

三峡水库消落带植被分布规律及对磷迁移和鱼产力的影响

汪志聪 周维成 李晓宇 彭成荣 李敦海

DISTRIBUTION OF VEGETATION IN THE WATER-LEVEL-FLUCTUATION ZONE OF THE THREE GORGES RESERVOIR AND ITS EFFECTS ON PHOSPHORUS TRANSFER AND FISHERY PRODUCTION

WANG Zhi-Cong, ZHOU Wei-Cheng, LI Xiao-Yu, PENG Cheng-Rong, LI Dun-Hai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0241>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金沙江梯级大坝运行和三峡水库运行水位增高对长江上游干流寡鳞飘鱼仔鱼丰度和分布的影响

EFFECT OF THE IMPOUNDMENT OF DAM CASCADE IN JINSHA RIVER AND INCREASED WATER LEVEL OF THE THREE GORGES RESERVOIR ON THE DISTRIBUTION AND ABUNDANCE OF *PSEUDOLAUBUCA ENGRAULIS* (NICHOLS) LARVAE IN THE UPPER MAINSTEM OF THE YANGTZE RIVER

水生生物学报. 2019, 43(3): 606–611 <https://doi.org/10.7541/2019.073>

三峡水库水生态系统健康评价

ASSESSING THE ECOLOGICAL HEALTH STATUS OF THE THREE GORGE RESERVOIR

水生生物学报. 2019, 43(S1): 49–55 <https://doi.org/10.7541/2019.166>

三峡水库蓄水后长江上游鱼类群聚沿河流-水库梯度的空间格局

SPATIAL PATTERN OF FISH ASSEMBLAGES ALONG THE RIVER-RESERVOIR GRADIENT CAUSED BY THE THREE GORGE RESERVOIR (TGR)

水生生物学报. 2018, 42(6): 1124–1134 <https://doi.org/10.7541/2018.138>

三峡水库蓄水后期香溪河库湾浮游甲壳动物群落结构

CRUSTACEAN ZOOPLANKTON COMMUNITY IN XIANGXI BAY DURING THE LATER IMPOUNDMENT PERIOD OF THE THREE GORGES RESERVOIR

水生生物学报. 2020, 44(5): 1070–1079 <https://doi.org/10.7541/2020.124>

三峡水库产漂流性卵鱼类繁殖现状及水文需求研究

NATURAL REPRODUCTION AND HYDROLOGIC REQUIREMENTS OF PELAGOPHIL FISH IN THE THREE GORGES RESERVOIR

水生生物学报. 2019, 43(S1): 84–96 <https://doi.org/10.7541/2019.171>

在不同蓄水位下三峡库区春季水华特征及趋势分析

CHARACTERISTICS OF SPRING ALGAL BLOOMS UNDER DIFFERENT IMPOUNDED LEVELS IN TRIBUTARIES OF THE THREE GORGES RESERVOIR

水生生物学报. 2019, 43(4): 884–891 <https://doi.org/10.7541/2019.105>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2023.2022.0241

三峡水库消落带植被分布规律及对磷迁移和鱼产力的影响

汪志聪¹ 周维成^{1,2} 李晓宇^{1,2} 彭成荣¹ 李敦海¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了探究三峡水库消落带植被的分布规律及其对库区生态环境和渔业的潜在贡献, 对秭归、云阳和忠县库区共计30个典型消落带断面的植物群落结构特征、植物营养成分、断面坡度及土壤理化特性进行了调查分析。结果表明, (1) 共发现54科、61属、209种植物, 其中狗牙根(*Cynodon dactylon*)和苍耳(*Xanthium sibiricum*)为主要优势种, 平均盖度分别为29.73%和26.87%; 随着水位高程逐渐降低, 狗牙根、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)和苘麻(*Abutilon theophrasti*)的盖度逐渐增加, 苍耳、草木犀(*Melilotus officinalis*)和狼把草(*Bidens tripartite*)的盖度逐渐降低, 而菵草(*Humulus scandens*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium*)的盖度先增加后降低; 植被的分布还受到断面坡度的影响, 狗牙根的盖度与坡度呈显著负相关($P < 0.001$), 而苍耳的盖度则随着坡度呈现先增后降的显著单峰形态分布($P < 0.001$)。较高的土壤含水率促进了以狗牙根为主的共优势群落的形成, 而随着土壤含水率降低, 植被类型逐渐演替成以苍耳为主的共优势群落; (2) 低水位高程(150—160 m)消落带地表土壤呈现明显的磷吸收趋势, 而高水位(160—175 m)表层土壤则呈现明显的磷释放趋势, 这与样地的植被类型和土壤微生物群落结构特征密切相关; (3) 三峡水库消落带狗牙根和苍耳的地面鲜重总量为 2.51×10^8 和 2.48×10^8 kg, 它们的鲜重总量和蛋白质含量均远高于其他植物, 对库区渔产潜力贡献分别为 1.25×10^8 和 1.24×10^8 kg。综上, 三峡库区消落带植被的主要优势种为狗牙根和苍耳, 植被的分布主要受到水位高程、断面坡度和土壤含水率的影响。消落带植被在库区陆源磷营养截留、水体磷营养调控和鱼产力贡献方面具有较高的生态服务功能价值。研究可为评估水库消落带的生态渔业功能及研发水库消落带的植被修复技术提供重要参考。

关键词: 消落带; 植被分布; 鱼产力; 三峡水库

中图分类号: Q178.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2023)03-0436-14



消落带(Water-level-fluctuation zone), 通常又称为消涨带、涨落区或消落区, 是河流、水库和湖泊等水体随水位涨落而周期性淹没或露出水面的一段特殊区域, 是水生态系统和陆地生态系统交替控制的过渡地带^[1,2]。这里的生态系统结构非常脆弱, 极易受到自然水位涨落和人为干扰的双重影响^[3,4], 同时消落带具有涵养水源、保育土壤和保护生物多样性等多种生态服务功能价值^[5]。三峡工程于2009年全部竣工, 2010年成功蓄水至175 m最高水位。库区具有垂直落差约30 m、总面积为348.93 km²的消落带, 分布在重庆市22个县(区)和湖北省4个县(区)^[6]。依据三峡库区防洪、蓄水等水利调控需求和水位调控节律, 不同水位高程的消落带露出水面

的时间有显著的季节性差异。其中, 145—155 m间消落带在每年6—9月份出露为120d左右, 155—170 m间消落带在5—10月份出露为180d左右^[7]。植被是库区消落带生态系统的重要组成部分, 是在周期性水陆交替变化生境下协同进化产生的具有特定生态型的植物群落组合, 其作为承载消落带生态系统功能的主体, 对保护水域生态安全、水质稳定、堤岸地貌特征、生态系统多样性和能量物质循环等生态系统功能具有重要作用^[8]。

在三峡水库建成蓄水后, 库区山体在水流冲刷下形成各种典型的消落带地质地貌特征, 包括悬岸、陡岸、滩岸和台岸^[9]。不同水位高程的消落带经历淹水的时长和频率不同, 对消落带土壤环境产

收稿日期: 2022-06-07; 修订日期: 2022-08-11

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项(2019YFD0900603)资助 [Supported by the National Key R & D Program: Blue Granary Science and Technology Innovation Special Project (2019YFD0900603)]

作者简介: 汪志聪(1984—), 男, 副研究员; 主要从事水体富营养化研究。E-mail: wangzc@ihb.ac.cn

通信作者: 李敦海(1971—), 男, 研究员; 主要从事藻类环境生物学研究。E-mail: lidh@ihb.ac.cn

生的影响也不同,因而影响消落带植物群落组成及分布的主要环境参数为海拔、淹水时长及频率^[10,11]。有研究发现,重庆嘉陵江石门在高程165 m以下的消落带形成以苔草和狗牙根等低矮多年生草本植物为优势种的群落,在高程165—170 m的消落带形成高大复层草本群落,而在高程170 m以上的消落带形成草-灌-乔复层植物群落^[12]。消落带植被除了受到水位高程的影响,还可能受到样地坡度和含水率等其他环境因素的影响。刘明智等^[13]在消落带植被调查中发现,陡坡和缓坡及阴坡和阳坡的植物种类差异明显,而且 $\geq 30^\circ$ 的陡坡淹水后土壤受水波冲蚀流失严重,土层贫瘠,甚至基岩裸露。不同水位高程消落带的土壤含水率存在一定差异。一般来说,低海拔区的土壤含水率高于高海拔区。土壤含水率也会随着土壤深度增加而减小^[14],土壤含水率是影响植物生长的重要环境因子^[15]。然而,关于三峡库区不同水位高程消落带植被优势物种的分布格局及其与土壤含水率和样地坡度之间的关系,目前鲜有报道。

消落带的形成可能导致环境污染加重、水土流失加剧、植物多样性和生态系统遭到破坏、诱发地质灾害和暴发流行病等生态环境问题^[16]。然而,植被的形成可以在很大程度上缓解消落带对水库的不利影响。例如,一方面,植被覆盖可以稳固堤岸,防止水土流失。另一方面,植被生长还可以拦截雨水淋溶带来的陆源营养污染,降低消落带土壤富营养化程度,提高蓄水期消落带土壤的磷吸收势能和吸收容量^[17]。此外,消落带植被生长与鱼类产卵、育幼和觅食行为密切相关。三峡水库消落带大部分坡面上分布着大量砾石和石块,生境空间异质性较高。水位波动的扰动使不同水位高程的消落带植被类型和丰度表现出显著差异。145—160 m高程的消落带受水位波动的影响较大,为水生动物和两栖动物提供了重要栖息地。这些生态因子和植被生境直接或间接地为鱼类觅食提供了重要保障,消落带植被在淹水期可为草食性鱼类提供直接天然饵料,对三峡水库的渔业生态环境和渔产潜力产生了重要影响。因此,开展三峡库区消落带植被分布特征及其生态环境的影响研究,可为评估水库消落带的生态渔业功能及研发水库消落带的植被修复技术提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 研究位点设置

