

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.021

考虑淹水胁迫条件下的汉口江滩芦苇生长动态模拟

刘胜琪,夏军强,周美蓉,石 希

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要:为研究汉口江滩芦苇生长过程与淹没水深和淹没历时的关系,考虑淹没水深和淹没历时对芦苇生长带来的胁迫作用,对现有芦苇生长动态物候模型进行改进,并利用改进后的模型模拟了汉口江滩芦苇在不同淹水胁迫条件下的生长过程。结果表明:汛期汉口江滩芦苇地上生物量因淹水胁迫而急剧减小,淹水胁迫效应不可忽视,且汛期水量越大、持续淹没时间越长,淹水胁迫导致的芦苇地上生物量减小速度越快;淹水胁迫导致汉口江滩芦苇地上生物量的减少值与淹没历时和水深大于2 m的淹没历时之间存在较好的幂函数关系,且水深超过芦苇适宜淹没阈值带来的淹水胁迫作用占主导地位。

关键词:淹水胁迫;物候模型;芦苇生长;生物量;汉口江滩

中图分类号:Q948.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0178-08

Dynamic simulation of *Phragmites australis* growth in Hankou floodplain considering flooding stress//LIU Shengqi, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, SHI Xi (State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To study the relationships between water depth, inundation duration, and the growth process of *Phragmites australis* in Hankou floodplain, the existing growth dynamic phenological model was improved, in which flooding stress effects of water depth and inundation duration on *Phragmites australis* growth were considered. The improved model was applied to simulate the growth process of *Phragmites australis* in the Hankou floodplain under different flooding stress conditions. The results showed that the above-ground biomass of *Phragmites australis* decreased sharply due to flooding stress during the flood season, indicating that the effect of flooding stress should not be ignored; with the increases of the water volume and inundation duration, the above-ground biomass reduction rate of *Phragmites australis* caused by flooding stress increased; there were power function relationships between the above-ground biomass reduction of *Phragmites australis*, the inundation duration, and the duration with water depth greater than 2 m, and the flooding stress caused by water depth exceeding the inundation threshold was dominant.

Key words: flooding stress; phenological model; *Phragmites australis* growth; biomass; Hankou floodplain

芦苇是在湖泊沼泽、河流洲滩、滨海湿地等普遍生长的植物^[1],在净化水质^[2]、调节区域气候^[3]、维持动物栖息地^[4]和湿地生态系统稳定^[5]等方面具有重要的作用和显著的生态效益。长江中下游洲滩众多,芦苇是洲滩上最普遍的植物,因此有必要研究芦苇的生长及其与外界环境之间的关系。

近年来,国内外学者在芦苇的形态结构^[6]、生物量^[7]、生态特征^[8]、碳收支^[9]等方面开展了大量野外观测和室内试验研究,为揭示不同环境条件对芦苇生长的影响打下了基础。这些研究通常需要开

展长期的野外观测和植物采样,耗费大量人力、物力,因此,部分学者提出采用植物生长数学公式或模型计算芦苇的生长动态,如利用生长函数、Logistic方程等拟合植物生长^[10],基于芦苇形态结构与生物量经验关系进行估算^[11],采用遥感解译方法估算地上生物量^[12]等。上述公式或模型依赖大量实测数据,经验性强,且其中的参数取值在不同生长环境下差异较大。植物物候模型是基于植物对环境因子的响应机理而建立的用于模拟植物生长发育的数学方程^[13],Asaeda等^[14]最早构建了考虑呼吸作用、光合

基金项目:国家自然科学基金项目(U2040215,52109098);博士后创新人才支持计划资助项目(BX2021228)

作者简介:刘胜琪(1996—),男,博士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:liusqi@whu.edu.cn

通信作者:夏军强(1974—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:xiajq@whu.edu.cn

作用、自然死亡等物候行为的芦苇生长动态物候模型;Soetaert 等^[15]对该模型进行了改进,成功运用于日本、捷克、澳大利亚等多地湿地芦苇的生长动态计算,在预测芦苇生物量变化方面具有较高的精度。然而植物物候模型仅考虑了温度、光照两个环境因子,大量研究表明湿地挺水植物对水流淹没历时和淹没水深较为敏感^[6,16-17],适宜的淹没环境通过促进芦苇叶片叶绿素的合成,提高光合作用效率,进而促进芦苇的生长^[18]。但过度的淹没会使芦苇对氧气的运输效率大大降低,生长受到抑制,水流没顶还可能造成芦苇的死亡^[19]。芦苇作为河流生态保护和修复中的常见水生植物,通常生长在流量、水位呈季节性变化的河滨带或河流廊道,季节性洪水对芦苇生长造成的影响直接关系到其抵御洪水、截留泥沙、净化水质等生态或水文功能的发挥^[20-21]。因此,在模型中考虑不同淹水胁迫条件对芦苇生长过程的影响,对于河湖及滨海湿地植物应对洪水风险和湿地水位调控等有重要意义。

本文以长江中游武汉段汉口江滩芦苇湿地为研究对象,考虑水流淹没深度和淹没历时对芦苇生长过程的影响,对现有芦苇生长动态物候模型进行了改进,通过模拟汉口江滩芦苇在不同淹水胁迫条件下的生长动态,分析不同的淹水胁迫条件对汉口江滩芦苇生长过程的影响,为汉口江滩芦苇湿地管理和保护提供参考。

