

极端洪旱事件对鄱阳湖碟形湖苦草属生境的影响分析

徐祎凡¹, 陆昊¹, 陈炼钢¹, 陈黎明¹, 周举¹, 张磊²

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学水文水资源学院)

摘要:针对极端洪旱事件频发态势导致鄱阳湖碟形湖苦草属生境持续退化的问题,结合水文、遥感、地形及苦草属监测数据,构建了遥感-地形-水深潜在生境适宜度评估方法,量化了极端洪旱事件对苦草属生境的影响。结果表明:碟形湖水域面积具有显著的年际与季节波动,洪、旱事件使水域面积极值分别达到 53.08、1.80 km²,面积增减速率为 0.41、0.34 km²/d;2020 年仅 在 沙 湖 检 测 到 冬 芽 (生物密度为 0.34 个/m²、生物量为 0.01 g/m²),较 2019 年大幅下降,2022 年未观测到冬芽,说明连续极端水文过程已严重扰动苦草属种群延续;2019—2024 年潜在生境适宜度年均值为 0.028~0.420,适宜生境面积为 1.47~22.29 km²,2019 年、2021 年、2024 年的较高适宜度(>0.6)区域面积占比为 30%~40%,萌芽期适宜生境面积偏低会限制苦草属后续生长;极端洪旱事件通过改变水深格局、压缩关键生长期的适宜水深窗口加速苦草属潜在生境退化。

关键词:碟形湖;苦草属;生境适宜度;极端洪旱事件;鄱阳湖

Analysis of impacts of extreme flood and drought events on habitat of *Vallisneria* spp. in dish-shaped lakes of Poyang Lake//Xu Yifan¹, Lu Hao¹, Chen Liangang¹, Chen Liming¹, Zhou Ju¹, Zhang Lei²(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University)

Abstract: In response to the frequent occurrence of extreme flood and drought events, which have led to the continuous degradation of the habitat of the *Vallisneria* spp. in dish-shaped lakes of Poyang Lake, a remote sensing-terrain-water depth potential habitat suitability assessment method was constructed based on hydrological, remote sensing, terrain, and monitoring data of the *Vallisneria* spp. The impact of extreme flood and drought events on the habitat of the *Vallisneria* spp. was quantified. The results show that dish-shaped lakes exhibit significant interannual and seasonal fluctuations in water area, with extreme flood and drought events producing maxima and minima of 53.08 km² and 1.80 km², and mean expansion and contraction rates of 0.41 km²/d and 0.34 km²/d. In 2020, winter buds were detected only in Shahu Lake (biodensity is 0.34 ind/m², biomass is 0.01 g/m²), representing a substantial decline from 2019, and no winter buds were observed in 2022, indicating that consecutive extreme hydrological events severely disrupted population persistence. The annual average potential habitat suitability from 2019 to 2024 is 0.028~0.420, and the suitable habitat area is 1.47~22.29 km². The proportion of areas with high suitability (>0.6) in 2019, 2021, and 2024 is 30%~40%. Low suitable habitat area during the germination stage will limit subsequent growth of *Vallisneria* spp. Extreme flood and drought events accelerate the degradation of potential habitats of the *Vallisneria* spp. by altering water depth patterns and compressing the suitable water depth window during critical growth periods.

Key words: dish-shaped lake; *Vallisneria* spp.; habitat suitability; flood and drought events; Poyang Lake

近年来,在全球气候变化与长江中下游人类活动叠加作用下,鄱阳湖水文节律发生显著改变,洪旱转换过程趋于异常化,极端洪水和极端干旱事件呈现发生频率、持续时间、强度不断增强的趋势^[1-7]。例如,2020 年出现了持续高水位过程的极端洪水事件,而 2022 年经历了历史罕见的极端干旱事件,两者均显著偏离湖泊多年水位分布常态,被视为近年来鄱阳湖最具代表性的极端水文过程^[8-9]。极端洪旱事件通过改变水位涨落速率、淹水时长、水深格局及其季节性节律,可能对沉水植被的光环境、生长窗口、能量积累和营养繁殖过程产生深刻影响,从而引发生境退化、种群衰退甚至局部消失^[10-13]。目前,

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3209001)
作者简介:徐祎凡(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事环境遥感及水环境模拟研究。E-mail:xuyf@nhri.cn
通信作者:陆昊(1992—),男,工程师,博士,主要从事深度学习及智慧水利研究。E-mail:hlu@nhri.cn

国内外关于湖泊沉水植被对水文变化的响应机制已有大量研究,包括基于长期监测数据的水文-生态耦合分析、利用遥感技术反演植被空间格局变化以及采用生态过程模型模拟气候变化对湖泊生态系统的影响^[14-20]。然而,针对鄱阳湖独特的碟形湖单元在极端洪旱事件背景下沉水植物生境如何演变以及退化过程的水文驱动机制仍缺乏系统的定量研究。

碟形湖是鄱阳湖主湖区在枯水期于滩地上季节性形成的次级湖泊单元,是鄱阳湖湿地生态系统的重要组成部分^[21-22]。这些子湖泊具有相对独立的水文单元特征,在水鸟越冬、水生植被繁衍、水质净化、营养盐沉降等方面发挥重要的生态功能^[23-27]。其中,以苦草属(*Vallisneria* spp.)为代表的沉水植物是碟形湖生态系统结构与功能维持的核心组成部分,既是关键的初级生产者,也是水生无脊椎动物和候鸟的重要栖息与觅食资源,对维系碟形湖生物多样性和水动力-生态过程具有不可替代的作用^[28-31]。此外,碟形湖广泛存在圩堤与水闸等人工调控设施,其局地水文过程具有区别于主湖区的时空异质性,现有研究尚未充分揭示这些调控如何影响子湖水位波动与沉水植被适生生境的稳定性。传统的生境适宜度评估多依赖生态模型模拟^[32-34],但随着合成孔径雷达(SAR)技术的发展,利用 Sentinel-1 影像提取水体边界并结合高程数据构建水域面积-水位-水深关系,为刻画碟形湖精细水文过程和沉水植物潜在生境提供了新的技术路径^[35]。

鉴于此,本文综合利用水文资料、Sentinel-1 SAR 影像、水下地形资料及自然保护区监测资料,构建适用于碟形湖环境的遥感-地形-水深潜在生境适宜度评估方法,聚焦极端洪旱事件对沉水植物生境的扰动效应,拟揭示水文情势对碟形湖水域面积、变化速率及季节性规律的影响,定量刻画 2020 年和 2022 年洪旱事件背景下苦草属潜在适宜生境的时空演变格局,评估洪旱事件对苦草属生境与分布格局的影响,旨在深化对极端水文过程驱动下沉水植物生境演变机制的理解,为鄱阳湖及类似季节性湖泊湿地在极端气候情景下的生态调控、生境修复与适应性管理提供科学依据与技术支持。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

碟形湖位于鄱阳湖西北角,是鄱阳湖的重要组成部分,包括大湖池、沙湖、常湖池(图 1),面积约为 53 km²。碟形湖群区域属亚热带湿润季风型气候,1986—2020 年鄱阳湖湿地年平均气温为 17.9℃,2007 年月平均气温最高为 18.1℃,2012 年月平均

