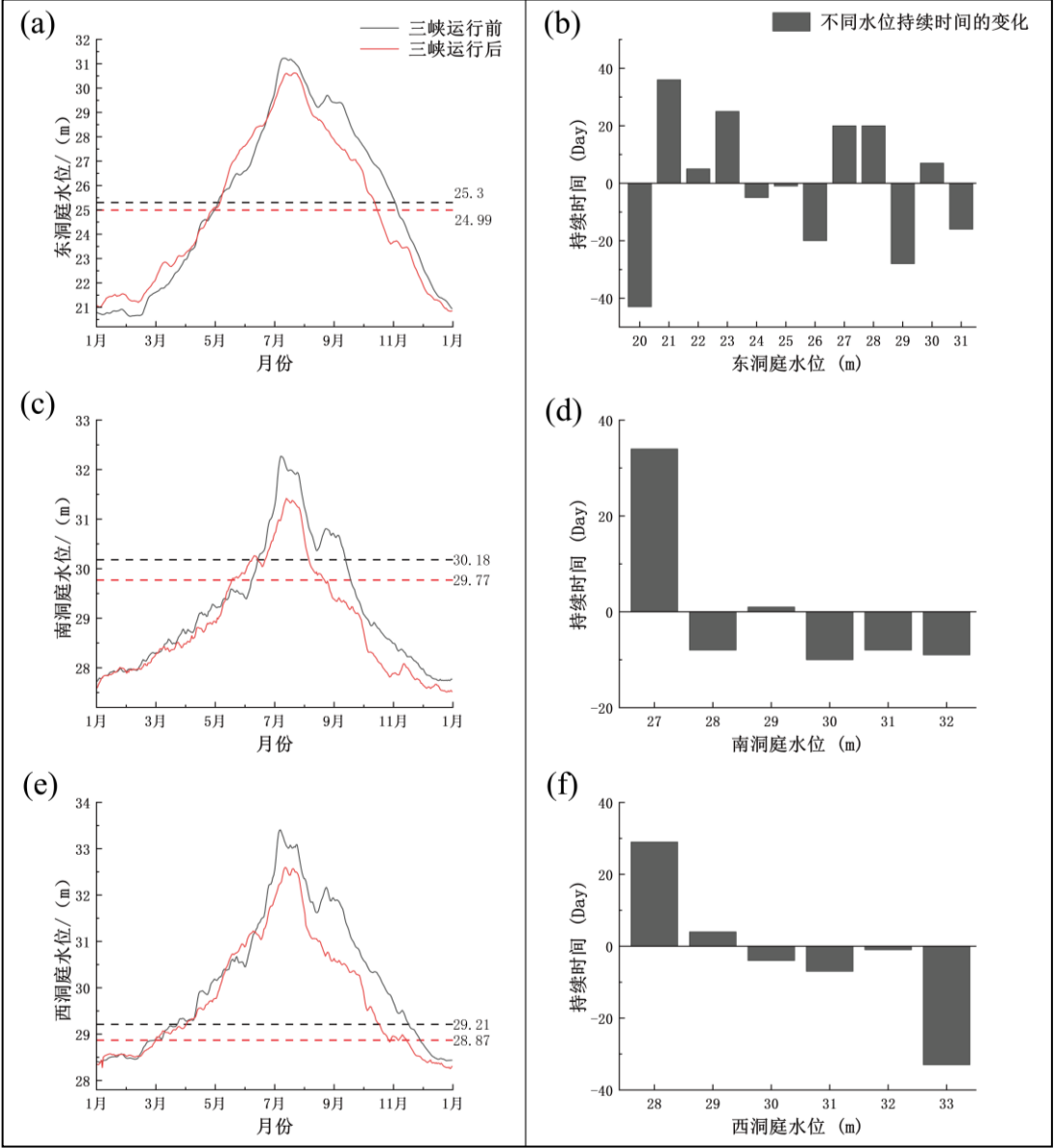


图 3 洞庭湖各区域三峡工程运行前后水位年内变化与不同水位持续时间的变化

((a)、(b)、(c)图中虚线代表三峡工程运行前后的多年年均水位)

Fig 3. Intra-annual variations in water level and changes in the duration of different water levels across regions of Lake Dongting before and after the operation of the Three Gorges Dam

(In figure (a), (b) and (c), the dashed line represents the multi-year average water level before and after the operation of the Three Gorges Dam.)