2020年7—8月,在三峡水库的秭归、云阳和忠县3个库区共设置30个断面开展消落带植被调查。

其中,在秭归库区的长江干流、香溪河、童庄河、袁水河和青干河共设置14个调查断面;在云阳库区的长江干流和澎溪河共设置8个调查断面;在忠县库区的长江干流和戚家河共设置8个调查断面,各断面的位置如图1所示。样地水位高程以长江水文网(cjh.com.cn)中三峡水库的实时水位为基准,结合GPS海拔高度定位,将消落带断面划分为150—155、155—160、160—165、165—170和170—175 m共计5个水位高程区段,水位高程区段划分精度控制在 ± 0.5 m。每个断面按150—155、155—160、160—165、165—170和170—175 m划分为5个水位高程。在各水位高程范围内随机设置3个样方,样方植被调查按行业标准规范《野生植物资源调查技术规程》(LY/T 1820-2009)进行。乔木幼苗和灌木样方大小为5 m \times 5 m,草本样方为1 m \times 1 m^[18]。详细记录每个样方的经纬度、坡度和基质状况,记录样方内植物群落的结构特征,测定土壤水分含量和土壤微生物群落结构,收割样方内植物优势种的地上部分用于营养成分分析。使用坡度仪测量样点坡度。

1.2 植物群落结构调查

记录样方内植物种类、估算盖度、收割并测定植物地面生物量,根据植被出现相对频度、相对盖度和相对生物量计算各种植物的重要值。植物的重要值=(相对频度+相对盖度+相对生物量)/3,据此确定样方内植物群落的优势种,本研究仅列出和统计重要值排序的前20种植物。中国植物图像库(Plant Photo Bank of China, PPBC, <http://ppbc.iplant.cn/>)是中国科学院植物研究所植物标本馆设立的专职植物图片管理机构,图库采用最新分类系统,已经收录各类植物图片527科5966属46582种10006310幅。本研究是基于中国植物图像库和《中国植物志》进行植物种类鉴定。按照样地植物数量将植物多度分成8个等级(表1)^[19]。

1.3 土壤含水率和土壤磷迁移趋势测定

用环刀在调查过植被的样方表层(0—20 cm)取土壤,采用梅花形布点混合取样法,并装在环刀土壤铝盒中,立即放入 -20°C 车载冰箱中冷冻保存备用,冷冻样品带回实验室用于分析微生物群落结构和土壤含水率。土壤含水率采用烘焙法计算,含水率计算公式为 $X=(m_1-m_2)/m_2\times 100\%$,式中, X 为土壤含水率, m_1 为湿土样重量, m_2 为干土样重量。用直径为90 mm \times 15 mm的培养皿将等量于100 g干重的冷冻保存土壤鲜样放入,再将培养皿放入1000 mL的烧杯中,缓慢加入蒸馏水至1 L刻度线,避免扰动培养皿内土壤。分别在土壤浸水后的初始时刻(0)、2h、4h、8h、24h和48h取烧杯混匀水样,经过

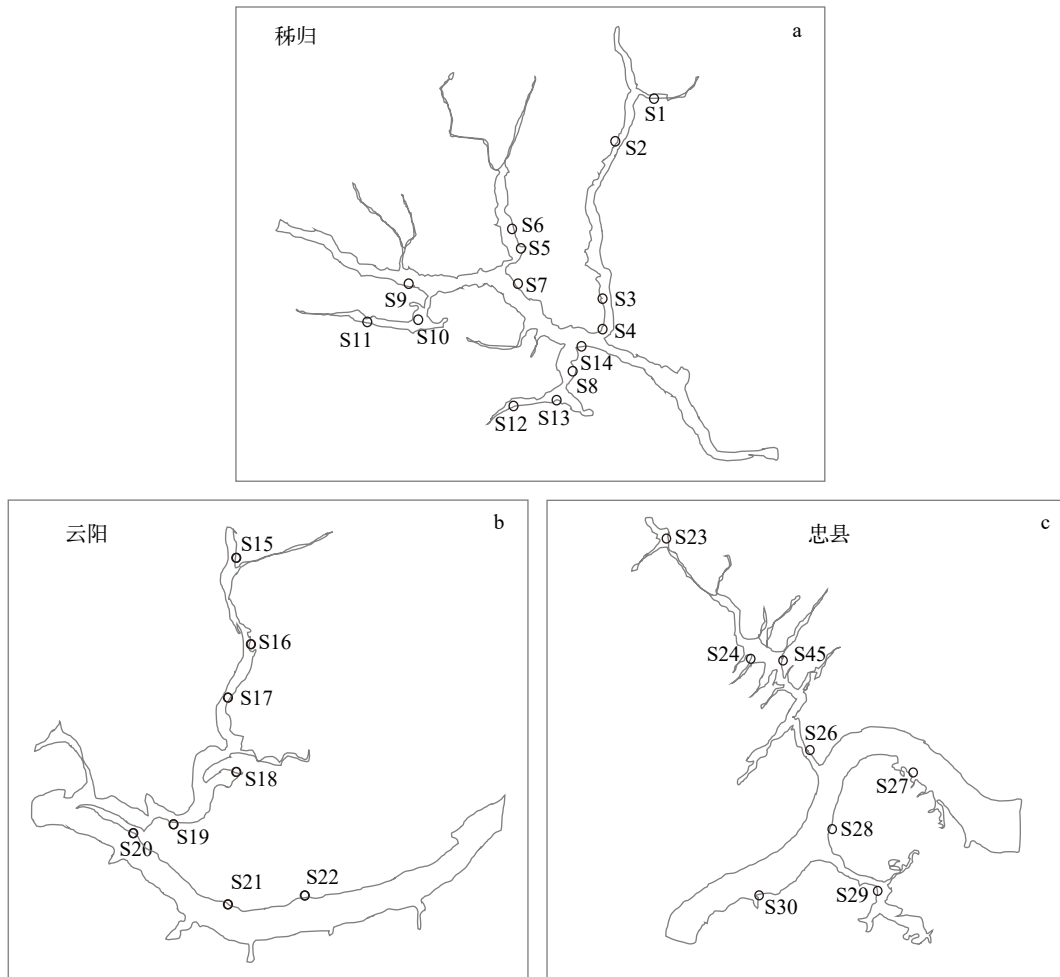


图1 三峡水库秭归库区、忠县库区和云阳库区的消落带调查断面分布图

Fig. 1 Distribution map of the survey sections of the water-level-fluctuation zone in the Zigui, Zhongxian and Yunyang Reservoir eras of the Three Gorges Reservoir

表1 植物多度分级

Tab. 1 Plant abundance classification

多度 Abundance	特征描述 Feature description	多度 Abundance	特征描述 Feature description
SOC	植物极多, 互相靠紧	SP	植物的数量不多
Cop3	植物的数量很多	So1	植物的数量很少
Cop2	植物的数量多	Un	植物的数量只有个别单株
Cop	植物的数量尚多	Gr	成丛

GF/C玻璃纤维膜(Whatman)过滤后, 采用钼蓝比色法测定生物可利用性磷(Soluble reactive phosphorus, SRP)的浓度(GB11893-89), 绘制时间-磷溶出量柱状图, 然后依据公式 $V_p = (\rho_2 - \rho_1) / (t_2 - t_1)$, 式中, V_p 为磷释放速率, ρ_1 初始计算 t_1 时刻烧杯中SRP的浓度, ρ_2 经过一段时间后在 t_2 时刻烧杯中SRP的浓度, t_1 为初始计算时刻, t_2 为计算时间段结束时刻。

1.4 土壤微生物分析

称取冻干后土壤样品0.50 g, 用E.Z.N.ATM Mag-Bind Soil DNA Kit(OMEGA公司, 美国)试剂盒

参照说明书提取总DNA, 并用琼脂糖凝胶电泳检测DNA的完整性。用Qubit3.0 DNA检测试剂盒对基因组DNA进行定量, 以确定PCR反应系统中DNA的添加量。以土壤中提取的宏基因组DNA为模板, 对16S rRNA基因(V3和V4区域)进行PCR扩增^[20]。341F引物“5'-CCCTACACGACGCTCTTCCGATCTG (barcode) CCTACGGGNGGCWGCAG-3'”和805R引物“5'-GACTGGAGTTCCTTGGCACCCGAGAATTCAGACTACHVGGGTATCTAATCC-3'”用于扩增V3和V4区域。通过数据库构建检测PCR扩增产物, 并在Illumina MiSeq平台上通过高通量测序对合格文库进行测序。使用Usearch(V8.0)软件将上述序列与数据库进行比较, 去除嵌合体序列, 最终得到有效的序列数据。UClustMethod用于在97%的有效数据水平上分析操作分类单元(OTU)的聚类信息。使用RDP贝叶斯分类器在97%的相似水平上对OTU进行分类分析, 并将Silva Library作为比较数据^[21]。

1.5 植物营养分析

样品经过80℃烘干至恒重后,称取500 g左右干样品,粉碎后过0.25 mm孔径筛,然后进行营养成分分析。水分测定参照GB/T 5099.3-2016,粗纤维含量测定参照GB/T 5099.10-2016,蛋白质含量测定参照GB/T 5099.5-2016,脂肪含量测定参照GB/T 5099.6-2016。

1.6 数据处理与统计分析

采用Excel 2010统计各样方内植物种类及盖度等群落结构组成数据,采用SPSS 24.0进行单因素方差显著性检验(ANOVA)和聚类分析(ward最小方差法),并基于Origin 2019对各水位高程的植被分布规律进行方程拟合和绘图。

2 结果

2.1 消落带植被优势种盖度及生物量

在秭归、云阳和忠县三个库区的30个消落带断面,共记录209种植物,隶属54科、61属。各样方内植被平均相对盖度在1%以上的共有8种,而平均相对盖度在0.1%以上的共有35种。狗牙根和苍耳在植被群落中是主要的优势种,其相对盖度分别为29.73%和26.87%,其他各种类型植物的相对盖度总计仅为30.20%,狗牙根和苍耳种群的相对盖度显著高于其他植被的相对盖度(表2)。在受农林经济影响较大的秭归和忠县消落带断面上,干流的苍耳相对盖度较大,支流中狗牙根的相对盖度高于干流,而苍耳的盖度明显降低;而在受城市化影响严重的云阳断面,狗牙根的相对盖度显著高于支流和其他断面。

