

三峡水库消落区4种一年生植物种子的水淹耐受性及水淹对其种子萌发的影响

申建红 曾波* 类淑桐 苏晓磊 黄文军

三峡库区生态环境教育部重点实验室, 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 稗(*Echinochloa crusgalli*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)、合萌(*Aeschynomene indica*)和水蓼(*Polygonum hydropiper*)是三峡水库消落区常见的4种一年生植物。该研究旨在验证这4种植物的种子能否耐受三峡水库消落区的水淹环境及种子在消落区变化的环境中能否成功地萌发。将消落区按照吴淞高程标准划分为9个高程梯度(145–150 m、150–155 m、155–160 m、160–163 m、163–166 m、166–169 m、169–172 m、172–175 m和>175 m), 实地播种这4种植物的种子(或果实), 并将种子萌发划分为“有泥沙淤积于种子表面”和“无泥沙淤积于种子表面”2组。观察在消落区水位变化(蓄水到退水)一个周期内种子能否耐受水淹及水淹对不同高程种子萌发的影响。结果发现: (1)稗、苍耳、合萌和水蓼的成熟种子(或果实)能够耐受三峡水库消落区的水淹环境并保持活力。(2)这4种一年生植物种子的萌发起始时间和萌发持续时间都随着高程的降低而逐渐缩短($p < 0.01$); 高程169 m以下, 种子萌发的起始时间显著缩短($p < 0.01$)。总体来看, 在同一高程区域内, 合萌种子的萌发起始时间略长一些, 苍耳次之, 水蓼最短。(3)对稗、苍耳和水蓼的种子而言, 萌发率随高程的降低总体上呈现先上升后下降的趋势。合萌的种子萌发率随高程的降低总体呈下降的趋势。(4)水淹过程中产生的泥沙淤积对种子萌发影响较小, 但是在一定程度上可以促进苍耳的种子萌发而抑制合萌的种子萌发。以上试验结果表明: 这4种一年生植物的种子(或果实)在三峡水库消落区变化环境中能够耐受水淹并成功地萌发, 可应用于三峡水库消落区的植被恢复和生态重建中。

关键词 合萌, 稗, 水蓼, 植被恢复, 种子萌发, 水淹, 耐受, 苍耳

Seed submergence tolerance of four annual species growing in the water-level-fluctuation zone of Three Gorges Reservoir, China, and effects of long-term submergence on their seed germination

SHEN Jian-Hong, ZENG Bo*, LEI Shu-Tong, SU Xiao-Lei, and HUANG Wen-Jun

Key Laboratory of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region of 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

Abstract

Aims Our objective was to examine seeds of *Echinochloa crusgalli*, *Xanthium sibiricum*, *Aeschynomene indica* and *Polygonum hydropiper*, four common annual species growing in the water-level-fluctuation zone of Three Gorges Reservoir in China, in regard to tolerance of submergence and germination in the changing environment of the zone.

Methods We divided the water-level-fluctuation zone into nine elevational zones according to the Wusong Elevation criterion. We then observed seed submergence tolerance and the effects of submergence on seed germination in a “water impoundment-water recession” cycle after seeds of the four species were sown in the nine elevational zones. Seed germination was divided into seeds with and without sand sediment on surface.

Important findings Ripe seeds (or fruits) of the four species kept their vitality after submergence. The starting time for seed germination after the end of submergence and seed germination duration both gradually decreased with decreasing elevation ($p < 0.01$), and the starting time for seed germination was significantly reduced below 169 m ($p < 0.01$). Overall, within the same elevational zone, the starting time for seed germination after the end of submergence was longest for *A. indica*, followed by *X. sibiricum*, and shortest for *P. hydropiper*. For *E. crusgalli*, *X. sibiricum* and *P. hydropiper*, seed germination percentage first increased and then decreased with decreasing elevation, while it decreased for *A. indica*. Sand sedimentation had little effect on seed germination; the effect was

positive for *X. sibiricum* and negative for *A. indica*. We concluded that seeds (or fruits) of the four annuals can tolerate submergence and germinate successfully in the changing environment of water-level-fluctuation zone. Therefore, these species are useful in the revegetation and restoration of this zone of the Three Gorges Reservoir.

Key words *Aeschynomene indica*, *Echinochloa crusgalli*, *Polygonum hydropiper*, revegetation, seed germination, submergence, tolerance, *Xanthium sibiricum*

根据三峡水库“蓄清排浑”的调度方案, 水库水位保持规律性涨落: 每年6–9月汛期, 维持低水位运行; 9月下旬水库开始蓄水, 水位逐步升高至175 m; 12月至次年4月, 维持在较高水位; 5月开始进一步降低水库水位, 5月末至6月初水位降至防洪限制水位145 m。由于水库水位周期性地涨落, 水库两岸将形成两条平行的垂直落差达30 m的季节性水位消落区, 即三峡水库消落区。随着三峡水库全面试验性蓄水, 消落区的生态环境问题变得尤为突出, 消落区原有的陆生植物在冬水夏陆、长时间反复水淹的情况下大多难以存活, 消落区植被退化和减少, 导致消落区生态功能及景观质量下降。在此情况下, 三峡水库消落区的植被恢复及生态系统重建工作就变得非常重要。采用人工构建植被的方法对其退化的植被生态系统进行生态修复, 不仅能大范围地改善库区景观, 而且还有利于库区水环境的改善。

在这一过程中, 能够适应消落区环境条件的一年生和多年生植物都可以选用。然而, 目前对三峡水库消落区适生植物的研究主要以筛选耐水淹的多年生植物为主, 对一年生植物的研究较少(李连发等, 2010; 王欣和高贤明, 2010)。并且, 已有的研究多是通过室内盆栽模拟水淹试验筛选出一些耐水淹植物种(李娅等, 2008; 王海锋等, 2008a, 2008b), 在实际消落区条件下进行的植物耐水淹试验目前还未见报道。要将现有研究筛选的植物物种应用到三峡水库消落区的植被恢复和重建中, 还需要对它们在实际消落区条件下进行反复试验、科学评估和长期监测。因此, 有学者提出, 根据三峡水库消落区水位涨落节律与自然消落区相反(即消落区在夏季成陆后正好与当地的水热同期)的特点, 利用一些种子成熟期与水位消落期一致的植物, 在水位消落后, 这些植物的种子可以迅速萌发、生长并覆盖水库消落区, 从而实现消落区的植被恢复与重建(王勇等, 2005)。

