

DOI: 10.5846/stxb201302120260

袁慎鸿, 曾波, 苏晓磊, 许建平. 水位节律差异对三峡水库消落区不同物候类型 1 年生植物物种构成的影响. 生态学报, 2014, 34(22): 6481-6488.
Yuan S H, Zeng B, Su X L, Xu J P. Effect of water-level fluctuation discrepancy on the composition of different annuals in Three Gorges Reservoir drawdown zone. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6481-6488.

水位节律差异对三峡水库消落区不同物候类型 1 年生植物物种构成的影响

袁慎鸿, 曾波*, 苏晓磊, 许建平

(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: 三峡水库蓄水后改变了原有长江自然的水位波动节律, 并在三峡库区内形成了两种类型的消落区: 蓄水前未经历过水淹的完全水库消落区, 其水位节律夏低冬高; 以及蓄水前属于自然消落区目前受蓄水和洪汛双重影响的消落区, 其水位在冬季和夏季都存在高水位。这与自然消落区冬低夏高的水位节律均存在差别。1 年生植物根据萌发结实特性可分为春萌秋实、冬萌夏实型植物和广适性植物 3 类。在不同消落区选取 5 个样地划分样带设置固定样方, 涨水前和退水后调查发现: 各消落区均存在 3 种 1 年生植物, 但 3 种类型物种的比例和优势度存在显著差异。只受夏季洪汛影响的自然消落区共发现 1 年生植物 73 种, 冬萌夏实型植物以 45 种占优; 而水位节律与之相反的完全水库消落区, 1 年生植物物种数为 85 种, 其中春萌秋实型植物以 45 种以及较大的优势度成为该区域的优势 1 年生生物种; 双重影响消落区, 1 年生植物物种总数未明显下降, 但是在蓄水和洪汛的双重影响下其种群大小相对较低。水位节律的巨大变化会引起 1 年生植物优势类型的显著改变, 适合生长的 1 年生植物主要是因为其生长周期与淹没期不完全重叠而成为优势物种类型。

关键词: 三峡水库; 水位节律; 1 年生植物; 物候

Effect of water-level fluctuation discrepancy on the composition of different annuals in Three Gorges Reservoir drawdown zone

YUAN Shenhong, ZENG Bo*, SU Xiaolei, XU Jianping

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

Abstract: After the Three Gorges Dam impoundment, the original water-level fluctuation rhythm of Yangtze River change dramatically. As a result, two new kinds of drawdown zones appear in Three Gorges Reservoir (TGR): the preupland drawdown zone (PU-DZ) which never submerged before impoundment and the preriparian drawdown zone (PR-DZ) which is the former riparian zone of Yangtze River. The water-level fluctuation rhythm of PU-DZ is high in winter because of impoundment, and low in the summer because of flood discharged. Meanwhile, the PR-DZ is affected by both the impoundment in winter and the flood in summer, so the water-level can raise high in winter and summer. Apparently, they both have differences with the water-level fluctuation rhythm of natural riparian zone (NRZ), which is only high in summer for the flood. Annuals can be divided into three types according to their germination and fructified characteristics: annuals germinating in winter fruitifying in summer (AGWFS), annuals germinating in spring fruitifying in autumn (AGSFA) and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31370443, 31070474, 30500041); 教育部高校博士点基金课题 (20100182110022); 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB723205); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (XDJK2013A003)

收稿日期: 2013-02-12; **网络出版日期:** 2014-03-17

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

the common annuals. In this study we chose five sample sites in each kind of habitat and survey them before the freshet and after the impoundment subsiding by fixed quadrats in different transects. All these three types annuals can be discovered in each drawdown zone, however, the proportion of the number of different type's species and their population size are significantly different. The major reason is discrepancy of occurred submergence time in different zones. There are 73 kinds of annuals found in NRZ. The number of AGWFS is 45, its proportion of species number are 52.26—67.46 as the elevations decrease, which is obviously dominant compared with the other two types, because they can avoid the disturbance of summer flood. The total number of annual in PU-DZ is 85, wherein the number of type of AGSFA is 45. The proportions of this type in the total species number are 59.42—82.44 as the elevations decrease. They are dominance in PU-DZ, for the water-level is high in winter from November to the next year's January has little effect on them. However, AGWFS can hardly germinate in this stressful environment. AGWFS are more easily seen in high elevation because this area can end of the impoundment. In PR-DZ, through the total number of annuals is 62, which is not significantly lower than the other two regions. Summer flood and the winter impoundment disturb so frequently that any type of annual cannot get dominance in this environment, the proportions of AGWFS in each elevation are 30—52.57. Meanwhile the proportions of AGSFA in each elevation are 13.33—48.32. Neither of them can get dominant in this region. Moreover, class ephemeral annuals may survive as the dominant type as the stress increasing. The ecological dominance is almost the same as the proportion of species number. This study show if the water-level fluctuation rhythm changed, the composition of annual will change as the response rapidly in the drawdown zone. The original riparian annual plants don't have any advantage in the competitions for survival and spaces in drawdown zone. The adaptive annuals mainly because of that their phenology do not compound with the submergence occurred time then survive as dominant species.