气温最低为 17.8℃。年平均降水量为 1550.1 mm,2006 年降水量最少,为 967 mm,1998 年降水量最多,为 3 250.5 mm。

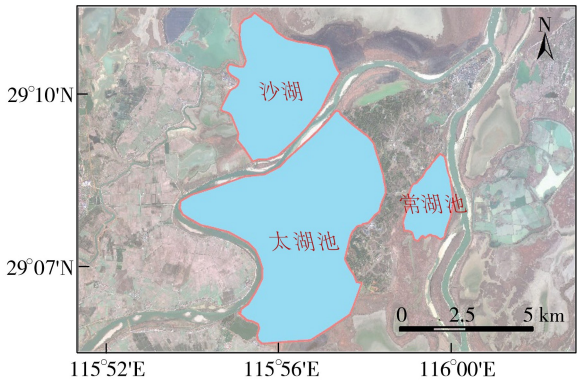


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

1.2 数据来源

本文采用数据主要包括水文数据、遥感数据、地形数据以及自然保护区监测资料等。其中,水文数据为星子站 1956—2022 年逐日水位资料;遥感数据主要为 2019—2024 年 Sentinel-1 微波影像,包括 269 景影像,影像收集与建模分析均基于 Google Earth Engine 平台完成,Sentinel-1 数据来自经过辐射定标和几何校正的 COPERNICUS/S1_GRD 数据集。地形数据为 2010 年测量的碟形湖水下地形资料。此外,还收集了 2019—2022 年江西鄱阳湖国家级自然保护区自然资源监测报告^[36-39]。

2 研究方法

2.1 水域面积提取及面积变化率计算

采用贾诗超等^[40]提出的 SDWI(Sentinel-1 dual-polarized water index)水体信息提取方法,对碟形湖水域面积进行逐景识别提取。SDWI 方法的原理是基于水体与非水体在 SAR 影像中后向散射特性的差异。水体由于对 SAR 信号吸收较强,通常表现为低后向散射,而土壤与植被因对信号散射较强则呈现较高的后向散射强度。SDWI 结合垂直发射垂直接收(VV)与垂直发射水平接收(VH)两个雷达极化通道的后向散射特征差异,有效区分水体与非水体。计算公式为:

$$I_{SDW} = \ln(10V_V V_H) - 8 \quad (1)$$

式中: I_{SDW} 为 SDWI 法水体指数; V_V 、 V_H 分别为 VV、VH 两个雷达极化通道经辐射定标后的线性后向散射系数。

在 SDWI 影像中,水体区域一般对应较低指数值,非水体区域则对应较高值,该方法的主要局限在于易受地形阴影干扰,导致阴影区域被误判为水体。

由于碟形湖区域地形平坦,无山体阴影影响,因此该算法适用性较高。参考前期经验值及相关研究^[41],将 $I_{SDW}>0.4$ 的像元判定为水体,并据此提取 2019—2024 年 269 景 SAR 影像的碟形湖水域面积。

基于提取的水域面积,采用面积变化率评估碟形湖群水域面积变化速率,计算公式为:

$$I_{AC} = (a_{n+1} - a_n) / (O_{n+1} - O_n) \tag{2}$$

式中: I_{AC} 为面积变化率; a_n 、 a_{n+1} 为第 n 、第 $n+1$ 次识别的水域面积; O_n 、 O_{n+1} 为第 n 、第 $n+1$ 次观测时间。

2.2 遥感-地形-水深潜在生境识别

由于受子堤和水闸调控影响,星子站水位资料并不能完全代表碟形湖的水位变化过程,因此借助碟形湖水下地形数据,基于面积-水位关系(图 2)构建水位反演模型,将 Sentinel-1 影像提取的逐景水域面积转换为对应水位,并进一步结合栅格化的水下地形数据逐像元转换为水深(式 3),生成 2019—2024 年碟形湖水深数据集,为潜在生境适宜度模拟提供水文驱动因子。

$$h = f^{-1}(A) - D \tag{3}$$

式中: A 为通过 Sentinel-1 影像提取的碟形湖水域面积; D 为水下地形数据; $f^{-1}(\cdot)$ 为基于水下地形数据构建的面积-水位关系的反函数; h 为对应水深。

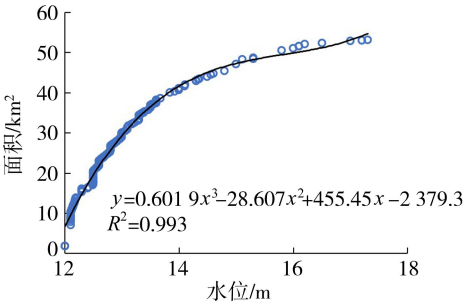


图 2 碟形湖水域面积-水位关系

Fig. 2 Relationship between water surface area and water level of dish-shaped lake

基于经验及前人研究成果^[42-47],构建苦草属不同生长阶段水深潜在适宜度曲线(图 3),包括萌芽期(4—5 月)、快速生长期(6—9 月)及生长后期(10—11 月)。结合 2019—2024 年碟形湖水深数据集,计算苦草属水深潜在适宜度的时空分布,计算公式为:

$$S = g(h) \tag{4}$$

式中: $g(\cdot)$ 为水深-适宜度函数; S 为潜在生境适宜度,取值范围为 0~1,0 表示完全不适宜,1 表示高度适宜。参照美国鱼类与野生动物管理局 (USFWS) 生境评价体系^[48],将适宜度划分为 5 个等级:0~0.1、>0.1~0.4、>0.4~0.6、>0.6~0.8、>0.8~1 分别 为不适宜、低适宜、一般适宜、较适宜、高适宜。

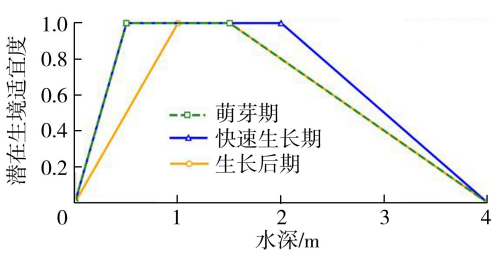


图 3 苦草属不同生长阶段水深潜在适宜度曲线

Fig. 3 Potential suitability curves of water depth for *Vallisneria* spp. at different growth periods