自2003年三峡水库开始蓄水以来, 我们对三峡

水库消落区进行实地考察发现, 消落区内生长的一年生植物稗(*Echinochloa crusgalli*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)、合萌(*Aeschynomene indica*)和水蓼(*Polygonum hydropiper*), 在消落区退水之后的一些平缓的区域大面积分布, 并成为该地段的优势种。这些一年生植被群落有两种可能的来源: 一种是消落区高程以上的植株产生的种子在退水之后, 由于雨水冲击等因素进入消落区而萌发长成的; 另一种是消落区原有一年生植物产生的种子经水淹后第二年萌发长成的。我们经过连续几年的野外观察发现: 稗、苍耳、合萌和水蓼的种子成熟期与消落区的水位涨落基本一致, 这就说明, 消落区存在的一年生植被群落有可能为第二种来源, 即这4种一年生植物的种子不仅能耐受三峡水库消落区的长时间水淹, 而且在退水后可以正常地萌发和生长。为此, 开展了对三峡水库消落区生长的一年生植物稗、苍耳、合萌和水蓼种子的水淹耐受性及水淹对其种子萌发的影响研究, 以回答两个主要问题: (1) 这4种一年生植物的种子是否能够耐受三峡水库消落区的水淹? (2) 退水之后, 这4种一年生植物的种子是否能成功地萌发, 从而为消落区的植被形成做出贡献?

1 材料和方法

1.1 研究地概况

研究样地位于重庆市忠县(107°30′–108°14′ E, 30°03′–30°35′ N)涂井乡三峡水库消落区。该样地具有典型的三峡水库消落区生境特点。忠县地处重庆市中部、三峡库区腹地, 属亚热带东南季风气候, 年平均气温18.2 °C, 年平均降水量1 200 mm, 空气相对湿度80%, 无霜期341天(王祥荣和蒋勇, 2006)。图1为2008–2009年试验区水位及气温的变化情况, 试验区2008–2009年蓄水最高水位为173.54 m, 退水最低水位为145.26 m, 水位信息来自重庆水文水资源信息网(<http://www.cqhwr.com/>), 气象数据来自忠县气象局。表1显示的是2008年三峡水库

蓄水后消落区忠县段不同高程的水淹状况。

1.2 研究植物及种子来源

本试验研究植物为稗、苍耳、合萌和水蓼。其种子采自忠县涂井乡三峡水库消落区。这4种植物的种子并非在消落区的每个高程都能采到,所以我们在全部145–175 m高程之间采集所需的种子,这个高程内每种植物的种子成熟时间差别不大。在采集种子时,对种子的成熟度进行了甄别。成熟度依据种子或果实的颜色来判断:稗的果序变黄、种子开始脱落为成熟,合萌的荚果颜色变黑为成熟,水蓼的果序变黑、种子开始脱落为成熟,苍耳瘦果外包被的总苞颜色变黑代表完全成熟。种子分别采自多个植株个体,然后将4种植物的种子分别充分混合。本试验结合2008年水库蓄水的调度方案及不同植物种子成熟的实际情况,对种子的采集时间进行了调整。在三峡水库蓄水开始前(2008年9月28日),消落区内合萌的种子已经发育成熟,因此在消落区各个高程播种的合萌种子均为成熟的种子。而蓄水开始前,稗、苍耳和水蓼的种子并未完全成熟,因此我们在145–155 m高程播种的种子为没有完全成熟的种子;水库蓄水至155 m后暂停了15天(图1;表1),在这段时间内,稗、苍耳和水蓼的种子已全部发育成熟,因此我们在155 m高程以上播种的种子均

为完全成熟的种子。

1.3 试验设计

1.3.1 种子水淹耐受性

三峡水库不同高程的消落区的水淹深度和水淹时间是不同的。由于相对位置的差异,在均被水淹没时,高高程区域比低高程区域水淹深度小。同理,高高程区域比低高程区域遭受水淹晚,并且更早露出水面,因此高高程区域比低高程区域被水淹没的时间短。根据吴淞高程标准,本试验设计了9个高程梯度:145–150 m、150–155 m、155–160 m、160–163 m、163–166 m、166–169 m、169–172 m、172–175 m、>175 m。在不同高程播埋种子,研究种子的水淹耐受性。种子播埋时间视水位上涨情况而定,即当水位即将上涨到某高程时对该高程进行播埋种子。为了避免消落区土壤种子库中所保留的种子对试验的干扰,种子萌发所需土壤均取自每个高程区域地表20 cm以下的深层土。将采挖的深层土置于塑料盆(内径25 cm,高18 cm)内,在每个塑料盆内播种种子100粒,种子直接播种于土壤表面,每种植物在每一高程区域内播种10盆。将塑料盆半埋于土壤中,防止塑料盆在水淹过程中遗失。本试验中不同高程播种的种子水淹天数与三峡水库消落区忠县段不同高程水淹天数一致(表1)。

