

DOI: 10.5846/stxb201912312844

苏琴琴, 俞幸池, 覃红玲, 谢姣姣, 荆书芳, 林锋, 苏晓磊, 阿依巧丽, 曾波, 张小萍. 三峡水库消落区不同生活史类型植物群落的空间分布格局. 生态学报, 2020, 40(13): 4507-4515.

Su Q Q, Yu X C, Qin H L, Xie J J, Jing S F, Lin F, Su X L, Ayi Q L, Zeng B, Zhang X P. Spatial distribution of plant communities composed of different life history species in the water-level-fluctuating-zone of Three Gorges Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4507-4515.

三峡水库消落区不同生活史类型植物群落的空间分布格局

苏琴琴, 俞幸池, 覃红玲, 谢姣姣, 荆书芳, 林 锋, 苏晓磊, 阿依巧丽, 曾 波, 张小萍*

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:为探究三峡水库消落区不同生活史植物群落随海拔梯度及水库干流沿程的空间分布规律,于2017年8月至2017年9月对三峡水库干流消落区植被进行了调查。研究表明:(1)三峡水库消落区植被的植物物种丰富度随距大坝里程距离的缩短而呈现逐渐减小的趋势。(2)三峡水库消落区不同生活史类型植被群落盖度对水淹梯度胁迫的响应呈现相反的变化规律:随着消落区高程的升高,一年生植物对消落区植被覆盖度的贡献逐渐增加,而多年生植物对植被群落覆盖度的贡献逐渐降低。但是,在消落区的任一高程区域,多年生植物物种盖度均要大于一年生植物物种盖度。(3)采用 TWINSpan 植被分类方法可对 9 个样地 607 个样方的三峡水库消落区植被划分为 25 个组,其中苍耳+狗牙根群落 Ass. *Xanthiumsibiricum*+*Cynodon dactylon* (含 213 个样方)、狗牙根群落 Ass. *Cynodon dactylon* (包含 137 个样方)、狗牙根+香附子群落 Ass. *Cynodon dactylon*+*Cyperus rotundus* (含 55 个样方)、狗牙根+酸模叶蓼群落 Ass. *Cynodon dactylon*+*Polygonum lapathifolium* (40 个样方)、苍耳+藜香蓼群落 Ass. *Xanthiumsibiricum*+*Ageratum conyzoides* (38 个样方)等为消落区的优势植物群落,群落特征明显表现出对水位涨落及小生境差异的适应。

关键词:三峡水库;消落区;植物群落;生活史类型;空间分布

Spatial distribution of plant communities composed of different life history species in the water-level-fluctuating-zone of Three Gorges Reservoir

SU Qinqin, YU Xingchi, QIN Hongling, XIE Jiaojiao, JING Shufang, LIN Feng, SU Xiaolei, AYI Qiaoli, ZENG Bo, ZHANG Xiaoping*

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 Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to explore the spatial distribution pattern of vegetation, which is composed of different life-history plants, along the river in the mainstream and bank elevation gradient at the water-level-fluctuating-zone of Three Gorges Reservoir, we investigated the vegetation in water-level-fluctuating-zone of the mainstream of Three Gorges Reservoir from August to September 2017. We found that (1) the plant species richness of vegetation in the Three Gorges Reservoir area decreased with the decrease of the distance from the dam. (2) The response of vegetation coverage of different life history species to water flooding gradient stress at water-level-fluctuating-zone of the Three Gorges Reservoir showed the opposite

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505301);国家自然科学基金项目(31770465);重庆市技术创新与应用示范专项重点研发项目(cste2018jszx-zdyfxmX0021-01)

收稿日期:2019-12-31; 修订日期:2020-06-08

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

change rule; with the elevation increasing, the contribution of annual plants to the vegetation coverage gradually increased, while the contribution of perennial plants to the vegetation coverage gradually decreased. However, the species coverage of perennial plants was higher than that of annual plants in any elevation in water-level-fluctuating-zone of the Three Gorges Reservoir. (3) Using TWINSpan vegetation classification method, the vegetation in water-level-fluctuating-zone of the Three Gorges Reservoir can be divided into 25 groups, in which the dominant plant communities are *Ass. Xanthiumsibiricum*+*Cynodon dactylon* (including 213 samples), *Ass. Cynodon dactylon* (including 213 samples), *Ass. Cynodon dactylon*+*Cyperus rotundus* (including 55 samples), *Ass. Cynodon dactylon*+*Polygonum lapathifolium* (including 40 samples), *Ass. Xanthiumsibiricum*+*Ageratum conyzoides* (including 38 samples). The community characteristics showed obvious adaptation to the fluctuation of water level of the Three Gorges Reservoir and ecological niche differences.

