

长期水淹条件下香根草 (*Vetiveria zizanioides*)、菖蒲 (*Acorus calamus*) 和空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 的存活及生长响应

王海锋, 曾 波*, 乔 普, 李 娅, 罗芳丽, 叶小齐

(西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 西南大学重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 西南大学生命科学学院, 重庆 400715)

摘要: 人工构建三峡库区消落区植被是控制消落区水土流失、保护消落区生态环境的重要措施, 选择能够耐受长时间完全水淹的植物物种是该措施实施的关键。为了验证香根草、菖蒲、空心莲子草能否用于消落区植被的构建, 实验模拟消落区的长期完全水淹条件, 设置 30d、60d、90d、120d、150d 和 180d 等 6 个完全水淹时间水平, 研究了 3 种植物在完全水淹条件下生长、生物量积累及存活状况。结果发现: (1) 3 种植物在经受长时间的完全水淹后有较高的存活率, 180d 全淹处理后, 香根草、菖蒲和空心莲子草的存活率分别为 87.5%、100% 和 50%。(2) 这 3 种植物有不同的水下生长能力。全淹条件下, 香根草生长缓慢, 几乎没有产生新的叶片, 总叶长也没有显著变化; 菖蒲能够持续产生较对照植株更为细长的叶片, 空心莲子草只在水淹初期 (30d 内) 能够快速伸长地上部分的枝条, 并迅速产生新叶片, 但随水淹时间的延长, 总枝条长及总叶片数没有再显著增加。(3) 与对照植株相比, 全淹处理抑制了 3 种植物总生物量的增加, 但对 3 种植物的地上、地下部分生物量抑制程度不同。全淹条件下, 香根草的地上部分和地下部分生物量与水淹 0d 水平 (水淹处理开始前一天, 下同) 相比无显著变化, 根冠比高于对照植株; 菖蒲的地上部分生物量随水淹时间延长而降低, 但却高于对照植株, 地下部分生物量始终低于水淹 0d 水平, 根冠比低于对照植株; 空心莲子草的地上部分生物量与水淹 0d 水平相比无显著差异, 但地下部分生物量与水淹 0d 水平相比大幅降低, 根冠比低于对照植株。结果表明, 这 3 种植物都有很强的水淹耐受能力, 可应用于三峡库区消落区植被的构建。同时, 发现植物对长期完全水淹的耐受能力很大程度上与植株在水下的生长情况及植株的营养储备水平相关, 剧烈的水下生长会消耗大量的营养储备, 进而造成植株存活率降低。植株在全淹条件下有限的生长能力及丰富的营养储备可能是耐淹物种的重要特征。

关键词: 香根草; 菖蒲; 空心莲子草; 三峡库区; 长期水淹; 生长; 存活

文章编号: 1000-0933(2008)06-2571-10 中图分类号: Q142, Q948.1 文献标识码: A

Survival and growth response of *Vetiveria zizanioides*, *Acorus calamus* and *Alternanthera philoxeroides* to long-term submergence

WANG Hai-Feng, ZENG Bo*, QIAO Pu, LI Ya, LUO Fang-Li, YE Xiao-Qi

Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30440035, 30500041, 30770406); 国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-06-0773); 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAC10B01); 重庆市科技攻关资助项目 (CSTC2007AB7049); 中国科学院西部行动计划资助项目 (KZCX2-XB2-07)

收稿日期: 2007-10-18; **修订日期:** 2008-03-26

作者简介: 王海锋 (1982 ~), 男, 河南卫辉人, 硕士生, 主要从事植物生态学研究. E-mail: whaifeng@swu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bzeng@swu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30440035, 30500041, 30770406); Program for New Century Excellent Talents in University of China (No. NCET-06-0773); The National Key Technology R&D Program of China (No. 2006BAC10B01); Chongqing key Technology R&D Program (No. CSTC2007AB7049); Western China Action Programme of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-XB2-07)

Received date: 2007-10-18; **Accepted date:** 2008-03-26

Biography: WANG Hai-Feng, Master candidate, mainly engaged in plant ecology. E-mail: whaifeng@swu.edu.cn

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2571 ~ 2580.

Abstract: In order to control soil erosion and maintain the eco-environmental quality in the water-level-fluctuation-zone in Three Gorges Reservoir, riparian vegetating is an important measure among all possibilities. For riparian vegetating, selection of appropriate plant species adapted to long-term submergence is crucial. To confirm whether *Vetiveria zizanioides*, *Acorus calamus*, and *Alternanthera philoxeroides* are suitable plant species for riparian vegetating, a flooding simulation experiment was conducted and the growth, biomass accumulation and survival of the three species subjected to 30d, 60d, 90d, 120d, 150d, and 180d full submergence were investigated. It was found that: (1) The three plant species showed high tolerance to full submergence, 87.5%, 100% and 50% of all submerged plants of *V. zizanioides*, *A. calamus* and *A. philoxeroides* after 180d submergence survived, respectively. (2) The three plant species possessed different underwater growth ability. *V. zizanioides* grew slowly, the length and number of total leaves did not change significantly. *A. calamus* kept producing narrower and longer leaf blades as compared with those of control plants. *A. philoxeroides* grew vigorously, shoots elongated notably and new leaves formed quickly in less than 30d, however, the length of total shoots and the number of total leaves did not increase significantly after any longer duration. (3) Submergence inhibited the biomass accumulation of three plant species significantly, but the change of aboveground biomass and belowground biomass differed among the three plant species. The aboveground biomass and belowground biomass of *V. zizanioides* did not change significantly during its submergence duration, but the root/shoot ratio was slightly higher than that of control plants. The aboveground biomass of submerged *A. calamus* plants decreased with the duration of submergence, but it was higher than that of control plants, the belowground biomass of *A. calamus* decreased significantly with the duration of submergence, and their root/shoot ratio was lower than that of control plants. The aboveground biomass of *A. philoxeroides* did not change significantly when it was submerged in water, but the belowground biomass decreased greatly with the duration of submergence, and the root/shoot ratio was lower than that of control plants. The results demonstrated that these three plant species were submergence-tolerant and could be applied in riparian vegetating of water-level-fluctuation zone in Three Gorge Reservoir. Meanwhile, our results also suggested that the survival and thus tolerance of these three species to submergence was associated with their performance of underwater growth. Intensive underwater growth may have consumed more nutrient storage and decreased the availability of energy for maintenance, which is crucial for survival. Limited underwater growth ability and sufficient carbohydrate reserve may be important factors for selecting long-term submergence-tolerant species.

