

三峡库区万州段消落带植被及土壤理化特征分析

张志永^{1,2},程郁春¹,程 丽²,万成炎^{1,3},李金波⁴

- (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,武汉 430079;
2. 华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070; 3. 水资源安全保障湖北省协同创新中心,武汉 4300723;
4. 武汉中科水生环境工程股份有限公司,武汉 430060)

摘要:水文节律是河岸带植物群落演替的主要驱动因子,受水文节律影响的土壤理化特性也有可能逐渐改变周边植被,为了探究周期性淹没对三峡水库消落带植物群落及其生境状况的影响,2015年8-9月,以三峡水库腹地万州段消落带为研究区域,调查分析了8个样地、24个样带、96个样方的消落带植被及土壤理化特征。结果表明,在三峡库区万州段消落带共调查到维管植物22科、47属、51种,其中禾本科、菊科、蓼科和莎草科的种类数较多;植物群落组成以草本植物为主,一年生和多年生草本植物分别占58.8%和27.5%。高程不同,群落优势种有差异,145~155 m及156~165 m区域优势度较高的物种相近,为狗牙根(*Cynodon dactylon*)、光头稗(*Echinochloa crusgalli* var. *mitis*)和醴肠(*Eclipta prostrata*);高程166~175 m区域优势度较高的物种为鬼针草(*Bidens pilosa*)和狗尾草(*Setaria viridis*)和狗牙根;高程156~166 m区域植物鲜重均值最高,为(2199.1±863.9)g/m²;高程166~175 m区域 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的均值最高,分别为(2.00±0.30)和(0.85±0.06)。随着坡度等级增加,植物鲜重和盖度呈递减趋势,物种数在坡度6~15°区域最高。长江左岸消落带植物鲜重、高度、Shannon-Wiener 和 Pielou 指数高于右岸。消落带土壤理化性质具有较高的空间异质性,土壤容重、pH、有机质、全氮、有效氮、全磷、有效磷均值分别为(1.34±0.09)g/cm³、(7.60±0.47)、(6.02±2.94)g/kg、(1.21±0.16)g/kg、(53.42±9.67)mg/kg、(0.42±0.14)g/kg、(6.55±2.82)mg/kg,其中有机质的变异系数最大,其次为有效磷和全磷。左岸消落带土壤 pH、有机质、全氮和有效氮含量均值低于右岸,但左岸土壤全磷和有效磷含量高于右岸。淹没时间和土壤有效磷含量对消落带植物重要值影响较大。

关键词:三峡水库;消落带;植物群落;重要值;土壤性质

中图分类号:Q948 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2016)02-0024-10

消落带又称为水位涨落带、消涨带、消落区等,由于人为控制或自然降雨在时间尺度上的不均匀,江河湖泊水位会发生季节性和时间性的波动,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(王勇等,2005;吕明权等,2015)。根据引起水位涨落的方式不同分为自然消落带和水库消落带。自然消落带类似于自然的河岸带生态系统和湖岸带生态系统,受关注较早。随着防洪、发电、灌溉和航运等需要,世界范围内的河流上构筑了越来越多的大坝,由此导致的生态环境问题日益受到广泛关注。大坝的调度运行显著改变了

河流的自然水位节律,导致原有河岸带植物(尤其是乔木和灌木)种类消失以及水土流失等生态环境问题(New & Xie,2008;Liu et al,2014)。

已有研究表明,水文节律是河岸带植物群落演替的主要驱动因子,受水文节律影响的土壤理化特性也有可能逐渐改变周边植被(Nilsson & Berggren,2000;Aerts et al,2003)。三峡水库于2008年试验性蓄水至172.8 m,2010年达到正常蓄水位175 m。三峡水库蓄水初期,消落带的植物群落特征(刘维擘等,2011;张志永等,2013)、土壤容重及养分在时空上发生了较大的变化(常超等,2011;郑志伟等,2011)。为掌握经历了5年的周期性淹没-出露后的三峡水库消落带植物群落及其生境状况,项目组于2015年8月17日至9月2日,以三峡水库腹地万州段消落带为研究区域,调查分析了消落带植被及土壤特征,旨在为大型水库消落带的生态恢复及科学管理提供数据支撑。

收稿日期:2015-12-07

基金项目:国家水体污染控制与治理重大专项(2013ZX07104-004);三峡后续工作科研项目(2013HXKY2-3)。

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

通信作者:万成炎。E-mail: chywan@mail.ihe.ac.cn

1 材料与方法

1.1 消落带概况

万州区(30°24'25"~31°14'58"N,107°52'22"~108°53'25"E)位于地处四川盆地东缘、三峡库区腹地。以三峡库区1:2000数字地形为主要信息源,以汛期多年日平均流量的80%流量(参考“三峡初步设计阶段干流各断面土地征用线和分期移民迁移线水位表”)在坝前145 m高程时回水线为下限,坝前175 m高程土地征用线为上限,测算三峡库区万州消落带面积为29.36 km²,占三峡库区总消落带(302.02 km²)的9.72%。按坡度划分,缓坡区(小于15°)、中缓坡区(15°~25°)和陡坡区(大于25°)的消落带面积分别为15.02 km²(51.16%),7.52 km²(25.61%)和6.82 km²(23.23%);按高程划分,高程145~155 m、155~165 m、165~175 m段消落带面积分别为8.38 km²(28.54%)、9.96 km²(33.92%)、11.02 km²(37.53%)。采用坝前175 m高程土地征用线测算万州消落带岸线长度为378.60 km,占消落带总周长(5 777.50 km)的6.55%。

万州区属亚热带季风湿润区,具有春早、夏长、秋雨、冬暖的特点。年平均气温18.1℃,1月最冷,平均气温6.7℃,7月和8月最热,平均气温28.5℃(重庆市万州区龙宝移民开发区地方志编纂委员会,2001)。降水量为1 000~1 300 mm,集中在5~9月,约占年降水量的70%。日照偏少、无霜期长,年平均日照时数924 h。