植物生物量呈斑块状不均匀分布,其中生物量大于2000 g/m²的植物有11种,分别为狗牙根、苍耳、葎草、酸模叶蓼、草木犀、狼把草、老鸦谷、加拿大蓬、艾蒿、白酒草、青蒿和双穗雀稗。酸模叶蓼植被斑块的生物量最高,为5584.2 g/m²;主要优势种狗牙根和苍耳植被斑块的生物量也较大,分别为2394.0和2648.2 g/m²(图2a)。三峡水库建成后形成了高程落差达30 m的消落带,总面积达348.9 km²,三峡消落带卫星图片表明硬石质裸岸消落带约占整个消落带面积的32.52%,植被调查区域类型为砂质和土质消落带,占比为67.48%。根据消落带植物总鲜重=消落带面积×植被盖度×斑块植被中物种生物量,计算出狗牙根和苍耳的地面总鲜重分别为2.03×10⁸和2.00×10⁸ kg,远高于其他植物,是三峡库区消落带植被最重要的物种组成。

2.2 消落带植被分布与水位高程的关系

不同水位高程的消落带植被中,植物优势种有

所不同。结合不同植物的种类生物量和植被总量,分析其中主要优势种狗牙根、苍耳、葎草、狗尾草、酸模叶蓼、草木犀、狼把草、喜旱莲子草和苘麻植被盖度随水位高程的变化。从图3可以看出,在150—155 m水位高程消落带中,植物优势种是狗牙根、苍耳和葎草;155—160 m是狗牙根、苍耳、苔草;160—165 m是狗牙根、苍耳、酸模叶蓼;165—170 m是苍耳、狗尾草、葎草和狼把草;170—175 m是苍耳、狗尾草、草木犀和狼把草。狗牙根的盖度在150—160 m处高达69.58%,随着水位高程增加而逐渐降低,至170—175 m水位高程时,其种群盖度降至4.34%。同样,狗尾草、草木犀和狼把草也是随着水位高程的增加而降低。然而,苍耳在低水位高程处盖度仅为17.31%,随着水位高程增加其盖度逐渐上升至48.08%。

2.3 消落带植被分布与岸带坡度的关系

从图4a可知,狗牙根、苍耳、狼把草和双穗雀稗在各种坡度上广泛分布,尤其是在0—40°的坡度上的多度分级均为极多;葎草、苘麻、加拿大蓬、艾蒿、牛筋草和千金子等植物同样在各种坡度上有分布,在0—30°坡岸分布很多。随着坡度增加,大多数物种的多度逐渐减少,只有酸模叶蓼和草木犀在20°—30°坡度上多度相对较高。总体来说,在坡度较缓(0—30°)的堤岸,植被种类较多,各种物种出现的频次相对较高,但随着坡度增加物种出现频次逐渐降低;60°—80°的陡坡上植被种类和丰度都较少,仅有少量的狗牙根、苍耳和狗尾草生长。狗牙根的盖度与坡度呈显著负相关($P<0.001$),即随着坡度的增大,狗牙根的植被盖度逐渐降低(图4b)。苍耳随着坡度呈显著的单峰值形态分布($P<0.001$),在20°—30°的坡度上覆盖度最大(图4c)。

2.4 消落带植被分布与土壤含水率的关系

一般来说,在含水率较高的土壤中,狗牙根和苍耳种群出现的频次更高。在土壤含水率大于20%的10个样地中,仅有4种类型的共优势群落,其中以狗牙根为主的共优势群落有9个。随着含水率的降低,其他物种的出现频次逐渐增加。在土壤含水率为10%—20%的12个样地中,其中以狗牙根为主的共优势群落有6个,以苍耳为主的共优势群落有10个,共有7种类型的共优势群落。土壤含水率小于10%的样地共12个,其中以狗牙根为主要优势种的共优势群落仅5个,其余8个样地以苔草、狗尾草、酸模叶蓼、草木犀、雀稗或鼠麴草等几种植物占优势,共优势群落有11种类型。由此可知,随着含水率逐渐降低,以狗牙根为主的共优势群落出现的频次逐渐降低,以苍耳为主的共优势群落则相

反;同时,随着含水率的降低,共优势群落结构也逐渐由狗牙根优势种向苍耳优势种转变,群落结构异质性也越来越高(图 5)。

2.5 土壤磷迁移趋势及微生物群落结构

不同水位高程的消落带表层土壤呈现出明显的磷迁移规律。较低水位高程(150—160 m)各种植被类型下的土壤磷溶出总量在4—8h就已经达到峰值,峰值为0.055—0.103 mg/L,随后磷溶出量迅速

下降,土壤整体呈现磷吸收的趋势。而高水位高程(160—175 m)磷的溶出量显著高于低水位高程,一直呈现磷吸收趋势,尤其是草木犀+狗牙根共优势群落,在48h后其磷溶出峰值高达0.292 mg/L(图 6a)。消落带植被在淹水后2—4h,土壤均呈现磷释放趋势,其中,苍耳+菟丝草和苍耳+雀稗共优势群落的磷释放速率最快,分别为0.059和0.053 mg/(L·h)(图 6b)。淹水4h后土壤的磷释放速率逐渐放缓,释放与吸附

表 2 三峡水库消落带植被优势种组成及相对盖度(%)

Tab. 2 Composition and relative coverage of dominant species of vegetation in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir (%)

物种名录Species name	秭归Zigui		云阳Yunyang		忠县Zhongxian		平均Average
	支流	干流	支流	干流	支流	干流	
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	28.31	27.06	40.38	51.79	37.39	31.54	29.73
苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>	31.65	41.18	30.88	25.90	12.61	50.18	26.87
葎草 <i>Humulus scandens</i>	11.51	9.12	4.99	0.40	7.21	0.36	6.20
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	4.72	4.41	9.74	6.77	4.50	2.15	4.67 e
酸模叶蓼 <i>Polygonum lapathifolium</i>	6.79	1.47	4.51	0.80	6.08	1.08	3.83
草木犀 <i>Melilotus officinalis</i>	5.87	5.29	0.95	7.17	2.70	0.36	3.47
狼把草 <i>Bidens tripartite</i>	2.65	1.47	0.95	0.80	4.50	7.53	2.50
喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	0.12	0.88	0.48	0.80	5.41	1.08	1.17
苘麻 <i>Abutilon theophrasti</i>	0.58	0.88	0.95	0.40	1.35	0.00	0.63
马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	0.69	0.29	0.00	0.00	2.48	0.72	0.67
老鸦谷 <i>Amaranthus cruentus</i>	0.12	0.29	0.00	0.00	3.38	0.00	0.57
加拿大蓬 <i>Conyza canadensis</i>	0.35	0.59	0.71	0.80	0.90	0.36	0.50
苔草 <i>Carex</i> spp.	0.35	0.88	0.71	0.40	0.68	0.36	0.47
艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>	0.58	1.47	0.00	0.00	0.68	0.36	0.47
白酒草 <i>Conyza japonica</i>	0.92	0.29	0.00	0.40	0.68	0.36	0.47
双穗雀稗 <i>Paspalum paspaloides</i>	0.46	0.29	1.43	0.40	0.23	0.00	0.43
青蒿 <i>Artemisia carvifolia</i>	0.58	0.29	0.24	0.00	1.13	0.72	0.47
无芒稗 <i>Echinochloa crusgalli</i>	0.69	0.59	0.00	0.00	0.68	0.00	0.37
牛筋草 <i>Eleusine indica</i>	0.46	0.00	0.00	0.00	1.13	0.72	0.37
千金子 <i>Leptochloa chinensis</i>	0.23	0.59	0.24	0.00	0.68	0.36	0.30
红姑娘 <i>Physalis peruviana</i>	0.12	0.00	0.71	0.40	0.68	0.00	0.27
牛鞭草 <i>Hemarthria altissima</i>	0.00	0.29	0.48	0.80	0.45	0.00	0.23
千根草 <i>Euphorbia thymifolia</i>	0.46	0.00	0.24	0.80	0.00	0.00	0.23
高粱 <i>Sorghum bicolor</i>	0.46	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.20
鳢肠 <i>Eclipta prostrata</i>	0.23	0.29	0.48	0.00	0.23	0.00	0.20
桑 <i>Morus alba</i>	0.00	0.00	0.48	0.40	0.45	0.36	0.20
雀稗 <i>Paspalum thunbergii</i>	0.12	0.29	0.24	0.00	0.45	0.00	0.17
小藜 <i>Chenopodium serotinum</i>	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17
土金芥 <i>Dysphania ambrosioides</i>	0.00	0.00	0.24	0.00	0.23	1.08	0.17
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	1.13	0.00	0.17
野胡萝卜 <i>Daucus carota</i>	0.12	0.59	0.00	0.00	0.23	0.00	0.13
蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i>	0.00	0.59	0.00	0.00	0.45	0.00	0.13
皱果莧 <i>Amaranthus viridis</i>	0.23	0.29	0.00	0.00	0.23	0.00	0.13
牡蒿 <i>Artemisia japonica</i>	0.00	0.29	0.00	0.00	0.68	0.00	0.13
草血竭 <i>Polygonum paleaceum</i>	0.12	0.00	0.00	0.00	0.45	0.36	0.13

过程逐渐达到平衡,甚至呈现为微弱的磷吸收趋势。各类型植被的土壤微生物群落结构大致可以聚类分成三大类,即狗牙根+苍耳共优势群落、以苍耳为主要优势种的共优势群落和以狗牙根为主的共优势群落。另外,高水位高程的狗牙根+鼠麴草共优势群落中Proteobacteria细菌丰度显著低于其他样品而区别于上述三大类,且160—165 m水位高程的酸模叶蓼+雀稗因其Proteobacteria细菌丰度显著高于其他样品而区别于其他聚类。分析了微生物聚类对应的水位高程分布规律,结果表明水位高程对微生物群落结构并没有显著影响(图 7)。

