

# 三峡水库消落区植物群落结构及其季节性变化规律

张志永<sup>1</sup>, 胡晓红<sup>2</sup>, 向林<sup>3</sup>, 邹曦<sup>1</sup>, 史方<sup>1</sup>, 李怡<sup>1</sup>, 胡莲<sup>1</sup>

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北武汉 430079;

2. 长江水利委员会河湖保护与建安中心, 湖北武汉 430010;

3. 华中农业大学园艺林学学院, 湖北武汉 430070)

**摘要:**为探究三峡水库消落区出露期间植物群落结构的季节性变化规律,于2017年4、6和8月,设置了15个调查样地,根据高程将消落区分为145~155 m、155~165 m和165~175 m共3个区域,并设置未水淹区域(高程175~185 m)为对照。结果表明,消落区出露时间显著影响植物群落组成,随着出露时间的延长,群落优势种及其优势度变化规律因植物的生活型不同呈现出相反的变化规律。从4月至8月,优势植物狗牙根、牛鞭草、喜旱莲子草等多年生草本植物优势度下降,鬼针草、苍耳、醴肠、水蓼、野胡萝卜、狗尾草等一年生草本植物优势度增加;而未水淹区植物优势种及其优势度变化不会因生活型不同而表现出不同的规律,不同采样地点的植物群落优势种差异较大,相对来说艾蒿较为优势,其次为小飞蓬。高程也是影响植物群落特征的主要因子,植物群落 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Simpson 指数、植物高度均值显著低于未水淹区域;随着高程的增加,生物多样性指数及植物高度均值呈增加趋势。植物内在的适应机制,包括植物本身的冬季耐水淹能力、夏季抗旱能力、抗病虫害能力及其繁殖对策、种源扩散对策等是影响植物群落分布的主因;而外界环境条件,包括消落区土层厚度、地形坡度、土壤基质氮磷等营养盐以及受水淹持续时间、水淹深度、高程、消落区出露时间等是其主要驱动因子。

**关键词:**三峡水库;消落区;植物群落;优势种;适应机制

**中图分类号:**Q948 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)06-0037-09

为了满足防洪、发电、供水和航运需要,已在众多河流上修建了7万多座大坝,分布在150多个国家,数量还在继续增加。在水资源梯级开发利用的同时,流域生态系统的保护面临着较大压力,对生物多样性和生境异质性的累积影响逐渐凸显,其中水库消落区的生态环境问题引起了广泛关注(Nilsson & Berggren, 2000; New & Xie, 2008)。消落区又称为水位涨落带、涨落区、消涨带、消落带等,由于人为控制或自然降雨在时间尺度上的不均匀性,导致江河湖泊水位会发生季节性波动,介于最高水位线与最低水位线之间的土地区域,具有交替淹没和出露特点(张志永等, 2013; 吕明权等, 2015)。

与其它水库相比,三峡水库水位涨落幅度大(达30 m),逆自然枯洪变化(冬涨夏落),在库周形成了面积超过300 km<sup>2</sup>的消落区。消落区淹没时间长,

高程150、160、170 m区域平均受水淹时间分别为271、213、94 d(据2008-2015年中国长江三峡集团公司网站水情信息统计)。随着三峡水库消落区的逐步形成,国家有关部门及地方政府高度重视消落区的生态环境问题,在水库库容和消落区土地资源管理、科学研究及工程治理等方面开展了一系列工作,主要涉及消落区现状调查、耐水淹植物选择、控制农业面源污染和生态恢复重建等方面,应用比较广泛的生态工程包括基塘工程、林泽工程、生态浮床工程等,为我国消落区的生态修复技术研究做出了巨大贡献(袁兴中等, 2012; 李波等, 2015; 吕明权等, 2015)。由于消落区生态恢复的基础理论研究还不够深入,生态恢复技术及其模式也不成熟;而三峡水库消落区湿地生态系统尚处于发育期,土壤生境及植物群落的演变趋势不甚清楚。

已有研究表明,三峡水库试验性蓄水期间,植物群落以草本植物为主(中国工程院三峡工程试验性蓄水阶段评估项目组, 2014; 程莅登等, 2019; 郭燕等, 2019)。至2017年,消落区植被已经历了8个周期的水淹-出露,植物群落组成及其分布特征有可能发生了新的变化。因此,本项目组于2017年开展植物群落特征调查,分析了消落区植物群落的季节性

收稿日期:2019-11-13

基金项目:国家重大研发计划(2016YFC0502208);国家自然科学基金面上项目(51679154);重庆市技术创新与应用示范项目(cstc2018jszx-zdyfmxX0021)。

作者简介:张志永,1979年生,男,副研究员,主要从事植物生态学。E-mail: zhangzy@mail.ihe.ac.cn

通信作者:胡莲。E-mail: hulian@mail.ihe.ac.cn

变化规律,从影响消落区植物生存生长的内在适应机制和外界环境因子,分析了目前三峡水库消落区的植物群落分布特征,旨在为大型水库消落区的生态恢复技术及理论研究提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与分析

依据三峡水库消落区的空间分布特点、土壤类型、消落区形成前土地利用类型,设置江津区珞璜镇段(S1)、渝北区珞璜镇段(S3)、涪陵区南沱镇段(S5)、忠县石宝寨段(S6)、万州新田镇段(S7)、云阳双江镇段(S8)、巫山巫峡镇段(S12)、秭归水田坝乡段(S14)共计8个干流监测点;同时设置乌江白涛镇段(S4)、御临河复盛镇段(S2)、小江黄石镇段(S9)、高阳镇段(S10)和养鹿乡段(S11)、大宁河双龙乡段