在图 3a 和图 3b 中,东洞庭湖在涨水期 (1 至 6 月) 的 1 月、2 月、3 月和 5 月月平均水位较三峡工程运行前增加超过 0.55 m, 而在退水期 (7 至 12 月) 三峡工程运行后的各月水位低于运行前 0.38 至 1.78 m, 且水位提前 21 d(d 为天)到达 25.3 m(东洞庭湖在三峡工程运行前的年均水位)和 24.99 m(东洞庭在三峡工程

运行后的年均水位), 超过年均水位的天数明显缩短。此外, 在 21 m、23 m、27 m 和 28 m 水位的持续时间明显增加, 增加时间最低为 20 d, 在 20 m、26 m、29 m、31 m 水位的减少持续时间超过 16 d。在南洞庭湖涨水期, 三峡工程运行前后的月均水位差值除 4 月达到 0.24m 外, 其余各月均低于 0.11m, 到达退水期后, 各月平均水位在三峡工程运行后下降了 0.21-0.8 m, 提前 38 d 下降至 30.18 m(南洞庭在三峡工程运行前的年均水位), 提前 27 d 下降至 29.77 m(南洞庭在三峡工程运行后的年均水位)。南洞庭水位持续时间增加量主要集中在 27 m 水位, 增加了 34 d (图 3c、d)。

西洞庭湖在三峡工程运行前后的水位变化趋势与南洞庭湖相似, 在涨水期水位变化差异不明显, 而在退水期, 三峡工程运行前月均水位高于三峡工程运行后 0.16-0.97 m, 水位下降至 29.21 m(西洞庭在三峡工程运行前的年均水位)的时间推迟了 30 d, 水位下降至 28.87 m(西洞庭在三峡工程运行后的年均水位)的时间推迟了 33 d。33 m 水位的持续时间明显下降, 缩短了 33 d, 减少时间主要集中在 28 m, 其余水位持续时间变化不明显, 均低于 7 d (图 3e、f)。

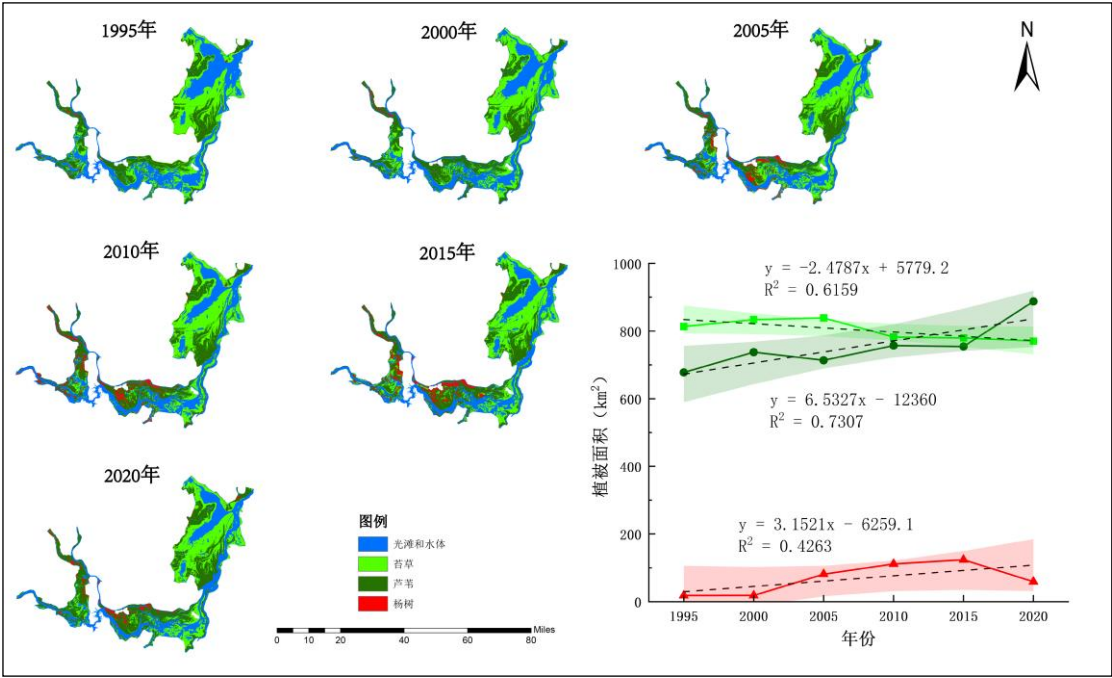


图 4 1995—2022 年洞庭湖植被面积变化

Fig. 4 Changes in vegetation area of Lake Dongting from 1995 to 2022

2.2 植被格局的变化趋势

由图 4 可知, 洞庭湖植被面积总体呈上升趋势($R^2=0.91$), 从 1995 年的 58.87% 增加到 2020 年的 66.98%, 面积达到 1717.36 km²。其中, 2005—2015 年间植被面积变化趋势较平缓, 但 2020 年后面积明显增长, 增加了约 59.11 km²。