1.2 样品采集与分析

消落带类型多样,即可按水系将消落带划分为干流消落带和支流消落带,又可按坡度划分为缓坡、中缓坡和陡坡类型,为了使调查样地能够较为全面地反映万州消落带植被及土壤环境特征,于2015年8月17日至9月2日(调查期间三峡水库坝前水位145.7~152.6 m),在长江干流设置了武陵(30°37'35.23"N,108°16'46.37"E)、溪口(30°36'44.42"N,108°20'50.01"E)、大周(30°53'14.65"N,108°29'59.85"E)、二桥(30°49'23.95"N,108°24'26.09"E)、新田(30°42'30.20"N,108°25'20.03"E)共计5个样地;在支流设置了灩渡(30°36'02.63"N,108°17'51.01"E)、芑溪(30°49'40.44"N,108°20'59.19"E)、黄柏(30°55'19.14"N,108°36'14.93"E)共计3个样地(图1)。在每个样

地沿消落带下部(高程145~155 m)、中部(156~165 m)和上部(166~175 m),设置10 m×30 m样带,每个样带内设置4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。同时采用多功能坡度仪测定每个样方的坡度,将坡度划分为6个等级,平坦(小于5°)、缓坡(6°~15°)、斜坡(16°~25°)、陡坡(26°~35°)、急坡(35°~45°)、险坡(大于45°)。合计调查8个样地,24个样带,96个样方。

野外调查时不能直接识别的,制作标本,编号保存,待野外工作结束后室内鉴定。依据彭镇华(2005)主编的《中国长江三峡植物大全》,统计调查到的植物生活型。环刀法测定样方内的土壤容重。每个样方内用手动取土钻钻取3个表层土壤样品(0~20 cm),混合为一个样品后放入封口袋,每个样带1个土壤样品,合计24个。带回实验室测定土壤pH、有机质(SOM)、全氮(TN)、有效氮(AN)、全磷(TP)、有效磷(AP)(鲍士旦,2005)。

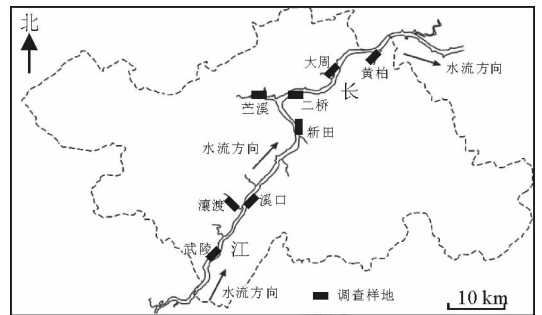


图1 万州消落带调查样地示意

Fig. 1 Location of sampling sites in the water level fluctuation zone of the Wanzhou region

1.3 数据处理

重要值(Importance value, IV)由Crutis和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公式(Li et al, 2012; Zhang et al, 2012):

$$\text{重要值} = (\text{相对盖度} + \text{相对高度}) / 2$$

$$\text{相对盖度} = (\text{某一植物种的盖度} / \text{样方内所有植物种的盖度之和}) \times 100\%$$

$$\text{相对高度} = (\text{某一植物种的高度} / \text{样方内所有植物种的高度之和}) \times 100\%$$

$$\text{优势度: } Y_i = P_i \times f_i$$

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数: } H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } E = H' / \ln S$$

式中: $P_i = N_i / N$; N_i 为物种的重要值; N 为样方内所有物种重要值之和; S 为样方内的物种数。

利用 SPSS 18.0 的非参数检验中的 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 C 法进行多重比较,显著水平取 0.05 (王强等,2011; 王业春等,2012),选用 Origin-Pro 9.0 软件制图。

利用 Canoco 4.5 软件,在 24 个样带植物重要值计算基础上,先进行除趋势对应分析(DCA),再进行冗余分析(RDA)或典范对应分析(CCA)。由于环境变量,坡度、土壤容重、pH、有机质(OM)、有效氮(AN)、有效磷(AP)、淹没时间的量纲不一样,需要对环境变量进行平方根转化(Leps & Smilauer, 2003; Gazer, 2011)。执行 RDA 过程时,选择自动前选,进行蒙特卡罗检验。通过边际影响(Marginal effects)特征值和条件影响(Conditional effects)特征值判定该环境变量对物种的影响(Gazer, 2011)。

消落带植物群落特征及土壤理化特征均值由 24 个样带的的数据计算得出,消落带下部(高程 145 ~ 155 m)、中部(156 ~ 165 m)和上部(166 ~ 175 m)植物与土壤理化特征均值由同一高程区域 8 个样带的的数据计算得出。

2 结果与分析

2.1 消落带植物群落组成

在万州消落带 8 个站点,共调查到维管植物 22 科、47 属、51 种,其中禾本科 9 种,菊科 7 种,蓼科和莎草科 4 种。植物群落组成以草本植物为主,其中一年生草本植物 30 种,占 58.8%;多年生草本植物 14 种,占 27.5%。在新田高程 170 ~ 175 m 区域零星分布有柳树(*Salix babylonica*),瀼渡、溪口、二桥附近的沱口福利院外侧 170 ~ 175 m 区域有成片的中山杉(*Ascendens mucronatum*)人工林。

高程不同,消落带植物群落的优势种有差异。高程 145 ~ 155 m 区域的 8 个样带中,狗牙根(*Cynodon dactylon*)和光头稗(*Echinochloa crusgalli* var. *mitis*)的优势最为明显,在 7 个样带中均为优势种,其次为醴肠(*Eclipta prostrata*) (4 个)和水蓼(*Polygonum hydropiper*) (3 个)。高程 156 ~ 165 m 区域,狗牙根和光头稗的优势较为明显,分别在 6 个和 5 个样带中为优势种,其次为醴肠和苍耳(*Xanthium sibiricum*),均在 4 个样带中占优。166 ~ 175 m 区域,鬼针草(*Bidens pilosa*)和狗尾草(*Setaria viridis*)的优势最为明显,在 6 个样带中均为优势种,其次为狗牙根、水蓼、水花生(*Alternanthera philoxeroides*),

在 5 个样带中为优势种(表 1)。

表 1 消落带不同高程区域优势种(优势度)

Tab.1 Dominant species (dominance) of the plant community at different elevations of the water level fluctuation zone