(S13)、香溪河峡口镇段(S15)共计7个支流监测点(图1)。

于2017年4、6和8月开展消落区植物群落特征调查。在每个监测点设置淹没区(即消落区)、未水淹区(高程175~185 m)。根据高程将消落区分为145~155 m、155~165 m和165~175 m共3个区域。每个区域设置3个1 m×1 m的样方,间距10 m,现场测量样方内每种植物的高度和盖度,然后收割地上部分,测定生物量。由于自然水位原因,在江津珞璜镇监测到2个高程区域,在渝北区珞璜镇、涪陵区南沱镇、御临河和乌江监测调3个高程区域,其余监测点均为4个高程区域,合计调查植物样方174个。野外调查时不能直接识别的,制作标本,编号保存,待野外工作结束后进行室内鉴定,统计调查到的植物生活型(彭镇华,2005)。

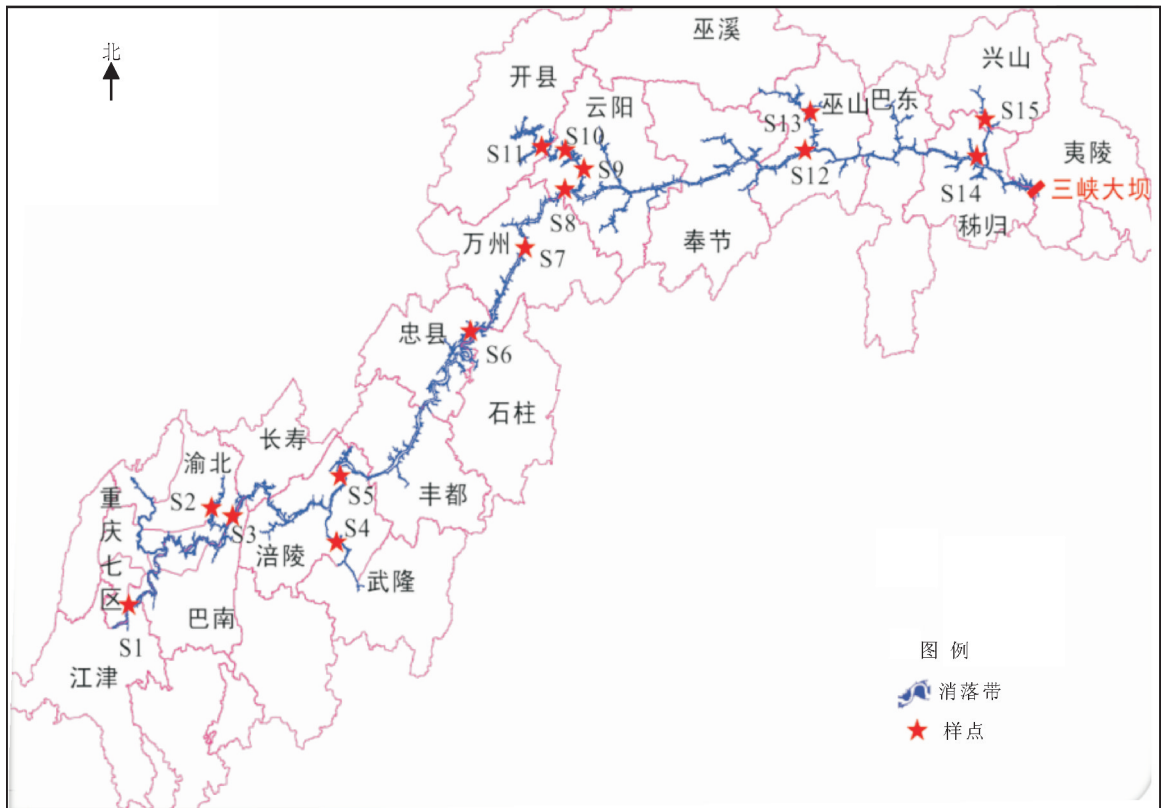


图1 消落区植物群落调查站点

Fig.1 Plant community monitoring sites in the water level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir

### 1.2 数据处理

重要值(Importance value, IV)由 Crutis & McIntosh(1951)研究森林群落时首先提出,研究草本植物重要值时多采用此公式(Li et al, 2012; Zhang et al, 2012):

(1)重要值=(相对盖度+相对高度)/2。

(2)相对盖度=(某一植物种的盖度/样方内所

有植物种的盖度之和)×100%。

(3)相对高度=(某一植物种的高度/样方内所有植物种的高度之和)×100%。

(4)优势度表征一个物种在群落中的地位与作用: $Y_i = P_i \times f_i$ 。式中: $P_i = N_i / N$ ;  $N_i$  为物种  $i$  的重要值;  $N$  为样方内所有物种重要值之和,  $f_i$  为物种  $i$  在各个采样点出现的频率。

(5) Shannon-Wiener 多样性指数假设在无限大的群落中对个体随机取样, 而且样本包含了群落中所有的物种和个体出现的机会, 计算公式为:  $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$ 。式中:  $S$  为样方内的物种数。

(6) Margalef 指数表征生物的丰富度, 仅考虑群落的物种数量和总个体数以及一定大小的样本中的物种数量, 计算公式为:  $D = (S - 1) / \ln N$ 。

(7) Pielou 均匀度指数表征生物组成的均匀程度, 假设对无限大的群落随机取样, 样本中两个不同种个体相遇的概率, 计算公式为:  $E = H' / \ln S$ 。

(8) Simpson 指数假设对无限大的群落随机取样, 样本中两个不同种个体相遇的概率可认为是一种多样性的测度, 计算公式为:  $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$ 。

利用 SPSS 18.0 非参数检验中的 Kruskal-Wallis H 方法检验高程之间和坡度等级之间植物鲜重、高度、盖度、多样性指数的差异显著性; 若差异显著, 选用 Dunnett 法进行多重比较, 显著水平取 0.05 (王强等, 2012); 选用 OriginPro 9.0 软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 消落区植物优势种及其优势度的时空变化