Key Words: Three Gorges Reservoir; water-level fluctuation rhythm; annual plants; phenology

三峡大坝(Three Gorges Dam, TGD)是目前世界最大的大坝,于2009年竣工^[1]。根据现行三峡水库水位调度方案,每年大坝在9月开始蓄水,于11月初蓄水至最高水位175m,次年1月开始水位逐步下降,5月降至防洪限制最低水位145m。由于大坝建成前,涪陵的常年平均水位为145m,江津城区的平均水位是175m,因此涪陵至江津段的长江河道属于三峡水库的回水区。水位的大幅提升使涪陵以下自然消落区的原有陆生植被永久淹没,而涪陵以上区段的水位原本高于145m,成库前属于长江自然消落区(Natural Riparian Zone, NRZ)。受到夏季洪汛和水库蓄水的影响,三峡库区形成了两种不同类型的消落区:涪陵至大坝的只受蓄水影响的消落区(Preupland Drawdown Zone, PU-DZ),该消落区蓄水前未经历过水淹;江津至涪陵的江段受到冬季蓄水和夏季洪汛双重影响的消落区(Preriparian Drawdown Zone, PR-DZ),蓄水前库岸会受洪汛的冲击^[2]。水位节律的改变会引起植物组成的变化^[3-6],由于蓄水时间较长,在消落区内水淹胁迫是植物生存的主要限制性因素^[7-11]。根据已有的研究结果表

明三峡库区消落区内未成库前的植被状况与现有状况存在明显差别,但极少见报道从植物生长规律与水位变化之间的关系进行研究说明植被差异原因。现有三峡库区植被以1年生草本植物为主,其比例超过50%^[2,12-15]。1年生植物可以根据其萌发结实的特性分为春萌秋实型植物和冬萌夏实型植物。三峡库区原有的水位节律是夏高冬低,我们推测在自然状况下长江库岸1年生植物主要是以在冬萌夏实型植物为主。由于三峡大坝的运行实行反季节蓄水,即夏季低水位,冬季高水位,因此在PU-DZ内,冬萌夏实型植物由于水淹胁迫可能无法萌发结实,甚至消亡;相反,原本在自然条件下并不占优的春萌秋实型植物由于适应这种水位涨落节律而可能成为库岸植物的优势物种类型。而对于PR-DZ,在夏汛和冬季蓄水的双重影响下,两种类型的1年生植物可能都难以完成生活史,物种种类和数量都会大大下降。本实验从植物自身生长规律与水位节律的关系解释三峡库区消落区1年生植物与自然消落区存在差异的原因。也希望了解水位节律对植物分布的影响为三峡库区植被重建时在物种类型选择上提供

帮助。

1 研究样地和研究方法

1.1 研究样地水位概况

以 2009 年全年水位变化为例,由于 PU-DZ 只存在蓄水的影响,水位变化表现出明显的冬季高夏季低(图 1)。然而对于江津至涪陵的 PR-DZ 区段,该区段的低高程区域成库前属于长江自然河岸带,夏季洪汛会对河岸植被产生干扰,大坝蓄水后,在夏季和冬季都会出现高水位,冬季高水位使原本存在于此的 1 年生适生植物失去了正常的萌发条件。江津以上区域由于超过了回水末端不受三峡水库蓄水的影响,属于 NRZ,水位冬低夏高。