Key Words: Three Gorges Reservoir area; water level fluctuation zone; plant community; different life history Vegetation; spatial distribution

三峡水库自 2008 年实施 175 m 试验性蓄水以来,从库首湖北宜昌至库尾重庆江津形成了长约 660 km、水面面积达 1084 km²的河道型水库,根据三峡水库“蓄清排浑”的运行调度安排,每年 10 月末水库蓄水至高水位 175 m (吴淞高程)并持续运行至次年 2 月以满足发电需求,并在每年 6 月初回落至最低水位 145 m 以满足防洪需求(图 1),从而形成了垂直落差达 30 m 的特大型狭长水库消落区。水库蓄水后,从未遭受水淹的陆地生态系统逐渐演变为水陆交错的湿地生态系统,原有的陆生植物难以适应新环境急剧变化,逐步消失或死亡^[1-4],有研究表明建库后消落区原有陆地生态系统植被大幅减少,优势物种类群由多年生植物转变为一年生植物,植被构成物种的生活史类型发生了变化,植物群落类型也发生了改变^[5-9]。

三峡水库成库后,消落区植被在减小流速、削弱涌浪,降低水流对消落区扰动中发挥着不可替代的作用。不同生活史类型植被在消落区生态系统中扮演着不同角色。消落区中的多年生植物具有较强的水淹耐受能力^[10-11],在水库蓄水期间地上部分仍然存活,地下根系相对发达,能加固缠绕固结土壤、改善土壤物理性质,提高抗剪能力^[12-16],降低土壤营养流失的风险;并且多年生植物在退水后能快速恢复生长,利用地上茎和/或地下根茎繁殖形成密集的植丛,这对于提高地表糙率,防止出陆初期消落区水土流失具有重要意义。消落区中的一年生植物可以在无多年生植物生长的裸露的库岸区域中快速形成植被覆盖,对消落区环境质量改善和土壤侵蚀控制发挥积极作用。相比较而言,消落区多年生植物由于其更好的耐淹性和长寿命特性因而在固土护岸、防止土壤侵蚀的作用上优于一年生植物。在消落区环境中植株密度、植被盖度、植被空间分布差异对水流流速阻减、河岸水土保持的效果均具有影响^[17]。在三峡水库消落区,不同生活史类型物种构成的植被随消落区高程变化所对应的水文梯度变化呈现出怎样的分布格局,这种分布格局具有怎样的生态意义,目前尚不明确。另一方面,三峡水库中距大坝较远的上游河段消落区地势较平坦,有较多淤泥沉积,土层较厚土壤营养较高,缓坡在水退时,受水流冲刷较小,其上生长的一些浅根系的植被可得到保留,一年生植物种子与多年生植物繁殖体也较容易留存于土壤中;而靠近大坝的下游江段为峡谷型河道,沿岸多为碎石,土壤贫瘠,消落区坡度大受水流冲刷的影响大,浅根系植物难以生长,植物的种子和繁殖体也因水流作用而易流失。三峡水库上下游水文地貌、土壤条件的差异,使得水流对植物所处生境干扰程度不同,同时给植物生长提供的环境也有很

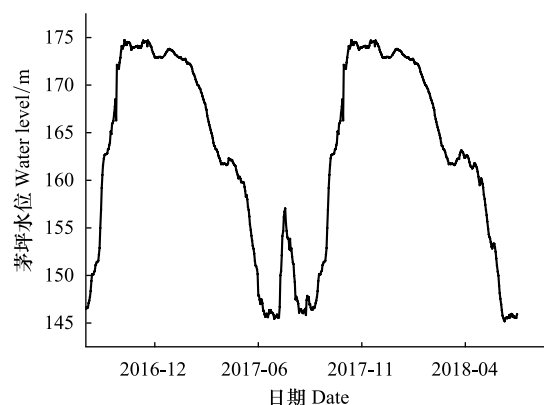


图 1 三峡水库坝前水位变化图(2016—2018)

Fig. 1 The water level variation at the dam from year 2016 to 2018

大差异,从而可能会影响消落区植物物种定居、繁殖、扩散,进而对植物群落分布模式产生巨大影响^[18]。探究不同生活史类型植物群落在三峡水库消落区的空间分布格局和变化规律,对深入认识三峡水库消落区植被特点及其生态功能具有重要意义。目前,已有的对三峡水库消落区植物群落开展的调查研究多集中在某个典型区域或少数几个区域等局部地段^[19-20],对全库区范围内的消落区植物群落和植被的空间分布差异还少有研究,在本研究中,对三峡水库干流消落区植被从上游到下游进行了调查,能从较大地理空间尺度上揭示三峡水库不同生活史类型植物群落的空间分布特征,为全面评估三峡水库运行对消落区植物群落的影响提供依据。

1 研究地点与方法

1.1 研究区概况及研究样地

三峡水库消落区东起三峡水库坝址(三斗坪),西至重庆江津(花红堡),总面积 348.93 km²,涉及重庆市和湖北省的 26 个区(市、县)^[21],地理位置约为 106°56′—111°04′E, 29°16′—30°50′N。属亚热带湿润季风气候,低山丘陵区消落区面积 258.39 km²,占库区消落区总面积的 74.06%。水库年平均气温 16.7—18.7℃,1 月均温 6.5—7.5℃,7 月均温 28—30℃。年均降雨量 992.5—1241.8 mm,降雨时空分布不均。本研究中,在综合考虑消落区的土壤条件、库岸坡度的基础上,从 2017 年 8 月至 9 月,在三峡水库的干流消落区从上游到下游共选择了空间分布距离较为一致的九个地点的消落区作为研究样地,对其消落区的植被进行了考察和研究。研究样地所在区县乡镇、地理位置及库岸环境特征见表 1 中所述。

