

DOI: 10.5846/stxb202202160364

孙龙, 卢涛, 孙涛, 孙然好. 金沙江下游典型库区消落带植被恢复模式. 生态学报, 2023, 43(2): 826-837.

Sun L, Lu T, Sun T, Sun R H. Vegetation restoration pattern of water-level-fluctuation zone in two cascaded reservoirs in the lower Jinsha River. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 826-837.

金沙江下游典型库区消落带植被恢复模式

孙 龙¹, 卢 涛², 孙 涛¹, 孙然好^{1,3,*}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 消落带植被分布、生活型、多样性的调查研究显著促进了消落带植被恢复技术的进步, 然而相邻两梯级库区消落带植被分布的差异以及植被群落特征的年际变化并不明确。此外, 金沙江下游部分区域表现出一定的干热特征, 其影响下的消落带植被群落特征有待深入了解。基于 2019 年和 2021 年向家坝和溪洛渡库区消落带植被调查结果, 分析表明: (1) 金沙江下游消落带按照下垫面特性主要分为硬岩型、软岩型、松软堆积型 3 种类型, 坡度平缓的松软堆积型消落带是植被恢复的主要类型; (2) 整体上, 消落带优势植被类型是一年生和多年生草本, 单优势种、少优势种群落较为普遍, 两个库区消落带优势种重要值差异显著, 植被生活型较少; (3) 向家坝、溪洛渡库区消落带在分别经历 6 次和 8 次周期性水淹后, 消落带植被分布与群落物种多样性特征变化不显著, 表明消落带植被群落结构相对稳定。综上说明向家坝、溪洛渡两个相邻的梯级库区消落带植被恢复需要以灌草为主, 且具有不同的潜在恢复模式, 因此需要对应采取不同的恢复策略。研究对于科学指导金沙江下游梯级水电站库区消落带植被恢复具有重要意义。

关键词: 梯级水库; 消落带; 植被生活型; 重要值; 多样性

Vegetation restoration pattern of water-level-fluctuation zone in two cascaded reservoirs in the lower Jinsha River

SUN Long¹, LU Tao², SUN Tao¹, SUN Ranhao^{1,3,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The investigation and research on the distribution, life-forms, and diversity of the vegetation have greatly promoted the progress of the restoration technology of the vegetation in water-level-fluctuation zone of the reservoir area. However, previous studies did not answer the question of how the distribution of vegetation in the riparian zone differed between two cascade reservoirs and the associated interannual variation of vegetation community characteristics. In addition, some areas in the lower Jinsha River belong to hot-dry valleys. The vegetation of the water-level-fluctuation zone in the reservoir areas of the lower Jinsha River is partly affected by the high temperature and arid climate, which would have a certain influence on the vegetation community characteristics of the water-level-fluctuation zone. That is, in the area of the lower Jinsha River, it is still unclear how the distribution of vegetation in the water-level-fluctuation zone in two cascaded reservoir areas and their interannual change. In 2019 and 2021, the vegetation communities of the neighboring Xiangjiaba

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2102209); 中国三峡建工(集团)有限公司技术服务项目 (JG/18103B-4B-5B-6B)

收稿日期: 2022-02-16; **网络出版日期:** 2022-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: rhsun@rcees.ac.cn

and Xiluodu reservoir areas were investigated, respectively. The results showed that: (1) there were mainly three types of water-level-fluctuation zone in the lower Jinsha River: type of hard rock, type of soft rock, and type of loose and soft sedimentary zones with soil or sediments accumulated. Plants were mainly distributed in the loose and soft sedimentary zones with gentle slopes; (2) Overall, the dominant vegetation in the sedimentary zones were annual and perennial herbaceous plants. The single dominant species and less dominant species communities were common. Due to the periodic inundation and dry heat, the vegetation in the zone had a zonal distribution along the water level elevation. Significant differences in the important values of dominant species in the two reservoirs. Generally, a relatively few vegetation life types were found in the studied areas; (3) The vegetation community index of the zone in Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs did not change significantly after six and eight periodic inundations, indicating that the vegetation community structure of the zone was relatively stable in the two-year time scale. Combining the differences in the important values of dominant species in the two reservoir areas, different vegetation restoration patterns of the water-level-fluctuation zone of Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs were clarified. In summary, it is suggested that the restoration of vegetation in the fallout zone of Xiangjiaba and Xiluodu, two adjacent terrace reservoirs, needs to be dominated by irrigation and grass, and has different potential restoration patterns, so different restoration strategies need to be adapted accordingly. The study is of great significance for scientific guidance on the restoration of vegetation in the fallout zone of the reservoir area of the lower Jinsha River.

Key Words: cascade reservoirs; water-level-fluctuation zone; vegetation life type; importance value; plant diversity

消落带是河、湖、库由于周期性水位消涨形成的在最高水位线与最低水位线之间的带状区域,是水陆生态系统的交错地带^[1-3]。消落带作为陆地生态系统和水域生态系统之间的过渡区域,是泥沙、有机物、污染物等进入水域的关键区域^[4-6],具有明显的环境、生态和植物群落梯度等特征,呈现出一定的脆弱性、边缘性与过渡性^[7]。消落带生态结构稳定是库岸稳定、水库安全运行的重要保障之一^[8-9]。植被是消落带生态系统的重要组成部分,在稳定堤岸、维持生境、保护水质等方面发挥重要作用^[10-11]。一方面消落带植被群落受水淹、土壤环境影响^[12],另一方面植被又是影响消落带泥沙沉积强度主要因素之一,而泥沙沉积又会给消落带来营养物质,有利于土壤瘠薄区域的消落带的植被生长^[5, 13-14]。因此,消落带植被恢复与土壤保持是互相促进的过程^[15],对于维护消落带功能稳定具有重要作用。

河岸植被的恢复与重建是消落带研究的重点方向之一,通过水库消落带植被恢复进而控制土壤侵蚀,是保障库岸稳定和水库安全运行的有效途径^[3, 5]。明确消落带自然植被的分布特征是科学指导人工恢复和重建消落带生态结构和功能的基础^[13, 16]。适生植物遴选是消落带生态重建的关键环节,以往关于大型库区消落带植被的结构组成、生活型、多样性等有了大量且充分研究^[17-20],支撑、促进了消落带植物的遴选和植被配置等技术的提升^[8, 21]。然而,以往研究并没有回答相邻两梯级库区消落带植被分布有何差异,以及植被群落特征的年际变化。植被群落特征及物种多样性与生境密切相关,是环境与生物因子共同作用的结果^[10, 14]。因此,回答上述两个问题有利于精准区别相邻库区消落带植被恢复模式,提高恢复植被的长期存活率,是科学指导消落带植被恢复的关键。