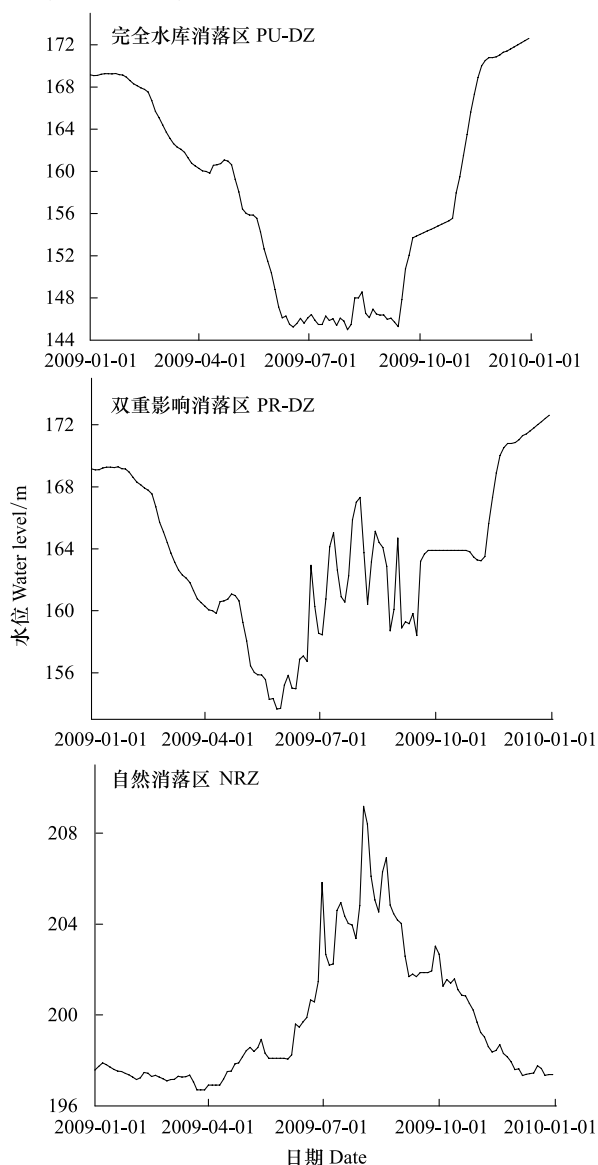


图 1 2009 年 3 种类型消落区水位变动图

Fig.1 the water-level fluctuation of three drawdown zones in 2009

1.2 研究方法

分别于 2012 年 4 月下旬(枯水期)、5 月下旬(洪汛前)、11 月中旬(洪汛后)对 NRZ 石门镇与金刚镇之间 5 个样地进行调查(图 2)。同年 4 月末(退水至 165m)、6 月中旬(洪汛前)、9 月中旬(蓄水前)对受蓄水和洪汛双重影响消落区对涪陵上游巴南区木洞镇至扇沱村之间 5 个样地进行调查,同年 6 月(水位退至最低后)、8 月、9 月初(蓄水开始)时和 9 月末(蓄水至 165m 时)对 PU-DZ 位于丰都、万州、云阳和巫山选取 5 个样地进行调查。

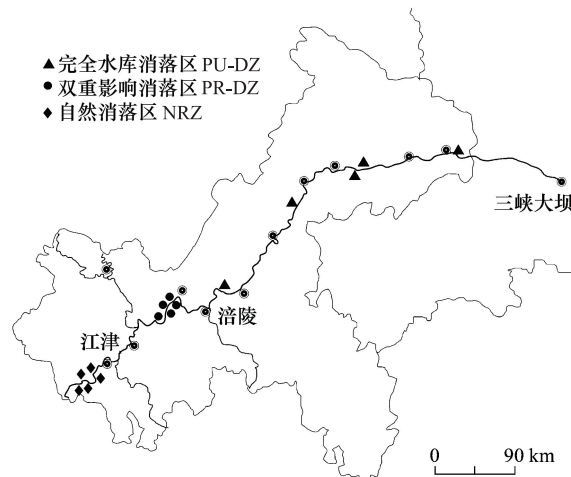


图 2 3 种类型消落区的调查样地分布图

Fig.2 The location of the sampling sites in each of three drawdown zones

将 PU-DZ 从 150m 以上按海拔每 5m 一个高程划分为 5 个高程: 150—155m、155—160m、160—165m、165—170m 和 170—175m; PR-DZ 根据调查样地历年洪汛平均水位 169m 将其以下定为受蓄水和洪汛双重影响的区域,将该区域按每 4m 一个高程划分为 3 条样带: 双重影响样带 1 (157—161m), 双重影响的样带 2 (161—165m), 双重影响的样带 3 (165—169m)。将 169m 以上区域按 3m 一个高程划分为只受蓄水影响样带 1 (169—172m), 以及只受蓄水影响样带 2 (172—175m)。将 NRZ 以历年当地最低水位以上每 4m 为一个高程,划分为 3 条样带,随高程上升,即将相对水位 0—4m 记做样带 1, 相对水位 4—8m 记做样带 2, 相对水位 8—12m 记做样带 3。采用样方法进行调查,每条样带调查面积不小于该样带最小面积, NRZ 样方共计 140 个, 受蓄水和洪汛影响的双重消落区样方 189 个, PU-DZ 样方 231 个, 所有样带用 PVC 管设置 3m×3m 的固定样方。调查

时对样方内所有 1 年生植物种类、物候期以及株数进行记录,根据观察到的植物物候期特点结合中国植物志对花果期的描述,将这些植物划分为冬萌夏实型植物(即在洪汛来临前可完成结实的植物),春萌秋实型植物(即在蓄水完成前可结实的植物)以及广适性植物(即可在较广时间范围内萌发并可在短时间完成生长结实过程的植物)。种群大小用不同类型植物在每个样方中株数的平均值进行表示。优势度计算 $C=N_i(N_i-1)/[N(N-1)]$,式中 N 为样带中各物种多度总和, N_i 为第 i 个种的多度指标。