表 1 研究样地地理位置及环境特征自然概况

Table 1 The location and environmental characteristics of study sites

研究样地 Site	研究所在乡镇 County	地理坐标 Location		库岸坡度 Slope	土壤特征 Soil characteristic	库岸地形 Topographic feature
		东经 E	北纬 N			
样地 1	涪陵百胜镇	107°28′39″	29°49′17″	10°	壤土	冲积平坝
样地 2	丰都三合镇	107°45′33″	29°54′31″	22°	紫色土	均衡的河谷谷地
样地 3	忠县乌杨镇	108°00′40″	30°12′36″	15°	壤土	弃耕地
样地 4	万州新田镇	108°25′45″	30°42′56″	7°	水稻土	弃耕地、梯田
样地 5	云阳云阳镇	108°55′06″	30°57′07″	32°	石灰土	陡峭、峡谷型阶地
样地 6	奉节永乐镇	109°27′45″	30°59′31″	26°	石灰土	较陡的石灰基岩阶地
样地 7	巫山巫峡镇	109°50′44″	31°03′35″	32°	石灰土	凹圆的石灰基岩阶地
样地 8	巴东县城	110°21′39″	31°03′23″	27°	紫色土	土层浅薄、碎石较多山地
样地 9	秭归归州镇	110°42′38″	30°59′17″	31°	紫色土	均衡的紫色基岩阶地

1.2 调查样带的设置

在每个研究样地中,根据三峡水库消落区不同高程区域每年被蓄水淹没的时间长短,每隔 10m 高程设置一条研究样带,分别为 152 m、162 m、172 m 高程样带,不同高程样带受三峡水库蓄水水淹强度不同。并根据各研究样地的具体情况,在每条研究高程带中设置 20—25 个样方,样方面积为 1m×1m,相邻样方间距 3—5m。在调查的所有研究样地中,样地内群落均由草本植物构成,对每个样方进行如下测定:植被投影盖度(以下简称植被盖度)、各物种的投影盖度、群落优势层投影盖度、各物种所有植株的高度、群落优势层的高度,并测定记录每个样方的坡度、土壤类型。植被盖度、物种盖度的测量方法为直接目测法。

1.3 数据处理

采用原始物种丰富度经转换后的丰富度值(Transformed Species Richness, TSR)^[22]来表征消落区植被的物种丰富度以避免取样面积对物种丰富度的影响。 $TSR = N / \lg S$ 。式中, N 为样地中植物种数; S 为取样面积。

对三峡水库消落区植被中不同生活史类型植物的相对优势进行分析,若样方中所有一年生植物物种盖度之和大于所有多年生植物物种的盖度之和,即认为该样方中一年生植物占优势;反之,则为多年生植物占优

势。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同高程平均物种数、每种生活史类型植物的盖度是否具有高程间差异及每个高程中不同生活史植物的盖度是否存在差异进行检验,多重比较采用 Duncan 法进行。若方差不齐则进行数据变换,数据变换后仍不能满足方差齐性,则采用非参数检验(Kruskal-Wallis H 检验)。

物种重要值作为判断优势物种的依据^[23-24],对不同高程消落区植被中的优势物种进行检测, $P = [(相对频度 + 相对高度 + 相对盖度) / 3] \times 100\%$,即物种的 P 值越大,代表该物种为优势种。

为找出消落区优势植物群落,利用 TWINSpan(WINTWINS for Windows 2.3)对消落区植物群落进行数量分类,采用所有研究样地中每个样方中每个物种的盖度数据建立盖度-样方原始数据矩阵,以二歧式的分割法来划分类型,其划分根据“指示种”(或称指示指标)将样方与种类(或者品种与指标)组成依次划分为各个等级的类型单位。TWINSpan(双向指示种法)是基于 RA/CA 排序发展起来的一种分类方法,能对样方和物种同时进行分类,并且分类结果也较为真实,因此得到广泛应用。不同物种具有明显的生态偏好,其存在可能识别特定的环境。样地和种类分类的结果矩阵明显反映种类和样地,种类和植物群落类型之间的关系,并且可以反映重要的环境梯度,具有一定的生态意义。

2 结果与分析

2.1 三峡水库消落区植被物种多样性

研究发现,在所调查的三峡水库消落区样地中共有物种 27 种,其中一年生草本植物物种的比例达到 72.4%。研究表明,三峡水库干流消落区的物种丰富度随着距大坝里程的距离缩短而呈现逐渐减小的趋势,从距大坝 223 km 处,即从云阳开始,到水库大坝,消落区植被具有的物种丰富度趋于一致(图 2)。对消落区不同高程区域植被的物种丰富度的分析发现,随着海拔高程的增加,消落区植被具有的物种数量逐渐增加,位于 152 m、162 m、172 m 海拔高程的消落区植被,平均每个样方中的物种数量为 4.8、5.6、5.7。研究表明三峡水库消落区植被中的物种丰富度沿海拔梯度随着水淹胁迫强度的减小而逐渐增加,但均无显著性差异($P > 0.05$)。

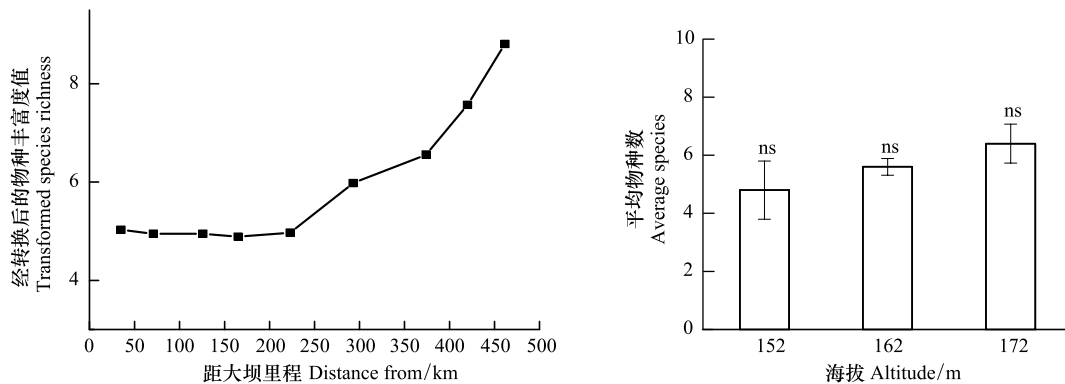


图 2 三峡水库干流消落区植被植物物种丰富度的沿程及随海拔梯度变化格局

Fig.2 Species richness of vegetation in the water-level-fluctuating-zone of TGR along the mainstream and the altitude of the reservoir