从 1995—2020 年整体来看, 苔草群落面积变化较为平稳。然而, 在 1995-2005 年间, 苔草群落面积增加了 25.26 km² 的面积, 占 1995 年苔草群落面积的 3.10%, 苔草面积的增加主要由水体和光滩转化而来; 2005—2020 年则相反, 减少了 68.26 km², 占 2005 年苔草群落平均面积的 8.14%, 主要转化为芦苇群落, 尤其是 2005—2010 年苔草面积的下降速度为 11.28 km²/a, 降幅最为明显。与苔草相比, 芦苇和杨树群落的变化幅度较大, 芦苇群落面积总体呈上升趋势, 2015—2020 年增长率最高, 达到 26.61 km²/a, 唯一一次下降出现在 2005 年, 其减少的区域被杨树所占据。杨树群落面积在 2000—2015 年间持续增长, 从 2000 年的 18.49 km² 增加到 2015 年的 123.89 km², 其中 2000—2005 年间增长最为明显, 达 12.54 km²/a。然而,

2020 年后，杨树群落面积从 123.89 km² 锐减至 59.21 km²，砍伐区域的植被被芦苇群落所替代。

在洞庭湖植被演替区域(图 5)中，1995-2020 年，光滩被苔草替代了 265.46 km² 的面积，这是占据面积最大的植被变化类型，芦苇侵占了 258.35 km² 的苔草，仅次于苔草转变为光滩。其中，东洞庭湖苔草变化尤为显著，尤其在飘尾洲、元咀和团洲，光滩转变为苔草的面积达 144.10km²。与此同时，芦苇扩展至苔草减少的区域，同样向湖盆方向扩散，君山公园周围的芦苇面积不断增加，飘尾北部和茅港地区的芦苇扩展也较为显著，然而，在哑港子、合兴洲和石矶头河道区域，大面积的苔草和芦苇转化为光滩。在南洞庭湖，苔草增长区域主要集中在青山岛南部，而芦苇增长区域则在株木场和北胜洲，苔草转变为芦苇的面积最大，达到 93.72 km²，而在黑泥洲、灯塔洲和曹家岭，杨树群落扩展侵占了大面积的芦苇。在西洞庭湖，苔草增加面积较小，而芦苇则在目平湖显著扩张，情况与南洞庭湖类似，其中，47.07 km² 的苔草被芦苇所替代，这是西洞庭湖占据面积最大的植被变化类型。此外，蒋家嘴镇西北部的大面积芦苇退化为光滩和水域，发生逆向演替，杨树主要增长区域在乐安垸和得意障之间。