样地	高程范围/m		
	145 ~ 155	156 ~ 165	166 ~ 175
武陵	狗牙根(0.61)	狗牙根(0.53)	狗牙根(0.21)
	稗(0.12)	稗(0.13)	狗尾草(0.20)
	苍耳(0.03)		鬼针草(0.06)
瀼渡			水蓼(0.05)
			水花生(0.03)
			小飞蓬(0.03)
		狗牙根(0.36)	鬼针草(0.19)
		狗尾草(0.18)	水花生(0.16)
	狗牙根(0.70)	铁苋菜(0.08)	水蓼(0.07)
溪口		马唐(0.07)	石芥苣(0.06)
		鬼针草(0.06)	狗牙根(0.05)
		稗(0.04)	扛板归(0.03)
		狗牙根(0.37)	
		水蓼(0.23)	狗尾草(0.47)
	稗(0.45)	稗(0.21)	狗牙根(0.18)
新田	狗牙根(0.32)	水花生(0.05)	水花生(0.07)
	鬼针草(0.07)	苍耳(0.02)	
		狗牙根(0.38)	狗尾草(0.23)
		醴肠(0.18)	苍耳(0.17)
		苍耳(0.08)	小飞蓬(0.09)
		稗(0.04)	水蓼(0.07)
二桥		水蓼(0.04)	鬼针草(0.07)
		马唐(0.05)	黄花蒿(0.05)
		鬼针草(0.03)	
		狗牙根(0.47)	鬼针草(0.19)
		醴肠(0.16)	狗牙根(0.17)
	稗(0.07)	醴肠(0.12)	狗尾草(0.08)
芭溪	苍耳(0.03)	合萌(0.03)	苍耳(0.07)
			醴肠(0.03)
			水花生(0.03)
		马唐(0.30)	水蓼(0.11)
		醴肠(0.12)	蔊菜(0.11)
	稗(0.56)	狗尾草(0.09)	菵草(0.08)
大周	水蓼(0.30)	鬼针草(0.06)	水花生(0.07)
	水花生(0.04)	苍耳(0.05)	马唐(0.07)
		蔊菜(0.03)	醴肠(0.06)
		马唐(0.29)	马唐(0.30)
		苍耳(0.12)	苍耳(0.17)
	稗(0.41)	醴肠(0.08)	狗尾草(0.12)
黄柏	鬼针草(0.09)	狗尾草(0.06)	水蓼(0.05)
	水蓼(0.07)	马唐(0.06)	稗(0.04)
	狗牙根(0.06)	香附(0.02)	鬼针草(0.03)
	醴肠(0.05)	水蓼(0.03)	
	香附(0.02)		
		狗牙根(0.53)	苍耳(0.40)
黄柏	苍耳(0.05)	狗牙根(0.50)	狗尾草(0.21)
	稗(0.04)	苘麻(0.09)	狗牙根(0.12)
	醴肠(0.02)	水花生(0.04)	鬼针草(0.06)

2.2 消落带不同高程区域植物群落特征比较

万州消落带植物鲜重、盖度、高度和物种数均值依次为(92 042.8 ± 889.9) g/m²、(95.5 ± 25.2)%、(54.1 ± 25.8) cm、(4.7 ± 2.0) 个。

高程 156 ~ 165 m 区域植物鲜重均值最高,为

(2199.1 ± 863.9) g/m^2 , 高程 166 ~ 175 m 区域植物鲜重均值最低, 为 (1821.8 ± 981.9) g/m^2 , 但高程之间差异不显著(图 2-A)。高程 166 ~ 175 m 区域总盖度均值最低, 为 (86.1 ± 26.5)%, 低于 145 ~ 155 m 区域(图 2-B); 植物高度和物种数均值最大, 分别为 (64.5 ± 27.4) cm 和 (5.4 ± 1.8) 个, 高于 145 ~ 155 m 区域, 但差异不显著(图 2-C, D)。高程 156 ~ 165 m 区域植物高度、物种数、总盖度均值介于其它 2 个高程区域之间。

消落带植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均值分别为 (1.72 ± 0.37) 和 (0.79 ± 0.08)。高程 166 ~ 175 m 区域 Shannon-Wiener 和 Pielou 指数的均值最高, 分别为 (2.00 ± 0.30) 和 (0.85 ± 0.06), 显著高于高程 145 ~ 155 m 区域(图 3-A, B)。

