

文章编号:1001-1498(2015)01-0109-07

# 三峡水库巫山—秭归段典型消落带 植被空间分异研究

朱妮妮<sup>1</sup>, 秦爱丽<sup>1\*</sup>, 郭泉水<sup>1</sup>, 朱莉<sup>1,2</sup>, 许格希<sup>1</sup>, 裴顺祥<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471003; 3. 中国林业科学研究院华北林业实验中心, 北京 102300)

**摘要:**消落带植被是三峡水库生态系统的重要组成部分,对于确保水库安全和库岸社会经济发展起着重要作用。消落带植被的空间分布及优势植物组成是消落带治理植物材料选择的重要依据。本研究基于三峡水库干流巫山—秭归段典型消落带的植被调查,研究消落带植被的物种多样性、植物生活型、优势植物的空间分布特征及其变化规律。结果表明:随着海拔的下降,消落带植被的物种多样性减少;1年生草本植物在群落中所占比例增加,多年生草本植物所占比例因地而异(巫山消落带为增加,秭归消落带为减少),木本植物所占比例减少。淹水较深区段消落带植被的优势植物主要是莎草科的莎草和禾本科的狗牙根、毛马唐、狗尾草及菊科的鬼针草等;淹水较浅区段的优势植物种类有所增加,但处于优势的仍然是莎草科、禾本科和菊科植物。能够在淹水区段存活的植物大多具有发达的通气组织、特殊的繁殖特性及对淹水和干旱环境有较强的适应能力。

**关键词:**物种多样性;生活型;优势植物;空间分异;消落带植被;三峡库区

中图分类号:S718.3

文献标识码:A

## Spatial Heterogeneity of Plant Community in Zigui and Wushan Typical Hydro-fluctuation Belt of Three Gorges Reservoir Areas

ZHU Ni-ni<sup>1</sup>, QIN Ai-li<sup>1</sup>, GUO Quan-shui<sup>1</sup>, ZHU Li<sup>1,2</sup>, XU Ge-xi<sup>1</sup>, PEI Shun-xiang<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2. School of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China; 3. Experimental Centre of Forestry in North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300, China)

**Abstract:** The vegetation in the hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir area as an important component of ecological system plays an important role in ensuring reservoir safety and social-economic development. The spatial distribution configuration and dominant plant species composition of the hydro-fluctuation belt are important bases for the selection of plant materials. Based on vegetation survey from four monitoring plots located in Zigui and Wushan, the trunk line of Three Gorges Reservoir, the species diversity, plant life form and spatial distribution configuration of dominant plants were investigated. The results are as follows. 1. With the altitude lowering, the species diversity decreased, the proportion of therophyte herbs increased, the species diversity of perennial herbs differed (in Zigui decreased, while in Wushan increased), and the species diversity of woody plant decreased. 2. The dominant species in deep water sections of Three Gorges Reservoir area mainly belongs to Poaceae, Cyperaceae and Asteraceae, such as *Cyperus rotundus*, *Cynodon dactylon*, *Digitaria ciliaris*, *Setaira viridis*, *Bidens pilosa* and so on. The dominant species survived in shallow water sections also mainly belongs to Poaceae and Asteraceae, but also emerged

收稿日期:2014-03-25

基金项目:“十二·五”林业科技支撑计划项目(2011BAD38B04)和“十一·五”林业科技支撑计划项目(2006BAD03A313)资助

\* 通讯作者:秦爱丽,博士,助理研究员。主要研究方向:野生植物保护与利用。E-mail: ailiqin@caf.ac.cn

some new important value higher dominant species compared to deep water sections. The mechanism of these survival species is that they mainly have underground creeping rhizomes, well developed aerenchyma and strong adaptability to flooding and extreme dry hot environment when the water level drops.

**Key words:** species diversity; life form; dominant plant species; spatial heterogeneity; Three Gorges Reservoir area; vegetation of hydro-fluctuation belt