Key Words: *Vetiveria zizanioides*; *Acorus calamus*; *Alternanthera philoxeroides*; Three Gorges Reservoir Region; long-term submergence; growth; survival

三峡水库建成后,根据其运行调度方案,将形成最大 30m(145 ~ 175m)的水位落差,在库区内形成面积高达 350km²的水位季节性涨落的消落区,该区域交替性地处于被水淹没及出水暴露的状态。与未成库之前的河流消落区相比,三峡库区消落区最大的特点之一就是水淹时间的延长,有些地段水淹可持续长达 6 个月,使消落区内很多原有植物物种难以存活,造成消落区内原有植被的退化,这对三峡库区内的景观质量、水土保持及环境保护等方面都造成了潜在的威胁^[1, 2]。采取在消落区内人工构建植被,是保护三峡库区消落区生态环境的重要措施之一,选择合适的水淹耐受能力强的植物物种是该措施实施的关键^[3]。

香根草是一种根系特别发达的多年生草本,有很强的水土固持能力,对铅、镉等重金属也有很强的耐受能力,在道路、河岸的边坡防护及重金属尾矿的生物修复工程中有广泛应用^[4, 5],对库区消落区内大坡度河岸的固土护坡可能会有重要作用。菖蒲是自然生长于溪流等水生环境中的多年生草本植物,外型美观,有香味,在水体富营养化及重金属污染的生态修复中有广泛应用,如果能够种植于库区消落区内,对改善库区景观质量和净化水质是有利的^[6]。空心莲子草在现在已形成的库区消落区内已有分布,对库区水位涨落已有一定的适应能力,有可能能够适应成库后更长时间水淹的环境而存活。

以往的研究已经表明香根草、菖蒲和空心莲子草都能在水淹环境中很好地生长,有较强的水淹耐受能力^[7~9],但能否耐受三峡水库成库后的长时间完全水淹,是否有可能成为构建三峡库区消落区植被的植物物种还有待进一步验证。本文对香根草、菖蒲和空心莲子草在完全水淹条件下生长、生物量积累及存活状况进行研究。拟回答以下问题:

(1)香根草、菖蒲及空心莲子草对完全水淹的耐受能力如何?是否能够耐受三峡水库成库后的长时间完全水淹条件?

(2)3个物种能否在完全水淹环境下进行生长?其生长是否与非水淹条件下植株的生长有差异?

1 材料及方法

1.1 实验材料

香根草(*Vetiveria zizanioides*),多年生草本,禾本科岩兰草属。菖蒲(*Acorus calamus*),天南星科菖蒲属。空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*),又名喜旱莲子草,多年生宿根性草本,苋科莲子草属。

1.2 实验设计

本实验在西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室实验基地内进行,2006年4~5月采集香根草、菖蒲和空心莲子草当年生的、生长旺盛且大小均匀一致的分蘖苗,移栽到花盆中,选用腐殖质土和壤土(按1:4的比例混合均匀)作为栽培基质。对实验植株给予全日照,并进行浇水、除草等常规管理。

2006年7月初开始进行实验,实验设置两个处理:对照及完全水淹,完全水淹处理包括30、60、90、120、150d和180d等6个水淹时间水平。各物种选取长势基本一致的植株,随机分为对照组和全淹组。对照组植株放置于实验基地旷地中,进行浇水、除草等常规田间管理。全淹组植株放置于注满水的高2.5m的水池中,进行完全水淹处理,香根草、菖蒲及空心莲子草因植株高度不同,植株顶端分别距水面约为1、1.5、2m,实验期间所有植株均处于被完全淹没的状态。实验处理共持续6个月,至2007年1月结束。

水淹处理开始前一天(水淹0d),各物种随机选取14株植株,测定其生长指标后(具体测定指标见后),洗净,在80℃下烘72h至恒重,测定植株地上及地下部分干重。

在连续完全水淹30、60、90、120、150d和180d后,从全淹处理和对照植株中分别随机选取16株(菖蒲为14株),其中6株在洗净后,测定植株的地下部分及地上部分的干重,另外10株(菖蒲为8株)用于生长及存活分析,测定其生长指标后(具体测定指标见后),放置于实验基地旷地中,进行常规田间管理,观察其存活情况。如果植株能产生新的叶片或枝条等组织则认为该植株是存活的,2006年11月~2007年1月出水的植株,由于季节原因不再产生新的组织,在2007年春天如果植株能够继续产生新的叶片或枝条等组织,则认为该植株也是可以存活的。