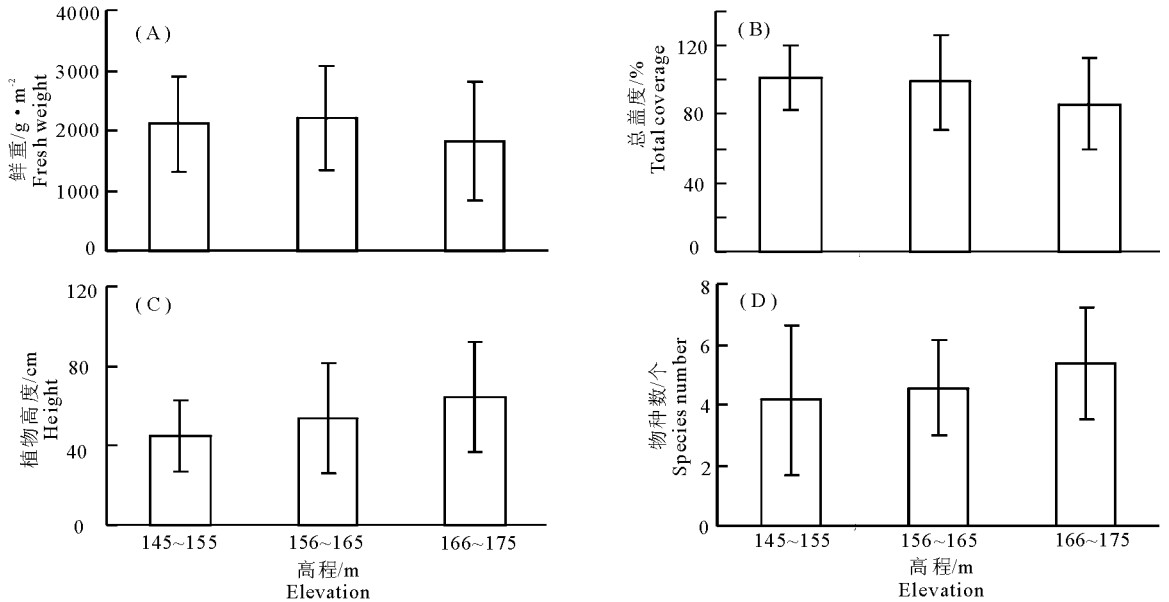
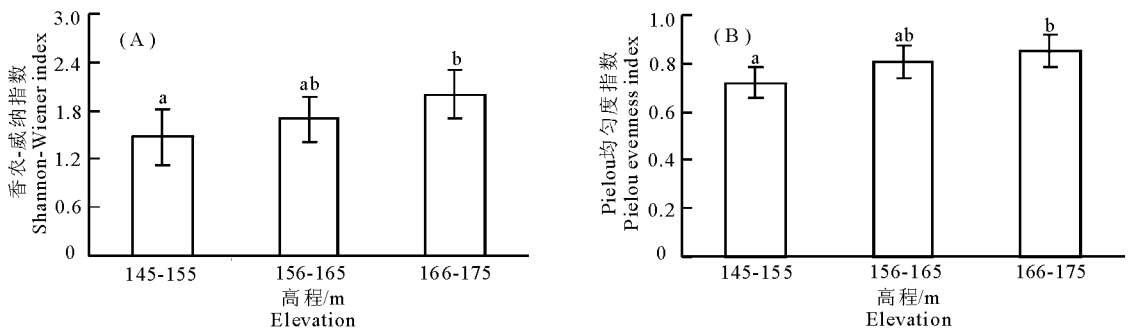


图 2 植物鲜重、盖度、高度和物种数随高程变化

Fig. 2 Changes in fresh weight, total coverage, height and species number of plants with increasing elevation

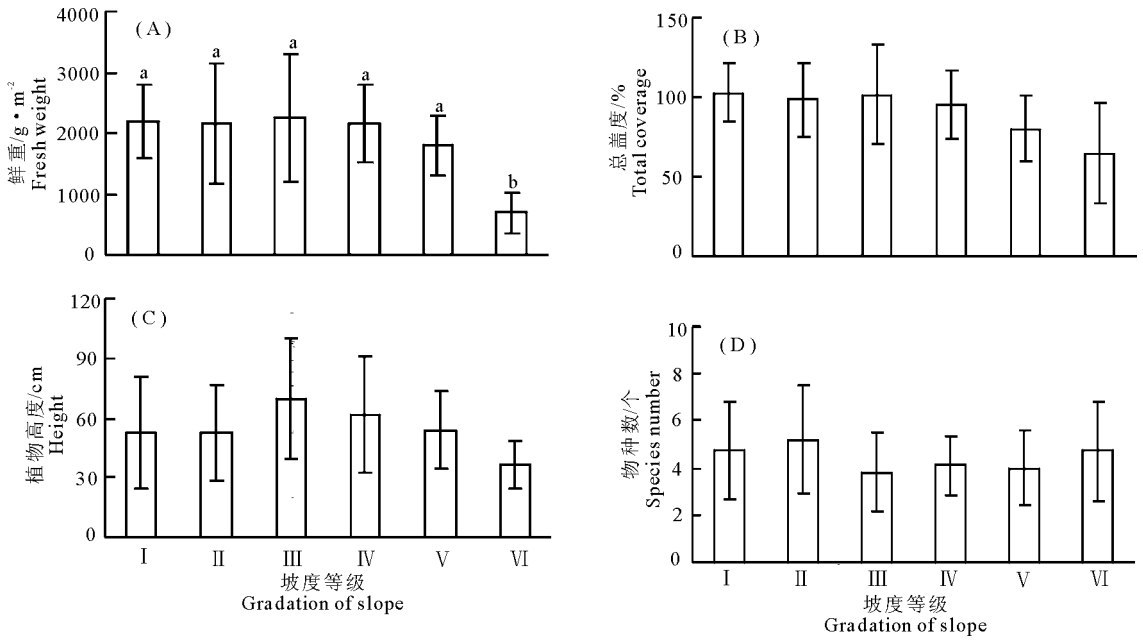


注: 不同小写字母表示 0.05 水平差异显著。

图 3 生物多样性指数随高程变化

Note: Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$.

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



注: 坡度等级 I - VI 依次为 $<5^\circ$, $6^\circ \sim 15^\circ$, $16^\circ \sim 25^\circ$, $26^\circ \sim 35^\circ$, $36^\circ \sim 45^\circ$, $> 45^\circ$ 。

图4 植物鲜重、盖度、高度和物种数随坡度等级变化

Note: Slope grade of I - VI are $<5^\circ$, $6^\circ \sim 15^\circ$, $16^\circ \sim 25^\circ$, $26^\circ \sim 35^\circ$, $36^\circ \sim 45^\circ$, and $> 45^\circ$, respectively.

Fig. 4 Changes in fresh weight, total coverage, height and species number of plants with increasing slope

表2 长江左岸和右岸植被特征比较

Tab. 2 Difference in vegetation characteristics between left bank and right bank of Yangtze River

坡向	鲜重/ $g \cdot m^{-2}$	盖度/ %	高度/cm	物种数/ 个	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数
左岸	2292.1 ± 967.1	94.23 ± 27.59	62.71 ± 30.29	4.65 ± 1.78	1.75 ± 0.44	0.80 ± 0.10
右岸	1793.6 ± 733.8	96.94 ± 22.79	45.30 ± 16.45	4.74 ± 2.29	1.69 ± 10.30	0.78 ± 0.06