三峡水库消落区出露期间, 随着出露时间的延长, 消落区优势种及其优势度变化因植物的生活型不同呈现出相反的变化规律。从 4 月至 8 月, 狗牙根 (*Cynodon dactylon*)、牛鞭草 (*Hemarthria altissima*)、喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 等多年生草本植物优势度下降, 鬼针草 (*Bidens pilosa*)、苍耳 (*Xanthium sibiricum*)、醴肠 (*Eclipta prostrata*)、水蓼 (*Polygonum hydropiper*)、野胡萝卜 (*Daucus carota*)、狗尾草 (*Setaria viridis*) 等一年生草本植物优势度增加。未水淹区植物优势种及其优势度变化不会因生活型不同而表现出不同的规律, 其中多年生草本植物柔枝秀竹 (*Microstegium vimineum*) (复盛镇段)、乌菘莓 (*Cayratia japonica*) (巫峡镇段) 的优势度呈增加趋势, 多年生草本植物牛鞭草 (石宝寨段)、问荆 (*Equisetum arvense*) (珞璜镇段)、葎草 (*Galium bungei*) (南沱段) 却呈下降趋势; 一年生草本植物鬼针草 (白涛镇段、南沱段)、艾蒿 (*Artemisia argyi*) (白涛镇段)、苍耳 (南沱段)、狗尾草 (南沱段、水田坝乡段) 的优势度呈增加趋势, 而苘草 (*Arthraxon hispidus*) (石宝段) 的优

势度呈下降趋势。

不同高程区域消落区的植物群落优势种存在一定的差异 (表 1)。以 6 月为例 (消落区已完全出露), 高程 145~155 m 区域的 11 个样带中, 狗牙根优势最为明显 (11 个); 其次为苍耳、香附 (*Cyperus rotundus*)、鬼针草和稗 (*Echinochloa crusgalli* var. *mitis*), 分别在 8、6、5、5 个样带中均为优势种。高程 155~165 m 区域的 14 个样带中, 狗牙根的优势最为明显 (14 个), 其次为苍耳 (11) 和香附 (5 个)。高程 165~175 m 区域的 15 个样带中, 狗牙根的优势也很明显, 在 12 个样带中为优势种, 其次是苍耳 (9 个)、鬼针草 (8 个)、稗 (6 个)。未水淹区 (高程 176~185 m) 的 15 个样带中, 不同地点的植物群落优势种差异较大, 相对来说艾蒿较为优势, 在 5 个样带中均为优势种, 其次为小飞蓬 (*Comynza canadensis*) (4 个)。

### 2.2 消落区植物鲜重、盖度及高度的时空变化

4 月, 消落区植物鲜重和盖度均值高于未水淹区, 消落区高程 156~165 m 区域植物鲜重均值 ( $321.9 \pm 194.5$ ) g/m<sup>2</sup> 高于 166~175 m 区域的鲜重 ( $282.6 \pm 149.9$ ) g/m<sup>2</sup>, 但不同高程区域植物鲜重差异不显著 (图 2-a)。155~165 m 区域植物盖度与 166~175 m 区域相近 (图 2-b)。消落区植物高度均值显著低于未水淹区域 ( $F = 13.278, P = 0.000$ )。

6 月, 消落区植物鲜重和盖度均值高于未水淹区, 高程 155~165 m 的植物鲜重均值 ( $1\ 266.7 \pm 1219.9$ ) g/m<sup>2</sup> 与 165~175 m 区域鲜重均值 ( $1\ 263.2 \pm 1\ 503.6$ ) g/m<sup>2</sup> 相近, 但显著高于 145~155 m 区域的鲜重均值 ( $426.8 \pm 300.8$ ) g/m<sup>2</sup> ( $F = 5.822, P = 0.001$ )。高程 155~165 m 区域植物盖度均值显著高于 145~155 m 区域和未水淹区域 ( $F = 5.926, P = 0.001$ )。消落区植物高度均值显著低于未水淹区域 ( $F = 9.751, P = 0.001$ ); 随着高程的增加, 植物高度均值呈增加趋势 (图 2)。

8 月, 消落区植物鲜重和盖度均值高于未水淹区。消落区高程 145~155 m、155~165 m、165~175 m 区域植物鲜重均值 ( $F = 10.078, P = 0.000$ ) 和盖度均值 ( $F = 5.887, P = 0.001$ ) 都高于未水淹区域, 其中 155~165 m 区域植物鲜重均值最大, 为 ( $1\ 519.8 \pm 1\ 002.5$ ) g/m<sup>2</sup>, 未水淹区域最低, 仅 ( $514.9 \pm 282.1$ ) g/m<sup>2</sup>。随着高程的不断增高, 植物盖度呈下降趋势, 145~155 m 区域植物盖度均值最

表1 不同高程区域植物优势种(优势度)

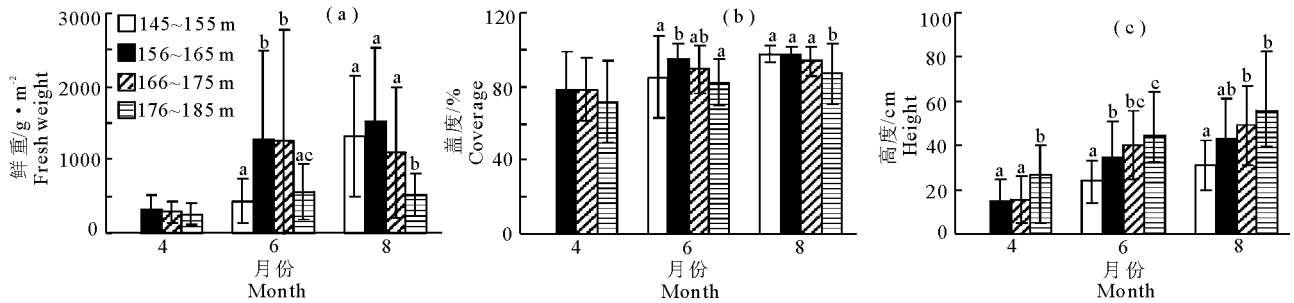
Tab.1 Dominant species and their corresponding dominance values by sampling site and elevation