1 研究区概况

汉口江滩位于长江中游武汉段左岸,上起武汉关,下至朱家河口,全长约 6 km(图 1)。在平面形态上,汉口江滩自上游向下游由窄变宽,最宽处约为 450 m,占该处河宽的 17%,且滩上植被生长旺盛,滩地植被覆盖密度较大时可能对河段的行洪能力产生影响^[22-23]。历史资料表明,2000 年以前汉口江滩上的芦苇-南荻群落分布面积仅约 0.13 km²,发展至今扩大为约 1.2 km²,这主要得益于 2001—2003 年实施的汉口江滩防洪及环境综合整治工程^[24]。该工程上起武汉客运港,下至武汉长江二桥,全长 3.49 km,总面积为 0.72 km²。吹填平整后的汉口江滩变为大面积地势相对平缓的区域,为芦苇-南荻群落的自然生长和扩张创造了适宜的生境条件^[25]。根据 2022 年实地查勘结果,汉口江滩植被呈明显的带状分布。高程为 19~22 m 的高滩上,芦苇-南荻群落为优势群落,伴生有茭蒿等其他植物;高程为 17~19 m 的临水岸坡上,主要以藨草为优势种群,伴生白茅等植物。汉口江滩 21 m 高程带芦苇长势良好,且植株高度、茎粗等形态特征较为一致,具有



图 1 汉口江滩位置

Fig. 1 Location of Hankou floodplain

代表性。因此将该高程带作为研究区域,选取样方观察芦苇的生长情况,测定芦苇的形态特征和生物量。

水流淹没在植物整个生长周期内(萌发、生长、衰老和死亡全过程)均能发挥胁迫作用,因此淹水胁迫条件(淹没历时和淹没水深)是影响植物生长过程的重要环境因素之一。汉口江滩汛期被洪水淹没,汛后出露,每年淹没时间和水深与上游水库调度方式、当年汛期水量及持续时间密切相关。收集汉口水文站的日均水位资料,统计了 2003—2022 年研究区域每年水流淹没历时,如图 2 所示。2003—2022 年每年平均淹没历时(水位高于 21.0 m)为 64 d,年际变化上淹没历时呈微弱增加的趋势。其中 2006 年为极枯年份,汛期洪水未漫滩,淹没历时为 0 d。2020 年发生特大洪水,淹没历时多达 123 d。可见汉口江滩不同年份的淹没历时和水深有较大差异,淹水胁迫条件的不同可能对汉口江滩芦苇的生长过程产生重要影响。长时间的淹没、过大的水深会抑制芦苇的生长,尤其是当水深超过芦苇植株高度时,芦苇会因缺乏光照和氧气而整株死亡,而未被水流没顶的芦苇大多可以继续存活。

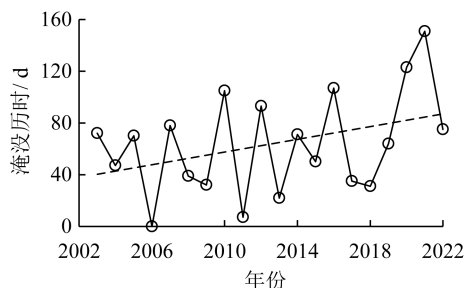


图 2 2003—2022 年汉口江滩 21 m 高程淹没历时

Fig. 2 Inundation duration of Hankou floodplain at 21 m elevation from 2003 to 2022

2 模型建立与验证

2.1 模型框架

现有的芦苇生长动态物候模型仅考虑了温度和光照两个环境要素^[14-15],而已有研究表明水流淹没对芦苇生长过程有重要影响^[6,16-17]。为考虑水流淹没对芦苇生长的影响,对现有模型进行改进,增加了淹水胁迫项,进而建立一个综合考虑光合作用、呼吸作用、淹水胁迫、同化物质转移和自然死亡等过程的芦苇生长动态物候模型。改进后的模型以芦苇生物量、植株高度和茎基直径为基本因变量,模型控制方程为

$$\frac{dB}{dt} = P_h - R - D + M + W \quad (1)$$

$$h_v = 0.2173B_a^{0.3427} \quad (2)$$

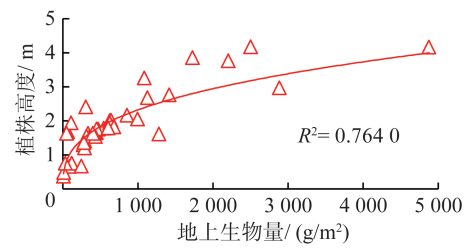
$$d_v = 2.3854B_a^{0.2043} \quad (3)$$

式中: B 为芦苇不同器官(根、茎和叶)单位面积生物量; B_a 为单位面积芦苇的地上生物量(茎和叶的生物量之和); P_h 、 R 、 D 、 M 分别为芦苇不同器官每天因光合作用、呼吸作用、自然死亡、同化物质转移等不同生物过程导致单位面积增加或减少的生物量,相应的计算方法及参数取值详见文献^[14-15],计算中时间步长 Δt 取1 d; W 为芦苇地上部分每天因淹水影响单位面积增加或减少的生物量; h_v 、 d_v 分别为芦苇的植株高度和茎基直径,采用芦苇形态与地上生物量的幂函数关系计算^[26],主要由长江中下游洲滩湿地(汉口江滩、鄱阳湖湿地^[27]、太湖湿地^[28]、南京市龙袍镇江滩湿地和镇江北固山湿地^[29])实测芦苇生长数据得到,如图3所示。