金沙江拥有丰富的水能资源,水电等清洁能源有力支撑了区域节能减排及“碳中和”目标^[22]。金沙江下游长 768.4 km,天然落差 719 m,从上游至下游依次建设有乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 个梯级水电站。梯级水电站开发是我国水电资源开发中的重要模式,高效利用水能资源的同时,改变了原有水热条件、水资源丰枯节律^[23-28]。此外,金沙江下游区域光热资源充足,由于地形起伏大,气候垂直变化明显。溪洛渡库区部分区域表现出一定的干热河谷特征^[29]。消落带植被筛选通常考虑耐水淹、耐贫瘠等特性^[8, 20],而在金沙江下游,植被恢复还一定程度上受到干热气候影响。例如金沙江干热河谷二滩水库库区陆生植物动态特性研究发现,对比建库之前,二滩库区植被群落结构更复杂,物种多样性增加^[29]。因此,金沙江下游库区消落带植被特征有待深入研究。综上,本研究以金沙江下游向家坝和溪洛渡库区消落带植被为研究对象,通过对比库区消

落带植物生活型、生物量及盖度、重要值及生物多样性指数的库区差异及年际变化,明确金沙江下游消落带植被分布特征、相邻两梯级库区植被群落特征的差异及年际变化规律。研究为金沙江下游消落带植被恢复、水电开发的生态环境影响的科学评估提供科学支撑。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

金沙江下游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 个梯级水电站库区主要位于四川、云南交界的干热河谷中。金沙江下游河段,地形起伏大,河谷深切。金沙江下游流域所在的川滇区域属亚热带气候区,是我国乃至全球纬度最高、海拔最高的一块亚热带气候区。该区域水热条件垂直变化显著,从河谷到高山顶部由亚热带过渡到寒温带。海拔 1400 m 以下的干热河谷地带干热资源丰富,日照时数长、太阳辐射强,年均气温 18—23℃。区域内年均降水量 800—1200 mm,年蒸发量 2500—4000 mm。降水年内分配不均,雨旱季分明,年降水量的 80%集中在 5—10 月。区域土壤多在石灰岩、砂页岩、紫色砂页岩、板岩、玄武岩、石英岩及第三系、第四系地层上发育而成。由于母岩、地形、气候、植被等多样性和人为活动的影响,形成了不同的土壤类型,包括黄壤、红壤、燥红土、红色石灰土、黄棕壤、水稻土、紫色土等。金沙江下游区域大部分属亚热带常绿阔叶林带中的川、滇金沙江干热河谷植被区。通常 1500 m 以下为稀树灌丛带,1500—2300 m 为云南松、阔叶林带。

1.2 样地设置与植被调查

按海拔由高到低,金沙江下游梯级电站依次是乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝,干流范围为乌东德库尾至向家坝电站坝址,总长约 782 km,落差 729 m。乌东德水库正常蓄水位 975 m;白鹤滩坝址距上游乌东德坝址约 182 km、下游溪洛渡水电站约 195 km,水库正常蓄水位 825 m;溪洛渡水库正常蓄水位 600 m;向家坝坝址距离上游溪洛渡 151 km,水库正常蓄水位 380 m。消落带植被调查主要在金沙江下游已经蓄水的向家坝和溪洛渡库区开展,水库基本信息见表 1。

表 1 金沙江下游库区基本信息

Table 1 Characteristics of reservoir in the downstream of Jinsha River

库区 Reservoir area	流域面积/(万 km ²) Catchment area	调节库容/(亿 m ³) Live storage	死水位/m Dead storage level	正常蓄水位/m Full reservoir level	首次蓄水时间 First impoundment
向家坝	45.88	9.03	370	380	2012 年 10 月
溪洛渡	45.44	64.60	540	600	2013 年 5 月

在向家坝和溪洛渡库区干、流水位梯度样带内选择代表性样地,共计选取调查样地 9 处(表 2),分别在 2019 年 7 月(6 次周期性水淹)和 2021 年 7 月(8 次周期性水淹)调查两次。在每个样地随机设置 3 个 1 m×1 m 的样方,共调查样方 122 个。调查记录样方内植物种类、优势种和植株高度,用网格目测法估算植被盖度,采用收割法调查生物量。向家坝消落带高差 10 m,在每处样地按照高、低分别选取 3 个样方,即为 6 个样方;溪洛渡消落带高差 60 m,在每处样地按照高、中、低分别选取 3 个样方,即为 9 个样方。

1.3 数据分析与处理

生活型是生物对于特定生境长期适应而在外貌上反映出来的类型,所以生活型是生物的一种生态分类单位。植物生活型是植物对综合生境条件长期适应而在外貌上表现出来的生长类型,如乔木、灌木、草本、藤本等,其形成是不同植物对相同环境条件产生趋同适应的结果。因此,生活型一定程度上反映该地区的气候特征。此外,生活型分析是以外貌为原则的群落分类的基本依据,据此有助于对群落结构和群落生态的深入理解。研究区植物生活型根据《中国植物志》划分^[18]。

重要值是一个物种所能利用的各种资源总和,综合表征植物在群落中的重要程度,是确定优势种和建群种的重要依据^[4,6]。重要值(*IV*)是相对频度(*RF*)、相对盖度(*RC*)和相对密度(*RD*)的函数,计算公式如(式 1):

$$IV = (RC + RF + RD) / 3 \quad (1)$$

式中,相对频度(RF)为某种植物出现样方数与所有样方数之和的比值(%);相对盖度(RC)为某种植物盖度与所有植物盖度之和的比值(%),相对密度(RD)为某种植物株数与所有植物株数之和的比值(%)。

表 2 金沙江下游库区消落带调查点位

Table 2 Survey sites of riparian zone at reservoir area in the downstream of Jinsha River

库区 Reservoir	经度 Longitude	纬度 Latitude	位置 Location	样方数量 Quadrat number
向家坝	104.296531°	28.626471°	邵女坪(干流)	6
	104.185335°	28.634328°	黄坪村(干流)	6
	103.873786°	28.319707°	桧溪镇(干流)	6
	103.987022°	28.617905°	新安镇(干流)	6
	103.872287°	28.693454°	中都河(支流)	6
溪洛渡	103.626019°	28.256825°	马家河坝(干流)	9
	103.127905°	27.419871°	上田坝乡(干流)	9
	103.041567°	27.397800°	大牛圈(干流)	9
	103.145347°	27.410276°	牛栏江(支流)	9

植物多样性指数包括植被的 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数。其中 Patrick 丰富度指数等于样地内出现的物种数(S),Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 优势度指数(D)、Pielou 均匀度指数(E)计算公式分别为^[18]:

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$D = \sum P_i^2 \quad (3)$$

$$E = H / \ln S \quad (4)$$

式中, P_i 为第 i 种的占比; S 为样方内出现的物种数。

数据统计分析通过 SPSS 23 软件完成。单因素方差分析(one-way ANOVA)用于消落带不同海拔梯度间的差异性检验。配对 T 检验用于相同消落带海拔高度、不同年份处理之间的差异性检验。统计检验的显著性差异标准为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 消落带分类