1.3 生长指标的测定

香根草 实验处理开始前一天(即水淹0d时),测定植株的叶片数及每一片叶子的叶长(此刻香根草地上部分的茎秆结构不明显,无法区分茎、叶鞘和叶片,地上部分可认为全部由叶片组成,从地面到叶片顶端的长度记为该叶片的叶长)。水淹处理结束后,测定总叶片数、总叶长和水淹期间新产生的叶片数,并计算新叶片数在现存总叶片数中所占的比例。

菖蒲 菖蒲的地上部分全部由叶片构成,水淹0d,测定植株的叶片数及每一片叶子的叶长(从土壤表面到叶片顶端的长度)、叶宽(叶片最宽处的宽度)。水淹处理结束后,测定总叶数、所有叶片的叶长、叶宽和水淹期间新产生的叶片数,并计算新叶数在现存总叶数中所占的比例。

空心莲子草 水淹0d,测定植株各级枝条的总长度(包括从根茎产生的分蘖及由节处长出的各次级分枝)、总枝条数及总叶片数。水淹处理结束后,测定总枝条长、总枝条数、总叶数和水淹期间新生的叶片数、新产生的节间长,并计算新叶数在现存总叶数中所占的比例。

由于全淹处理植株的部分组织会在水中枯死掉落,无法搜集,所以,本文中所有植株的生物量及生长指标的测定仅为现存的有功能的绿色组织部分。

1.4 数据分析

用统计分析软件 SPSS11.5 进行实验数据的处理和分析。全淹处理对香根草、菖蒲和空心莲子草生长、生物量的影响采用单因素方差分析完成(one-way ANOVA)。用 Duncan 多重比较(Duncan's multiple range test)来判断不同水淹时间水平之间植株生长、生物量的差异显著性,用独立样本 t 测试(Independent t -test)检验同一水淹时间处理下全淹处理植株与对照植株之间生长、生物量的差异。文中的图表由 Microsoft Excel 及 Origin7.5 软件制作完成。

2 结果

2.1 存活率

菖蒲对完全水淹有很强的耐受能力,从 30d 一直到 180d 的全淹处理后,存活率始终都保持为 100% (表 1)。香根草对完全水淹也有很好的耐受能力,在经历 150d 的全淹处理后可以全部存活,在 180d 的全淹处理后,香根草植株的存活率仍高达 87.5% (表 1)。空心莲子草对完全水淹的耐受能力则稍差,在 90d 及 120d 的全淹处理后,出水的 10 株中均有 1 株死亡,150d 的全淹处理后,存活率下降为 60%,到 180d 的全淹处理后,存活率为 50% (表 1)。

表 1 香根草、菖蒲及空心莲子草在不同持续时间完全水淹条件下的存活率

Table 1 The survival of *Vetiveria zizanioides*, *Acorus calamus* and *Alternanthera philoxeroides* subjected to water submergence of different durations

植被 Vegetation	存活率 Survival (%)					
	30d	60d	90d	120d	150d	180d
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	100	100	100	100	100	87.5
菖蒲 <i>Acorus calamus</i>	100	100	100	100	100	100
空心莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	100	100	90	90	60	50

2.2 地上部分的生长

在全淹条件下,香根草的地上部分生长受到了强烈的抑制,植株的叶片数量和总叶长显著低于未受水淹的对照植株($p < 0.01$) (图 1)。在整个水淹处理过程中,香根草几乎没有产生新的叶片,新叶比例一直维持在很低的水平(图 2),总叶长也没有显著变化,总叶片数和总叶长与水淹 0d (即水淹处理开始前)相比无显著差异(图 1)。

在全淹情况下,菖蒲能够持续产生新的叶片,老叶片不断枯死凋落(图 1, 图 2)。在水淹过程中,全淹处理植株的总叶长呈先上升后下降的趋势,且整体高于未受水淹的对照植株,叶片数也呈现先上升后下降的趋势(图 1)。同时,全淹处理菖蒲植株的成熟、全展叶片(叶长 $> 30\text{cm}$)的长宽比显著高于对照植株(图 3),叶片显得更为细长。

全淹条件下空心莲子草地上部分枝条的伸长生长加剧。在全淹 30d 时,植株总枝条长已显著高于未受水淹的对照植株($p < 0.01$),这可能是由于植株在水下新产生的节间长显著高于对照植株(图 3),使得空心莲子草的枝条能够更快地伸长。从淹没 30d 到 150d,全淹处理植株的总枝条长一直维持在较高水平,直到淹没 180d 后才有所降低(图 1)。在水淹环境中,空心莲子草在水淹开始前产生的叶片很快凋落,并能迅速产生新的叶片(图 2)。但是,与对照植株相比,全淹处理的空心莲子草植株产生的枝条数量相对较少,由于水淹导致部分枝条死亡,总枝条数还低于水淹处理刚开始时的数量水平(图 1)。

2.3 植株的生物量

在全淹条件下,香根草的地上、地下部分生物量均显著低于未受水淹的对照植株($p < 0.01$)。在水淹处理过程中,香根草的地上部分生物量与水淹 0d 相比有一定程度的降低,但随着水淹时间的延长一直没有太大的变化。而香根草的地下部分生物量在整个水淹处理过程中都与水淹 0d 水平无显著差异($p = 0.14$) (图 4)。与对照植株相比,全淹处理对香根草地上部分生物量积累的抑制作用更为显著,全淹处理植株的根冠比总体