地点	不同高程范围的植物优势种(优势度)			
	145~155 m	155~165 m	165~175 m	175~185 m
珞璜镇	-	-	紫萁(0.30),艾蒿(0.11),构树(0.07),荇草(0.05),野胡萝卜(0.05),紫茎泽兰(0.04)	艾蒿(0.23),紫萁(0.09),白茅(0.08),香附(0.05),野胡萝卜(0.05),菵草(0.05),地果(0.04),牛鞭草(0.03)
复盛镇段	-	狗牙根(0.78),香附(0.15)	菵草(0.42),水花生(0.22),牛鞭草(0.11),香附(0.04),芦苇(0.03)	柔枝莠竹(0.82),爬山虎(0.06),风轮菜(0.04)
珞璜镇	-	狗牙根(0.58),牛鞭草(0.34),鬼针草(0.03)	水花生(0.38),牛鞭草(0.37),芦苇(0.09)	草木樨(0.58),狗牙根(0.13),牛鞭草(0.05)
白涛镇	-	狗牙根(0.51),苍耳(0.16),鬼针草(0.09),水蓼(0.05),水花生(0.07)	狗牙根(0.33),稗(0.26),鬼针草(0.10),酢浆草(0.04),水蓼(0.03),苍耳(0.03)	狗牙根(0.31),鬼针草(0.12),稗(0.09),黄花蒿(0.07),问荆(0.02),苘麻(0.02),苍耳(0.04)
南沱镇	狗牙根(0.56),水蓼(0.11),苍耳(0.07),鬼针草(0.05),水花生(0.04),稗(0.03)	狗牙根(0.35),苍耳(0.18),稗(0.11),鬼针草(0.14),醴肠(0.05),苘麻(0.04),马唐(0.03)	狗牙根(0.13),鬼针草(0.12),水花生(0.15),狗尾草(0.09),稗(0.08),苍耳(0.06),牛鞭草(0.03),水蓼(0.02)	火炭母(0.14),菵草(0.08),狗牙根(0.05),马兰(0.04),柔枝莠竹(0.04),狸尾豆(0.05),荇草(0.03),接骨草(0.03)
石宝寨镇	狗牙根(0.59),苍耳(0.09),稗(0.08),鬼针草(0.05)	狗牙根(0.40),苍耳(0.12),鬼针草(0.11),水花生(0.08),稗(0.05),草木樨(0.03),碎米莎草(0.03)	狗牙根(0.41),苍耳(0.17),水花生(0.10),草木樨(0.05),鬼针草(0.05)	石芥苎(0.18),柔枝莠竹(0.12),水花生(0.10),牛鞭草(0.03),荇草(0.03),苍耳(0.02),艾蒿(0.02)
新田镇	狗牙根(0.73),苍耳(0.03),稗(0.03)	狗牙根(0.44),荔枝草(0.09),苍耳(0.08),稗(0.05),鬼针草(0.03),水花生(0.03),醴肠(0.03),碎米莎草(0.03)	狗牙根(0.22),苍耳(0.18),牛鞭草(0.16),小飞蓬(0.04),水花生(0.04),荔枝草(0.03)	荇草(0.40),艾蒿(0.05),鳞毛蕨(0.05),荔枝草(0.03),刺槐(0.03),接骨草(0.03)
双江镇	狗牙根(0.86),稗(0.03)	狗牙根(0.62),香附(0.27),水花生(0.02)	狗牙根(0.26),野胡萝卜(0.23),鬼针草(0.13),稗(0.08),水蓼(0.03),草木樨(0.06),桑(0.03)	白茅(0.14),艾蒿(0.18),柔枝莠竹(0.09),香附(0.08),黄荆(0.04),狸尾豆(0.03),金丝桃(0.02)
黄石镇	狗牙根(0.71),稗(0.03),苘麻(0.07),苍耳(0.05)	狗牙根(0.40),铁苋菜(0.03),草木樨(0.10),狗尾草(0.08),野胡萝卜(0.02),苍耳(0.04),马唐(0.03),龙葵(0.02)	苍耳(0.22),狗牙根(0.11),草木樨(0.09),稗(0.08),野胡萝卜(0.07),黄花蒿(0.04),扬子毛茛(0.03),石芥苎(0.03),香附(0.02)	马兰(0.15),白茅(0.14),香附(0.08),狸尾豆(0.08),艾蒿(0.05)
养鹿乡	狗牙根(0.61),苍耳(0.06),鬼针草(0.03),香附(0.06)	狗牙根(0.43),香附(0.24),苍耳(0.05),水花生(0.04)	狗牙根(0.31),苍耳(0.21),稗(0.13),水蓼(0.09),草木樨(0.09),野胡萝卜(0.06),鬼针草(0.04),水花生(0.02)	狗尾草(0.19),野胡萝卜(0.18),鬼针草(0.12),稗(0.05),白茅(0.04),小飞蓬(0.04)
巫峡镇	狗牙根(0.63),香附(0.16),苍耳(0.02)	狗牙根(0.71),苍耳(0.10),狗尾草(0.04)	狗牙根(0.35),苍耳(0.12),野胡萝卜(0.07),草木樨(0.06),狗尾草(0.06),鬼针草(0.05)	白茅(0.50),盐肤木(0.13),地果(0.07),悬钩子(0.02)
双龙镇	狗牙根(0.71),苍耳(0.18),香附(0.03)	狗牙根(0.44),苍耳(0.33),香附(0.11),打碗花(0.02)	狗牙根(0.57),鬼针草(0.10),苍耳(0.10),香附(0.02)	盐肤木(0.30),牡荆(0.20),荇草(0.05),茅莓(0.05)
水田坝乡	狗牙根(0.54),香附(0.46)	狗牙根(0.33),苍耳(0.16),鬼针草(0.07),草木樨(0.05),菵草(0.05),狗尾草(0.04)	菵草(0.26),苍耳(0.13),狗尾草(0.13),马唐(0.07),鬼针草(0.06),狗牙根(0.03)	狗尾草(0.24),菵草(0.24),鬼针草(0.08),小飞蓬(0.07),草木樨(0.03),野胡萝卜(0.02),狗牙根(0.02)
峡口镇	狗牙根(0.55),香附(0.25),鬼针草(0.12)	狗牙根(0.36),苍耳(0.20),水蓼(0.12),草木樨(0.06),菟丝子(0.03),菵草(0.03)	狗牙根(0.19),狸尾豆(0.16),水蓼(0.13),草木樨(0.06),苍耳(0.03),稗(0.11)	白车轴草(0.29),小飞蓬(0.27),艾蒿(0.03),狗尾草(0.03),细叶旱芹(0.02)