2.2 三峡水库消落区植被不同生活史类型植物的相对优势度

对三峡水库消落区植被中不同植物物种盖度占植被中所有物种总盖度的比例的分析发现,随着消落区高程的升高,一年生植物物种盖度占植被中所有物种总盖度的比例逐渐增加,多年生植物物种盖度占植被中所有物种总盖度的比例随海拔高程升高而降低(图 3);结果表明一年生植物对消落区植被覆盖度的贡献随消落区高程的增加而增加,而多年生植物对植被覆盖度的贡献随高程的增加而逐渐降低。但是,在消落区的任一高程区域,多年生植物物种盖度均要大于一年生植物物种盖度(图 3)。

2.3 三峡水库消落区植被各高程主要优势物种

三峡水库消落区植被的优势物种组成在不同高程表现不同,152 m、162 m 消落区植被中具有的优势物种

数量比 172 m 植被中要少,重要值大于 5% 的物种数量在 152 m、162 m、172 m 高程植被中分别为 6 种、8 种、8 种;同时,低高程植被中优势物种具有的最大优势度比高高程植被中优势物种具有的最大优势度更大(152 m 高程、162 m 高程、172 m 高程植被优势物种具有的最大重要值分别为 32.4%、22.4%、13.1%)(表 2)。152 m 高程植被中重要值大于 5% 的物种中多年生植物的重要值总和为 49.8%,一年生植物的重要值总和为 24%;162 m 高程植被中重要值大于 5% 的物种中多年生植物的重要值总和为 34.3%,一年生植物的重要值总和为 45.2%;172 m 高程植被中重要值大于 5% 的物种中多年生植物的重要值总和为 10.8%,一年生植物的重要值总和为 55.9%。在各高程植被中,低高程植被中株形高大的物种少,随高程升高,植被中株形高大的物种数量逐渐增多且都为高大的一年生植物(表 2)。

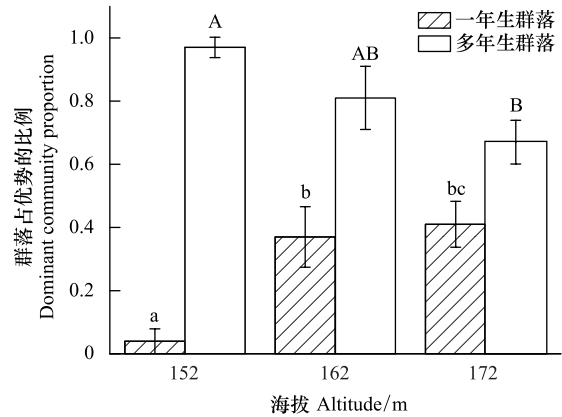


图 3 三峡水库消落区植被中一年生与多年生植物的相对盖度
Fig.3 Relative coverage of annual and perennial plants of the vegetation in the water-level-fluctuating-zone of TGR
 图中数值为平均值±标准误,不同的大、小写字母表示同一类型植被在不同高程间差异显著($P < 0.01$)

表 2 三峡水库消落区不同高程植被的主要优势物种

Table 2 The main plant dominant plant species of vegetation in the water-level-fluctuating-zone of TGR

海拔 Altitude/m	物种名 Species	重要值/% Importancet value	生活型 Life form
172	苍耳 <i>Xanthiumsibiricum</i>	13.1	高大一年生草本
	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	10.8	多年生草本
	狼把草 <i>Bidens tripartite</i>	8.2	高大一年生草本
	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	8.0	低矮一年生草本
	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	7.3	高大一年生草本
	小白酒草 <i>Conyza canadensis</i>	6.9	低矮一年生草本
	紫苏 <i>Perilla frutescens</i>	6.2	高大一年生草本
	石芥苎 <i>Mosla scabra</i>	6.2	高大一年生草本
162	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	22.4	多年生草本
	苍耳 <i>Xanthiumsibiricum</i>	20.9	高大一年生草本
	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	6.6	低矮一年生草本
	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	6.1	多年生草本
	狼把草 <i>Bidens tripartite</i>	5.9	高大一年生草本
	草木樨 <i>Astragalus melilotoides</i>	5.9	高大一年生草本
	酸模叶蓼 <i>Polygonum lapathifolium</i>	5.9	高大一年生草本
	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	5.8	多年生草本
152	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	32.4	多年生草本
	苍耳 <i>Xanthiumsibiricum</i>	9.9	高大一年生草本
	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	9.7	多年生草本
	稗 <i>Echinochloa crusgalli</i>	7.8	低矮一年生草本
	莲子草 <i>Alternanthera sessilis</i>	7.7	多年生草本
	鳢肠 <i>Eclipta prostrata</i>	6.3	低矮一年生草本