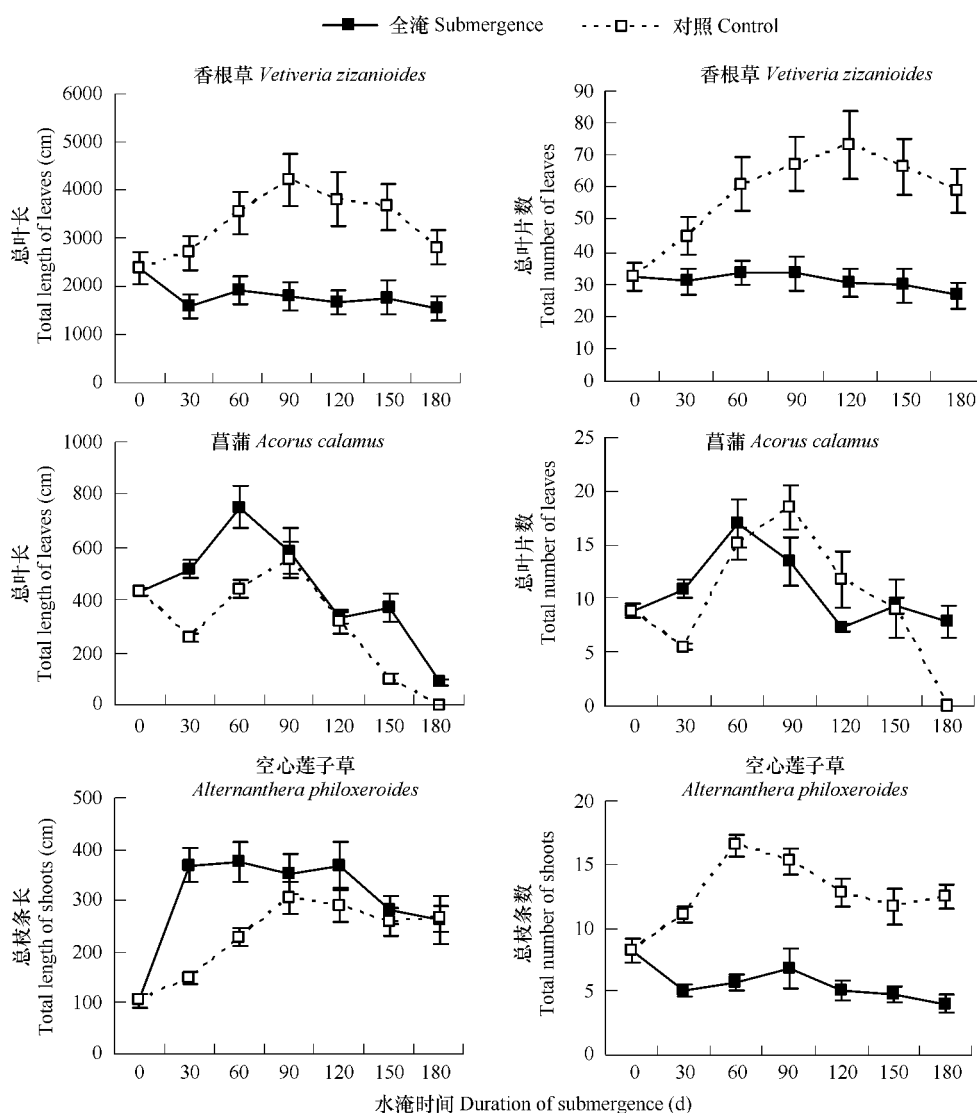


图1 不同水淹时间处理下香根草、菖蒲和空心莲子草地上部分的生长

Fig. 1 Aboveground growth (mean $\pm$ SE) of *Vetiveria zizanioides*, *Acorus calamus*, and *Alternanthera philoxeroides* subjected to water submergence of different durations

高于对照植株(图5)。

菖蒲在经全淹处理后,地上部分生物量随水淹时间延长而降低,但整体高于对照植株,地下部分生物量却显著低于未受水淹的对照植株($p < 0.01$)。在整个水淹处理过程中,地下部分生物量始终显著低于水淹0d水平(图4)。完全淹没30d后,菖蒲的地下部分生物量与水淹0d水平相比显著降低,是水淹0d水平的67.95%,但从淹没30d到淹没180d,地下部分生物量没有显著变化,淹没180d后,植株地下部分的生物量是水淹0d水平的51.78%。全淹处理下菖蒲植株的根冠比显著低于对照植株(图5)。

在全淹条件下,空心莲子草的地上和地下部分生物量均显著低于未受水淹的对照植株($p < 0.01$)。在整个水淹处理过程中,空心莲子草的地上部分生物量与水淹0d相比无显著差异,但地下部分生物量始终显著低于水淹0d水平,且随水淹时间的延长而不断降低(图4)。淹没30d后,植株地下部分生物量是水淹0d水平的42.88%,淹没180d后,植株的地下部分生物量下降为水淹0d水平的26.02%,显著低于全淹30d后植株的地下部分生物量。全淹处理植株的根冠比也低于对照植株(图5)。