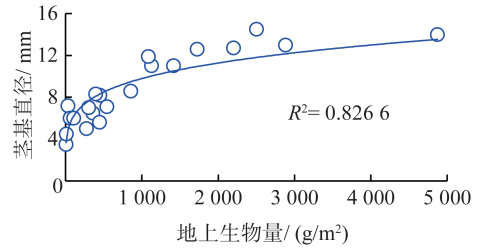
芦苇地上和地下器官在不同生长时期有不同的生物行为^[14-15],本文模型在器官层面把芦苇分为根、茎和叶;在生长期层面划分为生长初期、光合生长期及衰老期3个时期,并根据特殊物候行为的开始和结束确定控制时间点,如芦苇通常于3月中旬开始萌发生长,8月中下旬开始长出花序,10月上旬逐渐衰老和死亡。不同生长期内,同化物质的转移有不同的表现形式,如生长初期同化物质通常由芦苇地下组织补给地上茎叶使其萌发和生长,而光合生长期芦苇地上部分光合同化物质供给地下根茎,使其恢复生物量。此外不同生长期芦苇呼吸、死亡过程的部分参数取值也不尽相同^[14-15]。

2.2 淹水胁迫项的计算

考虑淹水影响时认为淹水胁迫项与淹没历时、淹没水深有关,反映在淹水胁迫因子中。淹水胁迫项与当前芦苇的地上生物量成正比^[14],即当前地上



(a) 植株高度与地上生物量的关系



(b) 茎基直径与地上生物量的关系

图3 长江中下游洲滩芦苇植株高度、茎基直径与地上生物量的关系

Fig.3 Relationships between plant height, stem diameter, and above-ground biomass in *Phragmites australis* in floodplains in middle and lower reaches of the Yangtze River

生物量越大,因淹水影响而增加或减少的生物量 W 就越大。 W 的计算公式为

$$W = \omega w_{h,t} B_a \quad (4)$$

其中

$$w_{h,t} = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ -0.5h^2 + h & 0 < h \leq 2 \text{ m 且 } t \leq 90 \text{ d} \\ -0.5 & h > 2 \text{ m 或 } t > 90 \text{ d} \end{cases}$$

式中: ω 为芦苇在淹水胁迫下的生长速率,由实测数据进行率定; h 为日均淹没水深; t 为一个生长周期内的淹没历时; $w_{h,t}$ 为淹水胁迫因子。

在适宜水深范围内,挺水植物通常通过增加地上部分生物量的比例来适应水深的增加^[18,27,30],而深度过大易导致氧气运输困难和根系腐烂,造成植物的死亡,因此存在芦苇适宜淹没水深阈值,一般取2 m^[19]。此外,长时间的淹没环境不利于芦苇的生长,存在芦苇适宜淹没历时阈值,一般取90 d^[31]。在淹没水深不超过2 m,且淹没历时不超过90 d时,采用抛物线函数计算淹水胁迫因子,以表征淹没对芦苇生长促进作用随水深增加先增大后减小的效应;当淹没水深超过2 m或淹没历时超过90 d时,淹水胁迫因子取值为-0.5,以表征水流淹没导致芦苇快速死亡。

2.3 模型率定和验证

分别采用鄱阳湖国家级自然保护区芦苇湿地^[27]和武汉汉口江滩(采样点位置见图1)实测芦苇生长数据,率定和验证考虑淹水胁迫的芦苇生长

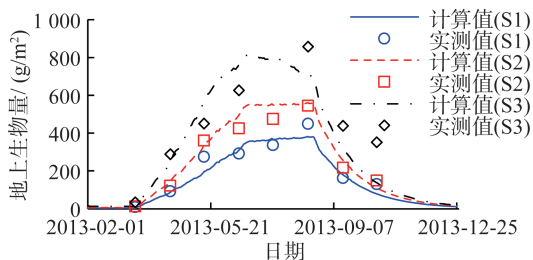
动态物候模型。采样时间、采样点高程和模型计算所需数据来源等信息见表1。模型计算需要输入的数据包括完整生长周期内的日均温度(用以计算 P_h 、 R 、 D 、 W 和 M)、日总辐射量(用以计算 P_h)和日均淹没水深(用以计算 W)。

表1 鄱阳湖湿地和汉口江滩芦苇采样信息

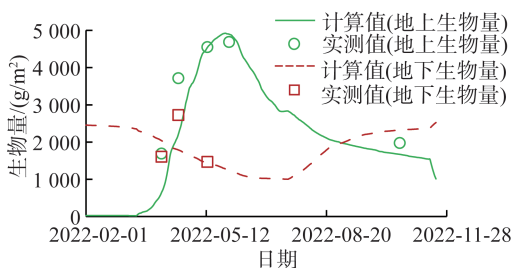
Table 1 Sampling information of *Phragmites australis* in Poyang Lake Wetland and Hankou floodplain