2.3 潜在适宜生境面积计算

基于遥感-地形-水深生境适宜度评估方法估算苦草属潜在适宜度,结合加权可用面积法^[49]估算碟形湖苦草属潜在适宜生境面积,进一步量化碟形湖潜在生境对苦草属生长的影响,计算公式为:

$$A_{wu} = \sum_{i=1}^n A_i S_i \tag{5}$$

式中: A_{wu} 为潜在适宜生境面积; A_i 为栅格单元 i 的面积; S_i 为栅格单元 i 的潜在生境适宜度; n 为栅格单元数。

3 结果与分析

3.1 极端洪旱事件下碟形湖水域特征

3.1.1 鄱阳湖水位时序变化

本文采用基于水位年极值序列分位阈值对极端洪旱年份进行界定,分别计算 1956—2022 年鄱阳湖星子站年最大与年最小水位序列的统计分布,将年最大水位超过其历史第 95 百分位的年份判定为极端洪水年,年最小水位低于其历史第 5 百分位的年份界定为极端干旱年。研究时段中,2020 年、2022 年分别呈现出显著的极端高水、极端低水特征:2020 年 7 月 12 日出现历史最高水位(22.63 m),2022 年 11 月 17 日水位跌至 6.46 m,刷新有记录以来最低值,这两年被明确界定为极端洪水年与极端干旱年,其极端性在长序列背景下具有突出的异常性。进一步对比 2003 年前后的水文情势可发现,2003 年以来区域水文节律发生显著改变:2004—2022 年逐月平均水位较 1956—2003 年整体下降 0.84 m(表 1)。最高水位呈现明显的时间异质性,全年月均降幅达 1.27 m,其中 1 月(2.76 m)、3 月(2.65 m)、9 月(2.53 m)下降最为显著。最低水位变化则具有季节性,5—6 月和 8—11 月平均下降 2.41 m,尤以 8 月(3.08 m)、9 月(3.83 m)、10 月(2.46 m)为主要下降期;而 3—4 月及 7 月则出现平均 0.78 m 的升幅,其中 4 月升幅最大(1.26 m)。

表 1 鄱阳湖星子站水位变化

Table 1 Water level change at Xingzi Station of Poyang Lake

月份	1956—2003 年			2004—2022 年		
	平均水位/m	最高水位/m	最低水位/m	平均水位/m	最高水位/m	最低水位/m
1	7.13	12.64	5.30	6.87	9.88	5.39
2	7.77	12.02	5.24	7.22	11.79	5.20
3	9.25	15.60	5.30	9.04	12.95	5.69
4	11.14	15.84	5.60	10.30	15.37	6.86
5	12.99	17.95	8.56	12.04	17.06	6.75
6	14.16	19.92	9.62	14.29	18.36	8.11
7	15.95	20.55	10.91	15.48	20.57	11.59
8	14.82	20.58	9.98	14.10	19.24	6.90
9	14.08	19.64	8.79	12.36	17.11	4.96
10	12.66	16.69	7.26	10.33	16.04	4.80
11	10.18	15.40	6.34	8.63	13.51	4.56
12	7.85	12.00	5.40	7.20	11.68	4.95

基于 0.5 m 水位步长的逐日平均水位频次分析进一步印证了水文节律结构性转变。1956—2003 年,水位在 13.0~13.5 m 区间停留时间最长(18.9 d),较长持续时间主要集中于 10.0~14.0 m;而 2004—2022 年,水位持续时间最长的区间显著下移至 6.0~6.5 m(21.9 d),表明湖区水文节律已从“中高水位主导”转向“低水位高频出现”新常态。这一变化不仅解释了近年来极端洪旱年份的频发趋势,也为理解极端事件对水域格局及生态生境的扰动提供了重要背景。

3.1.2 碟形湖水域面积变化

在鄱阳湖整体水位下降的长期背景下,为定量刻画极端洪旱事件对碟形湖水域动态的影响,利用 2019—2024 年共 269 景 Sentinel-1 影像提取碟形湖水域面积时序数据。结果显示,碟形湖水域面积在年尺度上变化趋势不显著,但对极端水位事件具有高度敏感性。研究期内碟形湖经历了 2020 年极端洪水和 2022 年极端干旱两个关键年份,水域面积的极大值(53.08 km²,2020 年 7 月 14 日)与极小值(1.80 km²,2023 年 6 月 11 日)直接对应于这两次极端水位条件。尤其是 2020 年洪水过程导致湖区迅速扩张,而 2022 年干旱的持续效应使得次年汛前碟形湖水位仍显著偏低,最终造成 2023 年面积出现历史最低点。研究期内年均水域面积在 2024 年达到最大(31.87 km²),在 2023 年降至最小(13.75 km²),总体平均变化幅度为(27.67±11.05)km²,表明即使在子堤与闸控的调节作用下,碟形湖对极端洪旱事件仍呈现出强烈响应。

按丰水期(6—9 月)、平水期(3—5 月、10—11 月)和枯水期(12 月至次年 2 月)分期统计碟形湖水域面积及面积变化率,结果如图 4 所示。由

图 4 可见,碟形湖水域面积呈现显著的季节性格局:丰水期平均面积最大(32.87 km²),平水期、枯水期面积分别为 24.56、21.57 km²。按四季划分,夏季最高(33.76 km²),冬季最低(21.57 km²)。结合子堤与闸控条件分析,春季受阻水影响入湖水量有限;汛期当主湖水位超过子堤高程后出现快速扩张;退水期在闸控限制下排水速度减缓,使秋季水域面积持续偏高。2023 年水域面积持续偏低正是由 2022 年极端干旱导致的湖区长期低水位所驱动,其影响跨季延续至次年汛前。

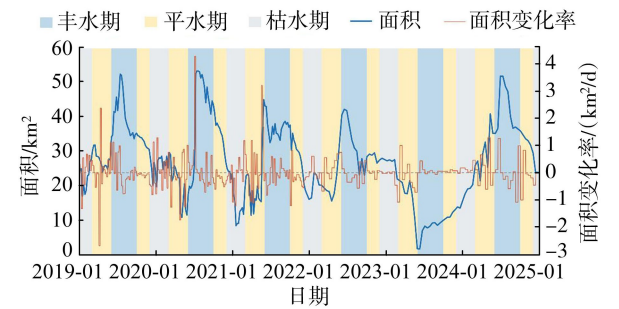


图 4 2019—2024 年碟形湖水域面积及面积变化率
Fig. 4 Water surface area and its change rate in dish-shaped lakes from 2019 to 2024

碟形湖平均水域面积增长速率为 0.41 km²/d、减少速率为 0.34 km²/d,最大增长、减少速率分别为 4.29、2.69 km²/d。面积增长过程的变异系数(1.33)显著高于减少过程(1.09),说明面积扩张的强烈波动主要受极端洪水年份驱动,而面积缩减过程因受子堤与闸坝调控影响更为平缓。

尽管碟形湖的子堤和闸控在一定程度上对湖区水体涨落过程起到了延迟和平缓作用,但其在应对洪旱水位过程中的调控能力显然存在边界,特别是极端水文条件下碟形湖水体仍表现出剧烈的动态响应。这种强烈的水文波动不仅可能打破湿地生态系统的水量平衡,还会对苦草属的生长周期和空间分布构成扰动,进而影响整个生物群落的结构稳定性。

3.2 基于地面调查数据的碟形湖苦草属演变

苦草属作为碟形湖重要的沉水植被类型,是维系湖泊湿地生态系统结构与功能稳定的关键物种。其在提升水体净化能力、促进营养盐沉降、稳定湖底沉积物以及为候鸟和多种水生生物提供栖息与觅食场所等方面发挥着重要的生态作用。本文收集并整理了 2019—2022 年《江西鄱阳湖国家级自然保护区自然资源监测报告》中的苦草属冬芽监测数据,用以探讨碟形湖生境变化对苦草属种群延续与恢复的潜在影响。