2.6 消落带植被优势种的营养成分分析

消落带植被优势种的水分含量在8.98%—12.5%,其中狗尾草的水分含量显著高于其他植物(图 8a)。各植物的粗纤维含量在17.9%—31.5%,其中苍耳的粗纤维含量最低(图 8b),但是苍耳的脂肪含量为6.1%,显著高于其他植物(图 8c)。各植物的蛋白含量在3.0%—17.5%,其中狗牙根和苍耳的蛋白含量分别为17.5%和16.0%,显著高于其他植物蛋白含量(3.0%—8.6%; 图 8d)。

3 讨论

3.1 消落带植被的分布规律及影响因素分析

在三峡水库蓄水后,消落带原有生态系统的结构和功能受到极大影响,其中最大的影响是库区反季节水位节律显著改变了消落带植被类型和分布规律。刘维璋等^[22]于2009年调查了三峡水库消落带的维管束植物,共记录61科69属231种,其中一年生草本植物105种,多年生草本75种,与水库建成前相比,科、属、种分别减少了26.51%、29.58%和42.96%。本研究中发现三峡水库消落带共有植物54科61属209种,与上述文献报道的调查结果相比略有减少。盖度和总鲜重最大的两个物种是多年生植物狗牙根和一年生植物苍耳,它们的盖度沿消落带的高程呈明显的分布规律,表现为狗牙根的盖度随高程的升高而逐渐降低,而苍耳的则呈现出相反的趋势。已有报道发现,随着三峡消落带高程的上升,植物物种数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数均逐渐升高^[8],这与本研究中观察到的苍耳、菵草、狗尾草、酸模叶蓼、草木犀和

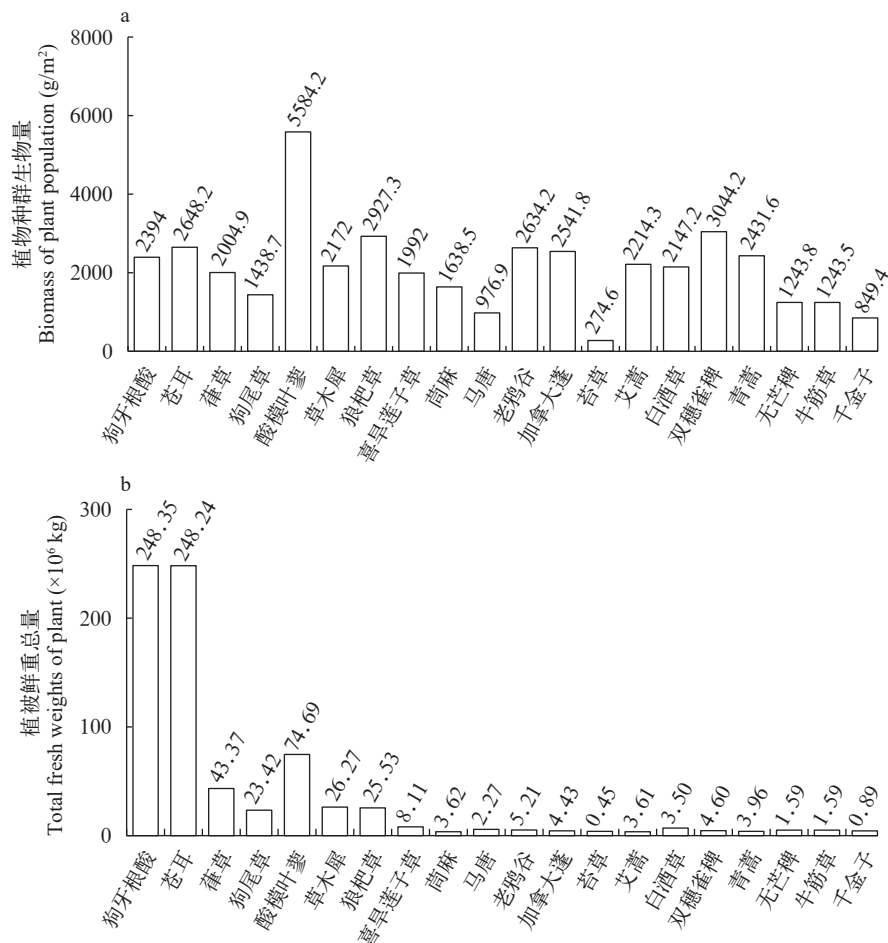


图 2 三峡水库消落带植物优势种的生物量(a)和植被鲜重总量(b)

Fig. 2 Biomass (a) and total fresh weight (b) of dominant plant species in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir

狼把草等主要优势种均呈现出高水位高程处盖度比低水位高程处盖度更大、各物种的盖度逐渐趋向均衡的分布规律相一致。低水位高程处主要是狗牙根单优群落或狗牙根+苍耳共优势群落,而高水位高程处主要是苍耳单优群落或苍耳与其他物种的共优势群落,这与以前的研究报道基本一致^[8]。

狗牙根是一种根系发达的禾本科植物,它有种子繁殖和匍匐茎营养繁殖两种繁殖方式。耐旱、耐涝。其种群对不利环境具有极强的抵抗力和适应性^[23],可在水库高水位运行的不利环境条件下形成具有特定适应性的生态型^[24]。苍耳是一种常见的一年生草本植物,具有结实率高、果实带刺防止被牧食和抗旱耐淹等特点,能在水库泄洪后至蓄水前完成从种子萌发到种子形成的整个生命周期,在幼苗生长过程中产生大量的化感物质,能有效抑制

相邻植物幼苗的萌发和生长^[25]。由于这些特殊的生理生态学特性,在三峡水库周期性水位节律剧烈干扰的环境条件下,狗牙根和苍耳在种群增长方面具有显著的竞争优势,容易形成单一优势种和共优势种。Ye等^[26]研究了三峡水库消落带植物-土壤的互作关系,提出水位节律的改变导致消落带土壤氮磷养分减少是消落带植被丰度和多样性下降的主要原因。而陈功等^[8]的研究则发现,海拔与淹水时间才是影响消落带植被群落物种组成的主要因子,总氮与总钾含量只是影响植被分布格局的次要因子。然而,本研究发现,三峡水库消落带植被分布不仅与水位高程密切相关,还与消落带的坡度密切相关。在地势由低水位高程的平坦河滩向高水位高程的陡坡变化过程中,狗牙根种群的盖度逐渐降低,而苍耳种群的盖度变化呈现典型的单峰型。这

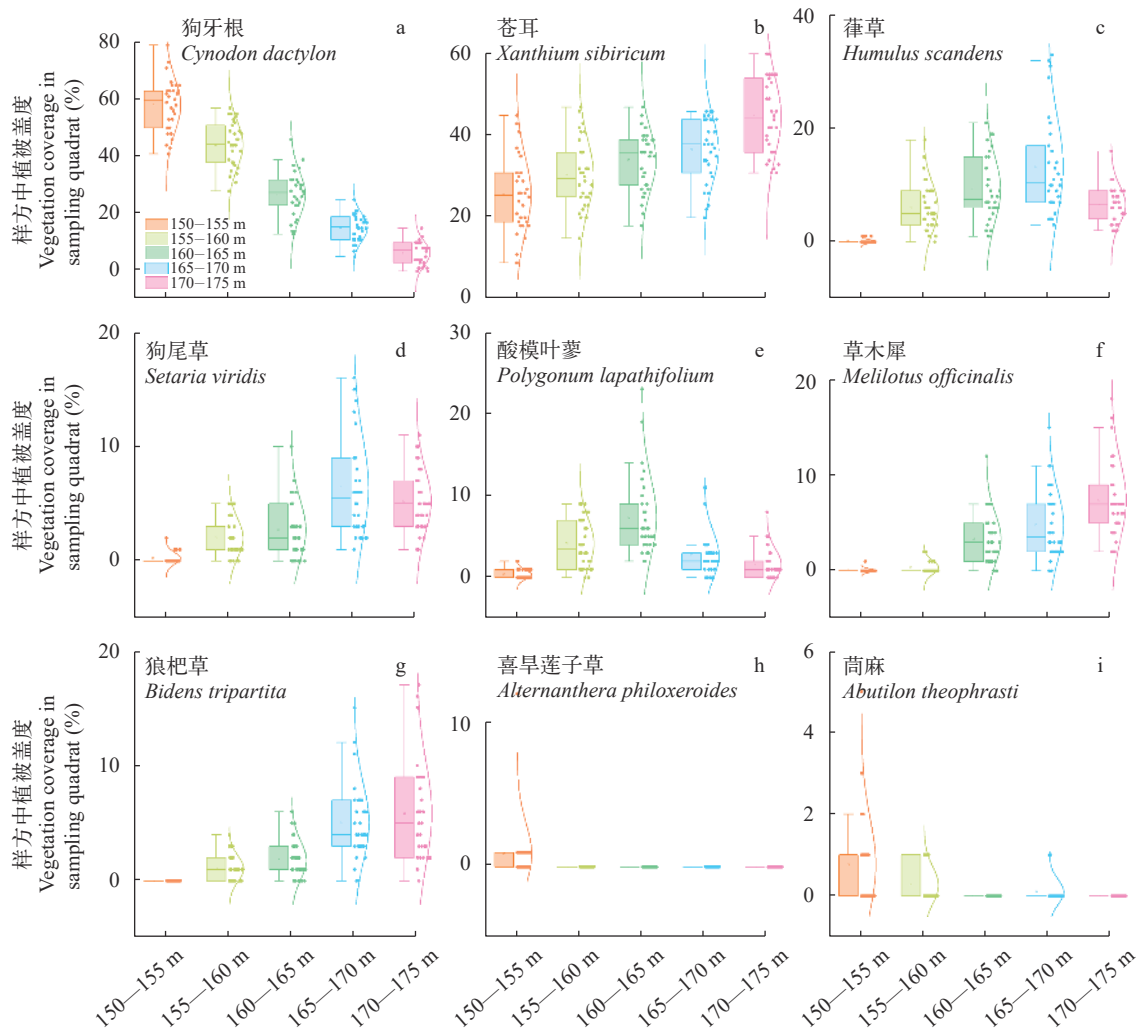


图3 三峡水库消落带植物主要优势种狗牙根(a)、苍耳(b)、葎草(c)、狗尾草(d)、酸模叶蓼(e)、草木犀(f)、狼把草(g)、喜旱莲子草(h)和苘麻(i)盖度沿水位高程分布规律