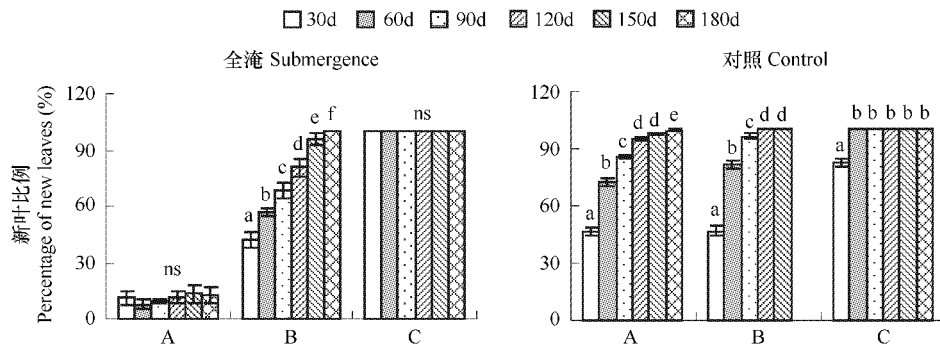


图2 不同水淹时间处理下香根草、菖蒲及空心莲子草新叶所占比例(±标准误)

Fig. 2 Percentage (mean ± SE) of new leaves of *Vetiveria zizanioides*, *Acorus calamus*, and *Alternanthera philoxeroides* subjected to water submergence of different durations

A: 香根草 *Vetiveria zizanioides*; B: 菖蒲 *Acorus calamus*; C: 空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides* 对于各个物种在对照及全淹处理的不同水淹时间水平, 标有不同字母的处理之间有显著差异(显著性水平 $p = 0.05$) For each species subjected to water submergence of different durations, means with different letters are significantly different ($p = 0.05$)

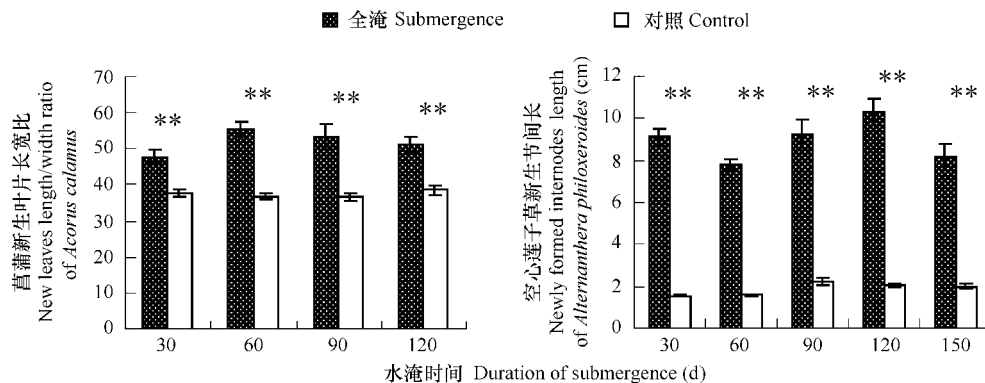


图3 不同水淹时间水平下菖蒲新生叶片长宽比及空心莲子草顶端节间长(±标准误)

Fig. 3 The new leaves length/width ratio (mean ± SE) of *Acorus calamus* and newly formed internodes length (mean ± SE) of *Alternanthera philoxeroides* subjected to water submergence of different durations (* * $p < 0.01$)

3 讨论

存活率是判断植物水淹耐受能力的重要指标,也是判断植物在河岸带可能的分布范围的重要标准^[10~12]。van Eck 等对荷兰境内莱茵河河岸带植物的研究发现,植物在河岸带能够分布的最低水位线与植物在完全水淹处理下的存活率存在相关关系,即在完全水淹处理下,存活率低的植物物种只能分布在距江面相对较高的海拔地段,而存活率高的植物,则可以分布在距江面更近的低海拔地段^[11]。这可能是由于河岸带不同海拔的地段在汛期遭受的水淹强度不同造成的,只有当植物物种能够耐受低海拔地段的水淹环境时,才可能在该地段存活^[12]。在三峡水库建成后,消落区内低海拔地段的水淹可持续长达6个月,而本实验证实,香根草、菖蒲和空心莲子草在长达180d的全淹处理后存活率分别为87.5%、100%和50%,有很强的水淹耐受能力,有可能也能够耐受库区消落区内低海拔地段的水淹环境而存活。

完全水淹条件下,植物遭受的最大胁迫是氧气供应减少,使得植物从有氧呼吸转向无氧呼吸,碳水化合物利用效率降低,加剧体内营养物质的消耗^[10]。同时,水体中光照和二氧化碳不足,植物的光合生产严重受阻^[13,14]。由此,在植物遭受长期完全水淹后,造成植株体内营养储备减少,生物量降低^[15,16]。为了缓解水淹对植株造成的伤害,不同的耐淹植物能够采取不同的策略(tactic)来适应水淹环境,有的植物可以加速枝条和叶片的伸长生长,以快速“逃离”水淹逆境^[13,17,18],而有的植物则减缓生长,降低能量消耗,依赖大量的营养储