三峡水库是我国乃至世界最大的水利枢纽工程,库区消落带垂直落差达 30 m。受人为调控,水库水位涨落反季节运行。每年汛期(6—9月),水库水位维持在海拔 145 m,汛期过后开始蓄水,10月底至 11月上旬蓄至海拔 175 m,并保持到 12月左右,然后逐渐回落,次年 1—4月降至海拔 155 m,5月底降至海拔 145 m。在水库水位涨落过程中,不同海拔的水位保持时间及由此产生的环境(光照、温度、水分等)效应各不相同,消落带植被的空间分布格局也因此受到影响。近年来,许多学者对消落带植被的空间分布格局开展过研究,但结果却不尽相同。2009年,王强等<sup>[1]</sup>将消落带海拔 145~173 m 划分为 6 个高程区,在每个高程区设置了 3 个 1 m × 1 m 调查样方,研究了消落带植被的物种多样性变化,结果显示,随着海拔的升高,物种多样性呈逐步增加趋势;孙荣等<sup>[2]</sup>对澎溪河开县段海拔 148~158 m 物种丰富度研究表明,随着海拔的升高,物种丰富度呈先升后降的变化趋势;王业春等<sup>[3]</sup>在忠县境内,取 3 个地质地貌和土地利用历史相似的消落带,对海拔 160、170 m 2 个区段的植被变化特征进行研究显示,不同海拔的植物种类组成完全相同,且群落的盖度、生物量、生物多样性指数等均不存在显著差异,只是优势种有所不同。由此可见,不同研究区域消落带植被的空间分布格局并不完全相同。许多学者对产生这种现象的原因进行了分析,一致认为,虽然不同研究区域因海拔高程变化带来的环境梯度效应基本一致,但不同研究区域原生植被的植物种类组成、地形、土壤、人为干扰程度等并不完全相同,消落带植被的空间分布格局可能因此受到影响<sup>[2-4]</sup>。另外,样方设置的数量、面积大小及调查时间也可能对研究结果产生影响。

目前,对三峡库区消落带植被空间分布的研究,主要集中在三峡水库中上游地段,对中下游地段研究较少。水库中上游地段的地势一般比较平缓,且水库蓄水前多为坡耕地,中下游地段的地势比较陡峭,岩体也较破碎,原生长在消落带的植被多为次生灌丛或次生林砍伐后营造的人工林。中下游地段是三峡库区地质灾害多发区,也是消落带治理的重点和难点。另外,过去对消落带植被空间分布的调查工作大多是在 2010 年以前进行的,调查年度内的最高蓄水位多在海拔 172 m 以下,而在水库蓄水位达到 175 m 以后,还缺乏系统的调查和研究。本文以三峡水库中下游巫山一秭归段典型消落带为研究对象,通过对消落带不同海拔区段植被的调查,揭示研究区消落带植被的物种多样性、植物生活型及优势植物组成的空间分布特征,以期为三峡库区中下游消落带分区治理植物材料的选择和三峡水库生态环境影响评估提供依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 研究区自然概况

三峡水库巫山一秭归段位于三峡水库中下游峡谷地貌区,属亚热带季风型湿润气候。调查样地设在巫山县巫峡镇和秭归县茅坪镇消落带。巫山县巫峡镇的年均气温为 18.4℃,年均降水量为 1 100 mm,≥10℃年活动积温 5 857.3℃,全年无霜期 306 d;秭归县茅坪镇的年均气温为 18℃,年均降水量为 1 049.3 mm,≥10℃年活动积温 5 723.6℃,全年无霜期 305 d;两地的气候类型相似,地带性植被均为亚热带常绿阔叶林。经历水库水位涨落影响前,各样地的自然概况见表 1<sup>[5]</sup>。

表 1 样地的自然概况

样地	经度(E)	纬度(N)	坡向	坡度/(°)	植被类型	土层厚度/cm	土壤类型
秭归 1 号	110°54'35.3"	30°52' 94.1"	27° SW	28°	板栗采伐迹地	35	黄壤土
秭归 2 号	110°53'19.1"	30°53'4.7"	16° NW	36°	马尾松采伐迹地	40	黄壤土
巫山 3 号	109°54'13.1"	31°04'94.3"	16° SW	32°	天然灌草丛	40	黄色石灰土
巫山 4 号	109°54'64.7"	31°03'55.5"	25° NW	41°	天然灌木林	35	黄色石灰土

注:板栗(*Castanea mollissima* Bl.)和马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)的采伐时间为 2008 年。

## 1.2 三峡水库水位变化

2007—2012年三峡水库的水位变化<sup>[6]</sup>见图1。图1表明:受人为调控,在2010年冬季以前,三峡水库最高蓄水位一直处在不断变动中。水库最高蓄水位,2007年12月为海拔156 m,2008年12月为海拔172 m,2010年12月为海拔175 m,在此之后,水库最高蓄水位才一直维持在海拔175 m。另外,从图1还看出,虽然三峡水库设计的最低限制水位为海拔145 m,但因受当地洪水季节的影响,真正在海拔145 m滞留的时间非常有限,更多的是在海拔150 m上下波动。不同海拔高程被水淹没的深度和水淹持续时间都有所不同。