表中顺序按各高程物种重要值从大到小排序,表中所列为重要值大于 5% 的物种

2.4 三峡水库消落区植被群落的数量分类

采用 TWINSpan 对三峡水库消落区 9 个样地 607 个样方的植被进行分类,将消落区植被划分为 25 个组(图 3),25 个组的基本特征见附表。结果表明,苍耳+狗牙根群落 *Ass. Xanthiumsibiricum+Cynodon dactylon* (含

213 个样方)、狗牙根群落 *Ass. Cynodon dactylon* (包含 137 个样方)、狗牙根+香附子 *Ass. Cynodon dactylon + Cyperus rotundus* (含 55 个样方)、狗牙根+酸模叶蓼 *Ass. Cynodon dactylon + Polygonum lapathifolium* (40 个样方)、苍耳+藎香蓂群落 *Ass. Xanthiumsibiricum + Ageratum conyzoides* (38 个样方) 等在消落区分布范围广, 为消落区的优势植物群落, 群落特征明显表现出对水位涨落及小生境差异的适应。

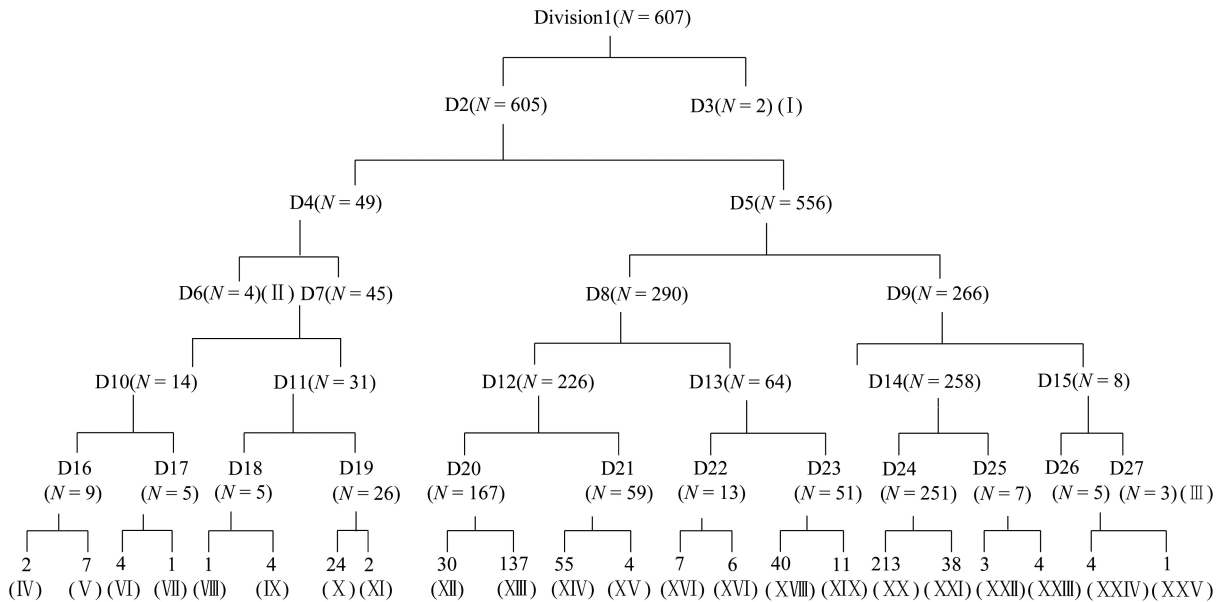


图 4 三峡水库消落区植被的 TWINSpan 分类结果

Fig.4 Classification of vegetation at water-level-fluctuating-zone of the Three Gorges Reservoir by TWINSpan

N 代表样方数; D_k ($k = 1, 2 \dots 11$) 代表第 k 次分类, 附表中 1—607 为样方编号, 罗马数字表示对应的植物群落

3 讨论

3.1 三峡水库消落区植物物种多样性差异及高程差异

在本研究中, 对三峡水库长江干流消落区植被的物种丰富度 (TSR) 分析表明, 三峡水库从上游到下游近 500 km 长 (即从涪陵到大坝) 干流消落区中植被的物种丰富度呈逐渐减小的趋势, 并且从涪陵到云阳消落区植被物种丰富度以较快的速度逐渐降低, 从云阳至大坝消落区植被的物种丰富度最低但差异不大 (图 2)。三峡水库从涪陵到大坝段的水库干流消落区具有相同的水文情势, 水库此区段消落区的水位完全受三峡水库水位调度控制, 即夏季维持最低防洪控制水位, 秋冬春季维持最高蓄水水位, 水库水文情势在此区段内没有差异; 因此, 水文条件不是导致消落区植被物种丰富度从上游到下游 (涪陵到大坝) 逐渐降低的影响因素。但是, 对三峡水库从涪陵到大坝的消落区的土壤基质和河岸形态观测发现, 涪陵到云阳的三峡水库消落区坡度较小, 土壤多为水稻土、壤土, 土层较厚、土壤营养含量高; 而云阳到大坝的水库消落区坡度大土壤侵蚀强, 土壤多为石灰土、土层薄石砾含量高, 消落区生境破碎化程度加剧^[25], 从上游到下游消落区土壤条件和生境差异可能是导致植被物种丰富度降低的重要原因。