阶段	采样点	采样时间	采样点高程/m	淹没状态	数据来源
率定	鄱阳湖 国家级 自然保护区	2013年 3—10月	16	干旱状态(S1)	吴城水位站 九江气象站
			15	干湿交替状态(S2)	
			14	深淹水状态(S3)	
验证	武汉汉口 江滩	2022年 4—10月	21	周期性淹没	汉口水文站 天河气象站

在模型参数的率定中,当 ω 取值为 $0.001\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 时,鄱阳湖湿地3个高程样方芦苇地上生物量计算值与实测值均较为一致,如图4(a)所示。3个样方地上生物量峰值计算结果的相对误差分别为 -15.05% 、 2.77% 和 -10.87% ,生长期地上生物量变化过程模拟结果的纳什效率系数分别为 0.89 、 0.94 和 0.80 。该采样地点淹没水深较小(1.5m 以下),淹历时较短,在芦苇耐受范围内,深淹水样地中芦苇长势最好,地上生物量最大。在模型验证过程中,对汉口江滩芦苇样方中的地上和地下部分同时进行采样并测定生物量,模型计算的生物量峰值和生长期内变化过程与实际较为符合,如图4(b)



(a) 率定



(b) 验证

图4 模型率定和验证中芦苇生物量计算值与实测值对比
Fig. 4 Comparisons between calculated and measured biomass of *Phragmites australis* in model calibration and validation

所示。地上生物量峰值计算结果的相对误差为 4.60% ,生长期地上生物量变化过程模拟结果的纳什效率系数为 0.75 ,模型具有较好的模拟精度。对于芦苇地下生物量,采样误差(芦苇根茎漏采或混入其他植物的地下组织)可能导致地下生物量计算值与实际有一定差别,但量值上基本对应,大约在 $1500\sim 3000\text{g}/\text{m}^2$ 之间。受到水流淹没影响,自5月中旬后无法进行芦苇地下组织的采样,因此地下生物量实测数据偏少。综上,淹水胁迫项参数取值合理,考虑淹水胁迫的芦苇生长动态模型可以反映不同淹水胁迫条件对芦苇生长的影响。

3 不同淹水胁迫条件下汉口江滩芦苇生长过程模拟

3.1 淹水胁迫项对芦苇生长过程的影响

在原有的芦苇生长动态模型中,认为温度和辐射条件不同是造成芦苇生长过程差异的控制因素。而不同年份的温度和辐射过程往往相差不大,部分研究中忽略了芦苇生长过程在年际上的变化^[14-15]。事实上,对于汉口江滩生长的芦苇,汛期的洪水往往给芦苇的生长造成较大的胁迫作用。为评估在有淹水胁迫项条件下模型对芦苇生长过程模拟结果的差异,分别计算了有无考虑淹水胁迫效应情况下汉口江滩芦苇的生长过程。2020年长江流域发生特大洪水,汉口江滩淹历时为 123d ,最大淹没深度达到 5.64m ,对汉口江滩芦苇的淹水胁迫作用较强,因此将计算时段2020年1—12月作为芦苇完整的生命周期。从两种情况结果对比可知,汉口江滩芦苇被洪水淹没发生于地上生物量达到峰值之后,淹水胁迫主要影响芦苇的衰老和死亡进程,考虑淹水胁迫时地上生物量减小速度显著加快,如图5所示。3—6月芦苇地上茎叶光合能力逐渐增强,地上生物量迅速累积。3月下旬至4月上旬天气转暖,光照充沛,是芦苇的生长旺季;5月中下旬地上生物

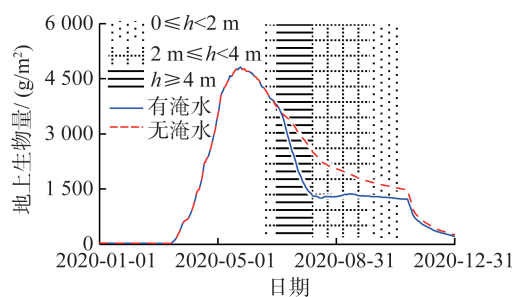


图5 有无淹水胁迫条件下汉口江滩芦苇地上生物量随时间变化

Fig. 5 Variations of above-ground biomass of *Phragmites australis* with or without flooding stress in Hankou floodplain

量增势趋缓达到峰值 $4\ 818\ \text{g}/\text{m}^2$; 6 月下旬汛期洪水上滩, 芦苇开始受到淹水胁迫, 不利的淹没环境使芦苇茎叶凋落, 地上生物量急剧减小, 洪水退去后芦苇地上生物量快速减少至 $1\ 264\ \text{g}/\text{m}^2$ 。模型中有无淹水胁迫条件下汉口江滩芦苇地上生物量的减小过程差异较大, 尤其是洪水没顶芦苇的时期内, 芦苇地上生物量由 $3\ 500\ \text{g}/\text{m}^2$ 锐减至 $1\ 324\ \text{g}/\text{m}^2$, 而不考虑淹水胁迫时仅减小到 $2\ 526\ \text{g}/\text{m}^2$ 。因此淹水胁迫对芦苇生长过程的影响不可忽视, 在芦苇生长过程模拟和生物量计算时应加以考虑。