对 3 种类型消落区内 3 种不同类型的 1 年生植物进行物种数和种群大小的统计,利用 SPSS18.0 中方差分析对不同高程各物种差异进行检验,若差异显著,采用 Duncan 进行多重比较。若方差不齐,则采用 Kruskal-Wallis H 检验差异是否显著,若差异显

著则采用 Mann-Whitney U 两两比较,将显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 。采用 Origin8.5 作图。

2 结果分析

2.1 各消落区 1 年生植物物种数及其组成的比较

对 3 种消落区调查中出现的物种总数进行统计,1 年生植物在 PU-DZ 共计有 85 种,PR-DZ 共有 62 种,NRZ 为 73 种。从表 1 中可见蓄水对春萌秋实型和冬萌夏实型的 1 年生植物都产生了显著的影响,春萌秋实型植物在 3 个消落区之间均存在显著差异,物种数在 PU-DZ>PR-DZ>NRZ。相反,冬萌夏实型的植物物种数则呈现 NRZ>PR-DZ>PU-DZ,NRZ 中的物种数与 PR-DZ 和 PU-DZ 之间均存在显著差异。广适性的植物物种数在各消落区间不存在明显差异。

表 1 3 种消落区不同类型 1 年生植物物种数量
Table 1 Species number of different annuals in three drawdown zones

物种类型 Species type	完全水库消落区 (PU-DZ) The preupland drawdown zone		双重影响的消落区 (PR-DZ) The preriparian drawdown zone		自然消落区 (NRZ) The natural riparian zone	
	平均值±标准误 (mean±se)	总计 Total	平均值±标准误 (mean±se)	总计 Total	平均值±标准误 (mean±se)	总计 Total
春萌秋实型 Annuals germinating in spring and fructifying in autumn	24.8±4.259a	45	13.8±1.655b	29	7.4±0.748c	17
冬萌夏实型 Annuals germinating in winter and fructifying in summer	11.6±2.421a	31	13.8±2.001a	24	23.2±2.518b	45
广适性 Common annuals	6±1.140a	9	4.6±1.077a	9	7.8±0.917b	11

2.1.1 PU-DZ 各高程植物物种比例比较

根据各高程记录到的物种数,计算 3 种类型植物组成比例的变化趋势(图 3),随着高程上升,春萌秋实型的植物所占比例有所下降,但仍然显著高于另两类物种,根据 Duncan 多重比较发现 150—155m 与 170—175m 两个高程之间物种存在显著的差异,其余各高程之间春萌秋实的物种比例则不存在显著差异,而随着高程上升,冬萌夏实型的植物的物种比例也随之升高,根据 Duncan 多重比较,165m 以上的两个高程与 150—155m 高程带之间存在显著差异,其他高程间则不存在显著差异,广适性植物则在各高程之间均未表现出显著差异。

2.1.2 PR-DZ 各高程植物物种比例比较

在该消落区内,3 种类型的植物物种数都没有表现出明显优势(图 3)。春萌秋实型植物在较低高程的比例相对大于较高高程,而冬萌夏实型的植物则在出露时间较早的区域占据了更多的比例。广适性植物则表现在各高程之间均无显著性差异。

2.1.3 NRZ 各高程植物物种比例比较

在 NRZ 内,随高程的上升,春萌秋实型物种比例呈现先下降后升高的趋势(图 3)根据比较显示,样带 1 与样带 2 之间春萌秋实型物种比例具有显著差异,冬萌夏实型植物物种比例则随着高程高度的上升而下降,样带 3 的冬萌夏实型植物比例与样带 1、2 均存在显著差异。广适性植物物种比例则差异不显著。