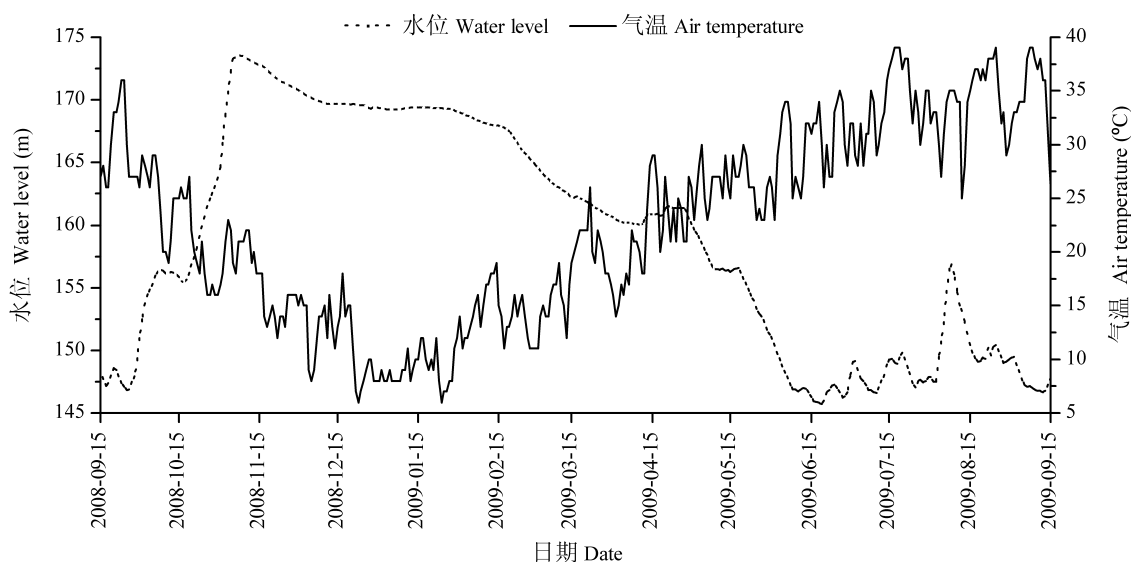


图1 2008年9月15日到2009年9月15日三峡水库忠县段水位及气温的变化。

Fig. 1 Variation of water level and air temperature at Zhongxian County section of Three Gorges Reservoir between September 15th, 2008 and September 15th, 2009.

表1 2008年三峡水库蓄水后消落区忠县段不同高程的水淹日期、出水日期和水淹天数**Table 1** Water impoundment date, water recession date and submergence duration of different elevations in water-level-fluctuation zone at Zhongxian County section after tentative water impoundment of Three Gorges Reservoir in 2008

高程 Elevation (m)	145–150	150–155	155–160	160–163	163–166	166–169	169–172	172–175	>175
水淹日期 Water impoundment date	2008-09-28	2008-09-30	2008-10-05	2008-10-24	2008-10-29	2008-11-01	2008-11-03	2008-11-05	–
出水日期 Water recession date	2009-06-19	2009-06-01	2009-05-21	2009-04-30	2009-03-10	2009-02-24	2009-01-31	2008-11-20	–
水淹天数 Submergence duration (d)	245–270	228–245	189–228	133–189	116–133	91–116	17–91	0–17	0

–, 未经历水淹。

–, this elevation did not experience submergence.

1.3.2 泥沙淤积对种子萌发的影响

在三峡水库蓄水期间, 消落区某些区段可能会发生泥沙淤积现象。为了搞清所播种种子的表面是否有泥沙淤积, 以及泥沙淤积是否会造成种子萌发的差别, 我们将145–175 m高程间每个高程区域内的种子萌发试验设计成两组不同的处理(每组5盆): 一组将塑料盆内装满土, 盆上覆盖致密的白布, 泥沙无法淤积在播种种子的表面; 另一组塑料盆内的表土离盆沿约有5 cm高度, 盆上覆盖纱网(孔径0.45 mm), 泥沙可以淤积在播种种子表面。盆上覆盖的白布和纱网同时可以阻挡外来种子进入花盆中。高程>175 m的区域由于未受水淹, 种子萌发试验一组为种子直接播种于塑料盆内的土壤表面, 另一组则用厚度5 cm的河沙覆盖于塑料盆内种子表面来模拟泥沙淤积的状况。

1.4 种子萌发特征

种子露出水面后即进行种子萌发试验, 将覆盖于塑料盆表面的白布及纱网去掉, 为了保证种子顺利萌发, 对种子定期浇水, 保持盆中土壤湿润, 气温与消落区忠县段自然条件保持一致(图1), 观察种子的萌发特征。试验过程中, 还记录了各高程每一盆种子露出水面的日期和种子最先开始萌发的日期。>175 m高程的种子露出水面的日期用其种子播种日期来代替。

本试验中, 种子萌发时间特征用种子萌发的起日日期、种子萌发的起始时间及种子萌发的持续时间来说明。其中, 种子萌发的起日日期为所有塑料盆中的种子最先开始萌发的日期。种子萌发的起始时间为每一盆内种子露出水面日期与种子最先开始萌发的日期之间所隔的天数。种子萌发的持续时间为每一盆内种子最先开始萌发的日期到种子停止萌发日期所需的天数。

种子开始萌发后, 每周观察并记录一次种子的萌发数量, 连续4周没有种子萌发即终止试验。由于145–155 m高程播种的稗、苍耳和水蓼种子为没有完全成熟的种子, 其种子萌发率是指不同成熟阶段种子中的可萌发数; 而对于其他的成熟种子来说, 种子萌发率为萌发种子数占受试种子数的百分比。

1.5 数据分析

用SPSS 13.0统计软件进行数据处理与分析。水淹对不同高程各物种种子萌发的影响用单因素方差分析(One-way ANOVA)完成。进行方差分析前, 先对数据进行方差齐性检验, 如方差不齐, 则需进行数据转化, 如数据转换后方差仍然不齐, 则采用非参数检验(nonparametric test)和多个独立样本检验(K independent samples)进行分析。同一高程区域的种子萌发起始时间和种子萌发持续时间采用独立样本 t 检验(independent samples t -test)来分析。用Duncan多重比较(Duncan's multiple range test)检验各个物种不同水淹高程间的差异。

2 研究结果

2.1 种子萌发时间特征

2.1.1 种子萌发起动日期

总体上, 高高程的水蓼种子萌发起动日期早, 其种子萌发起动日期随着高程的降低逐渐延后(表2)。稗、苍耳和合萌的种子萌发起动日期在163 m高程以上出现波动, 如: 稗在163–169 m的种子萌发起动日期接近于>175 m高程的种子; 苍耳在163–169 m的种子萌发起动日期甚至早于172–175 m和>175 m的种子; 合萌在163–169 m的种子萌发起动日期早于169 m高程以上的种子(表2)。