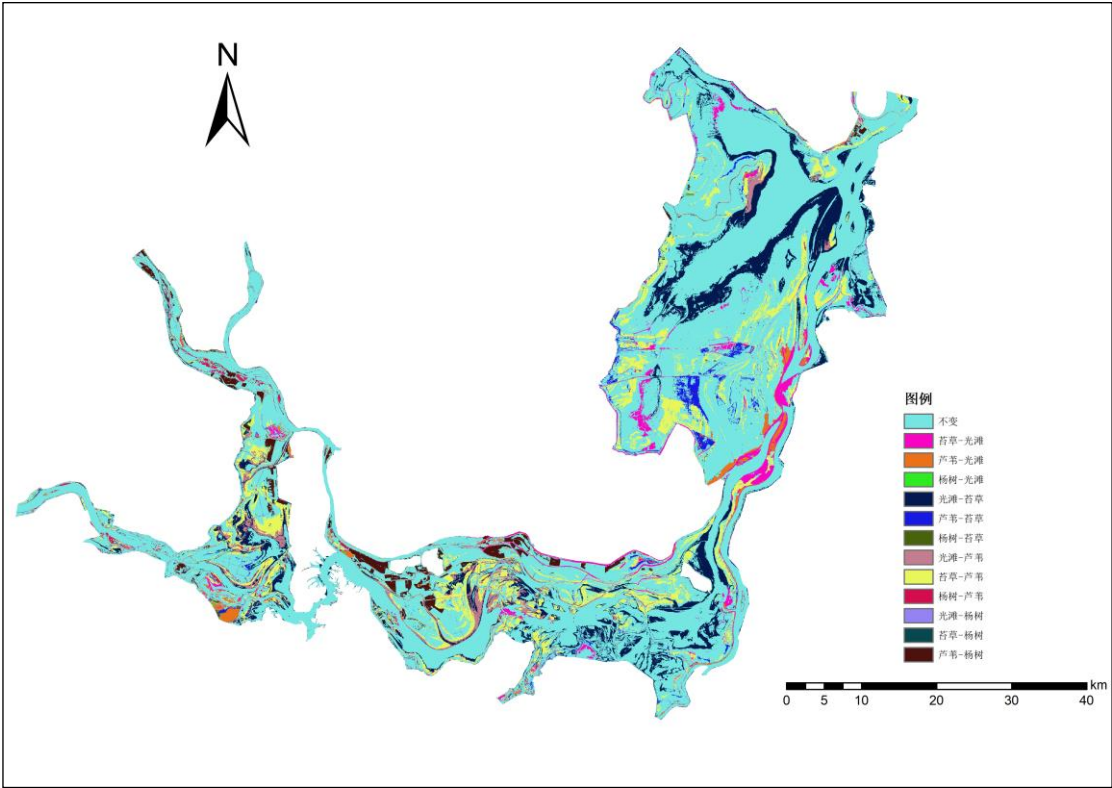


图 5 1995-2022 年洞庭湖植被演替图

Fig. 5 Vegetation succession in Lake Dongting from 1995 to 2022

2.3 植被格局演替区域的淹没时间变化

在 1995 至 2022 年间，洞庭湖的正向（光滩→苔草、苔草→芦苇）和逆向（苔草→光滩、芦苇→苔草）演替区域的淹没时间经历了不同程度的变化(图 6)。在东洞庭湖，年淹没时间超过 233 d 的区域几乎无植被生长，苔草区域的淹没时间介于 66 d 至 221 d 之间，适应范围最广，而在淹没时间低于 66 d 的演替区域主要分布着芦苇。在南洞庭湖，光滩区域的淹没时间超过 244 d，苔草区域的淹没时间介于 76 d - 233 d，而淹没时间在 34 d 至 60 d 的区域，主要分布着芦苇。在西洞庭湖，光滩区域在三峡工程运行前后年均淹没时间均超过 166d，苔草区域的淹没时间介于 117 d - 182 d，芦苇区域的淹没时间介于 39 d - 102 d。

经独立样本 t 检验，在三峡工程运行前后，光滩向苔草以及苔草向芦苇的正向演替区域的淹没时间均显著减少(光滩→苔草：所有 $p < 0.01$ ；苔草→芦苇：所有 $p < 0.01$ ；图 6)。与此相反，苔草向光滩以及芦苇向苔草这两类逆向演替与淹没时间的相关性不显著(苔草→光滩：所有 $p > 0.05$ ；芦苇→苔草：所有 $p > 0.05$ ；图 6)。

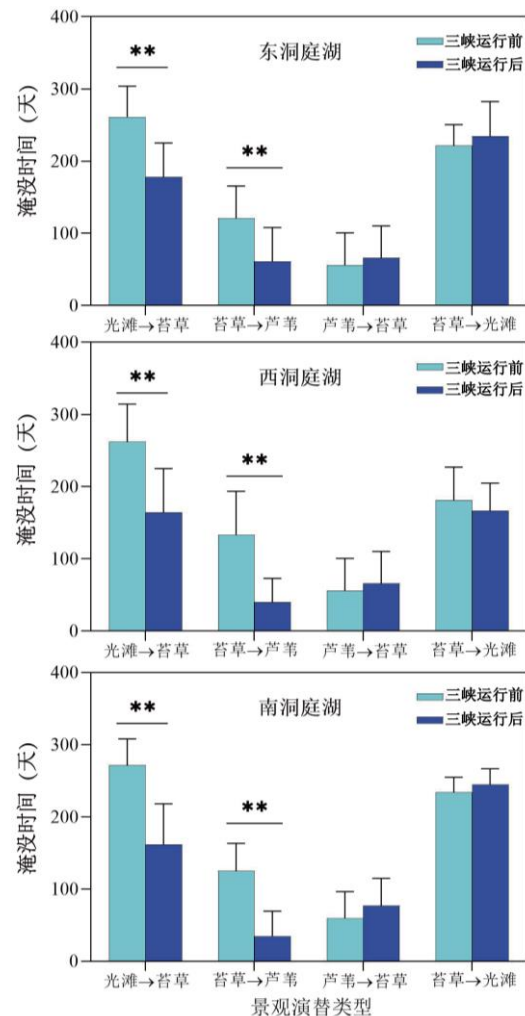


图 6 三峡工程运行前后四类演替区域淹没时间的变化

*表示显著水平($P < 0.05$), **表示极显著水平($P < 0.01$)

Fig. 6 Changes in inundation duration of the four successional zones before and after the operation of the Three Gorges Dam