在金沙江下游的向家坝和溪洛渡水电站库区,按照下垫面特性主要分为 3 种类型的消落带,分别是硬岩型、软岩型、松软堆积型(图 1)。硬岩型消落带(图 1)主要由坚硬的碳酸盐类岩石和砂岩等组成,地形陡峭,坡度一般在 30° 以上,地表基岩裸露,松软堆积物和植被较少,在水淹后几乎没有植物幸存。

软岩型消落带(图 1)广泛发育在向斜构造,由三叠系巴东组钙质泥岩、泥灰岩或侏罗系紫色砂、泥岩互层构成,地形呈阶梯状,水库运行中库岸再造作用强烈,不断有滑坡物质堆积在现有消落带内。软岩型消落带呈阶梯状,植被稀疏,受人类干扰较多,其植物主要为农田杂草,在坡坎面几乎没有植物着生。

松软堆积型消落带(图 1)是河流泥沙大量沉积形成的河滩和阶地,地势平坦,土地相对肥沃。松软堆积型消落带植物生长茂盛,种类相对较多,以往主要作为农田、草地和河滩地,构成种类为常见田间杂草和林缘草丛。

2.2 消落带植物生活型与空间分布

向家坝、溪洛渡库区消落带植物共包含 5 种生活型(表 3)。2 个库区一年生草本植物均占绝对优势,为消落带的优势生活型。其中,向家坝库区有 28 种,占统计植物种的 49.1%;溪洛渡库区有 35 种,占统计植物种的 58.3%。向家坝库区多年生草本植物 21 种,占统计植物种的 36.9%;溪洛渡库区 17 种,占统计植物种的 28.4%。

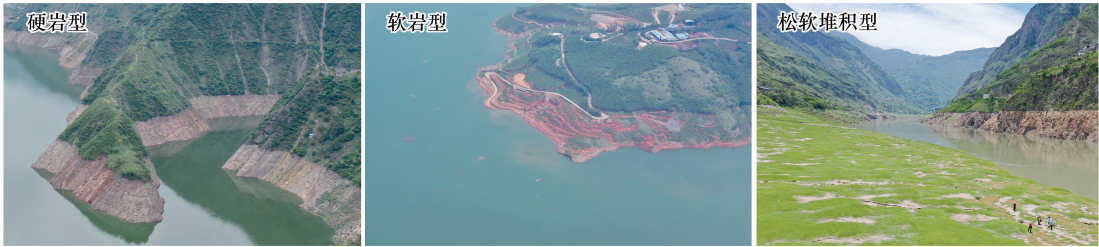


图 1 金沙江下游典型库区消落带类型

Fig.1 Type of water-level-fluctuation zone in typical reservoir areas in the lower Jinsha River

表 3 向家坝、溪洛渡库区消落带植物生活型

Table 3 Plant life-forms in the water-level-fluctuation zone in areas of Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs

生活型 Plant life-forms	向家坝库区 XJB reservoir area		溪洛渡库区 XLD reservoir area	
	种数	占比/%	种数	占比/%
一年生草本 Annual herbaceous	28	49.1	35	58.3
一年生或二年生草本 Annual or biennial herbaceous	3	5.3	4	6.7
多年生草本 Perennial herbaceous	18	31.6	13	21.7
藤本 Lianas	4	7.0	2	3.3
灌木 Shrubs	4	7.0	6	10.0

对向家坝库区和溪洛渡库区消落带的调查结果表明,消落带植被类型主要为多年生和一年生草本植物,灌木稀少,无乔木。多年生草本植物优势种为狗牙根和空心莲,2019 年发现多年生草本 24 种,2021 年发现多年生草本 36 种,主要包括:狗牙根(*Cynodon dactylon*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、笔管草(*Equisetum ramosissimum*)、慈姑(*Sagittaria sagittifolia*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、山蚂蝗(*Desmodium racemosum*)等。2021 年多年生草本物种比 2019 年多 50%。一年生草本植物优势种为苍耳、稗草和狗尾草,2019 年发现一年生草本植物 49 种,2021 年发现一年生草本 55 种,主要包括:叶下珠(*Phyllanthus urinaria*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)、稗草(*Echinochloa crusgalli*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、鬼针草(*Bidens bipinnata*)、小蓬草(*Conyza Canadensis*)等。

向家坝库区消落带植物种与溪洛渡库区消落带植物种相似度较高,两个电站有 31 种共有植物。在部分消落带中上部土壤基质条件较好的地段,出现了木本植物,主要种类有川麸杨(*Rhus wilsonii*)、截叶胡枝子(*Lespedeza cuneata*)、五色梅(*Lantana camara*)、悬钩子(*Rubus corchorifolius*)。此外,调查在向家坝库区消落带发现了外来植物土荆芥(*Dysphania ambrosioides*),在溪洛渡库区消落带发现了外来植物刺苋(*Amaranthus spinosus*)、野苘蒿(*Crassocephalum crepidioides*)。

整体上,向家坝、溪洛渡库区消落带植被沿水位高程呈现比较明显的带状分布特征。消落带下部周期水淹时间通常在 240 d 以上,主要分布有空心莲子草和狗牙根。往上是周期水淹 180 天左右的中部区域,通常分布有苍耳、马唐和狗尾草带。苍耳生长面积大、旺盛密集,马唐和狗尾草多伴生分布在其周边。消落带最上部周期水淹时间通常在 90 d 左右,通常一年生杂草群落占绝对优势。

2.3 消落带植被生物量和盖度

2019 年与 2021 年两年调查结果相近,即向家坝、溪洛渡库区消落带群落生物量和盖度均没有显著差异,表明两个指标变化不大,对时间变化不敏感。显著性检验结果 *P* 值最小为 0.076,接近差异显著,为溪洛渡 560 m 处 2019 年与 2021 年两年植被群落生物量的差异性分析结果。对于相同库区消落带不同海拔之间对比,显著性结果显示 *P* 值均小于 0.01,表明不同海拔梯度间消落带群落生物量和盖度均有极显著差异。对于两个库区整体比较,差异性结果显示生物量和盖度的 *P* 值分别为 0.77 和 0.76,表明库区间生物量和盖度差异不显著。

金沙江下游向家坝、溪洛渡 2 个库区消落带植被的地上生物量和盖度沿着水位梯度的不断升高,总体呈递增趋势(图 2、图 3),即消落带上部的地上生物量和植被盖度最高,下部最低。向家坝库区消落带下部水位梯度带(370 m)的平均盖度只有 39%,地上生物量少,平均值为 $(0.31 \pm 0.08) \text{ kg/m}^2$;上部水位梯度带(380 m)盖度明显增加,平均值达到 76%,地上生物量多,平均值为 $(0.68 \pm 0.22) \text{ kg/m}^2$,为消落部下部的 2.2 倍。