冬芽是苦草属的重要营养繁殖体,不仅是其越冬的主要生活史阶段,也是来年种群再生的重要物

质基础。冬芽密度可反映沉水植被的自我更新潜力,密度越高表明该水域种群延续能力越强;而冬芽生物量代表其储存的能量和养分水平,生物量较高的冬芽更有利于在翌年快速萌发和生长。监测结果显示,2019 年沙湖和常湖池苦草属冬芽密度均在 3.00 个/m² 以上,大湖池为 0.67 个/m²,苦草属冬芽密度均值为 1.73 个/m²;2020 年以后,大湖池和常湖池在实地调查中均未发现冬芽,沙湖 2020 年冬芽密度下降至 0.34 个/m²。同样,冬芽生物量的变化趋势与密度高度一致,2019 年常湖池和沙湖分别为 0.74 g/m² 和 0.62 g/m²,大湖池为 0.05 g/m²,冬芽生物量均值为 0.26 g/m²;2020 年沙湖降至 0.01 g/m²。

结合同期水文资料及前文分析,2020 年碟形湖经历了显著增强的水位波动,尤其是水位上涨的幅度与速率均高于常年水平。这种快速且频繁的水位变化会对苦草属的生长发育、光照条件以及能量积累产生不利影响,可能直接导致了冬芽在当年显著衰退并延续至 2022 年。这些结果显示,极端水文事件及其引起的水位变动是干扰碟形湖苦草属生境质量与种群延续的重要生态驱动因素。

3.3 碟形湖苦草属潜在适宜生境评估

基于碟形湖水域面积变化数据,利用构建的遥感-地形-水深潜在生境适宜度评估方法,对 2020 年和 2022 年洪旱事件对应的极端水位日期以及 2019—2024 年碟形湖苦草属潜在适宜生境进行模拟,得到洪旱事件极端时刻以及研究时段内苦草属适宜生境的时空分布特征。

3.3.1 洪旱事件极端时刻苦草属生境状态

以 2020 年 7 月 14 日和 2022 年 11 月 19 日作为洪旱事件极端时刻,计算碟形湖的水深空间分布,结果如图 5 所示。由图 5 可见,2020 年洪水事件后,碟形湖水深主要集中在 4~6 m,占湖区面积的 62.40%;2022 年干旱事件后,碟形湖在蓄水保水作用的支撑下,有 47.48% 湖区面积水深在 1 m 以下,52.25% 湖区处于干旱状态,这些水文情势对苦草属的生境产生显著影响。图 6 为洪旱极端时刻苦草属潜在生境适宜度的空间分布,可见适宜度的空间分布与适宜生境面积存在显著差异。2020 年 7 月 14 日碟形湖苦草属潜在生境适宜度均值为 0.168,适宜生境面积为 13.35 km²,潜在适宜生境主要分布于近岸区域;2022 年 11 月 19 日潜在生境适宜度均值为 0.249,适宜生境面积为 17.16 km²,潜在适宜生境主要分布于湖心区。洪旱事件极端水文条件下,碟形湖潜在生境适宜度处于低适宜度等级,生境适宜面积也较小,但 2022 年情况要优于 2020 年。

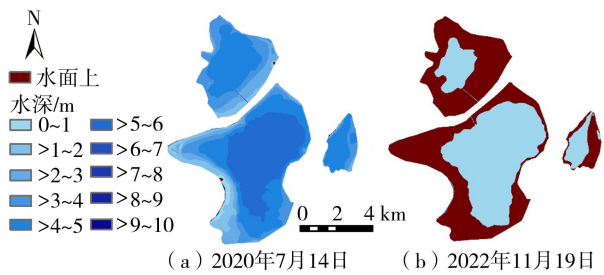


图 5 洪旱极端时刻碟形湖水深的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of dish-shaped lake water depth during extreme periods of flood and drought

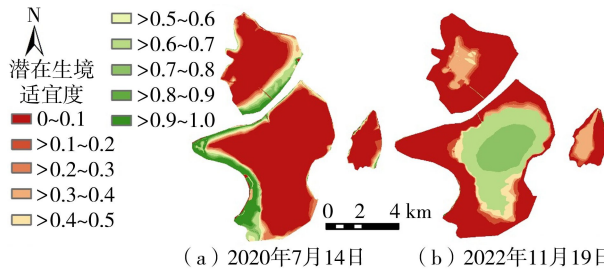


图 6 洪旱极端时刻碟形湖苦草属潜在生境适宜度的空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of potential habitat suitability of *Vallisneria* spp. in dish-shaped lake during extreme periods of flood and drought

3.3.2 研究时段内苦草属生境状态

遥感-地形-水深潜在生境适宜度评估结果表明,2019—2024 年碟形湖苦草属潜在生境适宜度整体呈现波动—下降—恢复的年际变化特征。2019 年(0.411)、2021 年(0.399)、2024 年(0.420)的年均适宜度相对较高,反映出这些年份具备相对有利的生境条件。极端洪旱事件发生的 2020 年(0.292)和 2022 年(0.316)适宜度显著下降,表明极端水文过程对苦草属生境造成明显冲击。受 2022 年极端干旱的持续影响,2023 年水域范围未恢复,适宜度进一步下降至 0.028,为研究期最低值,显示生境环境严重退化,几乎完全不适宜苦草属生长;至 2024 年适宜度回升,说明该年碟形湖水文节律有所恢复,促进了潜在生境改善。

图 7 为 2019—2024 年碟形湖苦草属潜在生境适宜度的空间分布,可见适宜度较高的区域主要集中于湖区中部及局部浅滩地带。在适宜度较高的年份(如 2019 年、2021 年、2024 年),较高适宜度区域(适宜度大于 0.6)覆盖面积较大,生境整体相对稳定。而在 2020 年和 2022 年,较高适宜度区域明显收缩;2023 年几乎全区域被低适宜度区域(适宜度小于 0.2)占据,反映出生态系统遭受了重大扰动。