2.4 消落带土壤理化性质分析

万州消落带土壤容重、pH、有机质、全氮、有效氮、全磷、有效磷分别为 $(1.34 \pm 0.09) g/cm^3$ 、 (7.60 ± 0.47) 、 $(6.02 \pm 2.94) g/kg$ 、 $(1.21 \pm 0.16) g/kg$ 、 $(53.42 \pm 9.67) mg/kg$ 、 $(0.42 \pm 0.14) g/kg$ 、 $(6.55 \pm 2.82) mg/kg$ (表3)。除土壤pH和有效氮外,土壤容重、有机质、全磷和有效磷表现为平均值大于中位数。土壤理化指标中变异系数最大的为有机质,达48.81%,其次为有效磷和全磷,说明这些指标空间分布差异大,对植被、地形和人类活动干扰敏感。

消落带土壤理化性质具有较高的空间异质性(表4)。高程145~155 m区域土壤容重最小,pH、有机质、全氮、有效磷含量均值最大,高程156~165 m区域土壤全磷含量均值最大,高程166~175 m区域土壤容重、有效氮含量最大,土壤有机质、全磷、有效磷含量均值最小。

坡向不同,土壤理化特征相近,左岸消落带土壤pH、有机质、全氮和有效氮含量均值比右岸稍低,但左岸土壤容重、全磷和有效磷含量比右岸的稍高。

2.5 土壤理化性质对植物重要值的影响

对物种数据进行DCA分析,最大轴的梯度长度为2.148,小于3,选择线性模型比较合理。本研究选择线性模型RDA对物种与环境因子的关系进行分析。结果显示,RDA第一和第二排序轴解释物种重要值的比例分别为30.8%和13.0%,总典范特征值(Sum of all eigenvalues)为0.594。淹没时间、有效磷、有机质的边际影响特征值(Lambda)较大,分别为0.21、0.11和0.08(图5),其中淹没时间($F = 5.75, P = 0.002$)、有效磷含量($F = 4.48, P = 0.002$)通过Monte carlo检验。

RDA排序图中,数量型环境因子箭头的长短可以代表环境因子对于物种数据的影响程度(解释量的大小)(Leps & Smilauer, 2003),淹没时间和土壤有效磷含量的箭头比其他环境因子较长(图5),可以说明这2个环境因子对万州段消落带植物重要值的影响较大。物种箭头之间的夹角可以表示物种之间的相关性,夹角越小表示相关性越高,因此,狗牙根和合萌,球穗莎草和双穗雀稗,扛板归和荔枝草,小飞蓬和苍耳,草木樨、空心莲子草和鬼针草常丛生

表 3 消落带土壤理化性质分析

Tab. 3 Characteristics of soil physical-chemical properties in the water level fluctuation zone

样地	编号	高程/ m	容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	pH	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
武陵	1	145 ~ 155	1.33	7.92	7.44	1.49	55.55	0.49	7.35
	2	156 ~ 165	1.49	7.79	3.63	0.91	33.77	0.69	7.39
	3	166 ~ 175	1.46	7.51	4.30	1.05	46.89	0.54	5.83
壤渡	4	145 ~ 155	1.36	7.13	4.97	1.28	50.37	0.25	2.67
	5	156 ~ 165	1.27	6.67	5.05	1.27	66.26	0.33	2.47
	6	166 ~ 175	1.31	6.89	6.12	1.14	38.86	0.28	2.40
溪口	7	145 ~ 155	1.35	7.93	3.39	1.06	42.61	0.44	5.75
	8	156 ~ 165	1.22	7.73	10.85	1.09	44.84	0.20	6.61
	9	166 ~ 175	1.45	7.17	2.32	1.13	56.08	0.19	1.97
新田	10	145 ~ 155	1.40	7.92	13.92	1.23	52.34	0.44	8.02
	11	156 ~ 165	1.36	7.91	5.27	1.27	57.87	0.50	6.65
	12	166 ~ 175	1.35	7.21	7.02	1.32	64.83	0.37	11.57
二桥	13	145 ~ 155	1.40	7.99	7.10	1.07	45.55	0.48	8.56
	14	156 ~ 165	1.30	7.81	7.86	1.07	47.36	0.44	5.87
	15	166 ~ 175	1.26	8.10	6.69	1.22	64.62	0.40	4.62
苕溪	16	145 ~ 155	1.26	7.57	9.51	1.13	65.81	0.36	10.16
	17	156 ~ 165	1.46	7.53	6.38	1.11	55.37	0.36	10.90
	18	166 ~ 175	1.29	7.06	3.81	1.48	62.15	0.32	6.45
大周	19	145 ~ 155	1.35	7.72	2.15	1.19	51.98	0.54	7.47
	20	156 ~ 165	1.46	7.56	2.32	1.26	58.76	0.69	10.40
	21	166 ~ 175	1.42	7.10	2.15	1.02	39.31	0.63	10.01
黄柏	22	145 ~ 155	1.18	8.10	8.93	1.46	67.15	0.42	6.34
	23	156 ~ 165	1.14	7.89	7.87	1.53	50.55	0.31	4.00
	24	166 ~ 175	1.27	8.13	5.46	1.25	63.26	0.29	3.64
合计		145 ~ 155	1.33	7.79	7.18	1.24	53.92	0.43	7.04
		156 ~ 165	1.34	7.61	6.15	1.19	51.85	0.44	6.79
		166 ~ 175	1.35	7.40	4.73	1.20	54.50	0.38	5.81

表 4 长江左岸和右岸土壤属性差异

Tab. 4 Difference in soil physical-chemical properties between left bank and right bank of Yangtze River

坡向	容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	pH	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
左岸	1.36 ± 0.08	7.37 ± 0.49	4.82 ± 2.26	1.19 ± 0.17	52.09 ± 10.71	0.46 ± 0.16	6.96 ± 3.14
右岸	1.32 ± 0.10	7.82 ± 0.32	7.22 ± 3.13	1.23 ± 0.15	54.76 ± 8.76	0.37 ± 0.10	6.13 ± 2.53