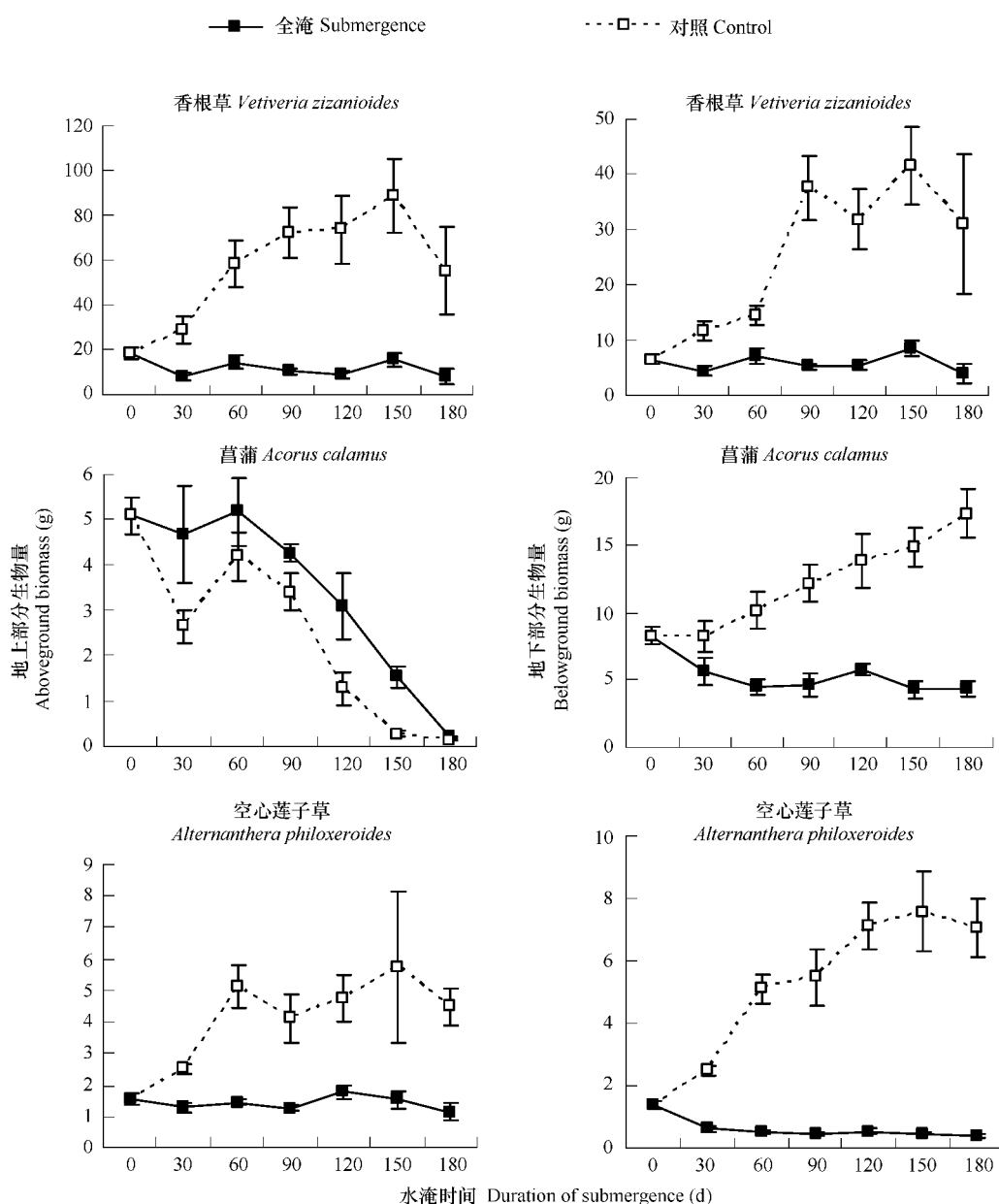


图4 不同水淹时间处理下香根草、菖蒲及空心莲子草的生物量变化($\pm$ 标准误)

Fig.4 The biomass (mean $\pm$ SE) of *Vetiveria zizanioides*, *Acorus calamus* and *Alternanthera philoxeroides* subjected to water submergence of different durations

备耐受长时间的水淹^[17,19,20]。本研究发现,全淹处理导致3种植物的总生物量显著低于对照植株,但3种植物的水下生长及各部分生物量的变化有不同表现。香根草在全淹环境下生长“停滞”,地上、地下部分的生物量与水淹0d水平相比无显著变化。菖蒲能够在水下持续产生新的更为细长的叶片,空心莲子草在水下的伸长生长加剧,它们的地下部分生物量与水淹0d水平相比都显著降低,这可能是由于其地上部分的生长消耗了更多的营养储备造成的。植物在水下不同的生长表现及生物量变化反映了植物对完全水淹不同的耐受机制^[19]。在水淹环境中,香根草生长“停滞”可以保存更多的营养物质以提供更长时间的能量供应,维持植株存活;菖蒲产生的新的细长的叶片、空心莲子草伸长的枝条和快速产生的新叶片都是植物对水淹环境积极的适应性响应,对于植物缓解水下缺氧及低光照的环境,甚至是“逃离”水淹逆境都是有利的^[21,22]。