表 2 为苦草属不同潜在生境适宜度区间的面积占比。由表 2 可见,苦草属潜在较高适宜度区域(>0.6)在 2019 年、2021 年、2024 年面积占比分别

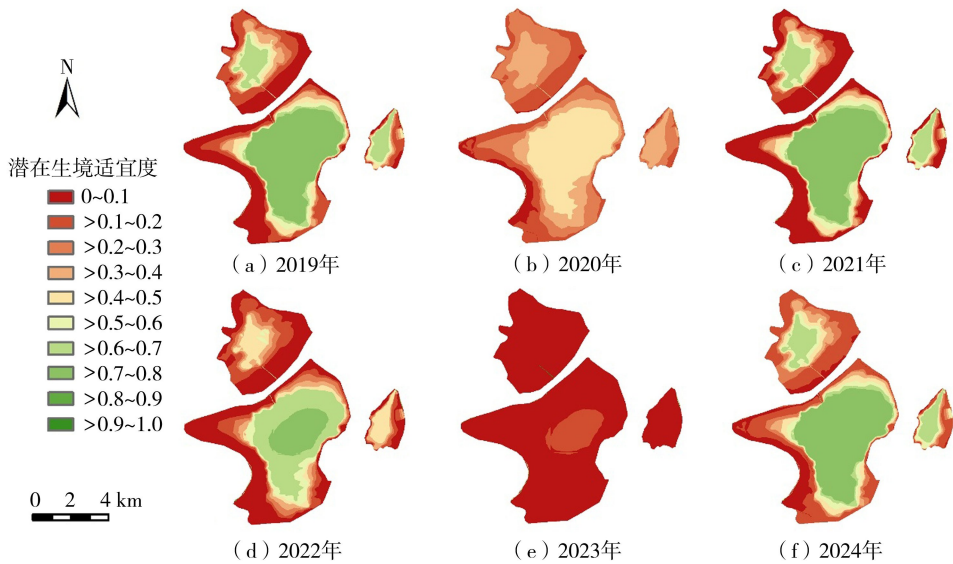


图 7 2019—2024 年碟形湖苦草属潜在生境适宜度的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of potential habitat suitability of *Vallisneria* spp. in dish-shaped lake from 2019 to 2024

表 2 苦草属不同潜在生境适宜度区间的面积占比

Table 2 Area proportion of different potential habitat suitability ranges for *Vallisneria* spp.

适宜度 区间	面积占比(%)					
	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年	2024 年
0~0.1	22.35	4.47	32.72	33.36	92.00	9.02
>0.1~0.2	15.53	22.14	5.93	13.21	7.74	25.85
>0.2~0.3	4.77	26.44	4.09	6.88	0.02	7.39
>0.3~0.4	6.27	20.08	5.27	6.50	0.04	5.57
>0.4~0.5	6.08	26.74	5.79	9.23	0.02	6.42
>0.5~0.6	5.78	0.13	6.21	3.97	0.03	6.04
>0.6~0.7	8.93	0.00	9.67	17.97	0.03	9.42
>0.7~0.8	30.29	0.00	30.32	8.79	0.01	30.29
>0.8~0.9	0.00	0.00	0.00	0.09	0.03	0.00
>0.9~1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00

达到 39.23%、39.99%、39.71%，而低适宜度区域 (<0.4) 均低于 50%，说明这些年份整体生境条件较为有利，潜在不适宜区域较小，有利于苦草属生长。2020 年和 2023 年低适宜度区域面积占比分别高达 73.13% 和 99.79%，究其原因，2020 年极端洪水导致湖区水位在短时间内急剧上升，7 月 3 日水域面积变化速率达到 4.29 km²/d，7 月 14 日面积增至监测期最大值 53.08 km²，高水位使适宜生境显著压缩；2023 年则受 2022 年极端干旱的持续影响，湖区水位长期偏低，前期蓄水随渗漏与蒸发基本耗尽，水深难以维持在适宜范围，不适宜等级区域面积占比高达 92.00%，中、高等级适宜区几乎消失，生境退化达到最严重程度。

综上，碟形湖苦草属潜在适宜生境在 2019—2024 年经历了明显的波动性退化，其中 2020 年洪水及 2022 年干旱发生对碟形湖苦草属潜在适宜生境存在较强的影响，研究期内苦草属潜在适宜生境

呈现明显的年际波动，空间格局亦发生显著变化，可能受到复杂水文过程以及碟形湖调控等人类活动干扰等多种因素共同影响。

3.3.3 苦草属潜在生境适宜面积变化

碟形湖苦草属的潜在生境适宜面积作为综合适宜度等级与空间分布的重要量化指标，表现出与年均适宜度高度一致的变化趋势。2019 年、2021 年、2024 年潜在生境适宜面积分别为 21.78、21.18、22.29 km²，生境适宜面积相对较高，占湖区面积的比例分别为 41.06%、39.94%、42.02%。而 2023 年潜在生境适宜面积仅为 1.47 km²，占湖区面积的比例为 2.76%，相较 2022 年 (16.75 km²) 下降显著。适宜度等级、潜在生境适宜面积与湖区水域面积同步波动，表明湖区潜在生境高度依赖于稳定的水文过程。

图 8 为苦草属不同生长期的年度潜在适宜生境面积。由图 8 可见，2019—2024 年苦草属不同生长期的潜在生境适宜面积呈现出明显波动特征。在萌芽期 (4—5 月)，除 2024 年外，碟形湖苦草属潜在生境适宜度普遍偏低，反映水文条件尚未达到适宜生长范围，平均生境适宜面积为 10.25 km²，最大值为 2024 年的 22.41 km²，最小值为 2023 年的 4.22 km²。快速生长期 (6—9 月) 湖区潜在生境适宜度明显上升，平均生境适宜面积为 18.76 km²，最大值为 2021 年的 27.99 km²，最小值为 2023 年的 0.40 km²。生长后期 (10—11 月) 适宜度进一步提升，平均生境适宜面积为 18.26 km²，除 2023 年处于极低水平外，其余年份均维持较高值。

采用 2019—2022 年苦草属冬芽密度与对应不同生长期的适宜生境面积进行皮尔森相关性分析，

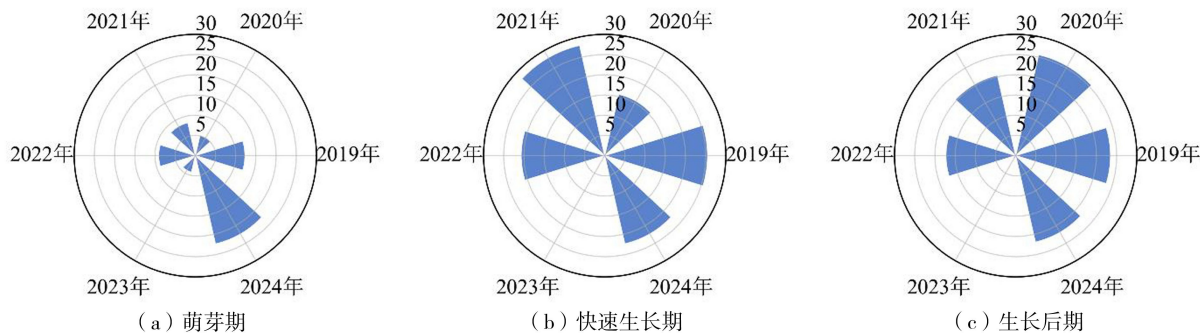


图 8 苦草属不同生长期的年度潜在适宜生境面积 (单位: km²)

Fig. 8 Annual potential suitable habitat area for different growth stages of *Vallisneria* spp. (unit: km²)

得到冬芽密度与萌芽期、快速生长期、生长后期的适宜生境面积之间的相关系数分别为 0.79、0.34、0.37。可见,苦草属生长情况与萌芽期的适宜生境面积相关性更高,侧面说明萌芽期在苦草属生命周期中占据重要地位,对其种群繁衍起到关键作用。