进一步采用根冠比讨论有无淹水胁迫项时芦苇地上、地下生物量分配的差异。结果表明, 考虑淹水胁迫时根冠比在汛期恢复速度更快, 如图 6 所示。生长初期及光合生长前期, 地下生物量自芦苇萌发逐渐减少, 地上生物量逐渐增加, 根冠比迅速减小, 在 5 月底达到最小值; 而后芦苇将部分光合同化物质转移至根状茎中贮存, 根冠比开始增加。在考虑淹水胁迫时, 自淹水开始至结束, 汉口江滩芦苇根冠比由 0.27 快速增大至 2.60, 而不考虑淹水胁迫时由 0.27 增加至 1.68, 增速显著慢于前者。部分研究得出芦苇根冠比与水深成反比的结论^[27,30], 而在本研究的深淹水条件下, 根冠比随水深的增大而迅速增加。究其原因, 已有研究中芦苇样地淹水水深最大不超过 1.5 m, 且淹没历时较短, 未超过芦苇适宜的淹水阈值, 芦苇通过一定的生长策略适应不同的淹水条件, 即干旱样地中通过发达根系汲取地下养分和水分, 深水样地中通过茎秆增高挺出水面, 增加水上部分的比例来获取光照和氧气。在汉口江滩芦苇样地中, 2020 年洪水产生的最大淹没深度达 5.64 m, 样地淹没水深仅 8 d 就猛增至超过 2 m, 水位变幅过大, 涨水过快, 且淹没历时较长, 远远超出芦苇适宜的淹水阈值, 导致地上生物量骤减, 根冠比迅速增加。

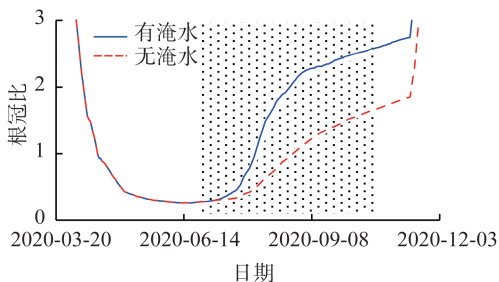


图 6 有无淹水胁迫条件下汉口江滩芦苇根冠比随时间变化
Fig. 6 Variations of root-shoot ratio of *Phragmites australis* with or without flooding stress in Hankou floodplain

3.2 不同淹水胁迫条件对芦苇生长过程的影响

由上述芦苇生长模拟结果可知, 淹水胁迫对汉

口江滩芦苇生长过程的影响不可忽视。而水流淹没历时和淹没深度与汛期水量大小、时间长短及上游水库调度方式密切相关。在淹没历时方面, 枯水年份汛期水流不漫滩或漫滩时间较短, 一般小于 30 d; 中水年份汛期水流漫滩时间为 60 ~ 90 d; 丰水年份汛期水流漫滩时间可持续超过 120 d。2011 年以来三峡水库开展促进产漂流性卵鱼类自然繁殖生态调度试验, 在 5—6 月增大出库流量, 模拟自然涨水过程, 导致汉口江滩淹没开始时间可能提前至 5 月中下旬, 极大地延长了水流漫滩时间, 达到 150 d。在淹没水深方面, 2019 年为中水年份, 最大淹没深度为 3.32 m, 尚未超过芦苇植株最大高度; 而 2020 年发生流域特大洪水, 最大淹没深度达到 5.64 m。

为探究不同淹水胁迫条件对汉口江滩芦苇生长过程的影响, 选取具有不同淹没历时和深度的代表年份进行芦苇生长模拟。2019 年和 2020 年汉口江滩淹没开始时间相近, 但汛期水量和持续时间不同, 分别代表中水年和丰水年。2021 年和 2022 年三峡水库较早开展了生态调度试验, 2021 年汛期偏丰, 2022 年汛期特旱, 分别作为上游水库开展生态调度条件下的丰水年和枯水年。各个年份淹水胁迫条件如表 2 所示, 对比 2019 年和 2020 年的模拟结果, 可分析汛期不同来水量的影响; 对比 2020 年、2021 年和 2022 年的模拟结果, 可分析汛前水库生态调度试验的影响。

表 2 不同年份的淹水胁迫条件

年份	生态调度情况	淹没历时/d	最大淹没水深/m	水深超过 2 m 历时/d
2019	无	63	3.32	17
2020	无	123	5.64	75
2021	有	151	4.04	103
2022	有	75	3.89	45

图 7 为不同淹水胁迫条件下汉口江滩芦苇地上生物量变化过程。从图 7 可以看出, 2019 年汛期芦苇地上生物量减小速度较慢, 而 2020 年汛期地上生物量骤减, 由 $4\ 089\ \text{g}/\text{m}^2$ 减少至 $1\ 264\ \text{g}/\text{m}^2$, 表明在不考虑上游水库生态调度时, 中水年短暂的水流淹没对汉口江滩芦苇生长过程影响不大, 而丰水年淹水胁迫效应显著, 可能会淹死大面积的芦苇。考虑上游水库生态调度试验时, 芦苇地上生物量显著减小的时间提前至 5 月下旬。对于枯水年(2022 年), 汛期结束后芦苇地上生物量与不考虑上游水库生态调度时相当(约 $1\ 400\ \text{g}/\text{m}^2$); 对于丰水年(2021 年), 芦苇淹没历时累计可达 5 ~ 6 月, 汛后芦苇地上生物量仅约为 $1\ 200\ \text{g}/\text{m}^2$, 略低于其他年份。4 个年份芦苇地上生物量峰值基本相同, 是因为温度和