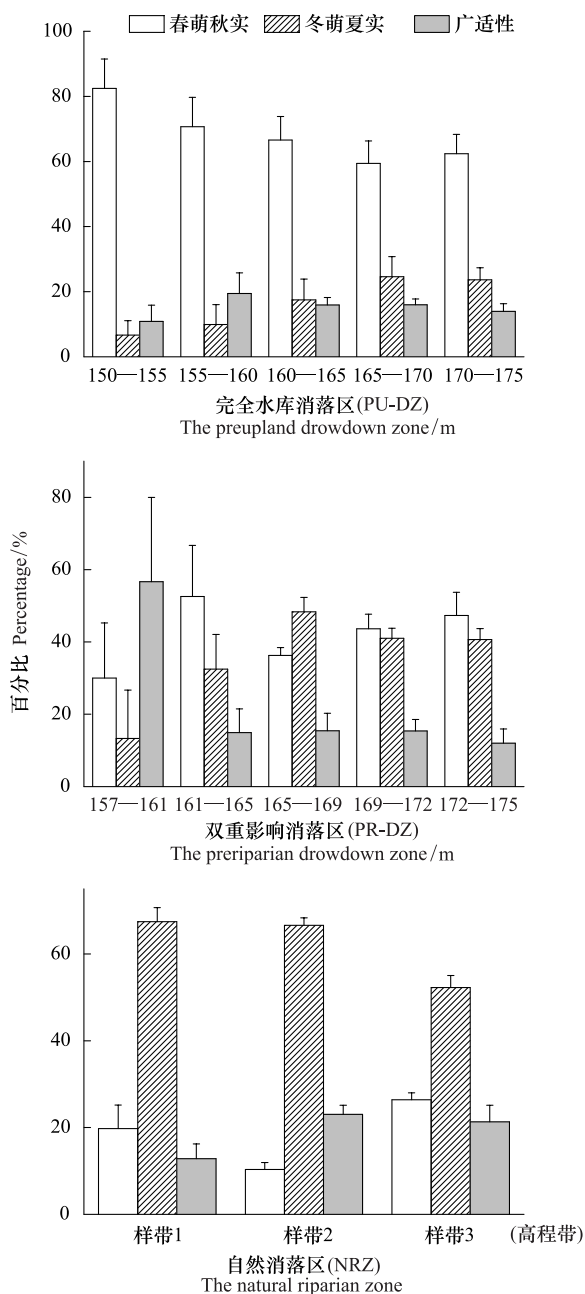


图 3 各消落区不同高程 3 种类型 1 年生植物物种比例

Fig. 3 Percentages of three different annuals at various elevations in each of three drawdown zones in different elevations in each drawdown zones

2.2 消落区间不同类型 1 年生植物优势度比较

以 5 月下旬至 6 月底对 3 种消落区调查的结果作为同一时间段内 3 种不同消落区各种类型 1 年生植物的计算各类型植物的优势度。春萌秋实型的植物种群大小在 PU-DZ>PR-DZ>NRZ, 3 种之间存在显著差异, 而冬萌夏实型植物则与之相反, NRZ>PR-DZ>PU-DZ, 通过比较发现 NRZ 与 PU-DZ 存在显著差异。广适性的物种在 PU-DZ 中与 PR-DZ 和 NRZ

均具有显著性差异(表 2)。

2.2.1 PU-DZ 各高程不同类型植物优势度比较

在 PU-DZ 的所有高程, 春萌秋实 1 年生植物生态优势度在 0.55 至 0.79 之间(图 4), 各高程之间不具有显著性差异, 占有明显的优势; 而冬萌夏实型 1 年生植物在 160m 以下区域生态优势度极低, 数量极少, 仅在 165m 以上高程数量显著增加, 但仍然小于春萌秋实型植物; 广适性 1 年生植物在 165m 以下具有优势度仅次于春萌秋实型植物, 但是各高程之间差异不显著。

2.2.2 PR-DZ 各高程不同类型植物优势度比较

在受蓄水和洪汛双重影响消落区, 各类型 1 年生植物的种群规模相对较小, 生态优势度均不明显(图 4), 春萌秋实型 1 年生植物在高程之间优势度不存在显著差异, 冬萌夏实型 1 年生植物仅在双重样带 1 和蓄水样带 2 存在显著差异, 其余各高程差异不显著, 广适性 1 年生植物在出水时间最短的双重样带 1 成为优势种, 与其余各高程存在显著差异。

2.2.3 NRZ 各高程不同类型植物优势度比较

在 NRZ 内, 春萌秋实型的 1 年生植物的优势度随高程升高而升高(图 4), 样带 3 与另两个高程存在显著差异。相反冬萌夏实型 1 年生植物的优势度则随高程的上升而下降, 各高程之间均存在显著差异。广适性 1 年生植物在样带 3 和样带 1、2 之间存在显著差异。

3 讨论

在 PU-DZ 春萌秋实的 1 年生植物是该类型水位节律下的优势物种, 它们根据本身的萌发和结实规律, 在退水后萌发, 在蓄水之前产生种子, 主要 1 年生植物为狼把草 (*Bidens tripartita*)、稗 (*Echinochloa crusgalli*)、苍耳 (*Xanthium sibiricum*)、狗尾草 (*Setaria viridis*) 和马唐 (*Digitaria sanguinalis*), 这些植物可以通过休眠避开水淹干扰^[16-17]。而冬萌夏实型植物并未在 PU-DZ 内消失, 调查显示消落区内即使在 150m 区域仍然可以发现少量该类型植物, 这部分植物可能来自于蓄水前土壤原有种子库^[18], 但是其种群极小, 而对于 165m 以上区域而言, 由于出露时间较早, 一部分能快速结实的冬萌夏实型植物可以在这里完成生活史从而存活于该区域内, 根据种子的扩散模型^[19]可知植物可从