Fig. 3 Distribution of dominant plant species including *Cynodon dactylon* (a), *Xanthium sibiricum* (b), *Humulus scandens* (c), *Setaria viridis* (d), *Polygonum lapathifolium* (e), *Melilotus officinalis* (f), *Bidens tripartite* (g), *Alternanthera philoxeroides* (h) and *Abutilon theophrasti* (i), along water level elevation in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir

两种优势种的分布规律存在显著差异, 这可能是由于不同坡度土壤的含水率、营养含量、淹水节律差异及植物间株高空间竞争的影响等多种原因造成的。对植被群落结构与土壤含水率的关系进行进一步分析发现, 较高的土壤含水率促进了以狗牙

根为主的共优势群落的形成, 随着土壤含水率的降低, 植被类型逐渐演变为以苍耳为主的共优势群落。

3.2 消落带植被类型对土壤磷迁移及微生物群落结构的影响

水体消落带或缓冲带是天然的生态屏障, 具有

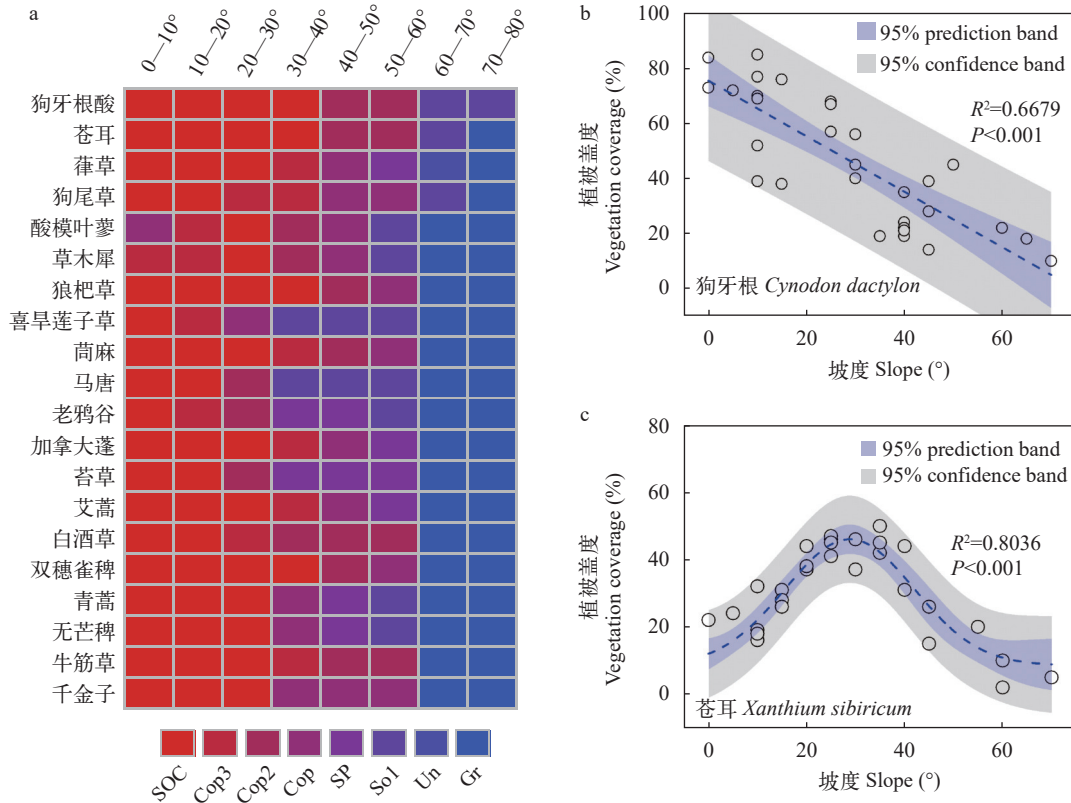


图 4 三峡水库消落带植物优势种多度分级(a)及狗牙根(b)和苍耳(c)盖度与样地坡度的关系

Fig. 4 The Classification of dominant plant species and relationship between the both coverage of *Cynodon dactylon* (b) and *Xanthium sibiricum* (c) and the slope of plots (a) in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir

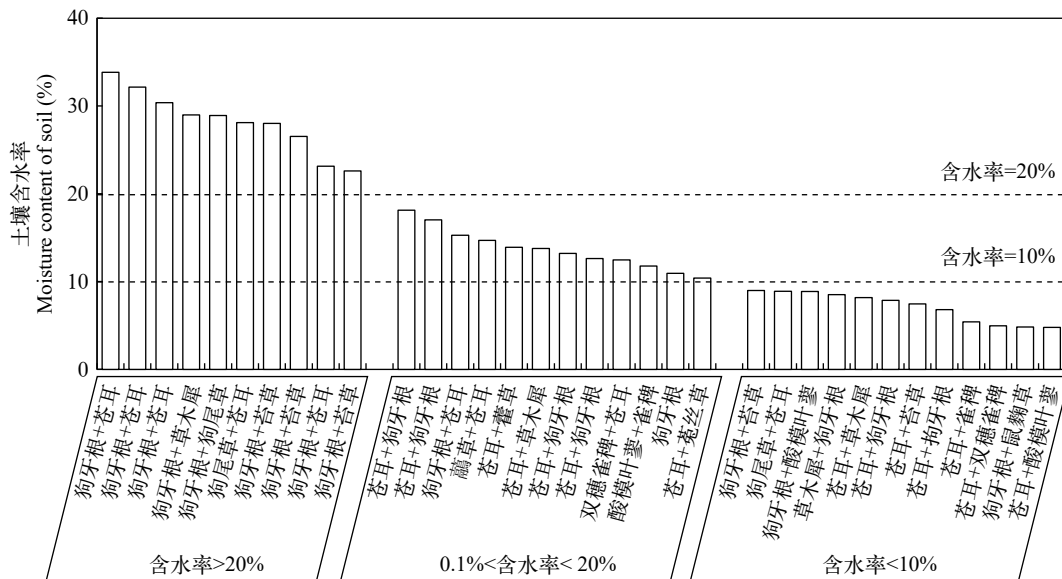


图 5 三峡消落带植被类型与土壤含水率的关系

Fig. 5 Relationship between vegetation types and soil moisture content in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir

拦截外源污染特别是农业面源污染的功能^[27]。除了可以吸收来自地表径流的氮、磷等营养,消落带植被还可以吸收土壤中的营养物质。若淹没期土壤磷含量明显低于上覆水,水体中的磷会逐渐迁移到土壤中,土壤呈现磷吸收状态。在消落带植物中,狗牙根的磷富集系数和磷吸收量最高^[28]。本研究发现,以狗牙根为主的共优势群落主要分布在较低水位高程的消落带,土壤主要呈现磷吸收趋势,而以苍耳为主的共优势群落主要分布在较高水位高程处,土壤呈现明显的磷释放趋势。这可能是由于狗牙根在生长过程中从土壤中吸收了大量的磷,导致土壤中磷的匮乏,呈现出强烈的磷吸收趋势。

一般来说,在短期淹水过程中,干土会瞬时向水体释放大量磷,这可能是土壤磷酸酶分解的无机磷被水溶解并迁移到水体中^[29]。然而,随着淹水时间的延长,土壤磷的释放速率将逐渐放缓,甚至呈现出磷吸收的趋势,这主要与土壤有机质对磷释放的抑制^[30]以及微生物的作用^[31]有关。通过对不同植被类型土壤微生物群落结构的聚类分析可以看出,以狗牙根为主的共优势群落和以苍耳为主的共

优势群落明显聚为两类。微生物的这种聚类形式只受土壤上生长植被类型的影响,与土壤的水位高程没有直接关系。对三峡消落带植被土壤微生物群落结构的进一步分析结果表明,变形菌门(*Proteobacteria*)是主要种类。大多数变形菌为兼性或专性厌氧菌^[32,33],而消落带植被分泌到表层土壤的胞外有机物和死亡植物体为土壤带来了丰富的有机质,可以显著促进这些异养细菌的繁殖^[34]。有研究表明,有机质在降解过程中改变了土壤颗粒的表面基团组成和电荷性质,从而改变了土壤对磷的吸附特性^[35]。禾本科植物的地下根系发达,在生命代谢过程中产生较多有机质^[36],在微生物降解过程中,这些有机质可能与土壤颗粒相互作用,增加土壤对磷的吸附能和吸附量。作为消落带的常见物种,狗牙根在淹水期间可去除水体中大量的磷,具有潜在的生态净水价值,可以作为库区富营养化防治和水生态修复的首选物种。这对保障三峡水库水质和提高优质水生产力具有重要意义。