3 讨论

本研究揭示了三峡工程运行前后洞庭湖水文情势的变化。具体而言，三峡工程的调度导致洞庭湖各区域的多年平均水位和最高水位出现明显下降，而东洞庭湖区域在枯水期的水位则有所抬升。这种变化主要是由于三峡水库在汛期前降低水位以腾出库容，洪峰来临时通过拦蓄洪水和科学调度下泄流量，以减轻下游的防洪压力。在非汛期，水库则储存一定水量，以应对干旱和补充下游水资源^[29]。此外，年内水位变化导致各区域水位到达多年年均水位的时间提前，各水位下的持续时间发生明显改变，可能改变部分区域的淹没时间^[30]。

洞庭湖植被逐渐向湖床发生扩张, 主要发生正向演替, 光滩区域被苔草群落代替, 芦苇群落不断侵占苔草群落, 植被面积总体上呈增长趋势, 这和周静等^[15]人对于洞庭湖的研究结果基本一致。鄱阳湖作为长江流域的另一个通江湖泊, 其水位梯度差异明显, 植被分布格局的变化主要是由于水文情势的变化所决定, 同样有着向湖心演变的趋势, 这是由于不同湿地植物对水文情势的响应不同^[31], 水位高程的变化会影响南荻、苔草等植被的过氧化物酶以及碳氮磷元素的含量, 从而改变植被的生长速率^[22; 32]。除此以外, 种间关系在植被格局形成中也可能发挥重要作用, 如在土壤水分饱和情况下, 随着短叶苔草密度的增加, 短叶苔草会增加对水蓼的竞争强度, 长时间尺度下, 水蓼群落可能被苔草群落所侵占, 而在排水处理后, 两种植物密度之间没有显著变化^[18]。除了苔草和芦苇群落以外, 美国黑杨作为洞庭湖的主要植被群落之一, 其主要分布在城陵矶水位 30m 以上的区域, 受水位变化影响极小, 因此无法用于探究淹没时间变化对其影响^[33; 34]。

已有研究表明, 三峡工程运行后水文变化是长江中下游通江湖泊(如洞庭湖和鄱阳湖)植被格局变化的关键原因之一^[3], 其中, 淹没时间的变化对植被格局的影响是一个复杂的过程, 它涉及植物生理响应、种群竞争以及土壤性质的变化等多方面。具体来说, 较长的淹没时间会延长颗粒物质的沉降时间, 这不仅增加了沉积速率, 还促进了沉积养分的积累。这种营养物质的增加, 尤其是在洪水过后, 会对植被的生长和分布产生显著影响。此外, 涨水期的提前和淹没时间的缩短会改变植被的生长季节, 进而影响湿地的生态功能, 尤其是对水文调节、碳氮循环和生物多样性维护等生态服务功能产生潜在影响。以洞庭湖为例, 苔草的范围沿着湖心不断扩张, 而部分水体光滩区域的水位高度和淹没时间都有所下降^[35; 36]。这种变化对水鸟的分布和数量产生了显著影响, 一方面, 它增加了以莎草为食的豆雁、小白额雁等水鸟的生境范围, 为它们提供了更多的栖息地, 另一方面, 它缩小了以鱼类为食的大白鹭、鸬鹚, 以及以沉水植物为食的小天鹅等鸟类的生境范围^[37]。本研究发现淹没时间的变化(尤其枯水期提前)与植被的正向演替密切相关, 即: 淹没时间的缩短可能促使植被格局正向演替(图 6)。其原因可能是不同植物对淹没胁迫的耐受性不同, Qin 等^[25]通过实验发现水蓼、苔草、藴草这三种湿地典型植被在不同的淹没时间下, 生长情况不同且体内的碳水化合物发生变化, 耐水性植物的可溶性糖和淀粉含量相对较高, 可以在长时间处于淹没情况下的区域存活。此外, 在淹没期间, 植物代谢转向无氧途径, 植物体内的过氧化物酶(Peroxidase, POD)能够保护植株免受氧化伤害, 长时间的淹没可能抑制酶活性, 导致活性氧在植物体内积累, 对植物造成伤害甚至死亡^[22]。而苔草拥有较为发达的通气组织且具有极强的适应性, 可以在较长的淹没时间范围内存活^[5; 14], 正因如此, 在部分芦苇区域, 植被完全浸没的时间越长, 逐渐被更加适应淹没条件的苔草群落所替代。