植物在水下地上部分的伸长生长是植物“逃离”水淹逆境的重要机制,但是,在植株无法“逃”出水面时,

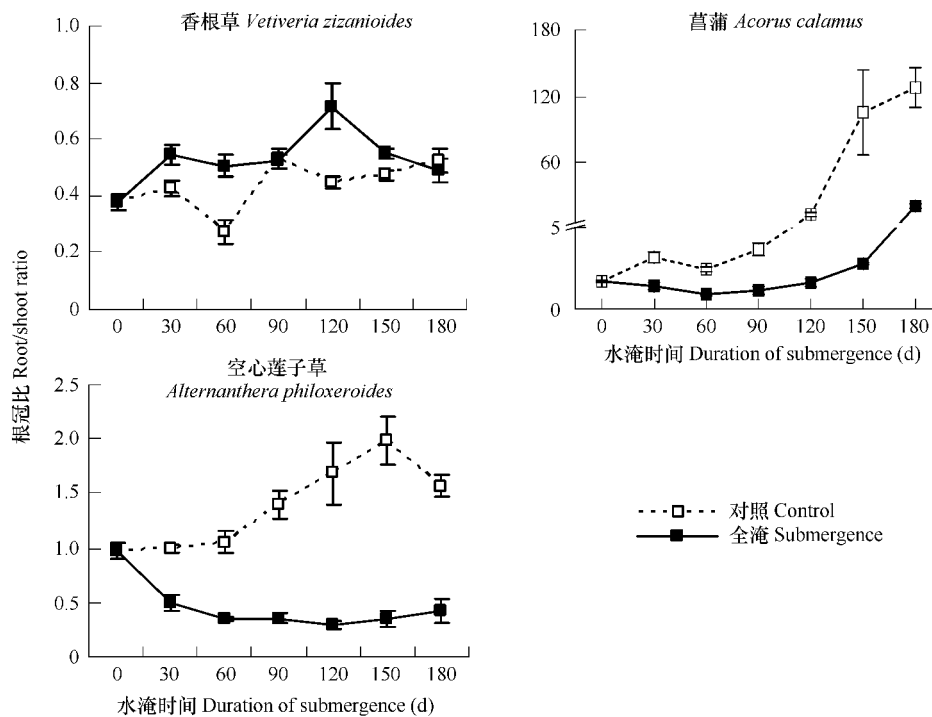


图5 不同水淹时间处理下香根草、菖蒲及空心莲子草的根冠比 ($\pm$ 标准误)

Fig. 5 The root/shoot ratio (mean $\pm$ SE) of *Vetiveria zizanioides*, *Acorus calamus* and *Alternanthera philoxeroides* subjected to water submergence of different durations

可能会因为消耗了更多的营养储备而对植株的存活造成不利影响^[13,17]。全淹条件下,能量的持续稳定供应对维持植物生存非常重要^[23],植物在全淹环境下的剧烈生长会消耗大量的营养物质,导致植物无法产生足够的能量以维持生存,从而造成植株存活率的降低^[24~26]。已有研究表明,不同基因型的水稻幼苗在遭受完全水淹后的存活率与其在水下的枝条伸长能力呈显著负相关^[25,26]。本研究发现,香根草在淹没的环境中,地上部分生长“停滞”,各部分生物量与水淹0d相比无显著变化,而空心莲子草在水下伸长生长加剧,消耗了大量的营养物质,导致其营养储备器官(地下部分的根茎)生物量的降低。香根草在经受长时间的完全水淹处理后的存活率高于空心莲子草,这证明了在不同的植物物种之间,其水下的生长与存活率之间也存在负相关关系。菖蒲虽然也可以在水下进行生长,但是,其水下生长不如空心莲子草剧烈,地下部分生物量降低的幅度也小于空心莲子草,且菖蒲的根茎较大,能储备更多的营养物质,水淹0d的地下部分生物量大大高于空心莲子草,虽然菖蒲在水下的生长也会消耗很多营养物质,其地下部分生物量也有显著的降低,但可能由于菖蒲有丰富的营养储备能够提供足够的能量供应,还不至于造成植株的死亡。可见,除了植物在水下的生长会影响存活率,植株的营养储备水平对判断植物对长期完全水淹的耐受能力可能也是非常关键的^[21, 25, 27]。

通过3种植物在长期完全水淹条件下的存活及生长分析得知,菖蒲、香根草及空心莲子草都有很强的水淹耐受能力,有可能用于三峡库区消落区植被构建。同时,也为进一步挑选合适的耐淹物种提供了一些有启示性的指标,在全淹条件下较低的生长能力及植株较高的营养储备水平可能是植物能耐受长期完全水淹的重要特征。另外,本实验中的实验材料空心莲子草是入侵物种,一些国家在恢复河岸带植被中积累的经验告诉人们选用外来种可能会造成负面效应^[28],所以,是否选用空心莲子草,它会对河岸带植被产生什么样的影响是值得关注的。

References:

- [1] Dai F X, Xu W N, Chen F Q. Pondering over falling zone ecosystem of sanxia reservoir and its ecological rehabilitation. Soil and Water