溪洛渡库区消落带的平均地上生物量和盖度相比向家坝库区略低,其下部水位梯度带(560 m)植被的平均盖度只有 30.0%,平均为 $(0.30 \pm 0.06) \text{ kg/m}^2$;中部水位梯度带(580 m)的平均盖度达到 67.5%,生物量也明显增加,达到 $(0.51 \pm 0.12) \text{ kg/m}^2$;消落带上部水位梯度带(600 m)的盖度和地上生物量都达到最大,平均值分别为 81.3%和 $(0.78 \pm 0.16) \text{ kg/m}^2$,为消落部下部的 2.6 倍。

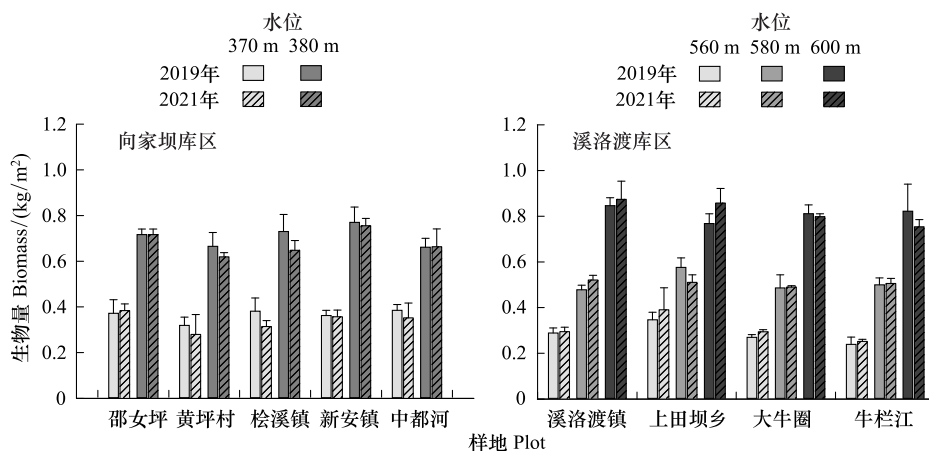


图 2 向家坝、溪洛渡库区消落带 2019、2021 年消落带植被生物量(均值±方差)

Fig.2 Plant biomass in the water-level-fluctuation zone of Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs in 2019 and 2021 (Mean±SD)

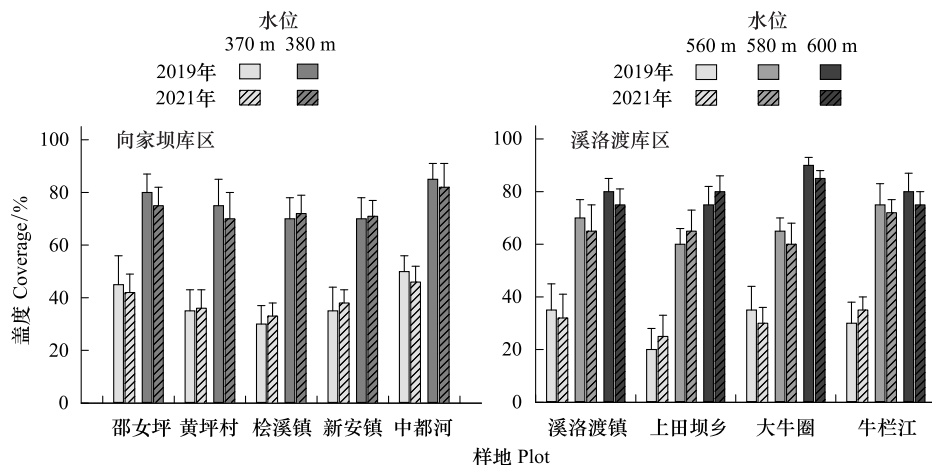


图 3 向家坝、溪洛渡库区消落带 2019、2021 年消落带植被盖度(均值±方差)

Fig.3 Plant cover in the water-level-fluctuation zone of Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs in 2019 and 2021 (Mean±SD)

2.4 消落带植被重要值与多样性

2.4.1 植被重要值

2019 年与 2021 年两年调查结果相近,分别在向家坝库区消落带选取苍耳、金色狗尾草、狗牙根以及空心莲子草,在溪洛渡库区消落带选取苍耳、金色狗尾草、狗牙根以及马唐各 4 种优势度最大的植物进行重要值分析(图 4)。

与 2019 年度监测结果相似,2021 年度向家坝库区消落带中,空心莲子草和狗牙根是 370 m 水位梯度带的优势物种,二者的重要值分别为 0.46 ± 0.18 和 0.26 ± 0.13 。随着水位梯度的升高,其重要值下降,而苍耳和金色狗尾草的重要值升高,并于 380 m 水位梯度二者重要值的平均值分别达到 0.51 ± 0.22 和 0.22 ± 0.18 ,这与它们在消落带内的分布情况相一致。在 2021 年度溪洛渡库区消落带中,狗牙根是 560 m 水位梯度带的优势物种,其重要值达到 0.59 ± 0.24 。随着水位梯度升高到 580 m,马唐逐渐取代狗牙根,成为优势物种,其重要值平均值为 0.29 ± 0.12 。消落带上部即 600 m 水位梯度带,金色狗尾草和苍耳又占优势,二者重要值的平均值分别达到 0.39 ± 0.20 和 0.29 ± 0.18 。

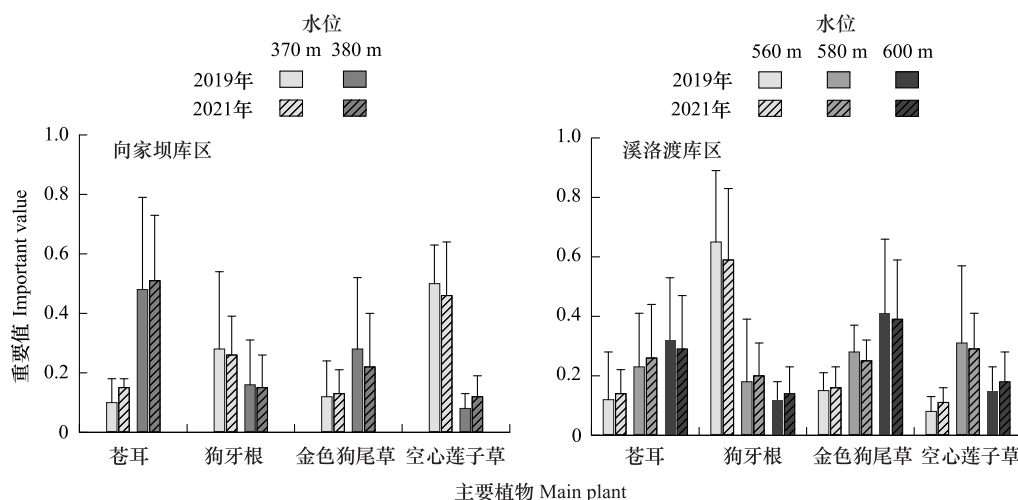


图4 向家坝、溪洛渡库区消落带主要植物重要值(均值 $\pm$ 方差)