在高程>175 m时, 稗无泥沙淤积的种子萌发起动日期比有泥沙淤积的提前了20天, 苍耳无泥沙淤

表2 不同高程稗、苍耳、合萌和水蓼的种子萌发起动日期

Table 2 The starting date for seed germination of *Echinochloa crusgalli*, *Xanthium sibiricum*, *Aeschynomene indica* and *Polygonum hydropiper* at different elevations

高程 Elevation (m)	种子出水日期 Water recession date	稗 <i>E. crusgalli</i>		苍耳 <i>X. sibiricum</i>		合萌 <i>A. indica</i>		水蓼 <i>P. hydropiper</i>	
		WT	YT	WT	YT	WT	YT	WT	YT
>175	2008-11-06	2009-03-10	2009-03-30	2009-03-28	2009-03-25	2009-04-01	—	2008-12-29	—
172–175	2008-11-12	2009-03-03	2009-03-02	2009-03-19	2009-03-20	2009-04-11	2009-04-11	2008-12-31	2008-12-31
169–172	2008-12-02	2009-02-25	2009-02-25	2009-03-04	2009-03-02	2009-04-04	2009-04-02	2009-01-06	2009-01-06
166–169	2009-02-20	2009-03-11	2009-03-11	2009-03-18	2009-03-18	2009-03-24	2009-03-26	2009-03-06	2009-03-06
163–166	2009-03-01	2009-03-14	2009-03-15	2009-03-14	2009-03-14	2009-03-28	2009-04-01	2009-03-11	2009-03-11
160–163	2009-03-28	2009-04-10	2009-04-14	2009-04-06	2009-04-11	2009-04-25	2009-04-26	2009-04-04	2009-04-04
155–160	2009-05-01	2009-05-08	2009-05-07	2009-05-04	2009-05-05	2009-05-15	2009-05-15	2009-05-08	2009-05-08
150–155	2009-05-29	2009-06-08	2009-06-06	2009-06-02	2009-06-04	2009-06-09	2009-06-08	2009-06-08	2009-06-04
145–150	2009-06-06	2009-06-13	2009-06-13	2009-06-17	2009-06-16	2009-06-13	2009-06-15	2009-06-15	2009-06-13

WT, 无泥沙淤积种子萌发起动日期; YT, 有泥沙淤积种子萌发起动日期。—, 种子未萌发。

WT, the starting date for seed germination without sand sediment on surface (year-month-day); YT, the starting date for seed germination with sand sediment on surface (year-month-day). —, seeds did not germinate.

积的种子萌发起动日期比有泥沙淤积的推迟了3天(表2), 合萌和水蓼有泥沙淤积的种子没有萌发。在145–175 m高程之间, 这4种植物无泥沙淤积的种子萌发起动日期与有泥沙淤积的种子萌发起动日期相差很小(表2)。

2.1.2 种子萌发起始时间及持续时间

稗、苍耳、合萌和水蓼无论是在有泥沙或无泥沙淤积于种子表面的条件下, 种子萌发的起始时间都随着高程的降低而逐渐缩短($p < 0.01$) (图2)。高程在169 m以上, 种子萌发的起始时间较长, 高程在169 m以下, 种子萌发的起始时间大大缩短, 显著低于169 m以上的种子萌发起始时间($p < 0.01$) (图2)。在169 m高程以上, 稗的种子萌发起始时间为85天以上, 苍耳为90天以上, 合萌为120天以上, 水蓼为35天以上; 高程169 m以下, 稗的种子萌发起始时间为6–19天, 苍耳为3–26天, 合萌为7–32天, 水蓼为5–14天。另外, 这4种植物的种子萌发持续时间无论是在有泥沙或无泥沙淤积于种子表面的条件下都随着高程的降低而逐渐缩短($p < 0.01$) (图2)。

总体上, 在同一高程区域内, 合萌种子的萌发起始时间略长一些, 苍耳次之, 水蓼最短(图3)。172 m高程以上, 水蓼和苍耳的种子萌发持续时间显著高于稗和合萌的萌发持续时间($p < 0.05$); 172 m高程以下, 苍耳和合萌的种子萌发的持续时间明显高于稗和水蓼的萌发持续时间(图3)。除少数高程外,

同一高程区域内4个物种的种子无论是在有泥沙或无泥沙淤积的情况下, 萌发起始时间和持续时间的差异都不显著(图3)。

2.2 种子萌发率

随着高程的降低, 稗的种子萌发率总体呈现先上升后下降的趋势(图4A)。无论有无泥沙淤积于种子表面, 稗在155–172和145–150 m高程的种子萌发率都超过50%, 其中, 无泥沙淤积的稗种子最高萌发率发生在166–169 m高程, 为 $82\% \pm 4\%$, 有泥沙淤积的种子最高萌发率出现在155–160 m高程, 为 $84\% \pm 3\%$ 。

苍耳的种子萌发率随高程的降低呈现先上升后下降的趋势, 在160–169 m高程的萌发率均大于40% (图4B)。除166–169和172–175 m高程外, 其余高程有泥沙淤积的苍耳种子萌发率都显著大于无泥沙淤积的($p < 0.05$)。在155–160 m高程, 有泥沙淤积的苍耳种子萌发率都达到最大, 分别为 $60\% \pm 2\%$ 和 $57\% \pm 6\%$, 在145–150 m高程萌发率最低, 分别为 $6\% \pm 2\%$ 和 $1\% \pm 0\%$ 。

合萌的种子萌发率随高程的降低总体呈现下降的趋势(图4C)。除>175 m、160–166 m外, 其余高程无泥沙淤积的合萌种子萌发率都显著大于有泥沙淤积的种子萌发率($p < 0.05$)。在无泥沙淤积的条件下, 在163 m高程以上合萌种子萌发率均超过45%; 在有泥沙淤积的状况下, 合萌在163–172 m