表 2 3 种消落区各类型 1 年生植物种群大小比较

物种类型 Species type	完全水库消落区 (PU-DZ) The preupland drawdown zone	双重影响的消落区 (PR-DZ) The preriparian drawdown zone	自然消落区 (NRZ) The natural riparian zone
	平均值±标准误 (mean±se)	总计 Total	平均值±标准误 (mean±se)
春萌秋实型 Annuals germinating in spring and fructifying in autumn	63.841±16.067a	10.170±2.084b	4.158±0.922c
冬萌夏实型 Annuals germinating in winter and fructifying in summer	8.984±2.640a	11.214±3.388a	19.177±3.683b
广适性 Common annuals	8.190±2.188a	2.037±0.607b	1.760±0.102b

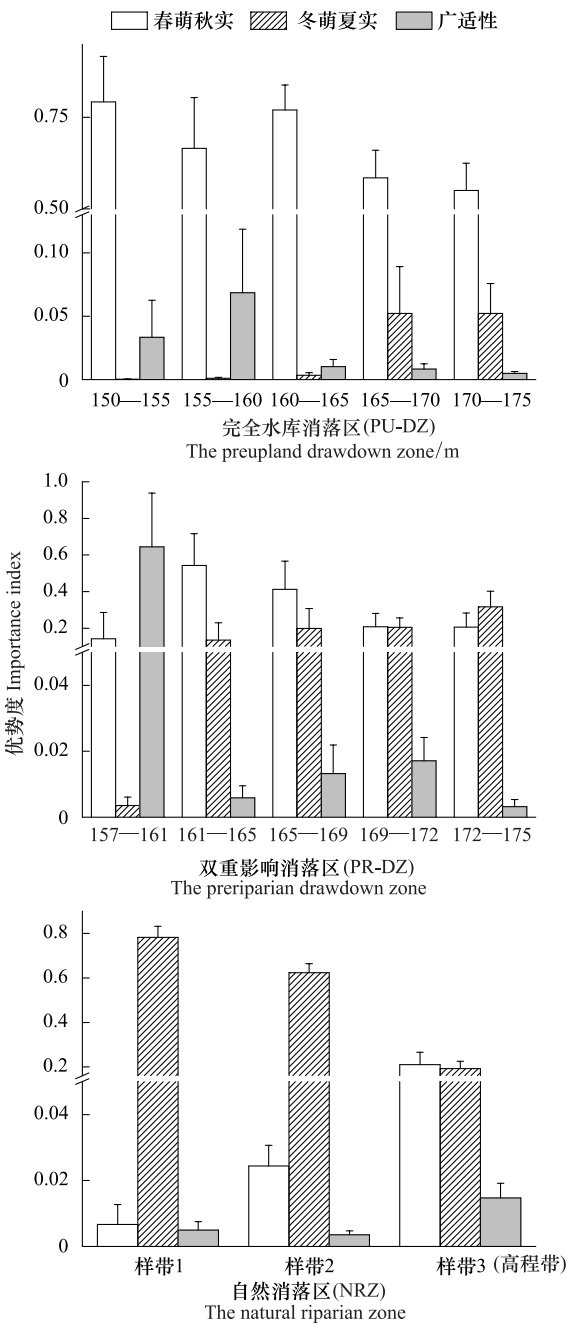


图 4 各消落区各高程 3 种类型 1 年生植物优势度比较

Fig. 4 Dominance of three different annuals at various elevations in each of three drawdown zones

175m 以上不受水淹区域通过风媒、人为干扰等方式可以将植物传播进入消落区,从而对 165m 以上区域进行种子的补充,因此可以预见在短时间内,165m 以上区域仍然会拥有丰富的冬萌夏实型植物物种,但是这类植物本身的萌发结实特性决定了它们不会在 165m 以上区域成为优势种。对于萌发结实条件要求不是很严格的广适性植物,可能由于种子良好的耐淹能力^[17,20],在较低高程可以快速萌发,从而成为该区域优势度较大的物种。

在 PR-DZ 中存在的 1 年生植物物种数并不低,这与假设并不一致,这可能是因为土壤种子库中各类型的植物种子仍未消耗完,夏季洪汛可带来部分外源种子^[18],对于植物种子库的研究已另设实验进行研究。较高高程出露时间为冬末初春,与自然条件冬萌夏实型的 1 年生植物的萌发时间较为吻合,而对于低高程区域,出露时间为 5—6 月,此时的生长条件对春萌秋实型植物更为有利,但是结果也显示 3 种植物的都没有在该区域形成明显的种群优势。1 年生植物多为 R 对策植物,由于 PR-DZ 水淹胁迫较强,他们很难生存,调查时发现的 1 年生植物多散布在多年生的禾本科或莎草科植物中^[21]。在蓄水和洪汛的双重冲击下,只有少数物种可以实现快速的萌发和结实,这部分 1 年生植物多为蓄水前该区域原生种为主^[15],他们的生活史周期已经与水位节律相一致^[22-23]。随着时间的推移,萌发条件不严格且结实较快的广适性植物可能成为该水位节律下的主要 1 年生植物。