Fig.4 Changes of important value in the water-level-fluctuation zone of Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs in 2019 and 2021 (Mean $\pm$ SD)

2.4.2 植被多样性

消落带植被 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数如图 5—图 8 所示。丰富度指数、多样性指数和优势度指数变化与地上生物量的变化趋势基本一致,即消落带下部最低,中部次之,上部最高。同一库区消落带不同海拔梯度之间对比结果显示,植被群落丰富度、多样性、优势度差异检验结果显示 P 值均小于 0.01,表明不同海拔间有极显著差异。均匀度指数显著性结果显示向家坝和溪洛渡 P 值分别为 0.125 和 0.295,表明均匀度指数没有显著差异。对于两个库区整体比较,差异性结果显示植被群落丰富度、多样性、优势度、均匀度差异检验结果 P 值均大于 0.05。均匀度指数 P 值为 0.059,接近差异显著。

对于丰富度指数(图 5),2021 年度调查结果显示,与 2019 年度调查结果大致相似,向家坝库区消落带在 370 m 处平均植物物种数(7.9 ± 1.8)种,在 380 m 处平均物种数(12.3 ± 2.3)种。溪洛渡库区消落带在 560 m 处平均物种数(6.7 ± 1.5)种,在 580 m 处平均物种数(8.1 ± 1.4)种,在 600 m 处为(12.6 ± 2.1)种,最长达 14 种。

对于多样性指数(图 6),在向家坝库区在 370 m 处最小、均值为 0.62 ± 0.07 ,在 380 m 处最大、均值为 1.27 ± 0.12 。溪洛渡表现出相似规律,Shannon-Wiener 指数在 560 m 处均值为 0.40 ± 0.08 、580 m 处为 0.70 ± 0.11 、在 600 m 处为 1.23 ± 0.16 。各库区 Simpson 优势度指数的变化趋势与 Shannon-Wiener 多样性指数刚好相反(图 7)。

对于均匀度指数(图 8),两次调查结果显示向家坝、溪洛渡库区各位点消落带的 Pielou 均匀度指数均基本上在 0.7—0.8 范围内波动。总体上,不同水位线的差异或不同年份的差异不大。

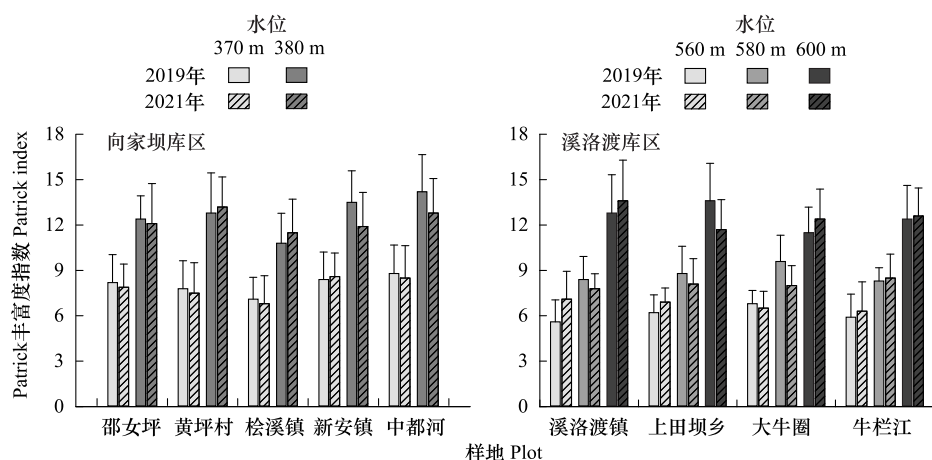


图5 向家坝、溪洛渡库区消落带 2019、2021 年物种丰富度指数沿高程变化(均值 $\pm$ 方差)

Fig.5 Changes of abundance index along the elevation in the water-level-fluctuation zone of Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs in 2019 and 2021 (Mean $\pm$ SD)

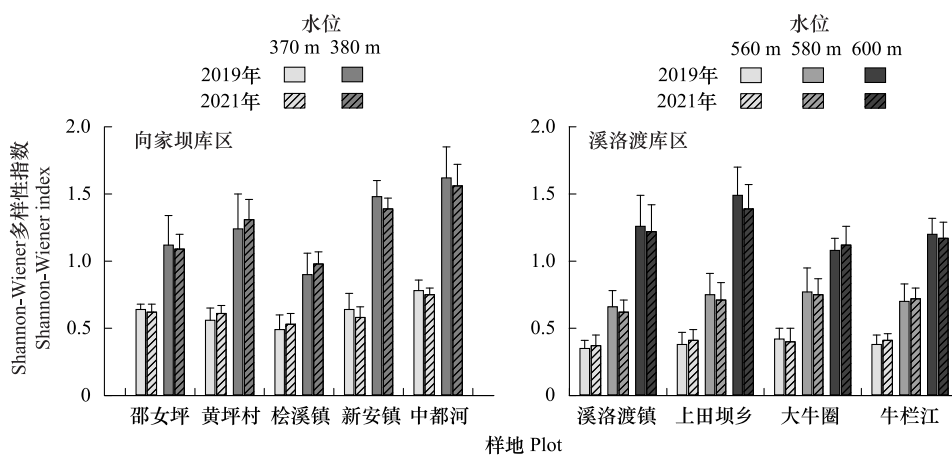


图6 向家坝、溪洛渡库区消落带 2019、2021 年物种多样性指数沿高程变化(均值 $\pm$ 方差)

Fig.6 Changes of diversity index along the elevation in the water-level-fluctuation zone of Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs in 2019 and 2021 (Mean $\pm$ SD)