3.3 消落带植被的潜在鱼产力评估及其修复建议
生长在低海拔消落带的植物,尤其是一些禾本

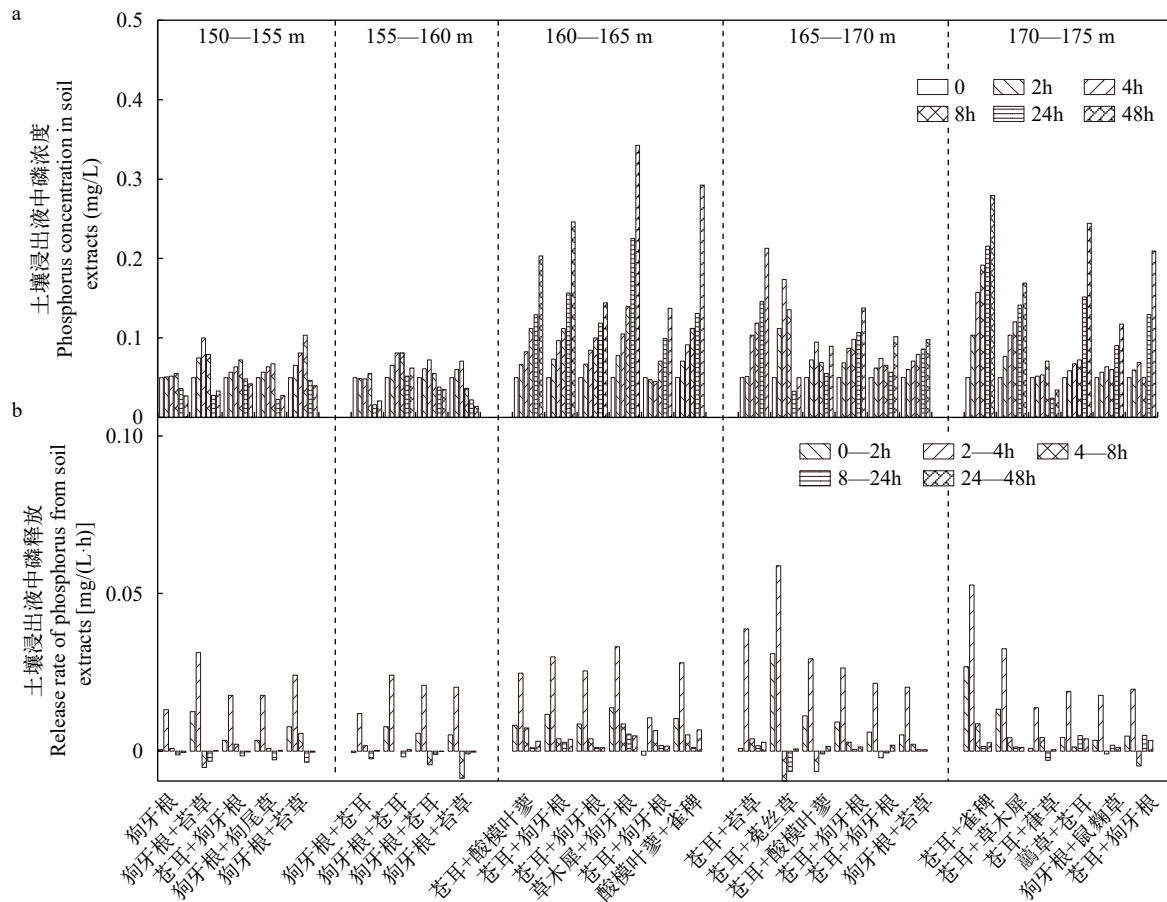


图 6 三峡水库消落带各植被类型土壤中磷迁移趋势(a)和磷迁移速率(b)

Fig. 6 Trends (a) and rates (b) of phosphorus migration in soils of different vegetation types in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir

科植物,在淹水后是草食性鱼类的优质饵料,对三峡水库的鱼产力具有重要作用^[37]。为了科学评估消落带植被对鱼产力的贡献,本研究测定了消落带主要植物优势种的营养成分。可见,主要的营养成分是粗纤维,可以为草食性鱼类提供丰富的膳食纤维。此外,狗牙根和苍耳茎叶中蛋白质含量显著高于其他植物,达到16.0%以上。它们是三峡水库消落带植被的绝对优势种,总鲜重高,这些特性使其成为三峡水库草食性鱼类潜在的优良饵料。

三峡水库建成后形成了高程落差达30 m的消落带,总面积达348.9 km²。根据消落带植物总鲜重=消落带面积×植被盖度×斑块植被中物种生物量,计算出消落带狗牙根和苍耳的总鲜重分别高达 2.51×10^8 和 2.48×10^8 kg。依据鱼类饲料能量转化效率的计算公式,计算了鱼产力。假设维管束植物的P/B系数为1.25,利用率为60%,饵料系数为120^[38],则狗牙根和苍耳的潜在鱼产力分别约为 1.25×10^8 和 1.24×10^8 kg。因为苍耳茎秆较硬,在植株形态上近似木本植物,因此它的适口性较差,饵料利用率和鱼产力可能估算过高。此外,消落带植被分布的空

间异质性有利于浮游动物等饵料生物的生长和繁殖,也为鱼类提供了良好的栖息地,对水库水质、浮游生物和鱼类繁殖有重要影响。从植被优势种的组成、分布格局、影响因素、生态功能、繁殖策略、生长速率、抗旱、耐涝、生态修复难度和渔业营养价值等方面来看,狗牙根和苍耳均是三峡水库消落带天然饵料植物的首选种。因此,在库区消落带,特别是在水土流失严重的中低水位高程的裸露地表,恢复狗牙根和苍耳植被是必要的,也是可行的。今后,可根据消落带的地质地貌结构,通过构建缓坡和稳固梯田式漫滩等微地形改造技术,构建中低水位高程消落带的狗牙根和苍耳植被群落,为库区的消落带地形稳定、水体富营养化防治和渔业经济发展等生态服务功能的正常发挥提供基本保障。

4 结论

在三峡水库消落带共发现209种植物,隶属54科61属,其中狗牙根和苍耳是主要优势种。植物群落结构受到水位高程、坡度和土壤含水率的影响

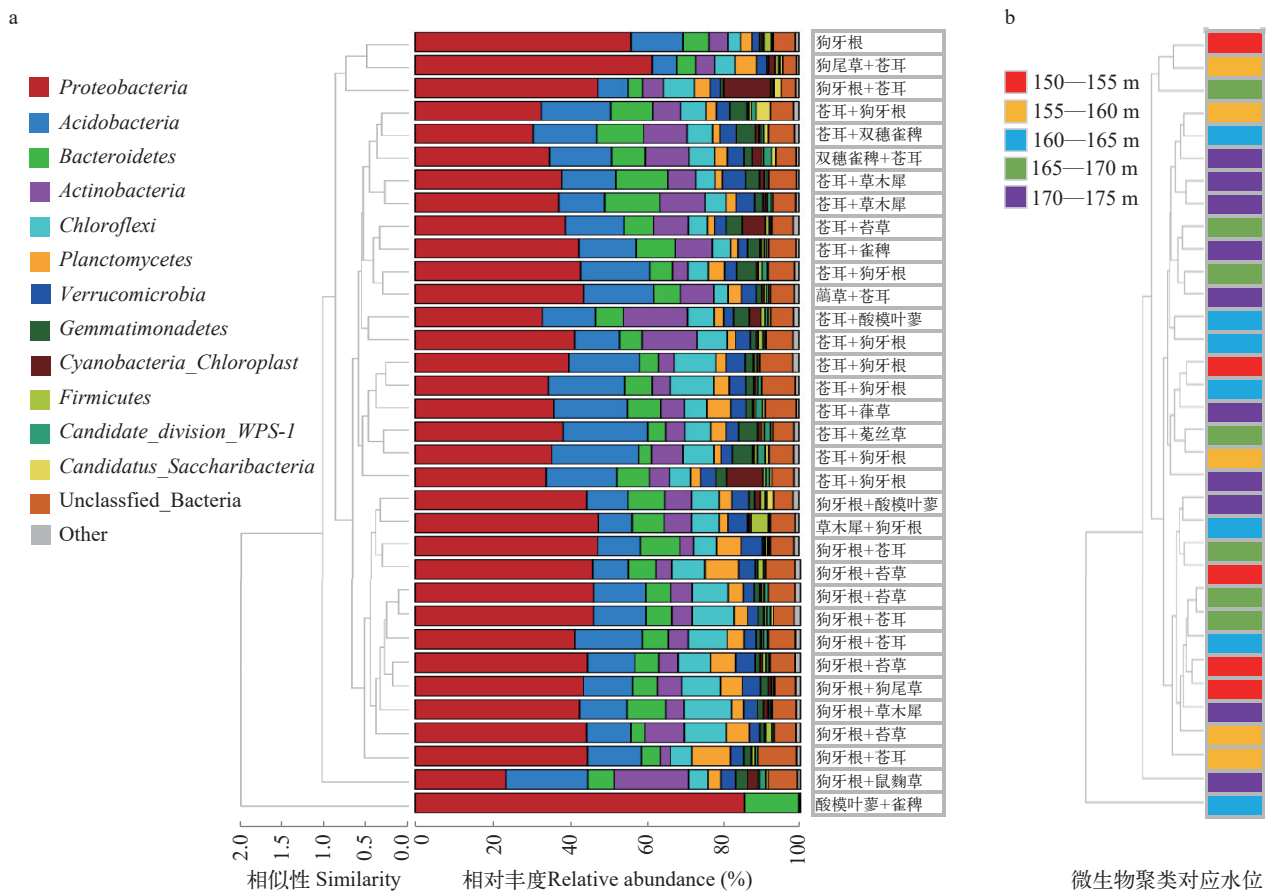


图7 三峡消落带土壤中微生物群落结构聚类分析与植被类型(a)及聚类分析与水位高程的关系(b)

Fig. 7 Relationship between microbial community structure cluster analysis and vegetation types (a) and cluster analysis and water level elevation (b) in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir

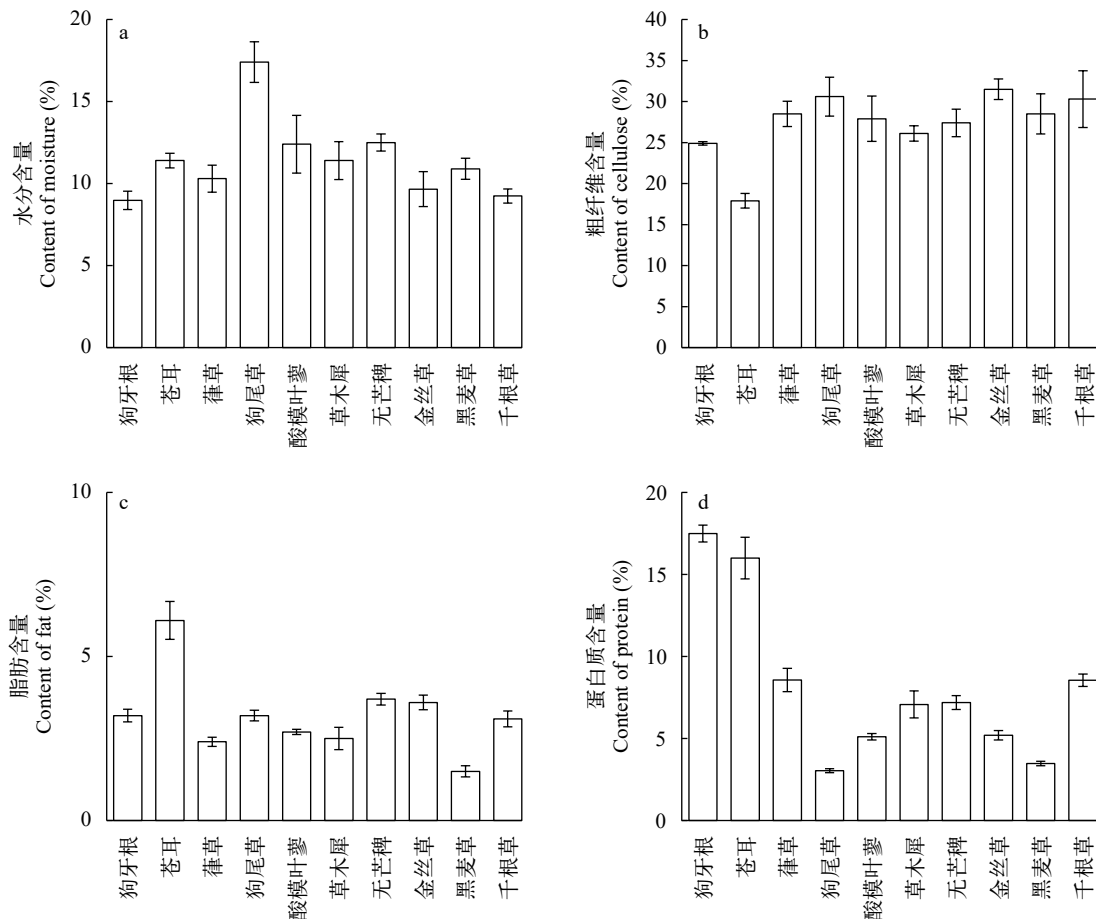


图8 三峡水库消落带植物优势种的水分(a)、粗纤维(b)、脂肪(c)和蛋白质含量(d)

Fig. 8 Contents of water (a), crude fiber (b), lipid (c) and protein (d) of dominant plant species in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir

响,具体表现为:狗牙根盖度随水位高程升高逐渐降低,而苍耳则相反;随着坡度增大,狗牙根的盖度逐渐减小,苍耳盖度呈先增加后减小的单峰型分布;较高的土壤含水率促进了以狗牙根为主的共优势群落的形成,反之则形成以苍耳为主的共优势群落。低水位高程消落带的表层土壤呈现明显的磷吸收趋势,而高水位土壤则呈现明显的磷释放趋势,这种趋势与植被类型及土壤微生物群落结构特征密切相关。消落带植被主要优势种狗牙根和苍耳对库区陆源磷营养有显著的截留作用,且其总鲜重和蛋白质含量均远高于其他植物,具有生态净化功能和巨大的潜在鱼产力贡献。本研究为探讨水库消落带的渔业生态服务功能和发展其植被恢复技术提供了重要参考。

参考文献:

- [1] Cheng R M, Wang X R, Xiao W F, *et al.* Advances in studies on water-level-fluctuation zone [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, **46**(4): 111-119. [程瑞梅, 王晓荣, 肖文发, 等. 消落带研究进展 [J]. *林业科学*, 2010, **46**(4): 111-119.]
- [2] Nilsson C, Jansson R, Kuglerová L, *et al.* Boreal riparian vegetation under climate change [J]. *Ecosystems*, 2013, **16**(3): 401-410.
- [3] Ke Z Y, Wang Q, Shen Q Y, *et al.* Characteristics of plant community in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir at the Zhong to Zigui section [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(9): 1975-1985. [柯智溢, 王琴, 沈秋月, 等. 三峡水库忠县至秭归县段消落带植被群落特征研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2020, **29**(9): 1975-1985.]
- [4] Zhang Y X, Cai D S, Yi R. Ecological fragility and impact factor of water-level-fluctuation of the qingshitan reservoir, Guilin, China [J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, **30**(4): 156-160. [张永祥, 蔡德所, 易燃. 桂林市青狮潭水库消落带生态脆弱性及其影响因子 [J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2012, **30**(4): 156-160.]
- [5] Yu M S, Xu G F, Hong L X, *et al.* Evaluation of ecological service value of vegetation reconstruction in hydro-fluctuation belt of thousand-island lake reservoir area [J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2019(10): 33-35. [余梅生, 徐高福, 洪利兴, 等. 千岛湖库区消落带植

- 被重建生态服务价值评价 [J]. *防护林科技*, 2019(10): 33-35.]
- [6] Ruan R, Shu S Y, Xiong W. Protection and management of water-level-fluctuating zone in Three Gorges Reservoir of Chongqing [J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2019, **39**(4): 72-79. [阮锐, 舒世燕, 熊文. 重庆市三峡库区消落带保护与治理探讨 [J]. *浙江林业科技*, 2019, **39**(4): 72-79.]
- [7] Lei B, Yang C H, Yang S M, *et al.* GIS-based division of ecological types and their characteristics of water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir of Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(8): 2082-2090. [雷波, 杨春华, 杨三明, 等. 基于GIS的长江三峡水库消落带生态类型划分及其特征 [J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(8): 2082-2090.]
- [8] Chen G, Li X L, Huang J, *et al.* Characteristics of plant communities and their relationships with environmental factors in the water level fluctuation zone of the Zigui region of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(2): 688-699. [陈功, 李晓玲, 黄杰, 等. 三峡水库秭归段消落带植物群落特征及其与环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2022, **42**(2): 688-699.]
- [9] Huang C. Ecological rebuilding pattern and health assessment system of the wet-dry area of three gorges reservoir [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. [黄川. 三峡水库消落带生态重建模式及健康评价体系构建 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.]
- [10] Blom C W P M, Voesenek L A C J. Flooding: the survival strategies of plants [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1996, **11**(7): 290-295.
- [11] Sun P F, Shen Y F, Wang L J, *et al.* Herb species diversity in the water-level-fluctuation zone in Zigui section of Three Gorges Reservoir area [J]. *Forest Research*, 2020, **33**(6): 96-104. [孙鹏飞, 沈雅飞, 王丽君, 等. 三峡库区秭归段水位消落带草本植物多样性分析 [J]. *林业科学研究*, 2020, **33**(6): 96-104.]
- [12] Xian X D, Zhao H, Wang H P. Analysis of plant community structure characteristics in water-level fluctuation zone under annual flooding cycle [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, **24**(4): 128-130. [先旭东, 赵辉, 王会平. 年度淹水周期下消落带植物群落结构特征分析 [J]. *绿色科技*, 2022, **24**(4): 128-130.]
- [13] Liu M Z, Niu H G, Lin F. Flooding height distribute of vascular plants in the water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir and influencing factors for its stability [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, **60**(19): 49-54. [刘明智, 牛汉刚, 林锋. 三峡库区消落带淹水梯度上维管植物分布及其稳定性影响因素 [J]. *湖北农业科学*, 2021, **60**(19): 49-54.]
- [14] Huang G Y, Zhang G Y, Cai Y P, *et al.* Spatial variability of soil water content and electrical conductivity in water level fluctuating zone of Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, **49**(21): 91-92. [黄桂云, 张国禹, 蔡玉鹏, 等. 三峡库区消落带土壤含水率和电导率空间变异性研究 [J]. *安徽农业科学*, 2021, **49**(21): 91-92.]
- [15] Sun R, Yuan X Z, Liu H, *et al.* Floristic composition and species diversity of plant communities along an environment gradient in drawdown area of Three Gorges Reservoir after its initial impounding to the water level of 156 M [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(2): 208-214. [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.]
- [16] Tian X Y. Ecological analysis and countermeasures of water-level fluctuation zone in Three Gorges Reservoir area [J]. *Coastal Enterprises and Science & Technology*, 2006(11): 34-36. [田兴勇. 三峡库区消落带生态分析与对策研究 [J]. *沿海企业与科技*, 2006(11): 34-36.]
- [17] Li S Z, Deng Y, Shi F N, *et al.* Research progress on water-level-fluctuation zones of reservoirs: a review [J]. *Wetland Science*, 2019, **17**(6): 689-696. [李姗泽, 邓玥, 施凤宁, 等. 水库消落带研究进展 [J]. *湿地科学*, 2019, **17**(6): 689-696.]
- [18] Zhang Y, Yu Y L, Li S N, *et al.* Vegetation distribution and diversity in the water-level-fluctuation zone of Danning Reservoir, Beijing section, middle route of the south-to-north water diversion [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, **42**(4): 40-49. [张羲, 于一雷, 李胜男, 等. 南水北调北京段大宁水库消落带植被分布特征及多样性 [J]. *水生态学杂志*, 2021, **42**(4): 40-49.]
- [19] Sun J D, Han X, Huang Y J, *et al.* Analysis on the difference of reconstructed soil moisture content in grassland open-pit mining area [J]. *China Mining Magazine*, 2022, **31**(4): 86-95. [孙俊东, 韩兴, 黄月军, 等. 草原露天矿区重构土壤含水率差异性分析 [J]. *中国矿业*, 2022, **31**(4): 86-95.]
- [20] Fu S F, He S, Shi X S, *et al.* The chemical properties and microbial community characterization of the thermophilic microaerobic pretreatment process [J]. *Bioresource Technology*, 2015(198): 497-502.
- [21] Quast C, Pruesse E, Yilmaz P, *et al.* The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools [J]. *Nucleic Acids Research*, 2012, **41**(D1): D590-D596.
- [22] Liu W W, Yang F, Wang J, *et al.* Plant species dynamic distribution in the water-level-fluctuating zone of the main stream and bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Plant Science Journal*, 2011, **29**(3): 296-306. [刘维璋, 杨帆, 王杰, 等. 三峡水库干流和库湾消落区植被物种动态分布研究 [J]. *植物科学学报*, 2011, **29**(3): 296-306.]
- [23] Feng Y B, Cao Y, Xu X M, *et al.* Integrated control strategy of malignant Gramineae weeds in wheat fields in xi'an [J]. *Xinjiang Farm Research of Science and Technology*, 2017, **40**(10): 28-29. [冯渊博, 曹瑛, 许西梅, 等. 西安市麦田恶性禾本科杂草综合防控策略 [J]. *新疆农垦科技*, 2017, **40**(10): 28-29.]