大, 为 $(97.5 \pm 4.5)\%$ , 未水淹区域最低, 为 $(86.9 \pm 16.3)\%$ 。消落区植物高度均值显著低于未水淹区

域( $F=6.381, P=0.001$ )。随着高程的增加, 植物高度均值呈增加趋势(图 2-c)。



(不同小写字母表示 0.05 水平差异显著)

图 2 植物鲜重(a)、盖度(b)和高度(c)随高程的变化

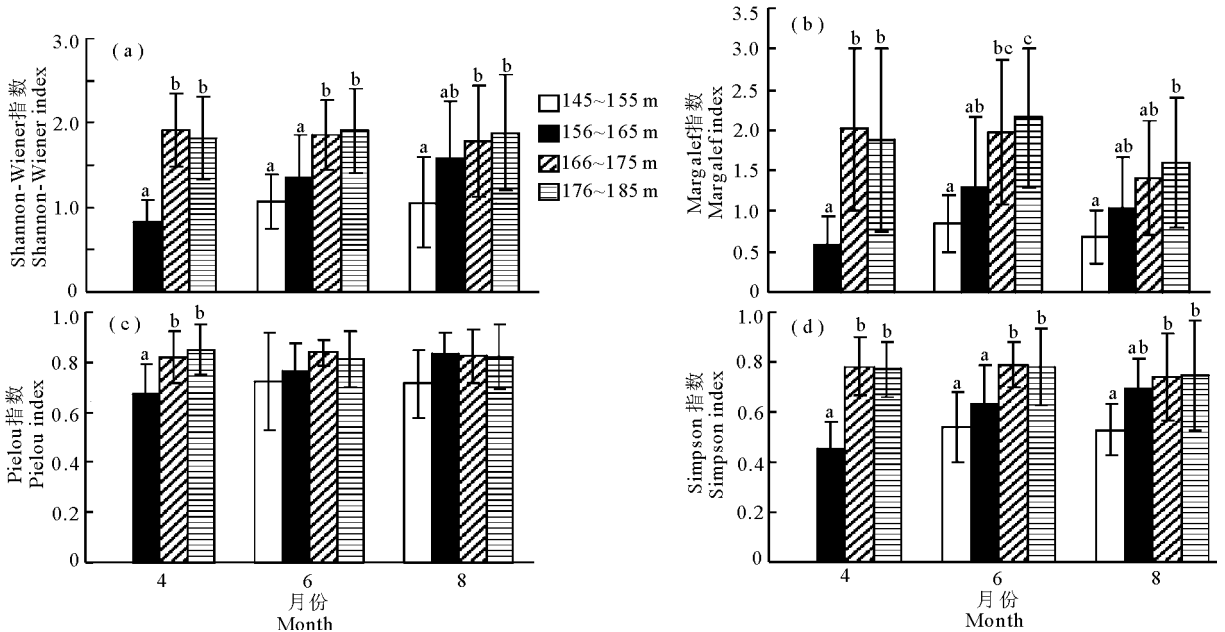
(Different small letters indicate significant difference at the level of 0.05)

Fig.2 Changes in vegetation fresh weight (a), total coverage (b) and height (c) with increasing elevation

### 2.3 消落区植物群落多样性指数的时空变化

4 月, 消落区高程 165~175 m 植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数为 $(1.91 \pm 0.42)$  ( $F=26.546, P=0.000$ ), Margalef 指数为 $(2.01 \pm 0.99)$  ( $F=9.262, P=0.001$ ), Pielou 均匀度指数为 $(0.82 \pm 0.011)$  ( $F=8.957, P=0.001$ ), Simpson 指数为 $(0.78 \pm 0.11)$  ( $F=33.266, P=0.000$ ) 显著高于 155~165 m 区域。未水淹区域植物群落 3 种指数均值高于高程 155~165 m 区域, 但低于 166~175 m 的区域(图 3)。

6 月, 植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 指数随着高程的上升呈递增趋势。未水淹区域 Shannon-Wiener 多样性指数 $(1.90 \pm 0.49)$  ( $F=10.212, P=0.000$ ) 和 Margalef 指数 $(2.16 \pm 0.85)$  ( $F=7.115, P=0.000$ ) 最高, 显著高于 145~155 m 和 155~165 m 区域。未水淹区域 Simpson 指数均值( $F=9.516, P=0.000$ ) 与消落区高程 165~175 m 区域相近, 但显著高于 145~155 m 和 156~165 m 的区域(图 3)。