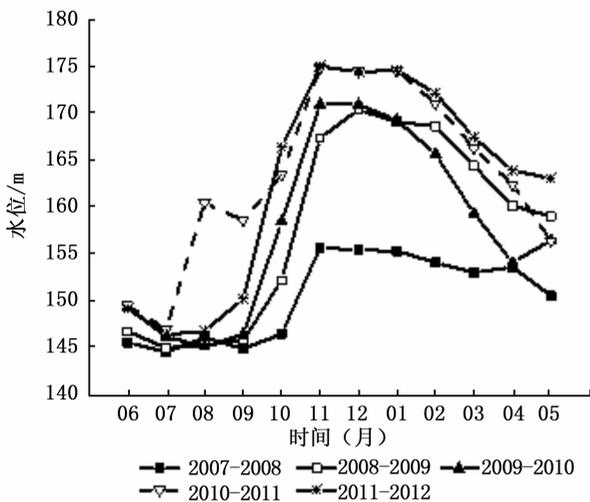


图1 三峡水库水位变化

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置和海拔区段划分

秭归1号、秭归2号和巫山3号、巫山4号4块样地大小均为宽15 m,长26 m。基线设在海拔155 m,最高线设在海拔180 m。在样地内采用相邻格子法布设样方,样方大小因调查对象而异,其中,乔木幼苗、幼树和灌木的样方大小均为2 m×2 m,草本样方为1 m×1 m,每块样地内样方数量为91个。调查内容包括:植物种类、植株数量、植株高度、单种盖度、植物生活型等。调查时间为2012年8月。

因调查当年消落带海拔155~172 m经历了4次水库水位涨落,海拔172~175 m经历了2次水库水位涨落,考虑到经历水位涨落周期数对消落带植被空间分布的影响,在海拔区段划分时,将海拔172 m设定为分界线,在其上下不完全等间隔分出了海拔155~160、160~165、165~168、168~172、172~175、175~180 m(对照区段)6个海拔区

段,为了便于讨论,简称为I、II、III、IV、V、VI区段。

### 2.2 数据处理

#### 2.2.1 物种多样性测度

(1)  $\alpha$  多样性测度<sup>[7-9]</sup>

物种丰富度指数( $R$ ):  $R = S$  (1)

Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ ):

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \times \log_2 P_i \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数( $J_e$ ):  $J_e = H_e / H_{\max}$  (3)

式(1)~(3)中:  $P_i = \frac{n_i}{N}$ ,  $H_e = - \sum_{i=1}^N p_i \times \ln P_i$ ;

$H_{\max} = \ln S$ ;  $S$  为各海拔区段的物种数目;  $N$  为各海拔区段所有物种个体数总和;  $n_i$  为第  $i$  个物种的个体数量。

(2)  $\beta$  多样性测度<sup>[2, 10]</sup>

Cody 指数( $\beta_c$ ):  $\beta_c = (g(H) + l(H)) / 2$  (4)

式(4)中:  $g(H)$  为沿生境梯度增加的物种数目;  $l(H)$  为沿生境梯度失去的物种数目。

2.2.2 重要值计算<sup>[11]</sup> 重要值( $Iv$ ) = (相对频度( $Fr$ ) + 相对多度( $Dr$ ) + 相对显著度( $Pr$ )) / 3

式中:  $Fr = F(\text{某个种的频度}) / \sum F(\text{所有种频度总和}) \times 100\%$

$Dr = D(\text{某个种的株数}) / \sum D(\text{所有种总株数}) \times 100\%$

$Pr = C(\text{某个种的盖度}) / \sum C(\text{所有种总盖度}) \times 100\%$

2.2.3 植物生活型划分 参考《中国植被》<sup>[12]</sup> 生活型分类系统,将草本植物划分为1年生草本、多年生草本。

受三峡水库清库的影响,海拔175 m以下各区段的乔木已被砍伐,仅有一些幼苗和幼树,因此,把乔木和灌木统归为木本植物生活型。

2.2.4 数据统计分析 数据处理在 Excel 2007 及 SPSS 19.0 完成;采用 SPSS 19.0 方差分析模块下的 Duncan 法对不同海拔梯度及不同样地间的各种统计参数进行分析比较;在 Origin 9 中完成绘图。

## 3 结果与分析

### 3.1 消落带植被 $\alpha$ 多样性和 $\beta$ 多样性指数的变化

3.1.1 不同海拔区段  $\alpha$  多样性和  $\beta$  多样性指数的变化 由图2可知:消落带植被的物种丰富度指数( $R$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )和 Pielou 均匀度指数( $J_e$ )均随海拔的升高而不断增大。差异显著性检验表明:物种丰富度指数( $R$ )在 I、II、III 区段

间及V、VI区段间差异均不显著,但I、II、III区段与V、VI区段间的差异显著( $P < 0.05$ ),IV区段仅与I区段差异显著;Shannon-Wiener多样性指数( $H$ )仅在I区段与VI区段间差异显著;均匀度指数( $Je$ )在各区段间差异均不显著。