不同生活史类型植物群落优势度随高程变化呈现相反的变化规律 (一年生植物群落盖度优势随高程升高而增加, 多年生植物群落盖度优势随高程升高逐渐降低), 说明在不同水淹胁迫强度导致的异质生境中, 不同生活史类型的植物群落对生境的适应能力不同。低高程水淹时间较长, 给予一年生植物生长的时间少, 其能成功完成开花结实产生大量种子的机会小。另外, 低高程伴随有较多泥沙沉积, 对一年生植物种子掩埋, 影响种子正常萌发, 降低一年生植物的优势度; 而高高程受水淹胁迫小, 能保留多数有活性的种子, 在适宜的条件下就会萌发成幼苗^[26], 从而占据生态位, 优势度升高。

3.2 三峡水库消落区现有的植被空间分布格局的生态意义

河岸带生态系统包含多种物种的相互作用和共存,将生物多样性整合到生态功能的研究中是非常必要的,物种多样性会增加根系生物量,从而降低河岸水土流失风险从而维护库岸稳定^[27-29]。多样性较高能保证河岸带生态系统服务的持续供给。三峡水库干流消落区的物种丰富度随着距大坝里程的距离缩短而呈现逐渐减小的趋势,不利于下游消落区植被发挥土壤改良作用及提高河岸带的生产力。

虽然多年生植物在高高程的盖度优势减小,但多年生植物在高高程对群落盖度的贡献仍然起主要作用(各高程多年生植物占优势的样方比例均大于60%)。这种盖度分布格局对维护三峡水库消落区生态系统结构的稳定具有积极作用。一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^[30]。三峡水库消落区植被恢复应更加关注植被生态功能,一年生植物与多年生植物地下根系合理配置,对功能群落进行构建,加强固土护岸效果,发挥植被的最大生态效益。

4 结论

三峡水库消落区植被作为河岸带生态系统的重要组成部分,对库岸安全运行具有重要意义。本研究的主要结论有:三峡水库消落区的物种丰富度随着距大坝里程距离的缩短而逐渐减小;一年生植物对消落区植被覆盖度的贡献随消落区高程的增加而增加,而多年生植物对植被覆盖度的贡献随高程的增加而逐渐降低;经过近十年的植被演替,消落区植被组成日趋单一,苍耳与狗牙根在消落区的优势日趋明显,典型群落主要有苍耳+狗牙根群落、狗牙根群落、狗牙根+香附子群落、狗牙根+酸模叶蓼群落、苍耳+藿香蓟群落。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 刘维璋,王杰,王勇,杨帆. 三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异. 生态学报, 2012, 32(17): 5454-5466.
- [3] 齐代华,贺丽,周旭,刘成,闵鹏. 三峡水库消落带植物物种组成及群落物种多样性研究. 草地学报, 2014, 22(5): 966-970.
- [4] Su X L, Zeng B, Huang W J, Yuan S H, Xu S J, Lei S T. The effect of winter impoundment of the Three Gorges Dam: the degradation and convergence of pre-upland vegetation. Ecological Engineering, 2013, 61: 456-459.
- [5] 张晟,杨春华,雷波,王业春,由永飞. 三峡水库蓄水初期消落带植被分布格局. 环境影响评价, 2013, (5): 45-50.
- [6] 雷波,王业春,由永飞,张晟,杨春华. 三峡水库不同间距高程消落带草本植物群落物种多样性与结构特征. 湖泊科学, 2014, 26(4): 600-606.
- [7] 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): 684-687, 691-691.
- [8] 李波,熊森,黄亚洲,袁兴中. 三峡水库蓄水对白夹溪消落区的植物群落格局的影响. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2012, 29(3): 70-74, 168-170.
- [9] 张爱英,熊高明,樊大勇,杨丹,谢宗强. 三峡水库蓄水对长江干流河岸植物组成的影响. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1): 145-156.
- [10] 李娅. 水淹对三峡库区岸生植物秋华柳和野古草存活和恢复生长的影响[D]. 重庆:西南大学, 2008.
- [11] 杜琿,张小萍,曾波. 水体溶氧影响陆生植物喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)和牛鞭草(*Hemarthria altissima*)对完全水淹的耐受力. 生态学报, 2016, 36(23): 7562-7569.
- [12] 鲍玉海,贺秀斌,钟荣华,高进长,唐强. 三峡水库消落带植被重建途径及其固土护岸效应. 水土保持研究, 2014, 21(6): 171-174, 180-180.
- [13] 钟荣华,贺秀斌,鲍玉海,杨克君,高进长,吕发友. 狗牙根和牛鞭草的消浪减蚀作用. 农业工程学报, 2015, 31(2): 133-140.
- [14] 徐少君,曾波,类淑桐,苏晓磊. 三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应. 土壤学报, 2011, 48(1): 160-167.
- [15] 钟荣华,吕发友,鲍玉海,贺秀斌. 三峡水库消落带草本植物对若干土壤物理性质的影响. 水土保持研究, 2018, 25(1): 17-22.
- [16] 张伦. 波浪作用下三峡库区消落带草本植物固土减蚀特性研究[D]. 宜昌:三峡大学, 2017.
- [17] 葛芳,田波,周云轩,何青,钱伟伟. 海岸带典型盐沼植被消浪功能观测研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1784-1792.
- [18] Bendix J, Hupp C R. Hydrological and geomorphological impacts on riparian plant communities. Hydrological Processes, 2000, 14(16/17):

2977-2990.