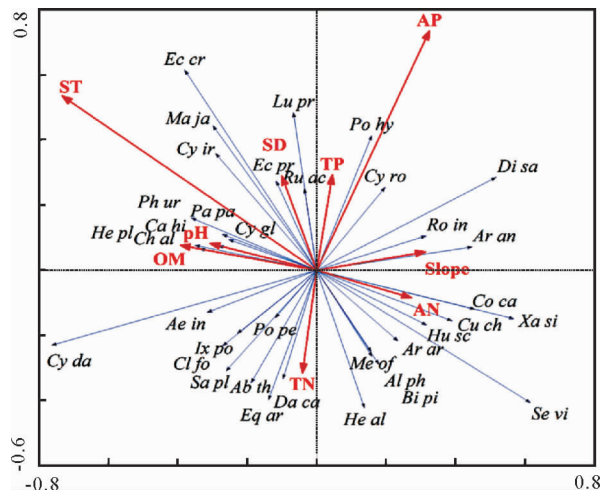
在一起。物种箭头与数量型环境因子箭头之间也可以同样解读,夹角越小相关性越高,由此可见苍耳和小飞蓬的重要值与土壤有效氮正相关,水蓼和香附的重要值与土壤有效磷正相关,醴肠、酸模和丁香蓼的重要值与土壤容重正相关。

3 讨论

3.1 消落带植物群落组成及优势种的时空变化

三峡水库蓄水前后,高程 145 ~ 175 m 区域植物群落组成发生了很大变化。蓄水前(2003 年第一期蓄水前),高程 175 m 以下的植被类型主要有森林(如马尾松林、柏木林和枫杨林等)、灌丛(中华蚊母、疏花水柏枝和巫溪叶底珠等)、草丛(白茅、野古草和狗牙根等)等(王勇等,2004;赵常明等,2007;

陈伟烈等,2008)。三峡水库第一期蓄水(2003 年)至成功蓄水 175 m(2010 年)期间,高程 145 ~ 175 m 区域受淹没影响的陆生植物在 300 种左右(陈伟烈等,2008),但绝大多数物种在 175 m 以上还有分布,不会导致物种灭绝(中国工程院三峡工程阶段性评估项目组,2010)。消落带(高程 145 ~ 175 m)植被以一年生和多年生草本植物为主(张志永等,2011;王强等,2011,王业春等,2012)。其主要原因一是三峡水库蓄水淹没前,为保证三峡水库水质和航运安全,砍伐和清除了高程 175 m 以下成片的树林和竹林;二是残存的原生乔木、灌木种类大多数不耐水淹,很难在三峡水库蓄水运行导致的高水深(最高达 30 m)、长时间持续完全水淹(最长达 7 个月)环境中存活(刘维擘等,2011;张志永等,2013)。



注:SD, 土壤容重; ST, 淹没时间; OM, 有机质; TN, 全氮; AN, 有效氮; TP, 全磷; AP, 有效磷; 仅显示合适度(Fit)大于3%的物种;名字以属名和种名的前2个字母表示, *Ar an*, 黄花蒿; *Ro in*, 蕹菜; *Di sa*, 马唐; *Cy ro*, 香附; *Po hy*, 水蓼; *Lu pr*, 丁香蓼; *Ru ac*, 酸模; *Ec pr*, 醴肠; *Ec cr*, 稗; *Ma ja*, 通泉草; *Cy ir*, 碎米莎草; *Cy gl*, 球穗莎草; *Pa pa*, 双穗雀稗; *Ph ur*, 叶底珠; *Ca hi*, 碎米荠; *Ch al*, 灰菜; *He pl*, 野荸荠; *Cy da*, 狗牙根; *Ae in*, 合萌; *Ix po*, 苦苣菜; *Cl fo*, 灯笼草; *Po pe*, 扛板归; *Sa pl*, 荔枝草; *Ab th*, 苘麻; *Eq ar*, 问荆; *Da ca*, 野胡萝卜; *He al*, 牛鞭草; *Me of*, 草木犀; *Al ph*, 水花生; *Bi pi*, 鬼针草; *Ar ar*, 艾蒿; *Se vi*, 狗尾草; *Hu sc*, 菎草; *Cu ch*, 菟丝子; *Co ca*, 小飞蓬; *Xa si* 苍耳。

图5 植物重要值与环境变量的RDA分析

Fig. 5 Relationship among species and environmental variables using RDA analysis

水库成功蓄水175 m(2010年)至2015年期间,消落带植物种类没有明显的变化,仍以草本为主,且一年生草本占优,但优势种及其优势度发生了变化。本次调查结果表明,草本植物在万州段消落带占有绝对优势,一年生草本植物占物种总数的58.8%,多年生草本植物占27.5%,这与朱妮妮等(2015)在三峡库区巫山和秭归段、付娟等(2015)在香溪河消落带的调查结果一致。消落带尤其是低海拔区域的植物群落中,耐水淹能力较强或者高繁殖力的物种优势度增加,不耐水淹或者种子体积较大的物种优势降低。张志永等(2013)监测结果显示,2009-2011年小江消落带高程145~155 m区域狗牙根、水蓼和醴肠优势度升高,而苍耳、鬼针草和狗尾草优势降低;高程166~175 m区域鬼针草、黄花蒿优势度下降,而狗尾草和狗牙根的优势度升高;朱妮妮等(2015)监测结果显示,2008-2012年高程156~172 m区域狗牙根和狗尾草的优势度增加;王强等(2012)在白家溪消落带监测结果显示,2008-2010年高程156 m以下,狗牙根替代苍耳成为优势种。本次调查结果表明,万州段消落带调查样带中,狗牙

根分布范围最广,在18个样带中占优(表1),这是因为狗牙根在水淹期间,其根部通气组织发生,并逐渐扩大(Bailey-Serres & Voeselek, 2008; Abiko et al, 2012),根系生物量增加(Peña-Fronteras et al, 2009; 洪明等, 2011),水位下降后能很快萌发。随着三峡水库周期性蓄水淹没次数的增加,狗牙根的竞争优势可能更为明显,且有逐渐向高程较高区域蔓延趋势。本次研究还显示,一年生草本植物稗、醴肠、水蓼、鬼针草和狗尾草也是消落带的优势物种(表1),其主要原因是9月水库蓄水前种子能够完全成熟,种子体积小、数量多,且水淹期间,大多数种子没有失去活力,水位消退后,萌芽和生长迅速,在种间竞争中具有优势。