$\beta$ 多样性表示沿环境梯度的变化物种的替代程度<sup>[12]</sup>,不同群落或环境梯度间的共有种越少, $\beta$ 多样性越大<sup>[13]</sup>。由图2D可知: $\beta$ 多样性指数 $\beta_c$ 随海拔梯度的升高而增大,表明随着海拔升高消落带植被群落中的共有种数逐渐减少。差异显著性检验表明:海拔I-II、II-III、III-IV区段间差异不显著,但海拔I-II区段与海拔IV-V和V-VI区段间差异显著,而海拔IV-V与V-VI间差异不显著,这与物种丰富度指数( $R$ )随海拔高程的变化规律(图2A)一致。

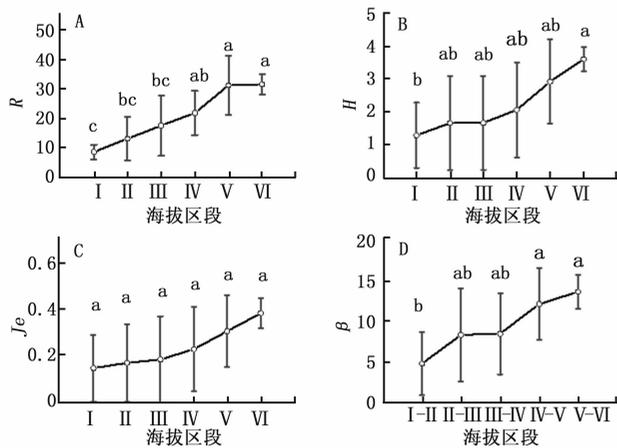


图2  $\alpha$ 多样性和 $\beta$ 多样指数沿海拔高程的变化  
(图中不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ))

3.1.2 不同样地间 $\alpha$ 多样性和 $\beta$ 多样性指数的变化 由表2可知:不同调查样地间的物种丰富度不

表2 不同样地间 $\alpha$ 、 $\beta$ 多样性指数的变化

样地	$\alpha$ 多样性指数			$\beta$ 多样性指数
	$R$	$H$	$Je$	$\beta_c$
秭归1号	16.8 ± 8.3a	2.219 ± 0.971b	0.210 ± 0.112b	6.7 ± 4.645ab
秭归2号	15.5 ± 7.7a	2.189 ± 0.968b	0.226 ± 0.116b	6.4 ± 3.928b
巫山3号	28.2 ± 11.4a	3.528 ± 0.585a	0.416 ± 0.048a	12.8 ± 2.197a
巫山4号	20.7 ± 13.3a	0.882 ± 1.443c	0.087 ± 0.152b	11.6 ± 6.035ab

注:同列指标数值后的不同小写字母表示同一测定指标下,在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

同,巫山样地(3、4号)的物种丰富度高于秭归样地(1、2号),但两地间差异不显著;秭归1、2号样地间 $\alpha$ 多样性指数 $H$ 和 $Je$ 均差异不显著,但秭归1、2号样地的 $H$ 与巫山3、4号样地的差异显著( $P < 0.05$ ), $Je$ 与3号样地的差异显著,与4号样地差异不显著, $\alpha$ 多样性指数 $H$ 和 $Je$ 在巫山3、4号样地间差异显著。

不同样地间 $\beta$ 多样性指数差异显著性检验表明: $\beta_c$ 在秭归2号和巫山3号样地间差异显著,其它样地间差异不显著。

### 3.2 不同样地和不同海拔区段植物生活型的变化

从图3可知:各调查样地的植物生活型组成均以1年生和多年生草本植物为主,木本植物较少。随着海拔的降低,1年生草本植物在群落中所占比例逐渐增大(图3a);多年生草本植物随海拔梯度的变化因调查样地不同而异,秭归样地(1号和2号)多年生草本在群落中所占比例随海拔的升高而增大,而巫山样地(3号和4号)的总体变化为随海拔的升高而减小(图3b);木本植物在群落中所占比例随海拔的升高而增大。不同调查样地木本植物开始出现的海拔区段不同,秭归样地出现在IV区段,巫山样地出现在II区段(图3c)。