对 2020 年和 2022 年极端洪旱事件下潜在适宜生境面积的进一步分析表明,洪旱极端过程对苦草属生境均造成显著扰动。2020 年平均适宜度为 0.292,低于多年平均水平,潜在适宜生境面积为 15.48 km²。2020 年萌芽期潜在适宜生境面积仅为 5.13 km²,显著低于多年均值 (12.21 km²);快速生长期受 6 月底至 7 月初极端降水影响,水位迅速升至全年最高,超出阈值,适宜度等级下降,潜在适宜生境面积仅 15.58 km²,虽然汛后水位在子堤滞蓄作用下相对适宜,但萌芽期受抑制导致后续恢复受限。2022 年平均适宜度为 0.316,潜在适宜生境面积 16.75 km²,略高于 2020 年;由于子堤蓄水,快速生长期仍保持一定适宜生境 (20.70 km²),但随着干旱持续,生长后期潜在适宜生境面积降至 17.28 km²,同时由于 2023 年旱情未能有效缓解,导致潜在适宜生境面积崩溃。在经历 2022—2023 年干旱冲击后,2024 年适宜生境有所恢复,较高适宜度区域 (>0.6) 占比升至 39.71%,潜在适宜生境面积达到 22.29 km²。尽管这表明湿地生态系统具有一定恢复能力,但在极端干旱趋于频发的背景下,沉水植被群落可能发生长期结构调整,对湿地生态功能与生物多样性产生深远影响。碟形湖的演变特征与全球受气候变化和人类活动影响的湖泊湿地退化现象具有一致性^[50-52],进一步凸显水文情势在湿地生境演变中的关键作用。

3.3.4 苦草属潜在适宜生境对极端洪旱事件的响应机制

综合分析碟形湖近年水文过程与潜在生境适宜度,可见极端洪旱事件通过改变水位涨落速率、水深格局及关键生长期水文窗口对苦草属潜在生境产生

显著影响。其响应机制主要体现在以下几方面: ①极端洪水通过快速高幅涨水造成生境挤占与光环境恶化。2020 年洪水期间,湖区水位在短时间内急剧上升至多年高位,水深主要集中在 4~6 m,远超苦草属适宜范围;深水条件导致光照衰减、机械扰动增强,使中高适宜度区域明显收缩,潜在生境适宜度均值下降至 0.168;浅滩及近岸区域被深水淹没,形成显著的生境空间挤占效应,直接压制萌芽期与快速生长期的生长。②极端干旱导致适宜生境面积大幅减少并呈局部化分布。2022 年干旱期间,超 50% 区域干涸,其余区域水深普遍偏低,难以维持适宜水深范围;适宜生境显著减少,仅集中于少数地势低洼、保有水面的区域;2023 年这一趋势进一步加剧,潜在生境适宜度均值降至 0.028,生境承载能力几乎丧失。③关键生长期窗口受扰动是苦草属种群衰退的重要诱因。相关性分析显示,苦草属冬芽密度与萌芽期潜在适宜生境面积的相关系数最高,表明萌芽期生境缺失直接影响种群更新能力,极端水文过程破坏萌芽期水深条件是抑制种群更新和导致生境退化的重要机制。

需要指出,苦草属潜在生境适宜度受多种生态因子共同影响,除水深外,还包括淹水时长、底质条件、光照强度、水体透明度、种子库储备、营养盐浓度、种间竞争等因素^[53-54]。本文构建的“遥感-地形-水深”潜在生境适宜度评估方法虽能较好地刻画以水深为主导的苦草属生境格局,但在部分区域的解释力仍存在局限。鉴于目前各生态因子对沉水植被分布影响权重尚缺乏精确量化数据,研究中未引入多因子耦合模型,后续研究可探索多因子协同驱动的潜在生境适宜度综合评价模型,以提高苦草属潜在生境模拟精度和解释能力。

4 结 论

a. 基于 2019—2024 年水文数据、遥感数据以及水下地形数据,构建了遥感-地形-水深潜在生境

适宜度评估方法,定量解析了鄱阳湖碟形湖苦草属潜在适宜生境对水文条件扰动的生态响应。

b. 1956—2022 年鄱阳湖水水位整体下降,主要水位持续区间由中高水位(10.0~14.0 m)转向低水位(6.0~6.5 m);在此背景下,碟形湖水域面积年际间水域面积差异明显,并呈显著的季节性波动,2020 年极端洪水事件、2022 年极端干旱事件导致水域面积变化明显,表明子堤与闸坝调控在缓解水位波动方面的能力有限。

c. 2019—2024 年碟形湖苦草属潜在生境适宜度呈现波动—下降—恢复趋势,极端洪旱事件通过改变水深格局和淹水时长,对苦草属不同生长期产生显著影响,导致种群连续衰退和局部消失。

d. 苦草属潜在适宜生境在空间上主要集中于湖区中部及浅滩地带,较高适宜度等级(>0.6)在 2019 年、2021 年、2024 年的面积占比可达 30%~40%,而 2020 年和 2023 年则明显收缩甚至消失;萌芽期对苦草属整个生长周期起到关键作用;连续极端干旱可能引起沉水植被群落结构长期调整,进而影响湿地生态功能与生物多样性。

参考文献:

[1] 郭敏,余定坤,李浙,等. 极端干旱对鄱阳湖碟形湖水生植物群落的影响[J]. 生态与农村环境学报,2024,40(6):790-798. (Guo Min, Yu Dingkun, Li Zhe, et al. The impact of extreme droughts on aquatic macrophyte communities in the sub-lakes of Poyang Lake[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(6): 790-798. (in Chinese))

[2] 陈静,李云良,周俊锋,等. 鄱阳湖洪泛区碟形湖湿地系统地表:地下水交互作用[J]. 湖泊科学,2021,33(3):842-853. (Chen Jing, Li Yunliang, Zhou Junfeng, et al. Assessing surface water-groundwater interactions in the seasonal lake-wetland system of Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3): 842-853. (in Chinese))

[3] Wei Zezhu, Xu Zhili, Dong Bin, et al. Habitat suitability evaluation and ecological corridor construction of wintering cranes in Poyang Lake[J]. Ecological Engineering, 2023, 189:106894.

[4] Hu Beijuan, Hu Xuren, Nie Xue, et al. Seasonal and inter-annual community structure characteristics of zooplankton driven by water environment factors in a Sub-lake of Lake Poyang, China[J]. PeerJ, 2019, 7:e7590.

[5] Xiao Zhe, Li Hua, Li Xiaochuang, et al. Geographic pattern of phytoplankton community and their drivers in lakes of Middle and Lower reaches of Yangtze River floodplain, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(55):83993-84005.

[6] Liu Xia, Qian Kuimei, Chen Yuwei, et al. A comparison of factors influencing the summer phytoplankton biomass in China's three largest freshwater lakes: Poyang, Dongting, and Taihu[J]. Hydrobiologia, 2017, 792(1):283-302.