- Conservation in China, 2006, 12: 6—8.
- [2] Bai B W, Wang H Y, Li X Y, *et al.* A comparative study of the plant community of the future water-level-fluctuation zone and the natural water-level-fluctuation zone in the Three-Gorges Reservoir. *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science)*, 2005, 27(5): 684—691.
- [3] Wang Y, Liu Y F, Liu S B, *et al.* Vegetation reconstruction in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, 22(5): 513—522.
- [4] Xia H P, Ao H X, Liu S Z. Studies on benefits of the vetiver eco-engineering for protection of highway slope. *Pratacultural Science*, 2002, 19(1): 52—56.
- [5] Yang B, Lan C Y, Shu W S. Growth and heavy metal accumulation of *Vetiveria zizanioides* grown on lead/zinc mine tailings. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 45—50.
- [6] Zhou S B, Wang C J, Yang H J, *et al.* Stress responses and bioaccumulation of heavy metals by *Zizania latifolia* and *Acorus calamus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 0281—0287.
- [7] Liu J X, Wang M M. Influence of waterlogging stress on the growth and photosynthesis of *Vetiveria zizanioides*. *Pratacultural Science*, 2005, 22(7): 71—73.
- [8] Yang D W. Research on the Adaptability of submerged macrophytes used by ecological riverbank in qinhuai river. *Environmental Science and Management*, 2006, 31(9): 154—156.
- [9] Tao Y, Chen S F, Jiang M X. Morphological adaptation of *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb to the change of water. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(5): 454—459.
- [10] Gibbs J, Greenway H. Mechanisms of anoxia tolerance in plants I. Growth, survival and anaerobic catabolism. *Functional Plant Biology*, 2003, 30: 1—47.
- [11] van Eck W H J M, van de Steeg H M, Blom C W P M, *et al.* Is tolerance to summer flooding correlated with distribution patterns in river floodplains? A comparative study of 20 terrestrial grassland species. *Oikos*, 2004, 107: 393—405.
- [12] Vervuren P J A, Blom C W P M, de Kroon H, *et al.* Extreme flooding events on the Rhine and the survival and distribution of riparian plants species. *Journal of Ecology*, 2003, 91: 135—146.
- [13] Voisenek L A C J, Clomer T D, Pierik R, *et al.* How plants cope with complete submergence. *New Phytologist*, 2006, 170(2): 213—226.
- [14] Mommer L, Visser E J W. Underwater photosynthesis in flooded terrestrial plants: a matter of leaf plasticity. *Annals of Botany*, 2005, 96: 581—589.
- [15] Setter T L, Ellis M, Laureles E V, *et al.* Physiology and genetics of submergence tolerance in rice. *Annals of Botany*, 1997, 79(Supplement A): 67—77.
- [16] Panda D, Sharma S G, Sarkar R K. Chlorophyll fluorescence parameters, CO₂ photosynthetic rate and regeneration capacity as a result of complete submergence and subsequent re-emergence in rice (*Oryza sativa* L.). *Aquatic Botany*, 2008, 88(2): 127—133.
- [17] Voisenek L A C J, Rijnders J H G M, Peeters A J M, *et al.* Plant hormones regulate fast shoot elongation under water: from genes to communities. *Ecology*, 2003, 85(1): 16—27.
- [18] Groeneveld H W, Voisenek L A C J. Submergence-induced petiole elongation in *Rumex palustris* is controlled by developmental stage and storage compounds. *Plant and Soil*, 2003, 253: 115—123.
- [19] He J B, Rijnders J H G M, van de Steeg H M, *et al.* Survival tactics of *Ranunculus* species in river floodplains. *Oecologia*, 1999, 118: 1—8.
- [20] Luo F L, Zeng B, Chen T, *et al.* Response to simulated flooding of photosynthesis and growth of riparian plant *Salix Variegata* in the Three Gorges reservoir region of China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2007, 31(5): 910—918.
- [21] Laan P, Blom C W P M. Growth and survival responses of *Rumex* species to flooded and submerged conditions; The importance of shoot elongation, underwater photosynthesis and reserve carbohydrates. *Journal of Experimental Botany*, 1990, 228(41): 775—783.
- [22] Kende H, van deer Knaap E, Cho H T. Deep water rice: A model plant to study stem elongation. *Plant Physiology*, 1998, 118: 1105—1110.
- [23] Ishizawa K, Murakami S, Kawakami Y, *et al.* Growth and energy status of arrowhead tubers, pondweed turions and rice seedlings under anoxic conditions. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22: 505—514.
- [24] Setter T L, Laureles E V. The beneficial effect of reduced elongation growth on submergence tolerance of rice. *Journal of Experimental Botany*,

1996, 47: 1551—1559.

- [25] Das K K, Sarkar R K, Ismail A M. Elongation ability and non-structural carbohydrate levels in relation to submergence tolerance in rice. *Plant Science*, 2005, 168: 131—136
- [26] Singh H B, Singh B B, Ram P C. Submergence tolerance of rainfed lowland rice: search for physiological marker traits. *Journal of Plant Physiology*, 2001, 158: 883—889.
- [27] Lynn D E, Waldren S. Survival of *Ranunculus repens* L. (Creeping Buttercup) in an amphibious habitat. *Annals of Botany*, 2003, 91: 75—84.
- [28] Ashley A W, Wayne D E. A practical scientific approach to riparian vegetation rehabilitation in Australia. *Journal of Environmental Management*, 2003, 68: 329—341.

参考文献:

- [1] 戴方喜, 许文年, 陈芳清. 对三峡水库消落区生态系统与其生态修复的思考. *中国水土保持*, 2006, 12: 6~8.
- [2] 白宝伟, 王海洋, 李先源, 等. 三峡库区淹没区与自然消落区现存植被的比较. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2005, 27(5): 684~691.
- [3] 王勇, 刘义飞, 刘松柏, 等. 三峡库区消涨带植被重建. *植物学通报*, 2005, 22(5): 513~522.
- [4] 夏汉平, 敖惠修, 刘世忠. 香根草生态工程应用于公路护坡的效益研究. *草业科学*, 2002, 19(1): 52~56.
- [5] 杨兵, 蓝崇钰, 束文圣. 香根草在铅锌尾矿上生长及其对重金属的吸收. *生态学报*, 2005, 25(1): 45~50.
- [6] 周守标, 王春景, 杨海军, 等. 菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及其富集能力. *生态学报*, 2007, 27(1): 0281~0287.
- [7] 刘金祥, 王铭铭. 淹水胁迫对香根草生长及光合生理的影响. *草业科学*, 2005, 22(7): 71~73.
- [8] 严德武. 外秦淮河生态护坡挺水植物适应性试验研究. *环境科学与管理*, 2006, 31(9): 154~156.
- [9] 陶勇, 陈少凤, 江明喜. 空心莲子草对水分变化的形态适应研究. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(5): 454~459.
- [20] 罗芳丽, 曾波, 陈婷, 等. 三峡库区岸生植物秋华柳(*Salix variegata* Franch)对水淹的光合和生长响应. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 910~918.