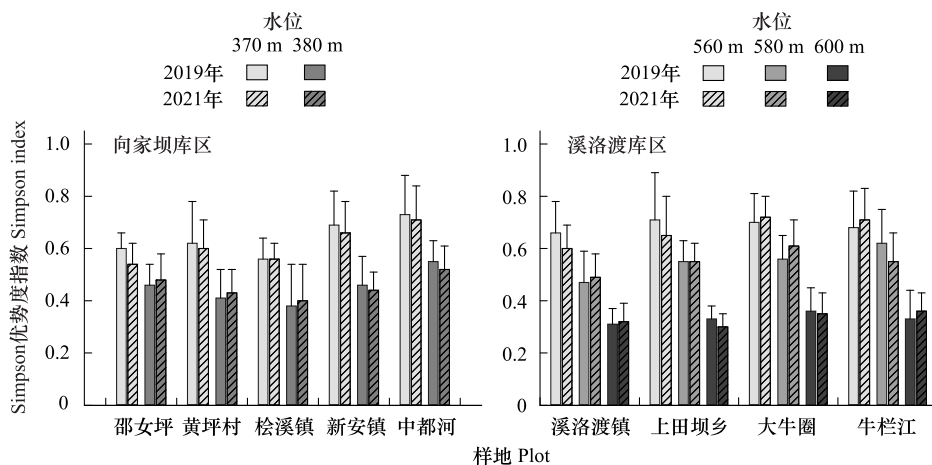


图7 向家坝、溪洛渡库区消落带 2019、2021 年物种优势度指数沿高程变化(均值 $\pm$ 方差)

Fig.7 Changes of dominance index along the elevation in the water-level-fluctuation zone of Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs in 2019 and 2021 (Mean $\pm$ SD)

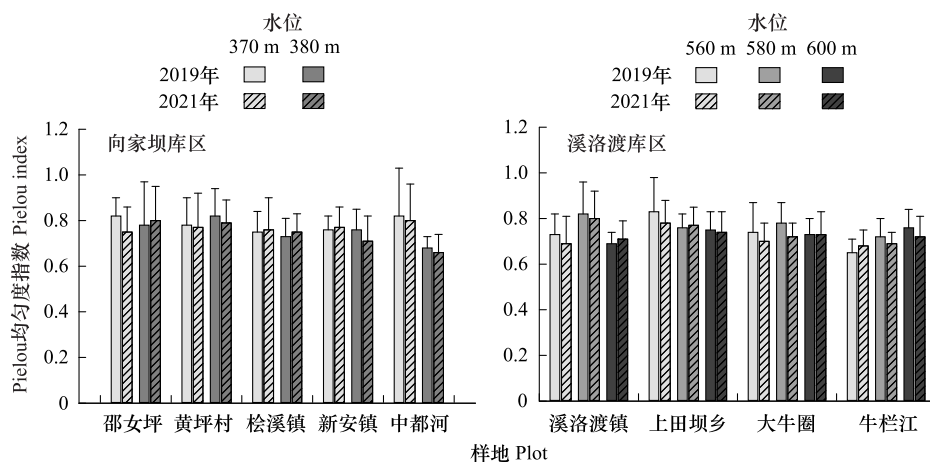


图8 向家坝、溪洛渡库区消落带 2019、2021 年物种均匀度指数沿高程变化(均值 $\pm$ 方差)

Fig.8 Changes of evenness index along the elevation in the water-level-fluctuation zone of Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs in 2019 and 2021 (Mean $\pm$ SD)

3 讨论

3.1 植被恢复的主要消落带类型

根据流域属性、质地、坡度、可开发利用等不同角度,消落带类型有多种划分方式,如广义上分为河道堤岸型、湖泊堤岸型和水库岸坡型 3 种^[19]。本研究按照下垫面特性将金沙江下游向家坝和溪洛渡库区消落带分为 3 种类型,即硬岩型、软岩型、松软堆积型,部分场景包括 3 种的类型的组合,均属于广义分类的水库岸坡型。也有研究表明,根据环境和可开发利用综合指标,可以将水库消落带划分为峡谷陡坡裸岩型、峡谷陡坡薄层土型、中缓坡坡积土型、开阔河段冲积土型、城镇河段废弃土地型和支流尾间型消落带^[19, 30]。本研究 3 种类型大致可对应前三种类型。消落带类型的划分一定程度上限定了植被恢复的应用场景,例如本研究植被恢复主要在松软堆积型消落带,研究结果对植被恢复的参考作用未必适用于其他类型消落带。

在南水北调中线水源地丹江口水库有类似的研究,其结果表明陡坡消落带分为石质和土质 2 种类型,石质库岸面源污染风险相对较低,土质库岸在蓄水前进行了淹没线以下的林木清理,库岸土壤受降雨和波浪的侵蚀影响较大,是生态屏障构建的主要区域^[9]。与本研究类似,从图 1 中可知,硬岩型消落带由于缺乏土壤、原始土地利用类型多为天然林草地,一方面土壤流失后,植被系统难以自然恢复;另一方面,面源污染及进一步土壤侵蚀风险相对较低,因此难以发挥水土保持、水质净化等生态功能。而在松软堆积型消落带,由于泥沙堆积及原始土地利用类型的影响,土壤侵蚀、面源污染影响较大,是植被恢复的关键区域,也是当前诸多研究关注的区域。

3.2 消落带植被生活型特征

本研究中,消落带下部区域周期水淹时间通常在 240 天以上,泥沙淤积,植被稀疏,主要分布的植被具有抗逆性强,根系发达,耐水淹的特性,如空心莲子草和狗牙根植物。消落带中部区域周期水淹 180 天左右,相对消落带下部区域植被生长面积大、旺盛密集,但土地利用方式受原有耕地影响,主要分布苍耳、马唐和狗尾草带。消落带的上部区域水淹周期通常在 90 天左右,由于受气候及农业耕作等影响,通常为一年生杂草群落。

在生活型种类方面,金沙江下游消落带植被生活型少于其他库区。例如在南水北调中线大宁水库消落带植被分为 9 种生活型^[6],重庆忠县至宜昌秭归段消落带植被分为 11 种生活型^[31]。本研究仅有 5 种生活型,主要缺少乔木、灌木等生活型,可能主要受原始土地利用类型及地形等因素的影响。与其他库区消落带研究

结果类似^[16, 31-32],金沙江下游消落带典型植被以一年生和多年生的草本植物为主,占比超过 86%。例如,在南水北调中线大宁水库消落带植被的分布特征的研究结果表明,草本占 98%,盖度及物种多样性指数均表现为随水位梯度升高而增加^[6]。在三峡库区不同生境下中华蚊母树群落中 56 种植物的生活型谱的调查显示草本超过 55%^[14]。综上说明草本是植被恢复的主体,但较少的生活型说明植被恢复需要以灌草为主。

3.3 消落带植被时空分布特征

从空间差异看,向家坝和溪洛渡库区消落带之间的生物量、盖度以及多样性指数的差异均不显著,表明相邻的两个梯级水电站库区消落带植被群落分布特征没有显著差异。从时间差异看,金沙江下游向家坝和溪洛渡库区消落带植被在 2019 年和 2021 年的生物量、盖度、多样性的差别不显。结果表明向家坝、溪洛渡库区消落带群落演替过程较为缓慢或趋于稳定。植物物种多样性是生物多样性的基础,体现了生物资源的丰富性,蕴含了植物物种间及植物与环境之间的互馈关系。周期性干湿交替使得消落带原本异质的环境趋同,样方植物退化,群落结构简化,植物种间表现出明显的独立性^[6, 33]。一般认为,水淹强度越大,出陆时间越短,植物多样性越低;水淹强度越小,出陆时间越长,植物多样性越高^[18, 34],本研究表明,物种丰富度、多样性、优势度均表现出明显的消落带梯度,而均匀度的变化特征不明显,研究结果与上述结论一致。