相关研究表明, 洞庭湖植被格局演替存在两种模式, 一是水文情势驱动的, 二是泥沙淤积驱动的。除水文情势外, 泥沙淤积是导致植被演替的重要原因之一^[38], 它可造成土壤容重、有机质含量以及金属含量等土壤理化性质发生改变, 而土壤物理性质的变化, 决定了植物生活型的分布, 进而影响群落结构^[5; 39]。在南洞庭湖区域的沙丘中, 泥沙淤积对土壤理化性质和植被特征的影响不容忽视, 沉积率的增加导致土壤沙含量上升、pH 值升高, 而土壤水分、有机质、全氮和全钾含量以及沙丘植物的生长和生物多样性普遍下降^[6]。聚焦于洞庭湖全域, 三峡工程的运行改变了洞庭湖水沙环境, 导致泥沙淤积减少, 这些变化对洲滩植被产生了重要影响^[29]。特别是泥沙淤积速率的减缓, 影响了植物群落的演替模式, 使得某些依赖泥沙淤积的物种受到限制^[40]。因此, 水位变化、淹没时间改变以及泥沙淤积等都是影响植被分布和演替的重要因素, 其影响过程与机理需进一步揭示, 并考虑如何通过水资源管理和生态保护措施, 减缓这些变化带来的负面效应。

4 结论

本文基于遥感反演的方法对洞庭湖近 40 年来的植被格局演替及其与水文变化(尤其淹没时间)的关联性进行分析, 揭示三峡工程运行前后洞庭湖淹没时间变化对洲滩植被格局的影响。主要结论如下:

1) 近 40 年来洞庭湖东、西和南各区域年际水位变化趋势较为一致, 三峡工程运行前后年内水位的变化趋势均是先升后降的曲线, 然而, 三峡工程运行后年均水位下降、退水时间提前的趋势明显。

2) 洞庭湖植被格局变化以正向演替为主, 主要表现为水域和光滩向苔草群落的演替和苔草群落向芦苇群落的演替, 其中水域和光滩向苔草群落的演替速率低于苔草群落向芦苇群落的演替速率。

3) 洞庭湖植被正向演替区域的淹没时间显著减少, 即: 三峡工程运行后枯水期提前和水位下降导致的淹没时间极显著下降可能是洞庭湖湿地植被正向演替的关键驱动因素之一。

4) 三峡工程的运行显著改变了洞庭湖湿地的水文节律和植被分布格局, 年均水位下降和植被淹没时间降低, 建议相关部门加强对湿地的动态监测, 尤其是退水期的水位管理, 以防止植被格局向不利方向转变, 例如湿地生态系统的退化或单一化。鼓励制定湿地植被修复政策, 支持苔草和芦苇群落的保护与扩展, 这些群落对湿地生态系统的稳定性和生物多样性至关重要, 未来研究可进一步考虑气候变化引起的极端天气事件(如洪涝、干旱)对植被分布格局和生态服务的影响, 评估其对湿地生态系统的潜在威胁和适应策略。

5 参考文献

- [1]李旭. 洞庭湖典型湿地植被特征及其分布的环境解释[学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
- [2]陆健健, 何文珊, 童春富等. 湿地生态学. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] Li F, Xie YH, Chen XS et al. Influence with its regulating mechanism of the Three Gorge Dam operation on plant distributing patterns in the Dongting Lake, 2018, **39**: 937-944. DOI: 10.13872/j.1000-0275.2018.0085. [李峰, 谢永宏, 陈心胜等. 三峡工程运行对洞庭湖湿地植被格局的影响及调控机制. 农业现代化研究, 2018, **39**: 937-944.]
- [4] Siefert A, Ravenscroft C, Althoff D et al. Scale dependence of vegetation–environment relationships: a meta-analysis of multivariate data. *Journal of Vegetation Science*, 2012, **23**(5): 942-951. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2012.01401.x.
- [5] Hou ZY, Xie YH, Gao DL et al. The life form and environment factors of typical plant communities in the Dongting Lake wetlands. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2016, **22**(6): 993-999. [侯志勇, 谢永宏, 高大立等. 洞庭湖湿地典型植物群落生活型构成及其环境影响因子. 应用与环境生物学报, 2016, **22**(6): 993-999.]
- [6] Pan Y, Zhang H, Li X et al. Effects of sedimentation on soil physical and chemical properties and vegetation characteristics in sand dunes at the Southern Dongting Lake region, China. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 36300. DOI: 10.1038/srep36300.
- [7] Hu JY, Xie YH, Tang Y et al. Changes of vegetation distribution in the East Dongting Lake after the operation of the Three Gorges Dam, China. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**: 582. DOI: 10.3389/fpls.2018.00582.
- [8] Zhang HP, Xiao M, Zeng MY et al. Effects of hydrological environment on plant diversity in the Yellow River Wetland of Henan Section. *Journal of Henan Agricultural University*, 2022, **56**: 822-829. DOI: 10.16445/j.cnki.1000-2340.20220411.003. [张会萍, 肖曼, 曾曼芸等. 河南段黄河湿地水文因子对植物多样性的影响. 河南农业大学学报, 2022, **56**: 822-829.]
- [9] Tang Y, Xie YH, Li F et al. Spatial distribution of emergent herbaceous wetlands in the East Dongting Lake during the last twenty years based landsat data. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(11): 1484-1492. [唐玥, 谢永宏, 李峰等. 基于 Landsat 的近 20 余年东洞庭湖湿地草洲变化研究. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(11): 1484-1492.]
- [10] Janousek CN, Folger CL, Halvorsen R. Variation in tidal wetland plant diversity and composition within and among coastal estuaries: assessing the relative importance of environmental gradients. *Journal of Vegetation Science*, 2013, **25**(2): 534-545. DOI: 10.1111/jvs.12107.
- [11] Shen S, Pu J, Xu C et al. Effects of human disturbance on riparian wetland landscape pattern in a coastal region. *Remote Sensing*, 2022, **14**(20). DOI: 10.3390/rs14205160.