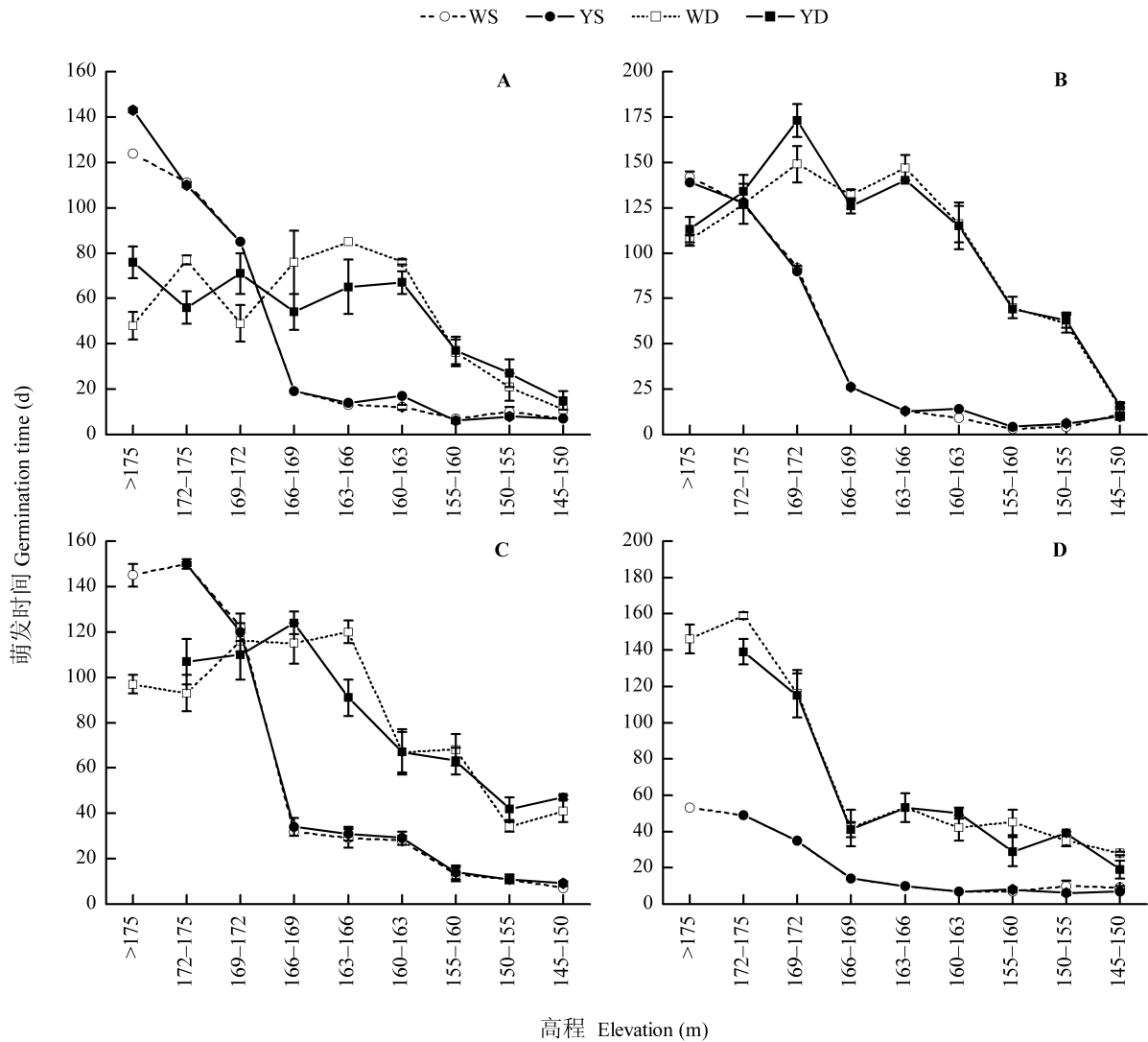


图2 不同高程稗(A)、苍耳(B)、合萌(C)和水蓼(D)的种子萌发起始时间和种子萌发持续时间(平均值±标准误差)。WD, 无泥沙淤积种子萌发持续时间; WS, 无泥沙淤积种子萌发起始时间; YD, 有泥沙淤积种子萌发持续时间; YS, 有泥沙淤积种子萌发起始时间。

Fig. 2 Starting time for seed germination after the end of submergence and seed germination duration (mean ± SE) of *Echinochloa crusgalli* (A), *Xanthium sibiricum* (B), *Aeschynomene indica* (C) and *Polygonum hydropiper* (D) at different elevations. WD, seed germination duration without sand sediment on surface; WS, starting time for seed germination after the end of submergence without sand sediment on surface; YD, seed germination duration with sand sediment on surface; YS, starting time for seed germination after the end of submergence with sand sediment on surface.

高程的种子萌发率达到40%以上。

水蓼的种子萌发率随高程的降低呈现先上升后下降的趋势, 在163-175 m高程其种子萌发率均超过70% (图4D)。在155-175 m高程水蓼有泥沙淤积的种子萌发率与无泥沙淤积的种子萌发率均无显著差异, 在145-155 m高程有泥沙淤积的种子萌发率显著大于无泥沙淤积的种子萌发率($p < 0.05$)。

3 讨论

本研究中, 稗、苍耳、合萌和水蓼这4种三峡水库消落区生长的一年生植物的成熟种子(或果实)在经历水淹之后仍然可以成功地萌发, 说明这4种植物的种子(或果实)能耐受消落区长期水淹的环境条件。