重要值的明显不同表明其反映库区植被群落特征差异的重要性。物种的重要值可以反映该植物在群落中地位和作用,重要值越大,表明该植物在群落中的地位越重要,对群落的影响越大。重要值是衡量物种在群落中的地位和作用的综合指标,也是种间关系分析的基础,表征了物种在群落中的优势程度或重要性^[6]。本研究中重要值大小依次为狗牙根(0.59)、苍耳(0.51)、空心莲子草(0.46)、狗尾草(0.39)。从重要值看,整体上可以采用以狗牙根、苍耳、狗尾草等为先锋植物,这与三峡水库涪陵-奉节段消落带研究结果接近^[6]。但具体库区有所不同,在向家坝消落带上部以苍耳、狗尾草为主,下部以空心莲子草、狗牙根为主。在溪洛渡消落带上部以狗尾草、苍耳为主,在中部以马唐为主,下部以狗牙根为主。

由于调查频数等不同(公式 1),重要值在不同调查情景下的可比性较差,但重要值的大小顺序具有一定参考意义。作为对比,在三峡库区不同生境下中华蚊母树群落的草本类别中,自然消落带狗牙根重要值为 7.58,排在地果、白茅、蕨之后;而在反季节消落带,前四位是狗牙根、苍耳、鼠鞠草和狗尾草,重要值分别为 36.4、8.5、7.9 和 7.3^[14]。在长江三峡水库涪陵-奉节段消落带的研究表明,狗牙根、苍耳、空心莲子草和马唐的重要值分别为 0.46、0.10、0.03、0.03^[6]。在三峡库区秭归段消落带 2014 年和 2019 年两年的调查结果显示,菊科为消落带优势科,其次为禾本科、廖科和大戟科植物,一年生草本植物毛马唐、狗尾草、稗、苍耳和多年生草本植物狗牙根等均有较高的重要值^[11]。在三峡库区的秭归段和巫山段消落带研究表明,优势植物重要值从高到低依次为狗牙根、狗尾草、毛马唐、金色狗尾草、苍耳^[17]。

3.4 消落带植被潜在恢复模式

基于消落带不同海拔高度植被生物量、盖度、重要值及群里多样性指数的分析,本研究提出向家坝、溪洛渡梯级库区消落带潜在植被恢复模式(图 9)。虽然对于向家坝、溪洛渡两个梯级库区消落带植被多样性指数没有显著差异,且两个库区消落带存在较多共有种,但两个库区植被优势种重要值、消落带梯度、水淹强度明显不同,因此向家坝、溪洛渡两个梯级库区消落带的植被恢复模式不同,尤其是在不同消落带海拔梯度的植被配置方面。

4 结论

本研究通过 2019 年、2021 年两次向家坝、溪洛渡库区消落带植被群落调查发现,金沙江下游消落带主要有硬岩型、软岩型、松软堆积型 3 种类型,以及以上 3 种类型的复合型。消落带植物主要分布在坡度平缓的松软堆积型消落带。向家坝、溪洛渡库区消落带植被群落单优势种、少优势种群落较为普遍,优势植被类型是一年生和多年生草本。由于周期性的水淹及干热等因素,消落带植被沿水位高程呈带状分布特征。消落带植被的 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数与地上生物量的变化趋势基本一

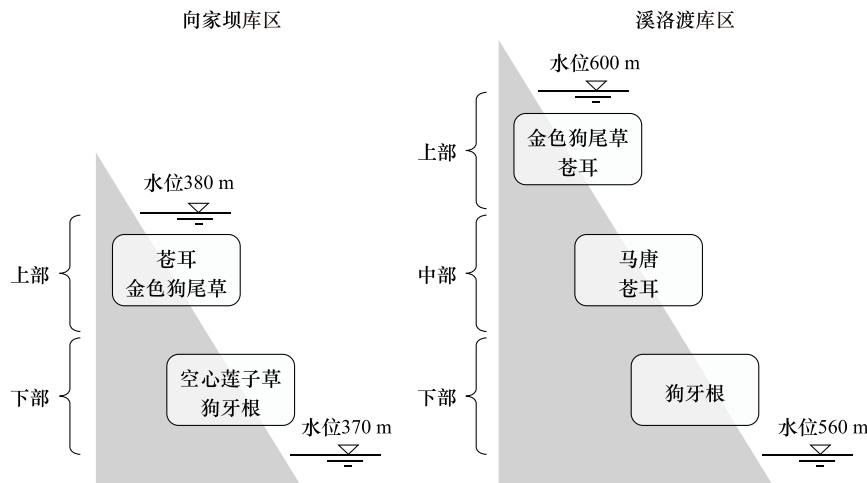


图9 向家坝、溪洛渡库区消落带植被恢复模式

Fig.9 Revegetation pattern of water-level-fluctuation zone in area of Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs

致,即消落带下部最低,中部次之,上部最高。经历了6次和8次周期性水淹的向家坝库区、溪洛渡库区消落带多年生草本种类2021年比2019年多50%,可能说明多年生草本群落演替的先锋植被型。但消落带植被分布与群落物种多样性特征变化不显著,说明两年的时间尺度上植被群落结构较为稳定。加之两个库区优势种重要值的差异,说明向家坝、溪洛渡梯级库区消落带具有不同的潜在植被恢复模式。因此建议向家坝消落带从上到下采用苍耳、金色狗尾草+空心莲子草、狗牙根的配置模式,溪洛渡采用金色狗尾草、苍耳+马唐、苍耳+狗牙根的配置模式。

参考文献 (References):