辐射过程在不同年份差异不大,洪水来临前芦苇的生长过程相一致。而汛后生物量差异很大,是因为不同年份淹水历时和深度不同,表明淹水胁迫是汉口江滩芦苇生长过程中的重要环境因素。综上,汉口江滩芦苇地上生物量的减小过程主要受到汛期水量大小、上游水库生态调度开始时间的影响,汛期水量越大、淹没历时越长,汉口江滩芦苇地上生物量减小越快;在丰水年较早开展多次水库生态调度试验,对汉口江滩芦苇的生长会产生最为不利的影响。

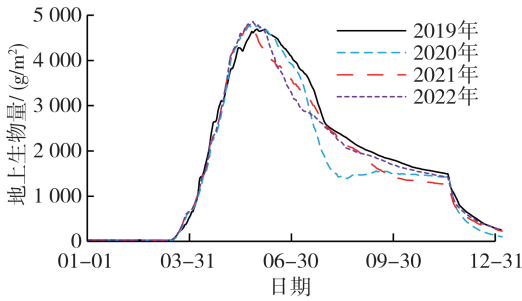


图7 不同淹水胁迫条件下汉口江滩芦苇地上生物量变化过程
Fig. 7 Variations of above-ground biomass of *Phragmites australis* under different flooding stress conditions in Hankou floodplain

如上所述,汛期芦苇地上生物量的减少值很大程度上取决于淹没历时,二者呈正比关系。将4个年份中芦苇自淹水开始至结束的地上生物量减小值(ΔB_a)与各自的淹没历时 t 、淹没水深大于2m的历时(t')进行拟合分析,结果如图8所示。芦苇地上生物量在淹水胁迫下的减少值与 t 和 t' 之间均存在较好的幂函数关系。本文选取的4个年份中,最大淹没水深均超过了模型给定的芦苇适宜淹没水深阈值(2m),因此,淹没历时越长,汉口江滩芦苇的地上生物量减少越多。生物量减小值与淹没水深大于2m历时拟合结果的 R^2 更大,表明水深超过芦苇适宜淹没水深阈值带来的淹水胁迫作用占主导地位。

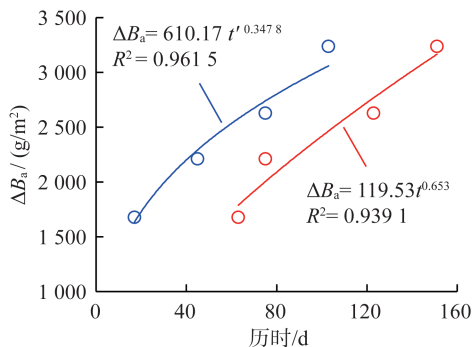


图8 芦苇地上生物量减少与水流淹没历时的关系
Fig. 8 Relationships between above-ground biomass reduction of *Phragmites australis* and inundation duration

根据汉口站水文资料和2019—2022年芦苇生物量的计算结果,2019年、2020年最大淹没水深出现时间分别为7月18日、7月14日,2021年、2022年则分别为5月28日、6月9日,即水库生态调度产生的淹没较早。因此在模型计算结果(图7)中,2019年和2020年芦苇生物量在7—8月减小速度最快,2021年和2022年则在5—6月减小速度最快。从淹水胁迫导致的生物量减小值来看,2021年淹没历时最长,生物量减小值最大;2022年虽然是极枯年份,但由于水库生态调度,芦苇地上生物量仍然存在显著的减少过程。综上,上游水库调度追求防洪、发电、航运、工农业及生态用水等综合效益的不断优化,却提前了汉口江滩芦苇淹水胁迫到来的时间,延长了淹水胁迫过程,对芦苇生物量的积累有负面作用。大洪水上滩后造成芦苇死亡、茎叶腐烂,还可能形成新的水体污染源,造成局部水质变差等问题。而在人工芦苇湿地中,可通过调控湿地年内水位过程,使淹没水深和历时不超过芦苇适宜的阈值,以促进芦苇的生长,发挥其净化水质等生态功能。

4 结 语

本文通过考虑淹水胁迫作用对现有芦苇生长动态物候模型进行改进,采用改进的模型研究汉口江滩芦苇在不同淹水胁迫条件下的生长过程。结果表明,在模型中考虑淹水胁迫项时,汛期汉口江滩芦苇地上生物量显著减小,淹水胁迫效应不可忽视,且汛期水量越大、淹没历时越长,汉口江滩芦苇地上生物量减小越快。淹水胁迫导致汉口江滩芦苇地上生物量的减少值与淹没历时、水深大于2m的淹没历时之间均存在较好的幂函数关系,其中水深超过芦苇适宜淹没阈值带来的淹水胁迫作用占主导地位。

参考文献:

[1] SANTAMARÍA L. Why are most aquatic plants widely distributed? dispersal, clonal growth and small-scale heterogeneity in a stressful environment [J]. *Acta Oecologica-International Journal of Ecology*, 2002, 23 (3):137-154.
 [2] STOTTMEISTER U, WIEBNER A, KUSCHK P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment [J]. *Biotechnology Advances*, 2003, 22 (1/2):93-117.
 [3] KAYRANLI B, SCHOLZ M, MUSTAFA A, et al. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review [J]. *Wetlands*, 2010, 30(1):111-124.
 [4] LI Bo, LIAO Chengzhang, ZHANG Xiaodong, et al.