3.2 消落带土壤理化性质的时空变化

淹水可改变土壤的理化性质,导致土壤容重和pH增加。程瑞梅等(2009)在三峡水库消落带秭归段、康义等(2010)在巫山段和秭归段、常超等(2011)在忠县段的调查结果均表明,消落带土壤容重和pH比未淹区域的大,且随着水位涨落周年的增加消落带土壤容重增加趋势,pH变化趋势不明显。已有研究表明,长时间水淹会导致消落带土壤pH升高,这可能与所在区域的环境特征相关,如在厌氧条件下,可形成大量的还原性碳酸铁、锰等,致使pH升高(常超等, 2011)。本次研究也证明了这点,在调查的8个样带中,有6个样地高程145~155 m区域的土壤pH比高程156~165 m和166~175 m区域高(表3)。虽然二桥和黄柏样地高程166~175 m区域pH最高,但这可能是由于高程180~200 m存在的桥梁建设和工程护岸的影响所致(水泥呈弱碱性)。

淹水可以改变消落带土壤的养分含量,但不同的研究,其结果不尽一致。与未淹区域相比,三峡水库消落带土壤全氮和有机质含量下降(王晓荣等, 2010; 常超等, 2011; 郭劲松等, 2012; 郭泉水等, 2012)下降;也有研究表明,消落带土壤全氮(王晓荣等, 2010)和有机质含量升高(郭劲松等, 2012)。淹水是否导致土壤全磷含量升高或降低,也没有明确的结论,常超等(2011)、郭泉水等(2012)的研究结果显示,消落带土壤全磷含量比未淹区域低,而王晓荣等(2010)的研究结果与此相反。消落带土壤理化特征的高度变异性,主要原因一是库周居民人类活动的影响,如放牧牛羊,在消落带高程区域170~175 m区域季节性种植农作物(施肥、收割)等;二是三峡水库运行后,消落带土壤呈周期性的淹

没-出露,干湿交替明显,且不同高程区域受水淹、浪涌冲刷、落淤程度、降雨侵蚀及地表径流等因素影响程度不同。

3.3 消落带土壤理化性质对植被的影响

消落带土壤的有无决定植物是否存在,而土壤的理化性质决定着植物覆盖度和生物量的大小。由于消落带土壤长期受涌浪侵蚀、径流侵蚀、崩坍和蠕滑等多种侵蚀营力作用,土壤侵蚀异常剧烈。前期已有研究表明,三峡水库消落带土壤侵蚀模数是库区 $[3\ 185\ t/(km^2 \cdot a)]$ 的 30 倍,干流消落带土壤侵蚀强度是支流的 7 倍(中国工程院三峡工程试验性蓄水阶段评估项目组,2014);由此可推断,随着水位周年涨落增加的消落带,尤其是陡坡区域,土层可能变得越来越薄,植物将失去赖以生存和生长的基质。胡波等(2010)也发现,重庆市三峡库区石宝寨段消落带的植被优势度、生物量与土层厚度正相关。本研究显示,苍耳和小飞蓬的重要值与土壤有效氮正相关,水蓼和香附的重要值与土壤有效磷正相关,醴肠、酸模和丁香蓼的重要值与土壤容重正相关(图 5)。王长庭等(2005)认为土壤养分对于植物的生长起关键作用,直接影响着植物群落的组成与生理活动,决定着生态系统的结构、功能和生产力水平;张志永等(2013)研究表明,植物鲜重与土壤养分含量均呈正相关,其中土壤有机质、全氮、有效氮含量与植物鲜重呈显著的正相关。

随着三峡水库的调度运行,消落带不同海拔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将会逐渐呈现差异,为了正确理解和预测大型水利水电工程建设运行对植物群落特征及土壤理化性质的累积效应,需要继续监测消落带植物群落特征及土壤理化性质的时空变化。实施消落带生态恢复工程时,可优先选择具有较强耐水淹能力、高经济价值的多年生植物如狗牙根、牛鞭草等,可以减少二次播种或栽植成本。在消落带生态环境脆弱区进行生态修复时,尤其在陡坡区域,应采取必要的水土保持措施,尽量减少水土流失的可能。

参考文献

鲍士旦,2005. 土壤农化分析(3 版)[M]. 北京:中国农业出版社:25-113.
常超,谢宗强,熊高明,等,2011. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J]. 自然资源学报,26(7):1236-1244.