(不同小写字母表示 0.05 水平差异显著)

图 3 生物多样性指数随高程变化

(Different small letters indicate significant difference at the level of 0.05)

Fig.3 Changes in the biodiversity index of the plant community with increasing elevation

8月,植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 指数、Simpson 指数随着高程的上升呈递增趋势。未水淹区域 Shannon-Wiener 多样性指数为 $(1.88 \pm 0.68)$  ( $F=3.829, P=0.015$ ), Margalef 指数为 $(1.59 \pm 0.80)$  ( $F=4.778, P=0.005$ ), Simpson 最高 $(0.75 \pm 0.22)$  ( $F=3.321, P=0.029$ ), 显著高于 145~155 m 的区域(图 3)。

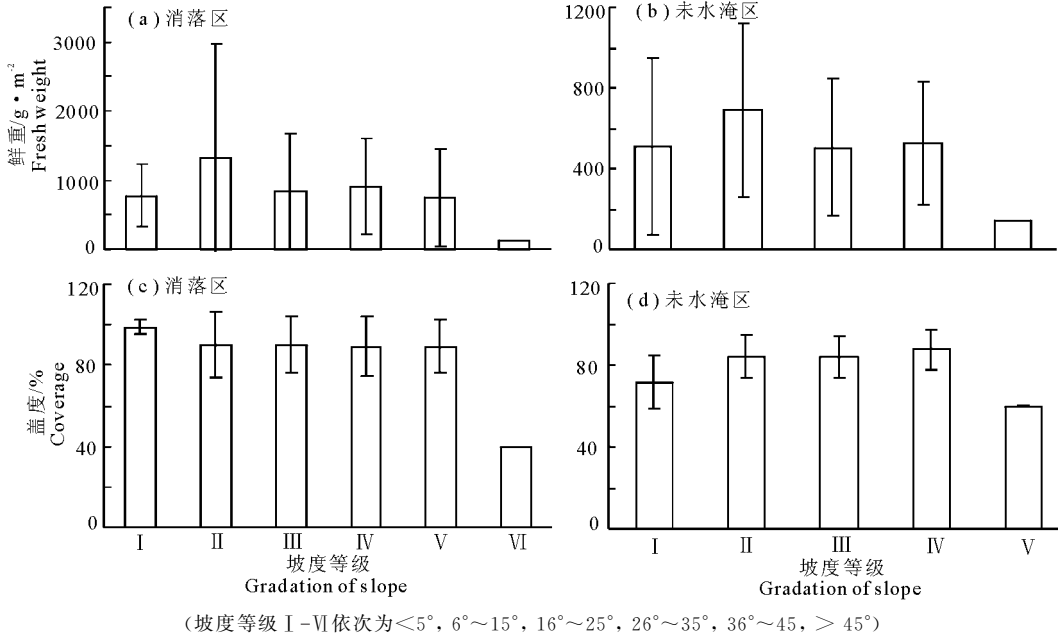


图 4 消落区和未水淹区植物鲜重和盖度随坡度等级的变化

(Slope gradients of I-VI are  $<5^\circ$ ,  $6^\circ-15^\circ$ ,  $16^\circ-25^\circ$ ,  $26^\circ-35^\circ$ ,  $36^\circ-45^\circ$ , and  $>45^\circ$ , respectively)

Fig.4 Changes in vegetation fresh weight and total coverage with increasing slope

### 3 讨论

#### 3.1 影响消落区植物生存生长的内在适应机制

影响消落区植物生存生长的内在机制包括植物本身的冬季耐水淹能力、夏季抗旱能力、抗病虫害能力以及植物的繁殖对策、种源扩散对策等。本研究表明,三峡水库消落区高程 145~155 m 区域,狗牙根占有绝对的优势地位;这与其他学者之前对三峡水库消落区的研究结果相近(刘维擘等,2011;王强等,2012;张志永等,2013)。究其原因,在水淹期间,狗牙根的根部通气组织发生(Abiko et al,2012),根系生物量增加(洪明等,2011),根系仍能维持活力,消落区出露后能很快萌发;其次,狗牙根也是高度耐旱的多年生草本植物;另外,狗牙根的茎节之间一旦遇到土壤,能够萌发根系,使其拥有众多的细根。狗牙根和牛鞭草的克隆繁殖策略也有助于抵御水淹胁迫,退水后能够迅速占领生态位,在种间竞争中具有优势(由永飞等,2017)。本研究还显示,一年生草本

#### 2.4 消落区不同坡度植物群落特征比较

本次调查结果表明,样地坡度影响着植物群落结构特征,消落区高程范围内以及未水淹区  $6^\circ-5^\circ$  区域的植物鲜重均值最高, $>45^\circ$  区域最低。消落区  $0^\circ-5^\circ$  区域植物盖度均值最大, $>45^\circ$  区域最低。未水淹区  $36^\circ-45^\circ$  区域植物盖度均值最大, $>45^\circ$  区域最低(图 4)。

植物苍耳、鬼针草、稗、醴肠、水蓼和狗尾草也是消落区常见的优势物种(表 1)。其主要原因是 9 月水库蓄水前种子能够完全成熟,种子数量多,且水淹期间,大多数种子没有失去活力,水位消退后能够萌芽和生长迅速,在种间竞争中具有优势;另外,这些植物的种子体积小,三峡水库冬季高水位运行时,有些种子滞留原地或植株周围,有些种子随水流流到下游,沉降到某个位置,消落区出露时,这些种子可以萌发成新的植株,逐渐生长发育,并在 9 月前结实。吴阳等(2017)在香溪河的研究也证实了水蓼、狗尾草、酸模均能借助于风力和水力传播,是消落区土壤种子库重要来源。