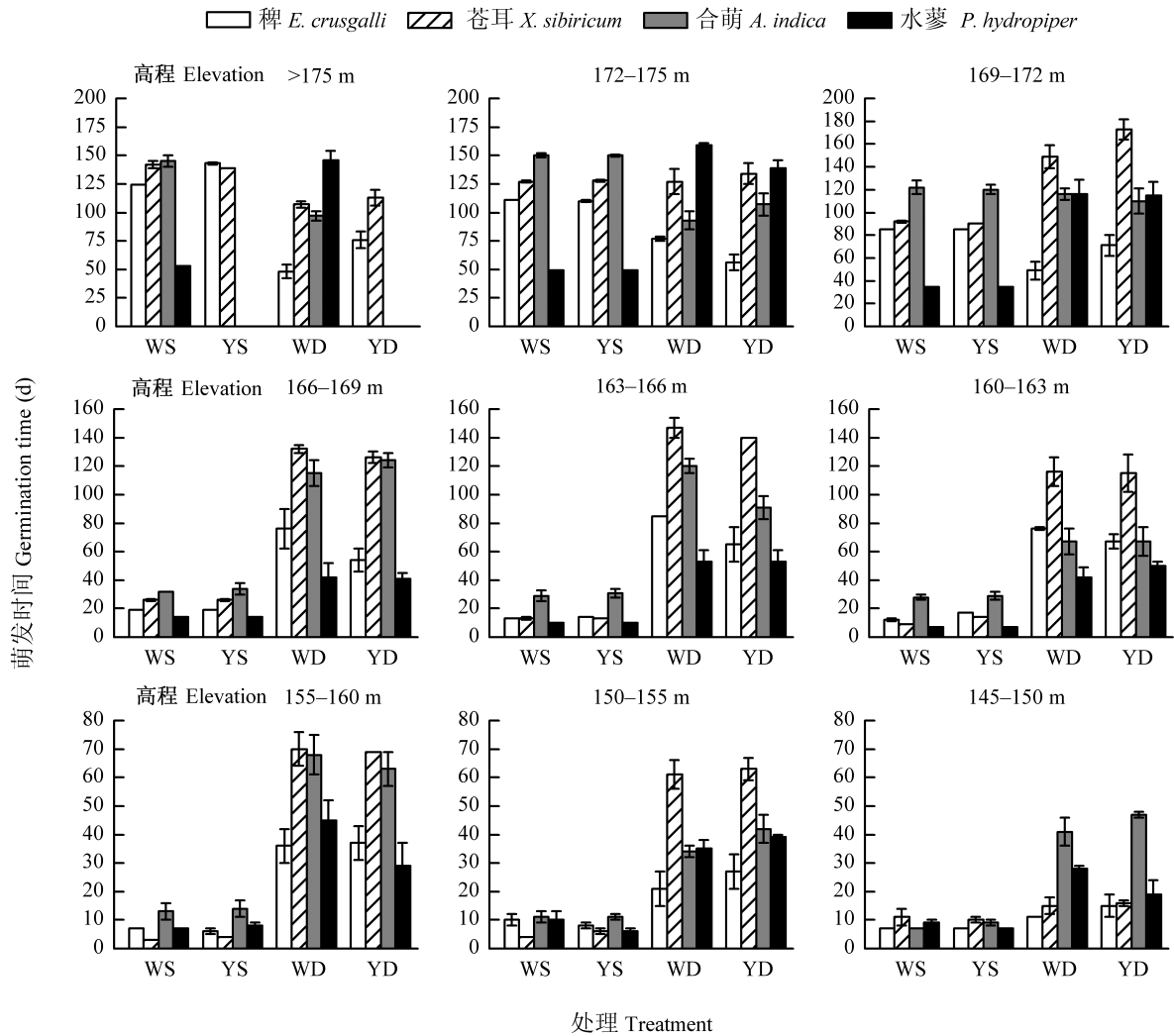


图3 同一高程稗、苍耳、合萌和水蓼的种子萌发起始时间和种子萌发持续时间(平均值±标准误差)。WD, 无泥沙淤积种子萌发持续时间; WS, 无泥沙淤积种子萌发起始时间; YD, 有泥沙淤积种子萌发持续时间; YS, 有泥沙淤积种子萌发起始时间。
Fig. 3 Starting time for seed germination after the end of submergence and seed germination duration (mean ± SE) of *Echinochloa crusgalli*, *Xanthium sibiricum*, *Aeschynomene indica* and *Polygonum hydropiper* at the same elevation. WD, seed germination duration without sand sediment on surface; WS, starting time for seed germination after the end of submergence without sand sediment on surface; YD, seed germination duration with sand sediment on surface; YS, starting time for seed germination after the end of submergence with sand sediment on surface.

植物群落的形成和演替都与种子萌发特性有关(Thompson, 1992)。每种植物的种子都有一个特定的萌发环境范围(Baskin & Baskin, 1989), 温度、光照、土壤水分、埋藏深度、海拔等因素都可以影响种子萌发(Meyer & Kitchen, 1994; Chachalis & Reddy, 2000; 张风娟等, 2009)。水淹作为某些生态系统中一种常见的环境胁迫, 对植物种子的萌发也具有很大的影响。Walls等(2005)研究发现, 水淹使沼泽生栎(*Quercus palustris*)种子萌发的起始时间延长, 导致最终的种子萌发率降低; Mollard等(2007)

研究发现, *Setaria parviflora*经过季节性的水淹和水浸处理后, 种子萌发率显著降低。有研究表明, 水淹可以使*Carex comosa*、*C. sticta*和*Schoenoplectus purshianus*的种子摆脱休眠, 提高种子萌发率(Baskin et al., 1996, 2000)。

本试验中水淹对这4种一年生植物种子的萌发时间和萌发率也具有较大的影响。对种子萌发起动日期而言, 本试验显示在163 m高程以上, 高高程稗、苍耳和合萌的种子露出水面时间早, 但其种子的萌发起动日期却晚于相对低的高程(表2), 说明水