[7] 燕文明,蒋超,陈红,等. 苦草对沉积物-水界面不同形态砷的削减[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):65-71. (Yan Wenming, Jiang Chao, Chen Hong, et al. Reduction effect of *Vallisneria natans* on different forms of arsenic in sediment-water interface [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 65-71. (in Chinese))

[8] Liu Yuanbo, Wu Guiping. Hydroclimatological influences on recently increased droughts in China's largest freshwater lake [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(1):93-107.

[9] Wang Chenxi, Xia Shaoxia, Yu Xiubo, et al. Responses to extreme drought in wintering waterbirds: a multi-species approach[J]. Frontiers in Zoology, 2025, 22(1):3.

[10] 郭恢财,邵菁,杨小兰,等. 越冬白鹤在江西鄱阳湖南矶国际重要湿地的数量动态与空间分布[J]. 自然保护地, 2024, 4(1):88-98. (Guo Huicai, Shao Jing, Yang Xiaolan, et al. Quantitative dynamic and spatial distribution of overwintering Siberian cranes in Jiangxi Poyang Lake Nanji Wetlands [J]. Natural Protected Areas, 2024, 4(1): 88-98. (in Chinese))

[11] 张笑辰,秦海明,金斌松,等. 鄱阳湖浅碟湖泊沉水植物冬芽的分布及对植食水鸟的食物贡献[J]. 生态学报, 2014, 34(22):6589-6596. (Zhang Xiaochen, Qin Haiming, Jin Binsong, et al. Distribution in winter buds of submerged macrophyte and their contribution for herbivorous waterfowl in a shallow dish lake of Poyang Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6589-6596. (in Chinese))

[12] 曹思佳,李云良,陈静,等. 2022 年鄱阳湖极端干旱对洪泛区地下水文情势的影响[J]. 中国环境科学, 2023, 43(12):6601-6610. (Cao Sijia, Li Yunliang, Chen Jing, et al. Influence of extreme drought in 2022 on groundwater hydrological regime in the Poyang Lake floodplain area [J]. China Environmental Science, 2023, 43(12): 6601-6610. (in Chinese))

[13] Yu Meixiu, Liu Xiaolong, Wood Paul, et al. Simulation of Poyang Lake water levels and outflow under historical extreme hydrological scenarios[J]. Journal of Flood Risk Management, 2022, 15(3):e12806.

[14] 夏军,薛颖,骆文广,等. 旱涝灾害对鄱阳湖生态系统的影响与适应性对策[J]. 水资源保护, 2025, 41(5):11-21. (Xia Jun, Xue Ying, Luo Wenguang, et al. Impacts of drought and flood disasters on the Poyang Lake ecosystem and adaptive strategies [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 11-21. (in Chinese))

[15] 姚斯洋,林妙丽,陈诚,等. 拟建鄱阳湖水利枢纽对湖区

- 水环境容量的影响[J]. 水资源保护,2023,39(1):200-207. (Yao Siyang,Lin Miaoli,Chen Cheng, et al. Impact of the scheduled Poyang Lake Hydraulic Project on water environment capacity in lake district[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):200-207. (in Chinese))
- [16] 赵雅楠,黄国鲜,童思陈,等. 气候变化与人类活动对鄱阳湖流域入湖水沙变化的贡献率分析[J]. 水资源保护,2025,41(6):113-122. (Zhao Yanan,Huang Guoxian, Tong Sichen,et al. Analysis of contribution rates of climate change and human activities to changes in runoff and sediment inflow into lake in the Poyang Lake Basin[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (6) : 113-122. (in Chinese))
- [17] 邓鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):39-45. (Deng Peng, Sun Shanlei, Huang Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (1) : 39-45. (in Chinese))
- [18] 高冰,任依清. 鄱阳湖流域 1961—2010 年极端降水变化分析[J]. 水利水电科技进展,2016,36(1):31-35. (Gao Bing, Ren Yiqing. Changes of extreme precipitation events in Poyang Lake Basin from 1961 to 2010 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (1) : 31-35. (in Chinese))
- [19] 雷声. 2020 年鄱阳湖洪水回顾与思考[J]. 水资源保护,2021,37(6):7-12. (Lei Sheng. Review and reflection on Poyang Lake flood in 2020 [J]. Water Resources Protection,2021,37(6):7-12. (in Chinese))
- [20] 雷声,全智平,王能耕. 2022 年江西省极端干旱回顾与思考[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(4):1-6. (Lei Sheng, Quan Zhiping, Wang Nenggeng. Review and reflection on extreme drought in Jiangxi Province on 2022 [J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33 (4) : 1-6. (in Chinese))
- [21] Botrel M,Maranger R. Global historical trends and drivers of submerged aquatic vegetation quantities in lakes[J]. Global Change Biology,2023,29(9):2493-2509.
- [22] Meng Zhujian, Yu Xiubo, Xia Shaoxia, et al. Effects of water depth on the biomass of two dominant submerged macrophyte species in floodplain lakes during flood and dry seasons[J]. Science of the Total Environment,2023,877:162690.
- [23] Ren Wenjing,Yao Yiqian,Gao Xiaoyu,et al. Water depth affects submersed macrophyte more than herbivorous snail in mesotrophic lakes [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15 : 1375898.
- [24] Wang Pu,Zhang Qian,Xu Yingshou,et al. Effects of water level fluctuation on the growth of submerged macrophyte communities[J]. Flora,2016,223:83-89.
- [25] Zhang Yehui,Yang Na,Xu Jiawei,et al. Long-term study of the relationship between precipitation and aquatic vegetation succession in East Taihu Lake, China [J]. Scientifica,2017:6345138.
- [26] Yang RuiBo, Wu Junen, Zhao Juchao, et al. Marked interannual variability in the relative dominance of phytoplankton over submerged macrophytes rather than regime shifts in a shallow eutrophic lake: evidence from long-term observations [J]. Ecological Indicators, 2024, 166 : 112301.
- [27] Liang Shuang, Gong Zhaoning, Wang Yingcong, et al. Accurate monitoring of submerged aquatic vegetation in a macrophytic lake using time-series Sentinel-2 images[J]. Remote Sensing,2022,14(3):640.
- [28] Wang Yingcong, Gong Zhaoning, Zhou Han. Long-term monitoring and phenological analysis of submerged aquatic vegetation in a shallow lake using time-series imagery[J]. Ecological Indicators,2023,154:110646.
- [29] 胡振鹏,葛刚,刘成林. 鄱阳湖湿地植被退化原因分析及其预警[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(3):381-386. (Hu Zhenpeng, Ge Gang, Liu Chenglin. Cause analysis and Early warning for wetland vegetation degradation in Poyang Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2015,24(3):381-386. (in Chinese))
- [30] 岳恩馨,刘意,李相虎,等. 鄱阳湖洪泛系统水文连通性演变特征及对湿地植被生长的影响[J]. 生态学报,2025,45(4):1938-1949. (Yue Enxin, Liu Yi, Li Xianghu, et al. Evolution characteristics of hydrological connectivity in floodplain system of Poyang Lake and its impact on wetland vegetation growth [J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(4):1938-1949. (in Chinese))
- [31] 汪豪,娄厦,刘曙光,等. 湿地环境质量评价方法研究进展[J]. 水利水电科技进展,2020,40(6):85-94. (Wang Hao,Lou Xia, Liu Shuguang, et al. Advances in wetland environmental quality assessment methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (6) : 85-94. (in Chinese))
- [32] 陈炼钢,陈黎明,徐祎凡,等. 水位变化对鄱阳湖苦草潜在生境面积的影响[J]. 水科学进展,2020,31(3):377-384. (Chen Liangang, Chen Liming, Xu Yifan, et al. Effects of water level fluctuation on the potential habitat area of *Vallisneria natans* in Poyang Lake [J]. Advances in Water Science,2020,31(3):377-384. (in Chinese))
- [33] 陈炼钢,陈黎明,贾建伟,等. 鄱阳湖枯季水位变化对越冬水鸟生境面积的定量影响[J]. 水利学报,2019,50(12):1502-1509. (Chen Liangang, Chen Liming, Jia Jianwei, et al. Quantitative effects of water level variation on the habitat area of wintering waterfowl in dry season of the Poyang Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50 (12) : 1502-1509. (in Chinese))
- [34] Tsyganskaya V, Martinis S, Marzahn P, et al. Detection of