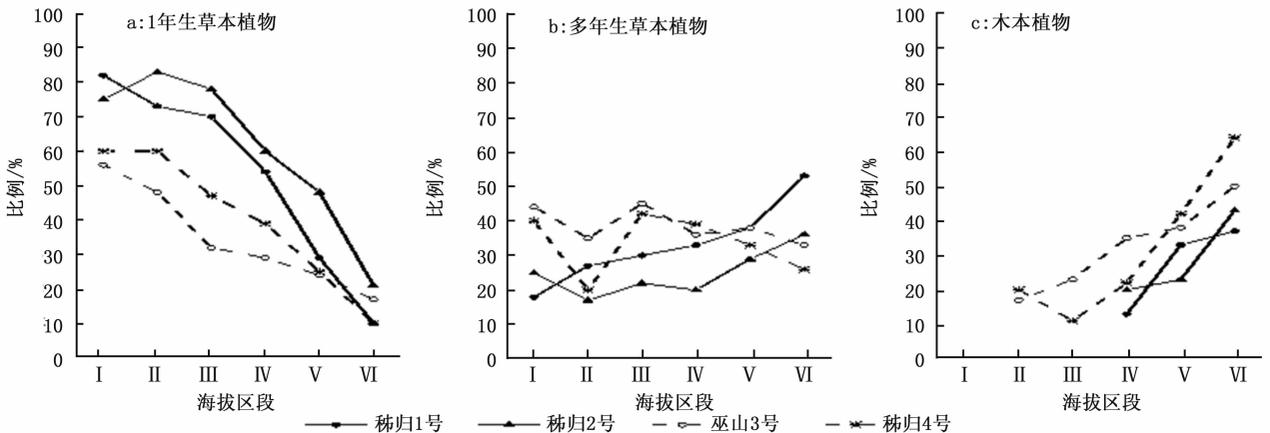


图3 不同海拔区段植物生活型组成及其在群落中所占的比例

### 3.3 不同样地和不同海拔区段优势植物组成

对各调查样地同一海拔区段的物种重要值进行计算,并按重要值大小取其前5位(表3)。从表3可知:海拔I-IV各区段优势植物大部分为草本,其中,秭归1号和2号样地的优势植物基本相同,巫山3号和4号样地比较接近,两地之间优势植物不尽相同但差别不大。按物种重要值大小排在前几位的是莎草科(Cyperaceae)的莎草(*Cyperus rotundus* L.)、禾本科(Poaceae)的狗牙根(*Cynodon dactylon* L.)、毛马唐(*Digitaria ciliaris* (Retz.) Koel.)、狗尾草(*Setaria viridis* L.)以及菊科(Asteraceae)的鬼针草(*Bidens pilosa* L.)和苍耳(*Xanthium sibiricum*

*Patrin ex Widder*)。

海拔V区段与I-IV区段的优势植物种类有所不同,海拔V区段含有海拔I-IV区段的大多数物种外,还增加了菊科的青蒿(*Artemisia carvifolia* Buch.-Ham. ex Roxb.)、艾蒿(*A. argyi* Levl. et Van.)、禾本科的芒(*Miscanthus sinensis* Anderss.)、白茅(*Imperata cylindrica* L.)、荩草(*Arthraxon hispidus* (Thunb.) Makino)等,木本植物短尖忍冬(*Lonicera mucronata* Rehd.)和黄栌(*Cotinus coggygia* Scop.)也有出现,但总体呈现各样地的优势植物仍为草本,仅有巫山4号样地在该区段有木本植物存在。

表3 不同样地和不同海拔区段优势植物组成

海拔区段	秭归1号		秭归2号		巫山3号		巫山4号	
	种名	重要值/%	种名	重要值/%	种名	重要值/%	种名	重要值/%
VI	飞蓬	23.14	红叶野桐	19.68	荩草	17.85	荩草	16.35
	蛇莓	18.12	槲栎	10.45	野菊	11.84	狗尾草	8.56
	白茅	6.49	青蒿	9.56	乌桕	9.37	枸骨	7.79
	芒	5.95	艾蒿	8.79	慈竹	8.31	黄荆	7.18
	红叶野桐	5.40	山麦冬	6.73	女贞	5.01	越桔	6.42
V	青蒿	17.58	毛马唐	26.67	鬼针草	12.58	狗牙根	32.93
	芒	11.21	鬼针草	22.51	酢浆草	7.68	黄栌	6.32
	白茅	11.21	艾蒿	9.94	荩草	6.76	短尖忍冬	5.94
	鬼针草	9.16	槲栎	7.17	香椿	4.89	黄杨	5.48
	红叶野桐	8.34	狗尾草	6.43	乌桕	4.59	龙葵	4.39
IV	鬼针草	23.21	毛马唐	34.56	鬼针草	19.00	狗牙根	53.53
	毛马唐	20.64	狗尾草	24.38	酢浆草	13.02	狗尾草	10.13
	狗尾草	19.58	鬼针草	14.34	苍耳	8.04	龙葵	9.72
	黄茅	14.04	红蓼	6.56	狗尾草	7.31	飞蓬	6.99
	飞蓬	6.38	南瓜	6.51	莎草	6.73	铁线蕨	3.23
III	狗牙根	42.21	毛马唐	48.51	狗尾草	16.26	狗牙根	54.55
	狗尾草	19.16	狗尾草	23.38	酢浆草	12.59	狗尾草	15.34
	鬼针草	12.79	鬼针草	13.59	猪毛蒿	12.02	龙葵	8.70
	黄茅	8.72	南瓜	7.78	飞蓬	11.96	铁线蕨	2.92
	金色狗尾草	6.18	飞杨草	2.80	鬼针草	8.76	飞蓬	2.42
II	狗牙根	46.92	毛马唐	45.52	苍耳	21.89	狗牙根	76.96
	莎草	12.12	狗尾草	28.21	狗尾草	16.62	鬼针草	6.93
	鬼针草	10.86	鬼针草	10.37	狗牙根	13.02	狼尾草	6.87
	金色狗尾草	10.29	飞杨草	3.84	酢浆草	9.22	桑树	5.91
	毛马唐	9.37	苍耳	3.62	黄茅	7.05	狗尾草	3.34
I	莎草	59.74	莎草	41.96	稗草	34.63	狗牙根	75.56
	毛马唐	13.11	毛马唐	34.01	狗牙根	24.92	莎草	10.07
	狗牙根	7.16	狗尾草	9.77	苍耳	17.80	鬼针草	4.83
	金色狗尾草	6.27	红蓼	5.83	红蓼	8.35	稗草	4.77
	狗尾草	3.46	鬼针草	3.46	莎草	3.93	铁苋菜	4.76