在三峡水库实施的消落区生态恢复过程中,采用狗牙根的试点区域长势都非常好,而部分试点区域选择栽植竹柳,如涪陵南沱镇、忠县石宝寨,大都干枯死亡,景观效果都不太理想,很可能原因是竹柳虽然具有一定的耐水淹能力,但不耐干旱,而三峡区域 7-8 月期间干旱现象经常发生,竹柳易遭虫害

侵袭也是一方面的原因。在忠县、万州区、开州区栽植的中华蚊母和秋华柳虽然能够存活,但长势都不太好,其原因可能是对于灌木来说,生长周期太短,抽出的新枝大部分在受淹期间容易失去活力。

### 3.2 影响消落区植物生存生长的外界环境因子

水位波动节律是塑造库区消落带植物群落结构的重要因素,水淹持续时间显著影响着消落区植物群落特征。不同高程区域受水淹时长差异明显,低高程区域受淹时间较长,2011-2015年,高程150 m区域水淹时长平均278 d,高程170 m区域受水淹时长平均为116 d,导致不同高程区域植物群落种类组成、数量特征差异明显。本次研究表明,较低高程区域植物群落以耐水淹的草本植物为主,随着高程的增加,Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Simpson 指数、植物高度均值呈增加趋势。程莅登等(2019)认为水淹时长是不同高程区域植物群落分布及多样性差异的主要原因;由永飞等(2017)也认为不同高程区域优势种的差异是植物对水库水位调节模式适应性策略的体现。

消落区出露时间显著影响着植物群落优势种的组成。本次研究表明,随着出露时间的延长,群落优势种及其优势度变化因植物的生活型不同呈现出相反的变化规律。1-5月为三峡水库水位下降期,消落区逐渐出露。由于多年生早本植物(狗牙根、牛鞭草等)具有高度耐淹能力和克隆繁殖特性,在植物群落中占有绝对优势(张想英等,2010);一年生草本植物种子(鬼针草、苍耳等)也逐渐萌发成新的植株。6-9月为水库低水位运行期,消落区完全出露。由于多年生草本植物生长空间相对固定,而一年生草本植物占有的空间比较随机,为了与多年生草本植物竞争生存空间和阳光,种子一旦萌发,高度和生物量快速增长,从而导致消落区出露期间狗牙根、牛鞭草、喜旱莲子草等多年生草本植物优势度下降,鬼针草、苍耳、醴肠、水蓼、野胡萝卜、狗尾草等一年生草本植物优势度增加。

消落区土壤基质的理化特性(包括土层厚度、地形坡度、土壤基质氮磷等营养盐)也影响着植被的生存生长。消落区土壤的有无,直接决定着植物是否存在,而土壤氮磷等营养盐含量决定着植被覆盖度和生物量的大小。在三峡库区,裸露的陡坡岩质也很常见,既无土壤,也无植被覆盖,在岩石缝隙中零星分布有少量的草本植物。陡坡土质消落区塌方现象常见,植被常呈斑块化分布。由于该处土壤长期受涌浪侵蚀,土层将越来越薄,植被将失去赖以生存

生长的基质。三峡水库消落区土壤侵蚀模数大,是库区平均土壤侵蚀模数 $3\ 185\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的30倍(中国工程院三峡工程试验性蓄水阶段评估项目组,2014)。消落区坡度越大,土层厚度越小,植被盖度和生物量越低(张志永等,2013)。因此,在实施消落区生态恢复工程试点时,建议采取必要的保水保土措施。关于土壤营养盐成分对植被特征的影响,不同研究区域的结果不尽相同,新疆白杨河-艾里克湖有机质对河岸带植被特征的影响显著(张江英等,2007);黑河土壤含水率、有机质和全氮对其河岸带植被的影响显著(许莎莎等,2011);昆仑山北坡策勒河土壤pH、有机质和土壤含水率对河岸带植被的影响显著(桂东伟等,2010)。

综上,三峡水库消落区植物群落特征受到植物内在的适应机制和外界的环境条件等多种因素影响。随着三峡水库的正常运行,消落区不同高程区域土壤受水淹和洪水冲刷的时间长短不同,植物群落特征及土壤理化性质的差异将逐步显现。为了正确理解和预测大型水库运行对植被及生境特征的累积影响,需要长时间序列的监测。实施消落区生态恢复工程时,可优先选择具有较强耐水淹能力、抗干旱能力、低枯落物多年生植物如狗牙根、牛鞭草等,既能减少二次播种或栽植成本,又能降低受淹死亡分解导致的二次污染;也可在坑塘分布较多处实施基塘工程,选择高经济价值、兼顾景观效果的植物,既有生态效益,又有经济效益。

### 参考文献

- 程莅登,邓洪平,何松,等,2019. 长江重庆段消落区植物群落分布格局与多样性[J]. 生态学杂志,38(12):3626-3634.
- 桂东伟,雷加强,曾凡江,等,2010. 中昆仑山北坡策勒河流域生态因素对植物群落的影响[J]. 草业学报,19(3):38-46.
- 郭燕,杨邵,沈雅飞,等,2019. 三峡水库消落带现存植物自然分布特征与群落物种多样性研究[J]. 生态学报,39(12):4255-4265.
- 洪明,郭泉水,聂必红,等,2011. 三峡库区消落带狗牙根种群对水陆生境变化的响应[J]. 应用生态学报,22(11):2829-2835.
- 李波,袁兴中,杜春兰,等,2015. 池杉在三峡水库消落带生态修复中的适应性[J]. 环境科学研究,28(10):1578-1585.
- 刘维璋,杨帆,王杰,等,2011. 三峡水库干流和库湾消落带植被物种动态分布研究[J]. 植物科学学报,29(3):296-306.