- [19] 朱妮妮, 郭泉水, 秦爱丽, 裴顺祥, 马凡强, 朱莉, 简尊吉. 三峡水库奉节以东秭归和巫山段消落带植物群落动态特征. 生态学报, 2015, 35(23): 7852-7867.
- [20] 童笑笑, 陈春娣, 吴胜军, 贾振毅, 温兆飞, 叶飞, 易雪梅, 马茂华. 涪陵到云阳段长江干流和支流彭溪河的消落带维管植物区系特征分析. 西南大学学报: 自然科学版, 2017, 39(4): 25-33.
- [21] 肖文发, 周志翔, 黄志霖, 王鹏程, 吴昌广. 长江三峡库区森林景观格局与景观恢复研究. 北京: 科学出版社, 2012.
- [22] Nilsson C, Grelsson G, Johansson M, Sperens U. Patterns of plant species richness along riverbanks. Ecology, 1989, 70(1): 77-84.
- [23] 蒋志刚, 马克平, 韩兴国. 保护生物学. 杭州: 科学出版社, 1997.
- [24] 张金屯. 植被数量生态学方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [25] 张虹. 三峡库区消落带土地资源特征分析. 水土保持通报, 2008, 28(1): 46-49.
- [26] 李丑. 三峡水库消落区一年生植物的幼苗库特征、幼苗发生及植被的季节动态[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [27] Allen D C, Cardinale B J, Wynn-Thompson T. Toward a better integration of ecological principles into ecogeoscience research. BioScience, 2014, 64(5): 444-454.
- [28] Allen D C, Cardinale B J, Wynn-Thompson T. Plant biodiversity effects in reducing fluvial erosion are limited to low species richness. Ecology, 2016, 97(1): 17-24.
- [29] Fernández-Santamarina A, Magdaleno F, Udias A. Spatial variation of woody riparian vegetation across the riverbank topographic gradient in mediterranean rivers: species and growth categories. River Research and Applications, 2016, 32(6): 1289-1301.
- [30] 谭淑端, 王勇, 张全发. 三峡水库消落带生态环境问题及综合防治. 长江流域资源与环境, 2008, 17(S1): 101-105.

附录: 三峡水库干流消落区植被的 TWINSPAN 分类结果

I. 甜根子草群落 (*Ass. Saccharum spontaneum*), 包括 (539, 541) 两个样方, 平均盖度为 7.5%;

II. 稗+小白酒草群落 (*Ass. Echinochloa crusgalli+Coryza canadensis*), 包括 4 个样方 (31, 56, 217, 221), 稗平均盖度 27.5%, 小白酒草盖度 20%, 伴生种有牛筋草 (*Eleusine indica*)、酸模叶蓼等;

III. 喜旱莲子草群落 (*Ass. Alternanthera philoxeroides*), 共 3 个样方 (280, 283, 292), 群落平均盖度为 13.3%;

IV. 马兰+狗尾草群落 (*Ass. Kalimeris indica +Setaria viridis*), 包括样方 (222, 225), 马兰盖度 45%, 狗尾草盖度 30%;

V. 黄花蒿+稗群落 (*Ass. Artemisia annua+ Echinochloa crusgalli*), 共 7 个样方 (140, 142, 216, 218, 219, 223, 224), 黄花蒿平均盖度 34.3%, 稗盖度 37%, 伴生种有小白酒草、狗尾草等;

VI. 黄花蒿+小白酒草+狗尾草群落 (*Ass. Artemisia annua+Coryza Canadensis+ Setaria viridis*) 共 4 个样方 (137, 139, 141, 220), 黄花蒿盖度 43.8%, 小白酒草平均盖度 12%, 狗尾草盖度 14.5%;

VII. 苍耳+小白酒草群落 (*Ass. Xanthiumsibiricum+ Coryza Canadensis*), 1 个样方, 样方编号 135, 苍耳盖度 5%, 小白酒草盖度 10%;

VIII. 黄花蒿+狗牙根+狗尾草群落 (*Ass. Artemisia annua+Cynodon dactylon+ Setaria viridis*), 包括 (203, 213, 407, 408) 样方, 黄花蒿盖度 60%, 狗牙根盖度 56.3%, 狗尾草盖度 27.5%;

IX. 狗牙根+狗尾草+小白酒草 (*Ass. Cynodon dactylon+ Setaria viridis+ Coryza canadensis*), 共计 1 个样方, 样方编号为 211, 狗牙根盖度 45%, 狗尾草 30%, 小白酒草盖度为 10%;

X. 苍耳+狗尾草群落 (*Ass. Xanthiumsibiricum+ Setaria viridis*), 共包含 24 个样方 (57, 134, 136, 151, 154, 340, 347, 384, 409—412, 418—428, 611), 该群落为距大坝较近消落区优势群落, 苍耳盖度 66.8%, 狗尾草盖度 44.3%, 伴生种有黄花蒿, 狼把草、稗、鳢肠等;

XI. 鳢肠+狗尾草群落 (*Ass. Eclipta prostrate+Setaria viridis*), 包括样方 (575, 576), 鳢肠盖度 12.5%, 狗尾草盖度 15%;

XII. 狗牙根+狗尾草群落 (*Ass. Cynodon dactylon+ Setaria viridis*) 共 30 个样方 (147, 152, 209, 210, 214, 321, 323, 328, 341, 343, 351, 355, 388, 526, 527, 540, 548, 549, 551, 577, 578, 580—583, 587—590, 605), 狗牙根盖度 55.4%, 狗尾草盖度 23%, 伴生种有鳢肠、藿香蓟、酸模叶蓼;