- Spartina alterniflora* invasions in the Yangtze River Estuary, China: an overview of current status and ecosystem effects [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35 (4):511-520.
- [5] BILKOVIC D M, MITCHELL M M. Ecological tradeoffs of stabilized salt marshes as a shoreline protection strategy: effects of artificial structures on macrobenthic assemblages [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61 :469-481.
- [6] VRETARE V, WEISNER S E B, STRAND J A, et al. Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* as a functional response to water depth [J]. *Aquatic Botany*, 2001, 69(2/3/4) :127-145.
- [7] ASAEDA T, MANATUNGE J, ROBERTS J, et al. Seasonal dynamics of resource translocation between the above ground organs and age-specific rhizome segments of *Phragmites australis* [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 57(1/2) :9-18.
- [8] 陈向全, 何彤慧, 周楠, 等. 不同水位梯度下引种芦苇生长特征变化研究 [J]. *农业科学研究*, 2020, 41(4) :36-39. (CHEN Xiangquan, HE Tonghui, ZHOU Nan, et al. Study on growth characteristics of introduced reed under different water level gradient [J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 41(4) :36-39. (in Chinese))
- [9] WHITAKER K, ROGERS K, SAINTILAN N, et al. Vegetation persistence and carbon storage: implications for environmental water management for *Phragmites australis* [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51 (7) : 5284-5300.
- [10] 曹秋玉. 北固山湿地芦苇和藨草种群的生长规律及其生态功能的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2006.
- [11] 郗敏, 孔范龙, 冯小敏, 等. 胶州湾湿地芦苇地上部分生长动态及其生物量估算经验公式 [J]. *湿地科学*, 2016, 14(6) :816-824. (XI Min, KONG Fanlong, FENG Xiaomin, et al. Growth dynamics and empirical formula for biomass evaluation of above ground part of *Phragmites australis* in Jiaozhou Bay Wetlands [J]. *Wetland Science*, 2016, 14(6) :816-824. (in Chinese))
- [12] 田艳林, 刘贤赵, 毛德华, 等. 基于 MODIS 数据的松嫩平原西部芦苇湿地地上生物量遥感估算 [J]. *生态学报*, 2016, 36 (24) : 8071-8080. (TIAN Yanlin, LIU Xianzhao, MAO Dehua, et al. Remote sensing estimation of the above ground biomass of reed wetland in the Western Songnen Plain, China, based on MODIS data [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (24) : 8071-8080. (in Chinese))
- [13] 刘慧, 白音包力皋. 植被物候模型研究进展 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46 (1) : 23-29. (LIU Hui, Baiyinbaoligao. Overview on the research of vegetation phenological model [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2018, 46(1) :23-29. (in Chinese))
- [14] ASAEDA T, KARUNARATNE S. Dynamic modeling of the growth of *Phragmites australis*: model description [J]. *Aquatic Botany*, 2000, 67(4) :301-318.
- [15] SOETAERT K, HOFFMANN M, MEIRE P, et al. Modeling growth and carbon allocation in two reed beds (*Phragmites australis*) in the Scheldt estuary [J]. *Aquatic Botany*, 2004, 79(3) :211-234.
- [16] 方源, 谢培, 谭林, 等. 生境对挺水植物生长的影响及其反馈作用机制综述 [J]. *生态学杂志*, 2021, 40(8) : 2610-2619. (FANG Yuan, XIE Pei, TAN Lin, et al. A review of the influence of habitat on emergent macrophyte growth and its feedback mechanism [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(8) :2610-2619. (in Chinese))
- [17] COOPS H, VAN DEN BRINK F W B, VAN DER VELDE G. Growth and morphological responses of four helophyte species in an experimental water-depth gradient [J]. *Aquatic Botany*, 1996, 54(1) :11-24.
- [18] 邓春暖, 章光新, 潘响亮. 莫莫格湿地芦苇生理生态特征对水深梯度的响应 [J]. *生态科学*, 2012, 31(4) : 352-356. (DENG Chunnuan, ZHANG Guangxin, PAN Xiangliang. Eco-physiological responses of *Phragmites australis* to different water depth in Momoge Wetland [J]. *Ecological Science*, 2012, 31 (4) : 352-356. (in Chinese))
- [19] WEISNER S E B, STRAND J A. Rhizome architecture in *Phragmites australis* in relation to water depth: implications for within-plant oxygen transport distances [J]. *Folia Geobotanica*, 1996, 31 : 91-97.
- [20] 吴宸晖, 鞠茂森. 河流生态修复的国际经验及对长江大保护的启示 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(3) :136-144. (WU Chenhui, JU Maosen. International experience of river ecological restoration and its enlightenment to the Yangtze River protection [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3) :136-144. (in Chinese))
- [21] 侯利军, 杨善印, 陈达, 等. 长江下游段岸线保护范围界定研究 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(6) :18-24. (HOU Lijun, YANG Shanyin, CHEN Da, et al. Study on definition of shoreline protection scope for the lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2022, 50(6) :18-24. (in Chinese))
- [22] HU Yong, LI Dongfeng, DENG Jinyun, et al. Mechanisms controlling water-level variations in the middle Yangtze River following the operation of the Three Gorges Dam [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(10) :e2022WR032338.
- [23] 王玲玲, 姜兆宇, 韩建军, 等. 长江浦口段江滩复绿对河道行洪能力的影响 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49 (4) : 316-321. (WANG Lingling, JIANG Zhaoyu, HAN Jianjun, et al. Influence of environmental remediation project on the discharge capacity of the Pukou