对于没有蓄水影响的 NRZ,在水淹持续时间较长的低高程,冬萌夏实型植物物种数较多,也占据了较大的优势,而位于样带 3 的这类植物在物种数和优势度上都发生了下降的趋势,这主要是因为该高程被水淹时间相对较短,多年生植物可以耐受这种

强度水淹^[24],在退水后通过横向生长占据了多数的生长空间,进而压缩了 1 年生植物的生长空间^[22,25]。同时在样带 3,由于出露时间较早,生长条件仍然较好,春萌秋实型植物种子可以迅速萌发,加之临近种源也可以传播部分种子进入该区域,使春萌秋实型植物得以在此区域生存。

蓄水之后水位节律的巨大变化,也引起了植被组成的明显差异,但在夏季低水位冬季高水位的条件下,春萌秋实的 1 年生植物得到了适宜的生长条件,可以在这种水文节律下的生长的春萌秋实型植物在物种数和种群大小上都占据了较明显的优势,成为了 PU-DZ 的主要 1 年生植物。但是由于 PU-DZ 的库岸较贫瘠^[14],而 1 年生植物对土壤的固持力较弱,且不耐水淹,所以蓄水过程中可能造成大量营养元素从库岸进入水体。随着营养流失可能造成库岸无法继续生长植物,从而引起植被衰退^[11]。对于 PR-DZ,在冬季蓄水和夏季洪汛的双重冲击下,库岸的 1 年生植物种群规模显著下降,由于土壤种子库以及通过夏季洪汛的传播等原因,1 年生植物的物种总数并没有发生急剧的下降。但是随着蓄水年份的增加,该区域的 1 年生植物可能继续减少。NRZ 在经历了长时间的自然选择后,形成了较为稳定的群落,冬末初春萌发在洪汛前可以结实的 1 年生植物,正好可以通过种子躲过夏季高水位,成为该水位节律下的优势物种。

由于生长环境相似,不同植物的生态位可能存在重叠,种间存在竞争关系,3 种消落区内各自因为不同水位节律引起的不同类型消落区出水时间差异,出露时长差异,成为了影响植物分布的主要因素,各类型物种之间主要以物候期的不同来减少竞争^[26],实现在同一生境下的存活。未来在 PU-DZ 内春萌秋实型植物的种间竞争将可能使物种的丰富度进一步下降^[27]。PR-DZ 随着蓄水年份的增加,1 年生植物的种类和数量有可能将进一步下降,仅有极少数可以快速萌发结实的 1 年生植物可以继续存活。NRZ 在自然条件不发生巨大变化的条件下,库岸仍然是物种较为丰富的区域。

References:

- [1] Wu J G, Huang J H, Han X G, Xie Z Q, Gao X M. Three-Gorges Dam—experiment in habitat fragmentation?. Science, 2003, 300(5623): 1239-1240.
- [2] Su X L, Zeng B, Huang W J, Xu S J, Lei S T. Effects of the Three Gorges Dam on preupland and preriparian drawdown zones vegetation in the upper watershed of the Yangtze River, P. R. China. Ecological Engineering, 2012, 44: 123-127.
- [3] Jansson R, Nilsson C, Dynesius M, Andersson E. Effects of river regulation on river-margin vegetation: a comparison of eight boreal rivers. Ecological Applications, 2000, 10(1): 203-224.
- [4] Nilsson C, Jansson R. Floristic differences between riparian corridors of regulated and free-flowing boreal rivers. Regulated Rivers: Research and Management, 1995, 11(1): 55-66.
- [5] Naiman R J, Melillo J M, Lock M A, Ford T E, Reice S R. Longitudinal patterns of ecosystem processes and community structure in a subarctic river continuum. Ecology, 1987, 68(5): 1139-1156.
- [6] Nilsson C, Keddy P A. Predictability of change in shoreline vegetation in a hydroelectric reservoir, northern Sweden. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1988, 45(11): 1896-1904.
- [7] Nilsson C, Svedmark M. Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: riparian plant communities. Environmental Management, 2002, 30(4): 468-480.
- [8] Blom C W P M, Bögemann G M, Laan P, van der Sman A J M, van de Steeg H M, Voesenek L A C J. Adaptations to flooding in plants from river areas. Aquatic Botany, 1990, 38(1): 29-47.
- [9] Capon S J. Flood variability and spatial variation in plant community composition and structure on a large arid floodplain. Journal of Arid Environments, 2005, 60(2): 283-302.
- [10] Su X L, Zeng B, Qiao P, Ayi Q L, Huang W J. The effects of winter water submergence on flowering phenology and reproductive allocation of *Salix variegata* Franch. in Three Gorges reservoir region. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(10): 2585-2592.
- [11] Wang Y, Liu Y F, Liu S B, Huang H W. Vegetation reconstruction in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. Chinese Bulletin of Botany, 2005, 22(5): 513-522.
- [12] Jiang M X, Cai Q H. Preliminary studies on the riparian plant communities of main channel in the Three Gorges Area, the Yangtze River. Acta Hydrobiologica Sinica, 2000, 24(5): 458-463.
- [13] Bai B W, Wang H Y, Li X Y, Feng Y L, Zhi L. A comparative study of the plant community of the future water-level-fluctuating zone and the natural water-level-fluctuating zone in the Three-Gorges Reservoir. Journal of Southwest Agricultural University, 2005, 27(5): 684-691.
- [14] Wang Q, Yuan X Z, Liu H, Zhang Y W, Chen Z L, Li B. Effect of initial impoundment on the vegetation and species diversity in water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. Journal of Natural Resources, 2011, 26(10): 1680-1693.