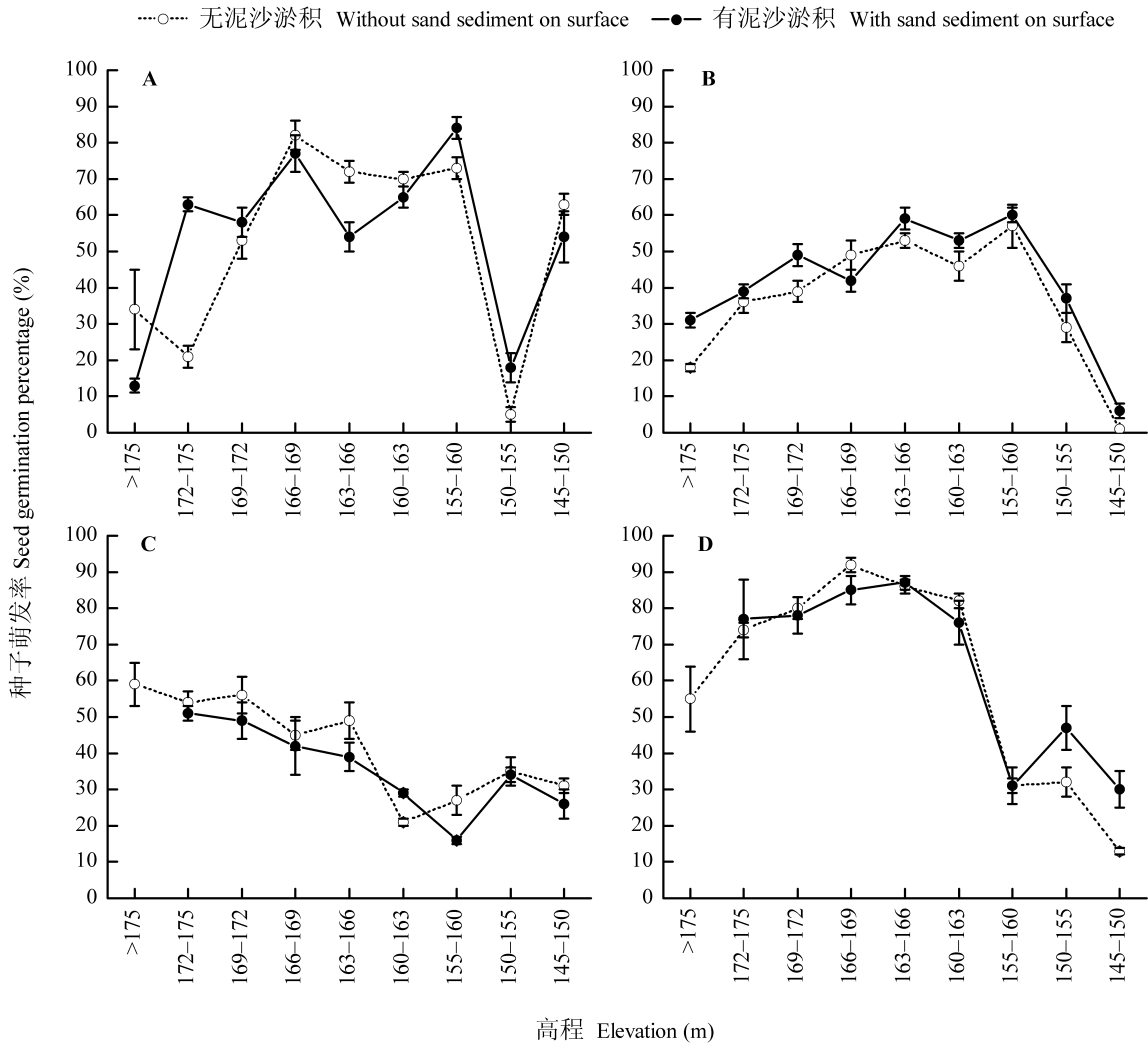


图4 不同高程稗(A)、苍耳(B)、合萌(C)和水蓼(D)的种子萌发率(平均值±标准误差)。
Fig. 4 Seed germination percentage (mean ± SE) of *Echinochloa crusgalli* (A), *Xanthium sibiricum* (B), *Aeschynomene indica* (C) and *Polygonum hydropiper* (D) at different elevations.

淹在一定程度上使稗、苍耳和合萌的种子萌发起动日期提前。而水淹对于163 m高程以下的稗、苍耳和合萌的种子萌发起动日期和所有高程区域内的水蓼种子萌发起动日期没有明显影响。对种子萌发起始时间而言,其随着高程的降低而逐渐缩短($p < 0.01$), 169 m高程以下种子萌发的起始时间显著低于169 m高程以上($p < 0.01$) (图2), 这是水淹时间和气温共同作用的结果。稗、苍耳和合萌169 m高程以上的种子水淹时间较短, 种子露出水面时间为11-12月, 此时气温较低, 不适于种子萌发, 直到2月底至4月上旬种子才开始萌发, 因此萌发起始时间较长; 而这三种植物169 m高程以下的种子经历的水淹时间较长, 种子露出水面的时间为2月下旬至6月初, 此时的气温适于种子萌发, 因此种子萌发起

始时间较短。169 m高程以上的水蓼种子露出水面之后, 在12月底至1月初即可萌发(种子萌发起始时间需35-53天), 169 m高程以下的种子出水之后在适宜的气温下陆续开始萌发(种子萌发起始时间需5-14天), 169 m高程以上的种子萌发起始时间相对较长(图2)。对种子萌发率而言, 稗、苍耳和水蓼的种子萌发率随水淹时间的延长总体上呈现先上升后下降的趋势(图4)。在2008年水库试验性蓄水期间, 消落区内的稗、苍耳和水蓼种子在水淹至145-155 m时并非所有的种子都完全发育成熟, 这是导致我们播种在155 m高程以下的种子萌发率急剧下降的原因。而水淹时间越长, 合萌的种子萌发率越低。本研究中水淹对种子萌发的影响, 一方面可能是由于水淹造成种子生理特性的改变, 另一方面也可能