陈伟烈,江明喜,赵常明,2008. 三峡库区谷地的植物与植被[M]. 北京:水利水电出版社:28-78.
程瑞梅,王晓荣,肖文发,等,2009. 三峡库区消落带水淹初期土壤物理性质及金属含量初探[J]. 水土保持学报,23(5):156-161.
付娟,李晓玲,戴泽龙,等,2015. 三峡库区香溪河消落带植物群落构成及物种多样性[J]. 武汉大学学报(理学版),61(3):285-290.
郭劲松,黄轩民,张斌,等,2012. 三峡库区消落带土壤有机质和全氮含量分布特征[J]. 湖泊科学,24(2):213-219.
郭泉水,康义,赵玉娟,等,2012. 三峡库区消落带土壤氮磷钾、pH 和有机质变化[J]. 林业科学,48(3):7-10.
胡波,张平仓,任红玉,等,2010. 三峡库区消落带植被生态学特征分析[J]. 长江科学院院报,27(11):81-85.
康义,郭泉水,程瑞梅,等,2010. 三峡库区消落带土壤物理性质变化[J]. 林业科学,46(6):1-5.
刘维峰,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.
王长庭,龙瑞军,王启基,等,2005. 高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系[J]. 草业学报,14(4):15-20.
王强,袁兴中,刘红,等,2011. 三峡水库初期蓄水对消落带植被及物种多样性的影响[J]. 自然资源学报,26(10):1680-1693.
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-以开县白家溪为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),29(3):66-69.
王晓荣,程瑞梅,肖文发,等,2010. 三峡库区消落带初期土壤养分特征[J]. 生态学杂志,29(2):281-289.
王业春,雷波,杨三明,等,2012. 三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价[J]. 环境科学,33(2):612-617.
王勇,吴金清,黄宏文,等,2004. 三峡库区消落带植物群落的数量分析[J]. 武汉植物学研究,22(4):307-314.
王勇,刘义飞,刘松柏,等,2005. 三峡库区消落带植被重建[J]. 植物学通报,(5):513-522.
张志永,刘明芹,郑志伟,等,2011. 三峡水库小江流域消落区的植物多样性研究[J]. 水生态学杂志,32(3):38-41.
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.
- 赵常明, 陈伟烈, 黄汉东, 等, 2007. 三峡库区移民区和淹没区植物群落物种多样性的空间分布格局[J]. 生物多样性, 15(5): 510 - 522.
- 郑志伟, 邹曦, 安然, 等, 2011. 三峡水库小江流域消落带土壤的理化性状[J]. 水生态学杂志, 32(4): 1 - 5.
- 中国工程院三峡工程阶段性评估项目组, 2010. 三峡工程阶段性评估报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社.
- 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[M]. 北京: 中国水利水电出版社: 197 - 198.
- 重庆市万州区龙宝移民开发区地方志编纂委员会, 2001. 万县市志[M]. 重庆: 重庆出版社: 58 - 59.
- 朱妮妮, 郭泉水, 秦爱丽, 等, 2015. 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[J]. 生态学报, 35(23): 1 - 16.
- 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.
- Aerts R, D E Caluwe H, Beltman B, 2003. Is the relation between nutrient supply and biodiversity co-determined by the type of nutrient limitation? [J]. Oikos, 101: 489 - 498.
- Bailey-Serres J, Voeselek LACJ, 2008. Flooding stress: accumulations and genetic diversity [J]. Annual Review of Plant Biology, 59: 313 - 339.
- Curtis J T, McIntosh R P, 1951. An upland forest continuum in the Prairie-forest border region of Wisconsin [J]. Ecology, 32(3): 476 - 496.
- Gazer M H, 2011. Vegetation composition and floristical diversity in date palm orchards of central Saudi Arabia [J]. Acta Botanica Hungarica, 53: 111 - 12.
- Leps J, Smilauer P, 2003. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO [M]. New York (US): Cambridge University Press.
- 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.
- Liu W Z, Liu G H, Zhang Q F, 2014. Shoreline vegetation in the Danjiangkou Reservoir: characteristics, related factors, and differences with adjacent riverine wetlands [J]. Clean-Soil, Air, Water, 42 (7): 1014 - 1021.
- 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.
- Peña-Fronteras J T, Villalobos M C, Baltazar A M, et al, 2008. Adaptation to flooding in upland and lowland ecotypes of *Cyperus rotundus*, a troublesome sedge weed of rice: tuber morphology and carbohydrate metabolism [J]. Annals of Botany, 103: 295 - 302.
- 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)

Characteristics of Vegetation and Soil in the Water Level Fluctuation Zone of the Wanzhou Region of Three Gorges Reservoir

ZHANG Zhi-yong^{1,2}, CHENG Yu-chun¹, CHENG Li², WAN Cheng-yan^{1,3}, LI Jin-bo⁴

(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. College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, P. R. China;

3. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, P. R. China;

4. Wuhan Zhongke Hydrobiology Environment Engineering Co., Ltd., Wuhan 430060, P. R. China)

Abstract: Hydrological regime is a main driver of plant community succession in riparian zones. Soil that has been influenced by hydrology also affects the overlying vegetation. The goal of this study was to determine the effects of periodic submergence on the habitat and vegetation in the fluctuation zone of Three Gorges Reservoir after the five years of water-level fluctuation, since impoundment first reached 175m in 2010. The characteristics of vegetation and physical-chemical properties of soil in the water level fluctuation zone of the Wanzhou region of Three Gorges Reservoir were investigated from August 17 to September 2, 2015. Eight sampling sites were selected on the main stem of the Yangtze River and its tributaries. A total of 96 plots were set within twenty-four sampling belts (10 m × 30 m) established at three elevations: 145 – 155 m, 156 – 165 m and 166 – 175 m. The height, cover and biomass of each plant in the sampling plots were determined and soil samples were collected at each sampling belt for analysis of pH, soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), available nitrogen (AN), total phosphorus (TP) and available phosphorus (AP). A total of 51 vascular plants species, belonging to 47 genera and 22 families, were recorded in the water level fluctuation zone of the Wanzhou section, with abundant species of Gramineae, Asteraceae, Polygonaceae and Cyperaceae. Vegetation was dominated by herbaceous plants, and the annual herbs and perennial herbs accounted for 58.8% and 27.5% of the plant community. The dominant plant species varied with elevation. Plant species with high importance values included *Cynodon dactylon*, *Echinochloa crusgallivar. mitis* and *Eclipta prostrate* at 145 – 165 m and *Bidens pilosa*, *Setaria viridis* and *Cynodon dactylon* at 166 – 175 m. The fresh weight of plants was highest in the 156 – 165 m elevation belt at (2 199.1 ± 863.9) g/m². The Shannon-Wiener diversity index and the Pielou evenness index were highest in the 166 – 175 m elevation belt, averaging (2.00 ± 0.30) and (0.85 ± 0.06). Fresh weight and total coverage of vegetation declined with increasing slope. The species number was richest in the slope range 6° – 15°. The average fresh weight, height, Shannon-Wiener diversity index and Pielou evenness index of the plant community on the left bank were higher than those on the right bank. The soil physical-chemical characteristics exhibited obvious spatial heterogeneity. The mean value and standard deviation of soil density, pH, SOM, TN, AN, TP and AP were, respectively, (1.34 ± 0.09) g/cm³, (7.60 ± 0.47), (6.02 ± 294) g/kg, (1.21 ± 0.16) g/kg, (53.42 ± 9.67) mg/kg, (0.42 ± 0.14) g/kg, (6.55 ± 2.82) mg/kg. The variation coefficient of SOM was the highest, followed by AP and TP. The average pH, SOM, TN and AN on the southeast-facing bank were lower than those on the northwest-facing bank. The importance value of species was also found to be significantly affected by submergence time and available phosphorus.

Key words: Three Gorges Reservoir; water level fluctuation zone; plant community; importance value; soil properties