- 吕明权,吴胜军,陈春娣,等,2015. 基于文献计量视角的三峡消落带生态系统研究进展[J]. 生态学报, 35(11): 1-22.
- 彭镇华,2005. 中国长江三峡植物大全[M]. 北京:科学出版社.
- 王强,刘红,张跃伟,等,2012. 三峡水库蓄水后典型消落带植物群落时空动态-以开县白夹溪为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 29(3): 66-69.
- 吴阳,陈芳清,吕坤,等,2017. 香溪河消落带种子二次传播特征及其对土壤种子库的作用[J]. 应用与环境生物学报, 23(6): 1096-1102.
- 许莎莎,孙国钧,刘慧明,等,2011. 黑河河岸带植被与环境因子间的相互作用[J]. 生态学报, 31(9): 2421-2429.
- 由永飞,杨春华,雷波,等,2017. 水位调节对三峡水库消落带植被群落特征的影响[J]. 应用与环境生物学报, 23(6): 1103-1109.
- 袁兴中,熊森,刘红,等,2012. 水位变动下的消落带湿地生态工程——以三峡水库白夹溪为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 29(3): 24-26.
- 张江英,周华荣,高梅,2007. 白杨河-艾里克湖湿地及周边植物群落与环境因子的关系[J]. 干旱区地理, 30(1): 101-107.
- 张想英,樊大勇,谢宗强,等,2010. 克隆整合有助于狗牙根抵御水淹[J]. 植物生态学报, 34(9): 1075-1083.
- 张志永,万成炎,郑志伟,等,2013. 三峡水库小江消落带生境异质性对植物群落影响[J]. 长江流域资源与环境, 22(11): 1507-1513.
- 中国工程院三峡工程试验性蓄水阶段评估项目组,2014. 三峡工程试验性蓄水阶段评估报告[R]. 北京:中国水利水电出版社:197-198.
- Abiko T, Kotual L, Shiono K, 2012. Enhanced formation of aerenchyma and induction of a barrier to radial oxygen loss in adventitious roots of *Zea nicaraguensis* contribute to its waterlogging tolerance as compared with maize (*Zea mays*) [J]. Plant, Cell and Environment, 35: 1618-1630.
- Li J P, Dong S K, Yang Z F, et al, 2012. Effects of cascade hydropower dams on the structure and distribution of riparian and upland vegetation along the middle-lower Lancang-Mekong River [J]. Forest Ecology and Management, 284: 251-259.
- New T, Xie Z Q, 2008. Impacts of large dams on riparian vegetation: applying global experience to the case of China's Three Gorges Dam [J]. Biodiversity and Conservation, 17: 3149-3163.
- Nilsson C, Berggren K, 2000. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation [J]. BioScience, 50(9): 783-792.
- Zhang J T, Xiang C L, Li M, 2012. Effects of Tourism and Topography on Vegetation Diversity in the Subalpine Meadows of the Dongling Mountains of Beijing, China [J]. Environmental Management, 49: 403-411.

(责任编辑 万月华)



## Plant Community Structure and Seasonal Variation in the Water Level Fluctuation Zone of Three Gorges Reservoir

ZHANG Zhi-yong<sup>1</sup>, HU Xiao-hong<sup>2</sup>, XIANG Lin<sup>3</sup>, ZOU Xi<sup>1</sup>, SHI Fang<sup>1</sup>, LI Yi<sup>1</sup>, HU Lian<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R.China;

2.River and Lake Protection and Construction Safety Center Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China

3.College of Horticulture and Forestry Science of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, P.R.China)

**Abstract:** The ecological problems in the water level fluctuation zone (WLFZ) of Three George Reservoir have attracted much attention in relevant departments of both the national and local government. As of 2017, the vegetation in the WLFZ had undergone eight wet-dry cycles. The objectives of this study were to characterize seasonal variation of the WLFZ plant community and to analyze the internal adaptive mechanisms and external environmental factors affecting plant growth. Our study will provide data to support ecological restoration and advance the WLFZ theory of large-scale reservoirs. In April, June and August 2017, samples were collected from a total of 174 plots from 15 sites along three WLFZ elevation gradients (145 – 155 m, 155 – 165 m, 165 – 175 m), and within an un-flooded area (175 – 185 m), set as the control. The height, coverage and the above ground biomass of the plants were measured in situ. Results show that the dominant species and their dominance in the plant community presented different rules with increased exposure time and were closely related to the different plant life forms. From April to August, dominance by perennial herbs (*Cynodon dactylon*, *Hemarthria altissima* and *Alternanthera philoxeroides*) decreased, while dominance by annual herbs (*Bidens pilosa*, *Xanthium sibiricum*, *Eclipta prostrata*, *Polygonum hydropiper*, *Daucus carota* and *Setaria viridis*) increased. The dominant species composition and their plant community dominance in the un-flooded area did not display any relation with plant life form. The dominant species of plant community in the un-flooded area was obvious different among the different sampling sites, with relative higher dominance by *Artemisia argyi* and *Comnyza canadensis*. Elevation was also a major factor affecting plant community characteristics. The mean value of Shannon Wiener diversity index, Margalef richness index, Simpson index and plant height of the WLFZ plant community increased with elevation and were significantly lower than those in the un-flooded area. The primary internal adaptation mechanisms of WLFZ plants included flood tolerance in winter, drought resistance in summer, resistance to disease and insects, plant propagation strategy and provenance diffusion strategy. The primary external environmental factors affecting the WLFZ plant community were soil depth, terrain slope, nitrogen, phosphorus and other soil nutrients, duration and depth of flooding, elevation and exposure time.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; water level fluctuation zone (WLFZ); plant community; dominant species; adaptive mechanism