- [24] Li Q, Ding W Q, Wang S M, *et al.* Influence of multi-year high water level running on growth recovery of *Cynodon dactylon* population in water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(3): 985-992. [李强, 丁武泉, 王书敏, 等. 三峡库区多年高水位运行对消落带狗牙根生长恢复的影响 [J]. 生态学报, 2020, **40**(3): 985-992.]
- [25] Zhu Q, Zeng J J, Bai Y Q. Distribution of two invasive *Xanthium* plants in Ningxia [J]. *Journal of Weed Science*, 2021, **39**(3): 28-34. [朱强, 曾继娟, 白永强. 2种苍耳属入侵植物在宁夏的分布 [J]. 杂草学报, 2021, **39**(3): 28-34.]
- [26] Ye C, Butler O M, Chen C R, *et al.* Shifts in characteristics of the plant-soil system associated with flooding and revegetation in the riparian zone of Three Gorges Reservoir, China [J]. *Geoderma*, 2020, **361**: 114015.
- [27] Yin Y L, Yu C G, Hua J F, *et al.* A trial on the silviculture of *Taxodium hybrid* 'Zhongshanshan118' planted in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir within the Wanzhou district area of Chongqing City [J]. *China Forestry Science and Technology*, 2014, **28**(2): 110-114. [殷云龙, 於朝广, 华建峰, 等. 重庆万州三峡库区消落带中山杉造林试验 [J]. 林业科技开发, 2014, **28**(2): 110-114.]
- [28] Wang Z, Xiao L W, Tan Q X, *et al.* Nitrogen and Phosphorus absorption from soil by the dominant herbaceous species in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(2): 151-160. [王正, 肖丽微, 谭秋霞, 等. 三峡水库消落带优势草本植物对土壤氮磷的吸收富集特征 [J]. 山地学报, 2019, **37**(2): 151-160.]
- [29] Zhou F R, Wang J X, Yang N, *et al.* Changes of urease and phosphatase activities under water and lead stress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, **30**(5): 229-234. [周芙蓉, 王进鑫, 杨楠, 等. 水分和铅胁迫下土壤中脲酶和碱性磷酸酶活性的变化 [J]. 中国农学通报, 2014, **30**(5): 229-234.]
- [30] Xiang S L, Wu T Z, Gong C Y, *et al.* Effects of organic matter removal on nitrogen and Phosphorus release characteristics from surface sediments in urban shallow lakes [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, **41**(5): 9-14. [向速林, 吴涛哲, 龚聪远, 等. 去除有机质对城市浅水湖泊氮磷释放特征的影响 [J]. 水土保持通报, 2021, **41**(5): 9-14.]
- [31] Zeng X M, Fan Y X, Lin K M, *et al.* Characteristics of soil phosphorus fractions and microbial communities in *Pinus taiwanensis* Hayata forests at different altitudes in a subtropical region of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(18): 6570-6579. [曾晓敏, 范跃新, 林开森, 等. 亚热带不同海拔黄山松林土壤磷组分及微生物特征 [J]. 生态学报, 2018, **38**(18): 6570-6579.]
- [32] Caporaso J G, Kuczynski J, Stombaugh J, *et al.* QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data [J]. *Nature Methods*, 2010, **7**(5): 335-336.
- [33] Jiang W, Bai H M, Xue G P, *et al.* Analysis of bacterial community structure and diversity in rhizosphere soil of different fruit vegetables in greenhouse continuous cropping on high-throughput sequencing [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, **36**(4): 82-89. [姜伟, 白红梅, 薛国萍, 等. 基于高通量测序的设施连作果类菜根际土壤细菌群落结构和多样性分析 [J]. 华北农学报, 2021, **36**(4): 82-89.]
- [34] Li X, Li Z C, Wang X, *et al.* Characteristics of dissolved organic matter in overlying water during algal bloom decay [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3281-3290. [李翔, 李致春, 汪旋, 等. 蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 [J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3281-3290.]
- [35] Wang C, Fang F, Wang C, *et al.* Phosphorus adsorption characteristics of the soils at different altitudes in water-level-fluctuating zone of Pengxi River [J]. *Journal of Chongqing University*, 2019, **42**(12): 89-98. [王翀, 方芳, 王超, 等. 彭溪河不同高程消落带土壤磷的吸附特性 [J]. 重庆大学学报, 2019, **42**(12): 89-98.]
- [36] Lin F, Liu X J, Zhang J Y. Effects of planting patterns on soil aggregates and organic matter characteristics of sandy soil [J]. *Journal of Desert Research*, 2018, **38**(6): 1219-1229. [藺芳, 刘晓静, 张家洋. 人工草地种植模式对沙化土壤团聚体及有机质含量的影响 [J]. 中国沙漠, 2018, **38**(6): 1219-1229.]
- [37] Tu J J, Chen Z J, Chen G J, *et al.* A study on land consolidation and utilization of the water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir—a case study of Kaixian County, Chongqing City [J]. *Journal of Mountain Research*, 2002, **20**(6): 712-717. [涂建军, 陈治谏, 陈国阶, 李德清. 三峡库区消落带土地整理利用——以重庆市开县为例 [J]. 山地学报, 2002, **20**(6): 712-717.]
- [38] Chen J P, Dong C Z, Xia C Z, *et al.* Estimation of food organisms and fish production potential in Nihe Reservoir [J]. *Northern Chinese Fisheries*, 1999(4): 9-11. [陈金平, 董崇智, 夏重志, 等. 泥河水库饵料生物和鱼产潜力的估算 [J]. 黑龙江水产, 1999(4): 9-11.]

DISTRIBUTION OF VEGETATION IN THE WATER-LEVEL-FLUCTUATION ZONE OF THE THREE GORGES RESERVOIR AND ITS EFFECTS ON PHOSPHORUS TRANSFER AND FISHERY PRODUCTION

WANG Zhi-Cong¹, ZHOU Wei-Cheng^{1,2}, LI Xiao-Yu^{1,2}, PENG Cheng-Rong¹ and LI Dun-Hai¹

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The water-level-fluctuation zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR) has the characteristics of large water level drop, wide area and high vegetation coverage. In order to explore the distribution law of vegetation in the WLFZ of the TGR and its potential contribution to the ecological environment and fishery in the reservoir area, the plant community structural characteristics, plant nutritional components, section slope and soil physical and chemical characteristics of 30 typical sections of the WLFZ in Zigui, Yunyang and Zhongxian Reservoir areas were investigated and analyzed. The results showed that: (1) 209 species belonging to 61 genera and 54 families were found, of which *Cynodon dactylon* and *Xanthium sibiricum* were the main dominant species, with an average coverage of 29.73% and 26.87%, respectively. With the decrease of water level elevation, the coverage of *C. dactylon*, *Alternanthera philoxeroides* and *Abutilon theophrasti* gradually increased, the coverage of *X. sibiricum*, *Melilotus officinalis* and *Bidens tripartite* gradually decreased, while the coverage of *Humulus scandens*, *Setaria viridis* and *Polygonum lapathifolium* first increased and then decreased. The distribution of vegetation was also affected by the slope of the sampling sections. The coverage of *C. dactylon* was significantly negatively correlated with the slope ($P < 0.001$), while that of *X. sibiricum* showed a significant single peak distribution ($P < 0.001$). Higher soil moisture content promoted the formation of common dominant communities dominated by *C. dactylon*, and with the decrease of soil moisture content, vegetation types gradually succeed to common dominant communities dominated by *X. sibiricum*; (2) The surface soil in the WLFZ at low water level elevation (150—160 m) showed an obvious phosphorus absorption trend, while the soil at high water level elevation (160—175 m) showed an obvious phosphorus release trend, which was closely related to the vegetation types and the soil microbial community structure characteristics of the sampling plots; (3) The total ground fresh weights of *C. dactylon* and *X. sibiricum* in the whole WLFZ of TGR was 2.51×10^8 and 2.48×10^8 kg, respectively, their total amount and protein content are much higher than those of other plants, and their potential contribution to the fishery productivity in the reservoir area are 1.25×10^8 and 1.24×10^8 kg, respectively. To sum up, the dominant species of vegetation in the WLFZ of the TGR are *C. dactylon* and *X. sibiricum*. The distribution of vegetation is mainly affected by water level elevation, section slope and soil moisture content. The vegetation in the WLFZ of the TGR has high ecological service value in terms of terrestrial phosphorus interception, phosphorus regulation and fishery contribution. This study can provide an important reference for evaluating the ecological fishery function of the reservoir WLFZ and developing the vegetation restoration technology for the WLFZ.

Key words: Water-level-fluctuation zone; Distribution of vegetation; Fishery productivity; The Three Gorges Reservoir