XIII. 狗牙根纯植丛群落 (*Ass. Cynodon dactylon*), 包括 137 个样方 (99, 100, 103, 105—107, 109, 157—160, 162—168, 170, 172, 173, 180, 181, 187, 192, 193, 206, 208, 215, 226—248, 254, 255, 270, 271, 295, 297, 299—301, 303—319, 354—357, 359, 370, 372, 373, 380, 382, 396—399, 403, 429—432, 435, 436, 442—445, 460, 485, 487, 489, 490, 495, 496, 508—510, 512, 513, 515, 524, 545—547, 550, 552, 555, 595, 601, 606), 主要分布于各样地 152 高程, 狗牙根平均盖度 86.9%;

XIV. 狗牙根+香附子群落 (Ass. *Cynodon dactylon*+*Cyperus rotundus*), 55 个样方 (150、353、361—364、366—369、371、374—379、381、400—402、404、433、434、437—440、497—503、505、553、556—561、564—572、584、586、592), 主要分布在下游消落区低高程, 狗牙根平均盖度 76%, 香附子平均盖度 35.6%, 伴生种有狗尾草、喜旱莲子草;

XV. 苍耳+香附子群落 (Ass. *Xanthiumsibiricum*+*Cyperus rotundus*), 共计 4 个样方 (155、156、562、563), 苍耳平均盖度 25%, 香附子盖度 47.5%, 伴生种为狗牙根、狗尾草等;

XVI. 狗牙根+稗群落 (Ass. *Cynodon dactylon*+*Echinochloa crusgalli*), 共计 7 个样方 (18、23、29、60、207、212、263), 狗牙根平均盖度 70%, 稗平均盖度 25%, 伴生种有藿香蓟、石芥苳、莲子草等;

XVII. 狗牙根+鳢肠群落 (Ass. *Cynodon dactylon*+*Eclipta prostrata*) 包括 6 个样方 (26、30、62、253、256、268), 该群落主要分布于距大坝较远的消落区 152 高程, 狗牙根平均盖度 90%, 鳢肠平均盖度 17%, 伴生种有荔枝草 (*Salvia plebeia*)、酸模叶蓼等;

XVIII. 狗牙根+酸模叶蓼群落 (Ass. *Cynodon dactylon*+*Polygonum lapathifolium*), 共计 40 个样方 (1、2、4、5、7、8、10、12、17、24、28、95、101、102、104、108、110、114—116、169、171、175—179、260—296、298、302、360、365、504、506、507、525、534、535、591), 狗牙根盖度 92.5%, 酸模叶蓼的盖度 37.5%, 伴生种为青葙 (*Celosia argentea*)、喜旱莲子草、苍耳、马唐 (*Digitaria sanguinalis*);

XIX. 狗牙根+酸模叶蓼+莲子草 (Ass. *Cynodon dactylon*+*Polygonum lapathifolium*+*Alternanthera sessilis*), 包括样方 (11、14、15、16、19、20、27、174、281、514、554) 狗牙根平均盖度 35.2%, 酸模叶蓼平均盖度为 32.8%; 伴生种为稗、蔊菜等;

XX. 苍耳+狗牙根群落 (Ass. *Xanthiumsibiricum*+*Cynodon dactylon*), 213 个样方 (3、6、9、13、21、22、25、33—35、55、58、59、61、74、77、78、80、85、111、112、113、117、118—133、138、143—146、148、149、153、161、182.00—186、188—191、194—202、204、205、249—252、257—259、261、262、264—267、269、282、286、288—290、293、294、320、322、324—327、329—339、342、345、346、348—350、352、358、383、385—395、405、406、413—417、441、446—459、461—479、481—484、486、488、491—494、516—523、528—533、536—538、542—544、573、574、579、585、593、594、596—600、602—604、607、609、610), 苍耳平均盖度 54.5%, 狗牙根盖度 85.3%, 伴生种有狼把草、稗、鳢肠等;

XXI. 苍耳+藿香蓟群落 (Ass. *Xanthiumsibiricum*+*Ageratum conyzoides*), 共计 38 个样方 (32、36—50、52—54、63—73、75、76、79、81—84、480), 主要分布于涪陵消落区的 162 高程, 苍耳平均盖度 84.9%, 藿香蓟平均盖度 27.8%, 伴生种有狼把草、小白酒草;

XXII. 苍耳+石芥苳 (Ass. *Xanthiumsibiricum*+*Mosla scabra*), 包括 3 个样方 (274、275、276) 样方, 苍耳平均盖度 15%, 石芥苳盖度 100%;

XXIII. 石芥苳+狼把草 (Ass. *Mosla scabra*+*Bidens tripartite*), 含 4 个样方 (272、273、277、278) 样方, 石芥苳盖度 96.3%, 狼把草盖度 25%; 伴生种为苍耳;

XXIV. 苍耳+喜旱莲子草 (Ass. *Xanthiumsibiricum*+*Alternanthera philoxeroides*), 含 4 个样方 (279、285、287、291), 苍耳盖度 33.8%, 喜旱莲子草盖度 11.3%。

XXV. 苍耳+喜旱莲子草 (Ass. *Xanthiumsibiricum*+*Alternanthera philoxeroides*), 含 1 个样方 (284), 苍耳盖度 40%, 喜旱莲子草盖度 20%。