注:截止到2012年植被调查时,海拔155~172m经历了4次水库水位涨落,海拔172~175m经历了2次水库水位涨落。各海拔区段每年的淹水深度分别为:海拔I区段20~15m,海拔II区段15~10m,海拔III区段10~7m,海拔IV区段7~3m,海拔V区段3~0m,海拔VI区段为对照区段,未被水淹没。飞蓬(*Erigeron acer* L.),蛇莓(*Duchesnea indica* Focke),红叶野桐(*Mallotus paxii* Pamp.),狗尾草(*Setaria viridis* L.),黄茅(*Heteropogon contortus* L.),金色狗尾草(*S. glauca* L.),槲栎(*Quercus aliena* Blume),山麦冬(*Liriope spicata* Thunb.),红蓼(*Polygonum orientale* L.),南瓜(*Cucurbita moschata* Duch. ex Lam.),飞杨草(*Euphorbia hirta* L.),野菊(*Dendranthema indicum* L.),乌桕(*Sapium sebiferum* L.),慈竹(*Bambusa emeiensis* Rendle),女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.),香椿(*Toona sinensis* A. Juss.),酢浆草(*Oxalis corniculata* L.),猪毛蒿(*Artemisia scoparia* Waldst. et Kit.),稗草(*Echinochloa crusgalli* L.),枸骨(*Ilex cornuta* Lindl. et Paxt.),黄荆(*Vitex negundo* L.),越桔(*Vaccinium vitis-idaea* L.),黄杨(*Buxus sinica* Cheng),龙葵(*Solanum nigrum* L.),铁线蕨(*Adiantum capillusveneris* L.),狼尾草(*Pennisetum alopecuroides* L.),桑树(*Morus alba* L.),铁苋菜(*Acalypha australis* L.)。

海拔VI(未经历水库水位涨落影响)区段,反映了各调查样地原始植被优势植物组成的基本特征,明显的特点是木本植物种类多于经历淹水的I-V区段。

对各调查样地同一海拔区段共有物种进行分析表明:在海拔I-IV、V和VI区段,优势植物种类数量和共有种数有明显的不同,其中,海拔I-IV区段有19种,V和VI区段分别为18种;I-IV和V区段有6个共有种,和VI区段仅有2个共有种,V和VI区段有8个共有种,说明经历4次水库水位涨落,且深水淹没的I-IV区段与未淹的VI区段的优势植物组成差别较大,而经历2次水库水位涨落,且浅水淹没的V和VI区段的优势植物组成的差别相对较小。

## 4 结论与讨论

### 4.1 消落带优势植物组成和物种多样性与海拔高程和样地之间的关系

消落带I-IV、V和VI区段的物种丰富度 $R$ 、 $\alpha$ 多样性指数、 $\beta$ 多样性指数及优势植物的垂直空间分异,与消落带不同海拔梯度的环境(如:温度、光照等)效应有关<sup>[15]</sup>。不同海拔区段的淹水深度、水淹持续时间及经历的水位涨落次数的不同是其最主要的影响因素。截止到调查时(2012年8月),海拔I-IV区段经历4次水库水位涨落,V区段经历了2次。一般认为,水淹会极大的改变植株生长的环境条件,植物在水淹环境中的一个典型特征就是氧亏缺。对于大多数长期生活在陆生环境下的植物而言,淹水胁迫会在分子、细胞和个体水平上干扰生物体的正常结构和各种过程的协调,且胁迫对生物体造成的伤害程度随胁迫的持续而加重。淹水过后的氧化胁迫对消落带植物生存也会构成较大威胁,因为,消落带的植物经历长期水淹,重新回到陆生环境后有一段适应过程,水淹过后植物与空气接触,受到的氧化胁迫程度可能会明显提高。已有研究表明,能够耐受长期水淹的植物,在水淹过后的恢复期内,也可能因不耐受较高的氧化胁迫而死亡<sup>[16]</sup>。相对而言,淹水较深、持续水淹时间较长(在陆地恢复生长的时间短)的植物受到的伤害越重,如果超过植物的耐受极限,自然植物的生存就会受到影响。因此,能够在消落带生存的植物不仅对淹水有较强的适应能力,同时对淹水过后的陆生环境也有较强的适应性。