- [1] 李丽娟, 谢婷婷, 张松林, 袁中勋, 刘明辉, 李昌晓. 三峡库区消落带4种适生植物根际与非根际土壤养分与酶活性特征研究. 生态学报, 2020, 40(21): 7611-7620.
- [2] 阮宇, 胡景涛, 肖国生, 李俊清, 任凭. 中山杉功能性状适应三峡库区消落带的研究. 生态学报, 2022(7): 2921-2930.
- [3] 钟荣华, 贺秀斌, 鲍玉海, 唐强, 胡云华. 三峡水库消落带几种草本植物根系的垂直分布特征. 水土保持通报, 2015, 35(6): 235-240.
- [4] 郭燕, 杨邵, 沈雅飞, 肖文发, 程瑞梅. 三峡库区消落带现存草本植物组成与生态位. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3559-3568.
- [5] 俞幸池, 苏琴琴, 谢姣姣, 苏晓磊, 林锋, 阿依巧丽, 曾波. 三峡水库消落带泥沙沉积强度影响因素的分析研究. 长江流域资源与环境, 2021, 30(11): 2746-2754.
- [6] 张乐满, 兰波, 张东升, 刘英杰, 张丽红, 许文锋, 段晨辉, 敦静怡, 刘正学. 三峡水库涪陵-奉节段消落带优势草本植物生态位与种间联结性研究. 生态学报, 2022, 42(8). DOI: 10.5846/stxb202011162953.
- [7] 艾丽皎, 吴志能, 张银龙. 水体消落带国内外研究综述. 生态科学, 2013, 32(2): 259-264.
- [8] 卢阳, 周火明, 万丹, 金可, 张乾柱, 胡月, 闫建梅. 金沙江下游干热河谷消落带植被修复试验探讨. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2020, 41(2): 5-11.
- [9] 王超, 张洪, 雷俊山, 贾海燕, 雷沛, 尹炜. 南水北调中线水源区陡坡型库岸生态屏障构建. 环境工程学报, 2020, 14(12): 3243-3250.
- [10] 黄杰, 李晓玲, 王雪松, 杨进, 黄成名. 三峡库区不同消落带下中华蚊母树群落特征及其与土壤环境因子的关系. 植物生态学报, 2021, 45(8): 844-859.
- [11] 孙鹏飞, 沈雅飞, 王丽君, 杨邵, 郭燕, 肖文发, 程瑞梅. 三峡库区秭归段水位消落带草本植物多样性分析. 林业科学研究, 2020, 33(6): 96-104.
- [12] Ye F, Ma M H, Wu S J, Jiang Y, Zhu G B, Zhang H, Wang Y. Soil properties and distribution in the riparian zone: the effects of fluctuations in water and anthropogenic disturbances. European Journal of Soil Science, 2019, 70(3): 664-673.
- [13] 张黎明, 皇甫超河, 远勇帅, 孟盈盈, 贾璇. 升金湖消落带植被特征及与土壤特性的关系. 草业科学, 2021, 38(1): 52-62.
- [14] Soliveres S, Maestre F T. Plant-plant interactions, environmental gradients and plant diversity: a global synthesis of community-level studies. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2014, 16(4): 154-163.

- [15] Ye C, Chen C R, Butler O M, Rashti M R, Esfandbod M, Du M, Zhang Q F. Spatial and temporal dynamics of nutrients in riparian soils after nine years of operation of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 841-850.
- [16] 张羲, 于一雷, 李胜男, 徐卫刚, 李垒, 徐达, 孙昊苏. 南水北调北京段大宁水库消落带植被分布特征及多样性. *水生态学杂志*, 2021, 42(4): 40-49.
- [17] 简尊吉, 马凡强, 郭泉水, 秦爱丽, 肖文发. 三峡水库峡谷地貌区消落带优势植物种群生态位. *生态学杂志*, 2017, 36(2): 328-334.
- [18] 郭燕, 杨邵, 沈雅飞, 肖文发, 程瑞梅. 三峡水库消落带现存植物自然分布特征与群落物种多样性研究. *生态学报*, 2019, 39(12): 4255-4265.
- [19] 李姗泽, 邓玥, 施凤宁, 胡明明, 庞博慧, 王雨春, 李坤, 陈铭, 彭文启, 渠晓东, 包宇飞, 孟晶晶. 水库消落带研究进展. *湿地科学*, 2019, 17(6): 689-696.
- [20] 吴科君, 马文超, 李瑞, 陈红纯, 黄超, 何欣芮, 魏虹. 三峡库区消落带立柳(*Salix matsudana*)生长及营养元素分配特征. *生态学报*, 2019, 39(14): 5308-5316.
- [21] 简尊吉, 郭泉水, 马凡强, 秦爱丽, 程瑞梅, 肖文发, 康义, 梁洪海. 生态袋护坡技术在三峡水库消落带植被恢复中应用的可行性研究. *生态学报*, 2020, 40(21): 7941-7951.
- [22] 杜海龙, 李哲, 郭劲松. 基于 ISO14067 的长江上游某水电项目碳足迹分析. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(7): 1102-1110.
- [23] 李卫明, 艾志强, 刘德富, 周晓明. 基于水电梯级开发的河流生态健康研究. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(6): 957-964.
- [24] Chen J, Wang P F, Wang C, Wang X, Miao L Z, Liu S, Yuan Q S. Dam construction alters function and community composition of diazotrophs in riparian soils across an environmental gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 132: 14-23.
- [25] Wu H P, Zeng G M, Liang J, Guo S L, Dai J, Lu L H, Wei Z, Xu P, Li F, Yuan Y J, He X X. Effect of early dry season induced by the Three Gorges Dam on the soil microbial biomass and bacterial community structure in the Dongting Lake wetland. *Ecological Indicators*, 2015, 53: 129-136.
- [26] Yan Q, Bi Y, Deng Y, He Z, Wu L, van Nostrand J D & Shi Z, Li J, Wang X, Hu Z, Yu Y, Zhou J. Impacts of the Three Gorges Dam on microbial structure and potential function. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8605.
- [27] 李婷, 唐磊, 王丽, 安磊, 王骏, 莫康乐, 陈求稳. 水电开发对鱼类种群分布及生态类型变化的影响——以溪洛渡至向家坝河段为例. *生态学报*, 2020, 40(4): 1473-1485.
- [28] 吴乃成, 唐涛, 周淑婵, 蒋万祥, 傅小城, 李凤清, 蔡庆华. 香溪河梯级小水电站对河流生态系统功能的影响. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(6): 1458-1465.
- [29] 万丹, 周火明, 卢阳, 金可, 于江, 张乾柱, 胡月, 闫建梅. 金沙江干热河谷库区消落带植被恢复研究: 进展与展望. *三峡生态环境监测*, 2021, 6(3): 9-21.
- [30] 夏品华, 林陶, 邓河霞, 薛飞, 蒋瑶, 李秋华. 贵州红枫湖水库消落带类型划分及其生态修复试验. *中国水土保持*, 2011(6): 58-60.
- [31] 柯智溢, 王琴, 沈秋月, 谢梦婷, 肖衡林, 刘瑛. 三峡水库忠县至秭归县段消落带植被群落特征研究. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(9): 1975-1985.
- [32] 王丽君, 程瑞梅, 肖文发, 杨邵, 沈雅飞, 郭燕, 雷蕾, 曾立雄. 三峡库区水位消落带植被土壤 pH、阳离子含量随海拔及年际的动态特征. *林业科学研究*, 2021, 34(2): 12-23.
- [33] 沈振锋, 张开金, 夏雪, 胡莲. 基于文献计量法的三峡库区消落带研究现状及热点分析. *水生态学杂志*, 2021, 42(1): 26-34.
- [34] 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.