- section of the Yangtze River [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(4):316-321. (in Chinese))
- [24] 杨桦. 武汉市汉口江滩防洪及环境综合整治工程[J]. 中国水利,2006,(12):48. (YANG Hua. Flood control and environmental comprehensive treatment project of Hankou floodplain in Wuhan City [J]. China Water Resources,2006,(12):48. (in Chinese))
- [25] 熊海滨,孙昭华,陈立,等. 水文与岸滩变化对滨岸带南荻-芦苇群落适宜生境的影响:以长江武汉河段为例[J]. 湖泊科学,2022,34(4):1250-1261. (XIONG Haibin, SUN Zhaohua, CHEN Li, et al. Influence of hydrological and morphological changes on the habitats of *Miscanthus lutarioriparius* and *Phragmites australis* in a river flood plain: a case study of Wuhan reach of the Yangtze River [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34 (4):1250-1261. (in Chinese))
- [26] MUDD S M, FAGHERAZZI S, MORRIS J T, et al. Flow, sedimentation, and biomass production on a vegetated salt marsh in South Carolina: toward a predictive model of marsh morphologic and ecologic evolution [M]// FAGHERAZZI S, MARANI M, BLUM L K. The Ecogeomorphology of Tidal Marshes. Washington: American Geophysical Union,2004,165-188.
- [27] 许秀丽,张奇,李云良,等. 鄱阳湖洲滩芦苇种群特征及其与淹水深度和地下水埋深的关系[J]. 湿地科学,2014,12(6):714-722. (XU Xiuli, ZHANG Qi, LI Yunliang, et al. Reed population features and relationships between feature indicators and flooding depth, groundwater depth in an islet in Poyang Lake [J]. Wetland Science,2014,12(6):714-722. (in Chinese))
- [28] 刘秋华,吴永波,薛建辉. 收割对芦苇生物量及氮磷储量的影响[J]. 安徽农业大学学报,2013,40(5):809-814. (LIU Qiuhua, WU Yongbo, XUE Jianhui. Effects of cutting on biomass and nitrogen and phosphorus storage of reeds[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2013,40(5):809-814. (in Chinese))
- [29] 曹昀. 江滩湿地植物恢复的影响因子与技术研究[D]. 南京:南京师范大学,2007.
- [30] 王丹,张银龙,庞博,等. 苏州太湖湿地芦苇生物量与水深的动态特征研究[J]. 环境污染与防治,2010,32(7):49-54. (WANG Dan, ZHANG Yinlong, PANG Bo, et al. Study on dynamic characteristics between the biomass of *Phragmites communis* and water depth at Taihu wetland in Suzhou [J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(7):49-54. (in Chinese))
- [31] 韩祯,王世岩,刘晓波,等. 基于淹水时长梯度的鄱阳湖优势湿地植被生态阈值[J]. 水利学报,2019,50(2):252-262. (HAN Zhen, WANG Shiyan, LIU Xiaobo, et al. Ecological thresholds for the dominated wetland plants of Poyang Lake along the gradient of flooding duration [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(2):252-262. (in Chinese))

(收稿日期:2023-02-09 编辑:施业)

(上接第169页)

- [59] 张玲玲,王宗志,李晓惠,等. 总量控制约束下区域用水结构调控策略及动态模拟[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(1):90-96. (ZHANG Lingling, WANG Zongzhi, LI Xiaohui, et al. Study on regional water utilization structure controlling strategy and dynamic simulation within the gross volume constraints [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(1):90-96. (in Chinese))
- [60] 吴丹,吴凤平. 基于双层优化模型的流域初始二维水权耦合配置[J]. 中国人口·资源与环境,2012,22(10):26-34. (WU Dan, WU Fengping. The coupling allocation of initial two-dimensional water rights in basin based on the bi-hierarchy optimal model [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(10):26-34. (in Chinese))
- [61] 吴丹,向筱茜. 基于双层诊断准则的京津冀水资源与产业结构优化适配方法[J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(4):154-163. (WU Dan, XIANG Xiaoqian. Optimal adaptation method of water resources and industrial structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on bi-level diagnosis criteria [J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(4):154-163. (in Chinese))
- [62] 张丽娜,吴凤平,张陈俊,等. 流域水资源消耗结构与产业结构高级化适配性研究[J]. 系统工程理论与实践,2020,40(11):3009-3018. (ZHANG Li'na, WU Fengping, ZHANG Chenjun, et al. The adaptability of basin water resources consumption structure and optimization of industrial structure [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2020, 40(11):3009-3018. (in Chinese))
- [63] 刘慧,李景保,李艺璇,等. 湖南长江经济带产业结构与水资源利用耦合协调机制研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2020,43(2):1-8. (LIU Hui, LI Jingbao, LI Yixuan, et al. Study on the coupling coordination mechanism between industrial structure and water resources utilization in Hunan Yangtze River Economic Zone [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2020, 43(2):1-8. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-23 编辑:熊水斌)