不同调查样地间优势植物种类和物种多样性不完全相同,可能与消落带的土壤种子库特征有关,在消落带土壤存在的前提下,土壤种子库的植物组成

与地上植被的物种组成密切相关<sup>[5]</sup>。在经历水位涨落次数有限的情况下,消落带原生植被的植物组成对消落带的种子库以及现存植被的植物组成仍会有一些影响,至于经历十几年甚至更长时间的水位涨落周期后,也可能这种影响会逐渐减小。另外,土壤、地形、人为干扰等因素的影响,也是造成样地间出现差异的重要原因<sup>[17-18]</sup>。本研究中,秭归2块样地的土壤为黄壤土,巫山样地为黄色石灰土,不同样地的坡度大小也不同,在水库水位涨落过程中,土壤被冲刷的程度以及土壤保存状况对植物的空间分布也有一定的影响。

### 4.2 消落带植物生活型与高程差异

消落带植被物种组成以1年生草本植物为主,这与目前多数学者的研究结果一致<sup>[2-3,19-21]</sup>。随海拔梯度的下降,1年生草本植物的比例升高,淹水最深的海拔高程,在4块样地中,1年生草本植物的比例分别高达82%、75%、56%和60%,远高于未淹水区段,表明淹水提高了1年生草本植物的比例<sup>[3,20,22]</sup>。1年生草本植物的生活史较短,其生长发育期可能与三峡库区消落带出水成陆期基本一致;另外,1年生草本植物结实量大,传播能力强,对裸地环境有极强的适应性。这些可能是海拔较低的区段1年生植物比例提高的主要原因。相比而言,多年生草本植物,主要靠地下蔓延的根状茎进行克隆繁殖,种群扩散的速度比靠种子繁殖的1年生植物低。从图3b可以看出:多年生植物在不同海拔梯度上所占比例较小,多在30%~40%。秭归样地多年生草本植物在群落中所占比例,存在随海拔升高而增加的趋势,但变化速率不大,而巫山样地随海拔梯度的变化仅呈波动状态,似乎对海拔梯度的变化不甚敏感。这说明多年生草本对消落带生境适应性更为广泛,随着克隆繁殖时间的延长,很可能成为消落带不同海拔梯度的单优种群。木本植物在群落中所占比例,随着海拔梯度的降低而逐渐减少,表明木本植物对水淹的反应敏感,对于深水、长时间淹没的适应能力较差。

### 4.3 消落带适生植物、适应机制及不同海拔区段植被配置模式

海拔I-IV各区段,经历4次水库水位涨落影响后,其优势植物主要是莎草科的莎草,禾本科的狗牙根、毛马唐、狗尾草和菊科的鬼针草、苍耳,与经历首次水库水位涨落周期影响后调查的结果一致<sup>[5]</sup>。多年生草本莎草和狗牙根,一般具有能够克隆繁殖

的匍匐状地下根茎,具备极强的再生能力且通气组织较发达,可以适应水下缺氧环境。1年生草本毛马唐、狗尾草种子小、结实量大,种子可在土壤中存活较长时间<sup>[23]</sup>,种子的萌发可以选择在时间上分布的策略<sup>[24]</sup>;1年生草本苍耳,种子具有较强的耐淹能力,即使受近8个月原位水淹胁迫,90%以上的苍耳种子依然保持有生活力<sup>[25]</sup>。鬼针草的种子不耐水淹<sup>[24]</sup>,但其种子附属物(刺毛)利于其远距离传播,且其生活史较短,可在三峡出水成陆期完成其生命过程<sup>[3]</sup>;经历2个水库水位涨落周期影响的海拔V区段,其优势种除鬼针草、毛马唐和狗牙根外,新增的重要值较高的物种也多属于菊科、禾本科。