是由于种子萌发时生境因子不同造成的, 或者是二者共同作用的结果, 但本试验中未对其中的机理做深入的研究, 有待于后续试验的开展。

三峡水库采取“蓄清排浑”的运行方式, 极大地降低了水体中携带的泥沙, 退水之后我们发现, 只有很薄的一层淤泥(1–3 mm)沉积在种子表面, 对种子萌发的影响极其微小, 只在一定程度上影响了合萌和苍耳的种子萌发率。本试验中多数高程内苍耳有泥沙淤积的种子萌发率都显著大于无泥沙淤积的种子($p < 0.05$) (图4B), 而合萌无泥沙淤积的种子萌发率都显著大于有泥沙淤积的种子($p < 0.05$) (图4C)。在>175 m高程区域内的模拟泥沙淤积试验结果显示, 5 cm厚的泥沙严重限制了稗、合萌和水蓼的种子萌发, 而苍耳的种子萌发率则显著提高($p < 0.01$) (图4), 这表明苍耳可用于泥沙淤积较厚的消落区的植被恢复建设中。

综上所述, 稗、苍耳、合萌和水蓼这4种种子成熟期与三峡水库水位消落期一致的植物, 其成熟的种子能够耐受长时间水淹并在退水后正常萌发, 可以应用于三峡水库消落区的植被恢复和重建中。然而仅仅依靠其种子的自身扩散能力很难在消落区内形成大面积的植被, 还需要人工辅助播种。在播种时不能简单地将这4种植物的种子混播, 应结合其种子萌发特性来科学播种。比如, 在消落区同一高程区域内, 稗、苍耳、合萌和水蓼种子的萌发起始时间是不同的, 早萌发的植株会占据较多的可用空间和有限的资源(Ross & Harper, 1972), 从而妨碍晚萌发的植株, 所以在播种时要合理配置, 将不同物种播种成带状或块状; 另外, 可以根据各物种的种子在不同高程的萌发率高低来调整播种数量, 在萌发率较低的高程适当地增加播种数量, 以保证在各个高程均有较好的植被恢复效果。本研究为采用三峡水库消落区原有的一年生植物的种子进行消落区植被恢复与重建工作提供了理论依据和科学指导。

致谢 国家自然科学基金(30770406和31070474)和教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0773)资助。

参考文献

Baskin CC, Baskin JM (1989). Physiology of dormancy and germination in relation to seed bank ecology. In: Leck MA, Parker VT, Simpson RL eds. *Ecology of Soil Seed*

Banks. Academic Press, San Diego. 53–66.

Baskin CC, Baskin JM, Chester EW (2000). Effect of flooding on the annual dormancy cycle and on germination of seeds of the summer annual *Schoenoplectus purshianus* (Cyperaceae). *Aquatic Botany*, 67, 109–116.

Baskin CC, Chester EW, Baskin JM (1996). Effect of flooding on annual dormancy cycles in buried seeds of two wetland *Carex* species. *Wetlands*, 16, 84–88.

Chachalis D, Reddy KN (2000). Factors affecting *Campsis radicans* seed germination and seedling emergence. *Weed Science*, 48, 212–216.

Li LF (李连发), Liao JX (廖建雄), Jiang MX (江明喜), Huang HD (黄汉东), He D (何东) (2010). Effect of dry storage and water submersion on seed germination of 21 herbaceous species indigenous to be Three Gorges Reservoir Region. *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), 28, 99–104. (in Chinese with English abstract)

Li Y (李娅), Zeng B (曾波), Ye XQ (叶小齐), Qiao P (乔普), Wang HF (王海锋), Luo FL (罗芳丽) (2008). The effects of flooding on survival and recovery growth of the riparian plant *Salix variegata* Franch. in Three Gorges reservoir region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 28, 1923–1930. (in Chinese with English abstract)

Meyer SE, Kitchen SG (1994). Habitat-correlated variation in seed germination response to chilling in *Penstemon Section Glabri* (Scrophulariaceae). *American Midland Naturalist*, 132, 349–365.

Mollard FPO, Insausti P, Sánchez RA (2007). Flooding induces secondary dormancy in *Setaria parviflora* seeds. *Seed Science Research*, 17, 55–62.

Ross MA, Harper JL (1972). Occupation of biological space during seedling establishment. *Journal of Ecology*, 60, 77–88.

Thompson K (1992). The functional ecology of seed banks. In: Fenner M ed. *Seeds: the Ecology of Regeneration in Plant Communities*. Redwood Press, Melksham. 231–258.

Walls RL, Wardrop DH, Brooks RP (2005). The impact of experimental sedimentation and flooding on the growth and germination of floodplain trees. *Plant Ecology*, 176, 203–213.

Wang HF (王海锋), Zeng B (曾波), Li Y (李娅), Qiao P (乔普), Ye XQ (叶小齐), Luo FL (罗芳丽) (2008a). Effects of long-term submergence on survival and recovery growth of four riparian plant species in Three Gorges Reservoir Region, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), 32, 977–984. (in Chinese

with English abstract)

- Wang HF (王海锋), Zeng B (曾波), Qiao P (乔普), Li Y (李娅), Luo FL (罗芳丽), Ye XQ (叶小齐) (2008b). Survival and growth response of *Vetiveria zizanioides*, *Acorus calamus* and *Alternanthera philoxeroides* to long-term submergence. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 28, 2571–2580. (in Chinese with English abstract)
- Wang X (王欣), Gao XM (高贤明) (2010). Effects of simulated submergence on seed germination of four common annual herbs in the Three Gorges Reservoir Region, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 34, 1404–1413. (in Chinese with English abstract)
- Wang XR (王祥荣), Jiang Y (蒋勇) (2006). *Studies on the Landscape Ecology Along Yangtze River in Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section), China* (长江三峡库区(重庆段)沿江景观生态研究). China Architecture and Building Press, Beijing. (in Chinese)
- Wang Y (王勇), Liu YF (刘义飞), Liu SB (刘松柏), Huang HW (黄宏文) (2005). Vegetation reconstruction in the Water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), 22, 513–522. (in Chinese with English abstract)
- Zhang FJ (张凤娟), Li JQ (李继泉), Xu XY (徐兴友), Guo AY (郭艾英), Hu JR (胡京蕊), Du SX (杜淑欣), Wan FH (万方浩) (2009). Influence of environmental factors on seed germination of *Flaveria bidentis* (L.) Kuntza. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 29, 1947–1953. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 黄振英 责任编辑: 王 葳