- [15] Liu W W, Yang F, Wang J, Wang Y. Plant species dynamic distribution in the water-level-fluctuating zone of the main stream and bay of the Three Gorges Reservoir. *Plant Science Journal*, 2011, 29(3): 296-306.
- [16] Wang X, Gao X M. Effects of simulated submergence on seed germination of four common annual herbs in the Three Gorges Reservoir Region, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(12): 1404-1413.
- [17] Shen J H, Zeng B, Lei S T, Su X L, Huang W J. 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. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(3): 237-246.
- [18] Lu Z J, Li L F, Huang H D, Tao M, Zhang Q F, Jiang M X. Can the soil seed bank contribute to revegetation of the drawdown zone in the Three Gorges Reservoir Region? *Plant Ecology*, 2010, 209(1): 153-165.
- [19] Nathan R, Muller-Landau H C. Spatial patterns of seed dispersal, their determinants and consequences for recruitment. *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, 15(7): 278-285.
- [20] Franks S J, Sim S, Weis A E. Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climate fluctuation. *Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America*, 2007, 104(4): 1278-1282.
- [21] Grime J P. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *The American Naturalist*, 1977, 111(982): 1169-1194.
- [22] Lytle D A, Poff N L. Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology & Evolution*, 2004, 19(2): 94-100.
- [23] Lytle D A. Disturbance regimes and life-history evolution. *The American Naturalist*, 2001, 157(5): 525-536.
- [24] Wang H F, Zeng B, Li Y, Qiao P, Ye X Q, Luo F L. 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)*, 2008, 32(5): 977-984.
- [25] Gersani M, Brown J S, O'Brien E E, Maina G M, Abramsky Z. Tragedy of the commons as a result of root competition. *Journal of Ecology*, 2001, 89(4): 660-669.
- [26] Kochmer J P, Handel S N. Constraints and competition in the evolution of flowering phenology. *Ecological Monographs*, 1986, 56(4): 303-325.
- [27] Goldberg D E, Turkington R, Olsvig-Whittak L, Dyer A R. Density dependence in an annual plant community: variation among life history stages. *Ecological Monographs*, 2001, 71(3): 423-446.
- 参考文献:**
- [10] 苏晓磊, 曾波, 乔普, 阿依巧丽, 黄文军. 冬季水淹对秋华柳的开花物候及繁殖分配的影响. *生态学报*, 2010, 30(10): 2585-2592.
- [11] 王勇, 刘义飞, 刘松柏, 黄宏文. 三峡库区消涨带植被重建. *植物学通报*, 2005, 22(5): 513-522.
- [12] 江明喜, 蔡庆华. 长江三峡地区干流河岸植物群落的初步研究. *水生生物学报*, 2000, 24(5): 458-463.
- [13] 白宝伟, 王海洋, 李先源, 冯义龙, 智丽. 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.
- [14] 王强, 袁兴中, 刘红, 张跃伟, 陈忠礼, 李波. 三峡水库初期蓄水对消落带植被及物种多样性的影响. *自然资源学报*, 2011, 26(10): 1680-1693.
- [15] 刘维暉, 杨帆, 王杰, 王勇. 三峡水库干流和库湾消落区植被物种动态分布研究. *武汉植物学研究*, 2011, 29(3): 296-306.
- [16] 王欣, 高贤明. 模拟水淹对三峡库区常见一年生草本植物种子萌发的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(12): 1404-1413.
- [17] 申建红, 曾波, 类淑桐, 苏晓磊, 黄文军. 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. *植物生态学报*, 2011, 35(3): 237-246.
- [18] 卢志军, 李连发, 黄汉东, 陶敏, 张全发, 江明喜. 三峡水库蓄水对消涨带植被的初步影响. *武汉植物学研究*, 2010, 28(3): 303-314.
- [24] 王海锋, 曾波, 李娅, 乔普, 叶小齐, 罗芳丽. 长期完全水淹对 4 种三峡库区岸生植物存活及恢复生长的影响. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 977-984.