经历多次水库水位涨落后消落带植被的物种多样性、生活型组成的空间分布格局及不同海拔区段的优势植物,可为消落带植被恢复提供参考;但作为消落带植物恢复的材料,所选植物不仅要适应性强,同时还要考虑其枯落物对水体的污染状况及对旅游区库岸的景观需求。如苍耳,虽然适应能力较强,但其死亡后的第2年,甚至更长时间,其枯干和枯枝仍然在消落带宿存,不仅影响库岸景观,而且一旦倒伏还会给水体带来污染。因此,对类似植物的应用还需慎重考虑,而多年生的草本植物,如狗牙根、莎草等植物可列为优选培育对象。

综合考虑不同海拔区段的淹水周期、淹水时间、淹水深度,结合不同植被配置模式对水土保持及库区景观的影响,建议海拔I-IV(156~72 m)区段,植被的配置方式以草本为主,随海拔的升高,可梯度搭配种植莎草、狗牙根、毛马唐等;海拔V(172~175 m)区段以木本和草本结合的方式配置,建议木本植物如乌桕、红叶野桐、黄栌等,这些红叶类木本有利于库区两岸环境美化。

本研究仅对峡谷地貌区典型消落带海拔155~175 m的植被的空间分布开展了调查,因海拔155 m以下区段受季节性洪水的影响,水位上下波动较大,给野外调查工作带来一定困难,能否错开洪水季节,对海拔155~145 m区段的植被开展调查,有待继续研究。

## 参考文献:

[1] 王强,袁兴中,刘红,等.三峡水库初期蓄水对消落带植被及生物多样性的影响[J].自然资源学报,2011,26(10):1680-1693.  
[2] 孙荣,袁兴中,刘红,等.三峡水库消落带植物群落组成及物种多样性[J].生态学杂志,2011,30(2):208-214.

[3] 王业春,雷波,张晟.三峡库区消落带不同水位高程植被和土壤特征差异[J].湖泊科学,2012,24(2):206-212.  
[4] 刘维擘,王杰,王勇,等.三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异[J].生态学报,2012,32(17):5454-5466.  
[5] 郭泉水,康义,洪明,等.三峡库区消落带陆生植被对首次水陆生境变化的响应[J].林业科学,2013,49(5):1-9.  
[6] 中国长江三峡集团公司水情信息,宜昌.2014-03-25[2014-03-25].<http://www.ctgpc.com.cn/inc/sqsk.php>.  
[7] 常杰.生态学[M].北京:高等教育出版社,2010.  
[8] 方精云,沈泽昊,唐志尧,等.中国山地植物物种多样性调查计划及若干技术规范[J].生物多样性,2004,12(1):5-9,14.  
[9] 孔凡洲,于仁成,徐子钧,等.应用Excel软件计算生物多样性指数[J].海洋科学,2012,36(4):57-62.  
[10] 马克平,黄建辉,于顺利,等.北京东灵山地区植物群落多样性的研究Ⅱ丰富度、均匀度和物种多样性指数[J].生态学报,1995,15(3):268-277.  
[11] 宋永昌.植被生态学[M].上海:华东师范大学出版社,2002.  
[12] 中国植被编辑委员会.中国植被[M].北京:科学出版社,1983.  
[13] Whittaker R H. Evolution and measurement of species diversity[J]. Taxon, 1972, 21: 213-251.  
[14] Magurran A E. Ecological diversity and its measurement[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1988.  
[15] Gaston K J. Global patterns in biodiversity[J]. Nature, 2000, 405: 220-226.  
[16] 李兆佳,熊高明,邓龙强,等.狗牙根与牛鞭草在三峡库区消落带水淹结束后的抗氧化酶活力[J].生态学报,2013,33(11):3362-3369.  
[17] Lyon J, Gross N M. Patterns of plant diversity and plant environmental relationships across three riparian corridors[J]. Forest Ecology and Management, 2005,204: 267-278.  
[18] 陈求稳,欧阳志云.流域生态学及模型系统[J].生态学报,2005,25(5):1153-1161.  
[19] 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[J].西南农业大学学报,2005,27(5):684-691.  
[20] 卢志军,李连发,黄汉东,等.三峡水库蓄水对消落带植被的初步影响[J].武汉植物学研究,2010,28(3):303-314.  
[21] 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[J].植物生态学报,2010,34(12):1404-1413.  
[22] 王勇,吴金清,黄宏文,等.三峡库区消落带植物群落数量分析[J].武汉植物学研究,2004,22(4):307-314.  
[23] Hopkins M S, Graham A W. The viability of seeds of rainforest species experimental soil burials under tropical wet lowland forest in north-eastern Australia[J]. Australian Journal of Ecology, 1987, 12(2): 97-108.  
[24] 陶敏,鲍大川,江明喜.三峡库区9种植物种子萌发特性及其在植被恢复中的意义[J].生态学报,2011,31(4):906-913.  
[25] 王强,袁兴中,刘红,等.水淹对三峡水库消落带苍耳种子萌发的影响[J].湿地科学,2011,9(4):328-333.