-
- [12] Zhou S, Chang J, Luo P et al. Landscape dynamics and human disturbance processes in wetlands in a mining city: a case study in Huaibei, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, **195**(1): 192. DOI: 10.1007/s10661-022-10795-1.
- [13] Lomnický GA, Herlihy AT, Kaufmann PR. Quantifying the extent of human disturbance activities and anthropogenic stressors in wetlands across the conterminous United States: results from the National Wetland Condition Assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, **191**(Suppl 1): 324. DOI: 10.1007/s10661-019-7314-6.
- [14] Qin XY, Xie YH, Chen XS. Comparative study on the aerenchyma of four dominant wetland plants in Dongting Lake. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2010, **28**: 400-405. [秦先燕, 谢永宏, 陈心胜. 洞庭湖四种优势湿地植物茎、叶通气组织的比较研究. 武汉植物学研究, 2010, **28**: 400-405.]
- [15] Zhou J, Wan RR, Wu XH et al. Patterns of long-term distribution of typical wetland vegetation (1987–2016) and its response to hydrological processes in Lake Dongting. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**: 1723-1735. [周静, 万荣荣, 吴兴华等. 洞庭湖湿地植被长期格局变化(1987-2016 年)及其对水文过程的响应. 湖泊科学, 2020, **32**: 1723-1735.]
- [16] Dai X, Wan RR, Yang GS et al. Responses of wetland vegetation in Poyang Lake, China to water-level fluctuations. *Hydrobiologia*, 2016, **773**(1): 35-47. DOI: 10.1007/s10750-016-2677-y.
- [17] You HL, Xu LG, Liu GL et al. Effects of inter-annual water level fluctuations on vegetation evolution in typical wetlands of Poyang Lake, China. *Wetlands*, 2015, **35**(5): 931-943. DOI: 10.1007/s13157-015-0684-9.
- [18] Liu Q, Liu JL, Liu HF et al. Vegetation dynamics under water-level fluctuations: Implications for wetland restoration. *Journal of Hydrology*, 2020, **581**. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124418.
- [19] Liang B, Gao FL, Guo HY et al. Influence of different submergence gradients on growth and some physiological characteristics of *Phragmites communis* seedlings. *Journal of Tianjin Normal University(Natural Science Edition)*, 2015, **35**: 62-66. [梁贝, 高芳磊, 郭宏宇等. 不同淹水梯度对芦苇实生苗生长和部分生理特性的影响. 天津师范大学学报(自然科学版), 2015, **35**: 62-66.]
- [20] Wang QL, Chen JR, Liu H et al. The growth responses of two emergent plants to the water depth. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**: 583-587. [王秋林, 陈静蕊, 刘晖等. 两种挺水植物对水位变化的生长响应. 水生生物学报, 2012, **36**: 583-587.]
- [21] Liu XD, Hou ZY, Xie YH et al. Influence of water level on four typical submerged plants in wetlands of Lake Dongting. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(1): 181-191. [刘向东, 侯志勇, 谢永宏等. 水位对洞庭湖湿地 4 种典型沉水植物的影响. 湖泊科学, 2021, **33**: 181-191.]
- [22] Wu C, Chen XS, Zou YA et al. Effects of different water levels and cutting treatments on the growth and physiology of *Miscanthus lutarioriparius*. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2018, **44**: 290-294. DOI: 10.13331/j.cnki.jhau.2018.03.011. [吴超, 陈心胜, 邹业爱等. 不同水位和刘割处理对南荻生长和生理的影响. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, **44**: 290-294.]
- [23] Zhu G, Li Y, Sun Z et al. Response of vegetation to submergence along Jingjiang Reach of the Yangtze River. *Public Library of Science*, 2021, **16**(5): e0251015. DOI: 10.1371/journal.pone.0251015.
- [24] Mangora MM, Mtolera MSP, Björk M. Photosynthetic responses to submergence in mangrove seedlings. *Marine and Freshwater Research*, 2014, **65**(6): DOI: 10.1071/mf13167.
- [25] Qin XY, Li F, Chen XS et al. Growth responses and non-structural carbohydrates in three wetland macrophyte species following submergence and de-submergence. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, **35**(7): 2069-2074. DOI: 10.1007/s11738-013-1241-x.
- [26] 谢永宏, 薛萍等. 洞庭湖湿地生态环境状况 (2015-2020). 长沙: 湖南科学技术出版社, 2022, 8-10.