temporary flooded vegetation using Sentinel-1 time series data[J]. Remote sensing,2018,10(8):1286.

[35] Huth J, Gessner U, Klein I, et al. Analyzing water dynamics based on Sentinel-1 time series: a study for Dongting lake wetlands in China [J]. Remote Sensing, 2020,12(11):1761.

[36] 刘观华,余定坤,罗浩. 江西鄱阳湖国家级自然保护区自然资源 2019—2020 年监测报告[M]. 南昌:江西科学技术出版社,2020:42-46.

[37] 徐志文,刘观华,龚磊强. 江西鄱阳湖国家级自然保护区自然资源 2020—2021 年监测报告[M]. 南昌:江西科学技术出版社,2021:43-47.

[38] 徐志文,刘观华,龚磊强. 江西鄱阳湖国家级自然保护区自然资源 2021—2022 年监测报告[M]. 南昌:江西科学技术出版社,2023:42-47.

[39] 徐志文,龚磊强,詹慧英,等. 江西鄱阳湖国家级自然保护区自然资源 2022—2023 年监测报告[M]. 南昌:江西科学技术出版社,2024:41-45.

[40] 贾诗超,薛东剑,李成绕,等. 基于 Sentinel-1 数据的水体信息提取方法研究[J]. 人民长江,2019,50(2):213-217. (Jia Shichao,Xue Dongjian,Li Chengrao,et al. Study on new method for water area information extraction based on Sentinel-1 data[J]. Yangtze River,2019,50(2),213-217. (in Chinese))

[41] 孟庆港,曾琪明. 基于主成分变换的星载升降轨极化 SAR 数据水体提取方法[J]. 地球信息科学学报,2024,26(4):1057-1074. (Meng Qinggang,Zeng Qiming. Water body extraction method from spaceborne ascending and descending polarimetric SAR data based on principal component analysis [J]. Journal of Geo-information Science,2024,26(4):1057-1074. (in Chinese))

[42] 李启升,黄强,李永吉,等. 水深对沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 和穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*) 生长的影响[J]. 湖泊科学,2019,31(4):1045-1054. (Li Qisheng,Huang Qiang,Li Yongji,et al. Effects of water depth on growth of submerged macrophytes *Vallisneria natans* and *Myriophyllum spicatum*[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31 (4): 1045-1054. (in Chinese))

[43] 符辉,袁桂香,曹特,等. 水深梯度对苦草 (*Vallisneria natans*) 克隆生长与觅食行为的影响[J]. 湖泊科学,2012,24(5):705-711. (Fu Hui,Yuan Guixiang,Cao Te,et al. Clonal growth and foraging behavior of a submerged macrophyte *Vallisneria natans* in response to water depth gradient[J]. Journal of Lake Sciences,2012,24(5):705-711. (in Chinese))

[44] Xiao Keyan,Yu Dan,Wu Zhonghua. Differential effects of water depth and sediment type on clonal growth of the submersed macrophyte *Vallisneria natans* [J]. Hydrobiologia,2007,589(1):265-272.

[45] 曹昉,张素娟,刘燕燕,等. 水深梯度对苦草生长和生物量的影响[J]. 生态环境学报,2014,23(8):1332-1337. (Cao Yun,Zhang Sujuan,Liu Yanyan,et al. Effects of water gradient on seedlings growth and biomass of *Vallisneria natans* [J]. Ecology and Environmental Sciences,2014,23(8):1332-1337. (in Chinese))

[46] 杨鑫,孙淑云,柏祥,等. 水深梯度对苦草 (*Vallisneria natans*) 光合荧光特性的影响[J]. 湖泊科学,2014,26(6):879-886. (Yang Xin,Sun Shuyun,Bai Xiang,et al. Influences of water depth gradient on photosynthetic fluorescence characteristics of *Vallisneria natans* [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26 (6): 879-886. (in Chinese))

[47] 袁龙义,李守淳,李伟,等. 水深对刺苦草生长和繁殖策略的影响研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版),2007(2):156-160. (Yuan Longyi,Li Shouchun,Li Wei,et al. Effects of water depth on growth and reproductive strategy of *Vallisneria spinulosa*. Yan [J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science), 2007 (2): 156-160. (in Chinese))

[48] 赵越,周建中,常剑波,等. 模糊逻辑在物理栖息模拟中的应用[J]. 水科学进展,2013,24(3):427-435. (Zhao Yue,Zhou Jianzhong,Chang Jianbo,et al. Application of fuzzy logic for physical habitat simulation[J]. Advances in Water Science,2013,24(3):427-435. (in Chinese))

[49] Long K E,Schneider L,Connor S E,et al. Human impacts and Anthropocene environmental change at Lake Kutubu,a Ramsar wetland in Papua New Guinea[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2021,118(40):e2022216118.

[50] Loiselle A,Proulx R,Larocque M,et al. Resilience of lake-edge wetlands to water level changes in a southern boreal lake [J]. Wetlands Ecology and Management, 2021,29(6):867-888.

[51] Pal S,Singha P. Linking river flow modification with wetland hydrological instability, habitat condition, and ecological responses [J]. Environmental Science and Pollution Research,2022,30(5):11634-11660.

[52] Liu Yizhen,Liao Ning,Jia Chunyu,et al. Non-additive effects of inundation duration and soil depth on seed banks in a shoreline meadow of Poyang Lake in China [J]. Diversity,2024,16(1):3.

[53] Jin Ling,Wu Qihang,Xie Shijie,et al. Phosphorus stoichiometric homeostasis of submerged macrophytes and associations with interspecific interactions and community stability in Erhai Lake,China[J]. Water Research,2024,256:121575.

[54] Peng Qitong,Huo Bingbing,Yang Hui,et al. Increased invasion of submerged macrophytes makes native species more susceptible to eutrophication in freshwater ecosystems[J]. Science of the Total Environment,2024,909:168658.

(收稿日期:2025-10-17 编辑:王芳)