-
- [27] Xie YH, Tang Y, Chen XS et al. The impact of Three Gorges Dam on the downstream eco-hydrological environment and vegetation distribution of East Dongting Lake. *Ecohydrology*, 2014, **8**(4): 738-746. DOI: 10.1002/eco.1543.
- [28] Chen W, Zhang F, Shang X et al. The study on the comparative responses of aquatic vegetation to the interannual water level variation in different hydrologically connected sub-lakes based on GEE technology. *Ecohydrology*, 2022, **16**(3). DOI: 10.1002/eco.2514.
- [29] Xie YH, Chen XS. Effects of Three-Gorge Project on succession of wetland vegetation in Dongting Lake. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, **29**: 684-687. [谢永宏, 陈心胜. 三峡工程对洞庭湖湿地植被演替的影响. *农业现代化研究*, 2008, **29**: 684-687.]
- [30] Huang Y, Chen XS, Li F et al. Community trait responses of three dominant macrophytes to variations in flooding during 2011-2019 in a Yangtze River-connected floodplain wetland (Dongting Lake, China). *Frontiers in Plant Science*, 2021, **12**: 604677. DOI: 10.3389/fpls.2021.604677.
- [31] Zhu JT, Ai JQ, Chen XY et al. Long-term vegetation variation and its response to hydrological regime in Poyang Lake wetland based on GEE. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022, (8): 7-13. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0225. [朱江涛, 艾金泉, 陈晓勇等. 基于GEE的鄱阳湖湿地植被长期变化特征及其对水文情势的响应. *测绘通报*, 2022: 7-13.]
- [32] Hu C, Li F, Yang N et al. Testing the growth rate hypothesis in two wetland macrophytes under different water level and sediment type conditions. *Frontiers in Plant Science*, 2020, **11**: 1191. DOI: 10.3389/fpls.2020.01191.
- [33] Yu SC, Li CA, Yu DQ et al. Land cover change on beach of Dongting Lake's beach. *Earth Science*, 2020, **45**: 1918-1927. [余姝辰, 李长安, 余德清等. 洞庭湖区湖泊洲滩地表覆盖变化. *地球科学*, 2020, **45**: 1918-1927.]
- [34] 杨伟, 陈世文, 朱浩等. 洞庭湖区杨树的种植历史与科学发展. *湖北农业科学*, 2021, **60**: 339-342+349.
- [35] Huang Y, Chen XS, Zou YA et al. Exploring the relative contribution of flood regimes and climatic factors to *Carex* phenology in a Yangtze River-connected floodplain wetland. *Science of The Total Environment*, 2022, **847**: 157568. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157568.
- [36] Huang Y, Chen XS, Li F et al. Concurrent effects of flooding regimes and floodwater quality on sediment properties in a Yangtze River-connected floodplain wetland: Insights from field investigations during 2011-2020. *Science of The Total Environment*, 2022, **827**: 154225. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154225.
- [37] Zou YA, Zhang PY, Zhang SQ et al. Crucial sites and environmental variables for wintering migratory waterbird population distributions in the natural wetlands in East Dongting Lake, China. *Science of The Total Environment*, 2019, 655: 147-157. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.185.
- [38] Zhang XL, Zhang ZH, Gu DQ et al. Research on evolution of coastal wetlands in Liaohe River Delta. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**: 1002-1009. [张绪良, 张朝晖, 谷东起等. 辽河三角洲滨海湿地的演化. *生态环境学报*, 2009, **18**: 1002-1009.]
- [39] Li F, Pan Y, Xie YH et al. Different roles of three emergent macrophytes in promoting sedimentation in Dongting Lake, China. *Aquatic Sciences*, 2015, **78**(1): 159-169. DOI: 10.1007/s00027-015-0415-6.
- [40] Pan BH, Xie YH, Li F et al. Responses to sedimentation in ramet populations of the clonal plant *Carex brevicuspis*. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**: 512. DOI: 10.3389/fpls.2018.00512.