

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.004

碧流河水库入流消落区生态改善的潜坝技术及效应

许士国¹, 苏广宇¹, 谢楚依^{1,2}, 朱晨莹³

(1. 大连理工大学水利工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 广西壮族自治区梧州水利电力设计院, 广西 梧州 543002;
3. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质环境调查院, 河南 郑州 471023)

摘要:针对碧流河水库入流消落区生态改善需求,提出了利用潜坝提高主河道和滩地潜水水位,进而改善滩地植被条件的治理技术,并通过对比潜坝建设前后滩地植被状态分析了潜坝对植被的影响。结果表明:潜坝建设后,研究区优势物种由中旱生植物向湿生植物转变,2020年6月和7月区域平均植被覆盖度较潜坝建设前的2019年同期分别增长8.23%和20.94%;潜坝对于水库入流消落区落干期滩地植被覆盖度的提高具有良好的促进作用,是水库入流消落区生态改善的有效工程措施。

关键词:入流消落区;生态改善;潜坝;植被;碧流河水库

中图分类号:TV213.4;X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0026-06

Submerged dam technology and its effect of ecological improvement in inflow-water-level-fluctuating zone of Biliuhe Reservoir // XU Shiguo¹, SU Guangyu¹, XIE Chuyi^{1,2}, ZHU Chenying³ (1. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Water Conservancy and Electric Power Design Institute of Wuzhou, Guangxi Zhuang Autonomous Region, Wuzhou 543002, China; 3. No. 1 Institute of Geological Environment Investigation Institute, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Henan Province, Zhengzhou 471023, China)

Abstract: Aiming at the ecological improvement needs of inflow-water-level-fluctuating zone (IWLFZ) of Biliuhe Reservoir, the treatment technology of using submerged dam to raise the phreatic water level of the main river and the beach land and then improve the beach vegetation conditions was proposed. By comparing the vegetation status on the beach land before and after the construction of the submerged dam, the influence of the submerged dam on the vegetation was analyzed. The results showed that after the construction of the submerged dam, the dominant species change from xerophytes to hygrophytes. In June and July 2020, the average vegetation coverage of the study area increased by 8.23% and 20.94% compared with the same period in 2019 before the construction of the submerged dam. The submerged dam can promote the vegetation coverage on beach land of IWLFZ during the dry period, and the submerged dam is an effective engineering measure to the ecological improvement of IWLFZ.

Key words: inflow-water-level-fluctuating zone; ecological improvement; submerged dam; vegetation; Biliuhe Reservoir

水库消落区是由于水库运行调度而使周边被淹没土地周期性露出水面而产生的区域,又称消落带或涨落带^[1]。在水库水位周期性涨落影响下,水库消落区普遍呈现出土地退化、生物多样性减少等生态环境问题^[2-5]。入流消落区(inflow-water-level-fluctuating zone, IWLFZ)指处于水库支流入库段的消落区,它同时具有水库消落区和河道滩地的特征。入流消落区是支流入库前最后的屏障,对于支流携带污染物的拦截至关重要。相比于一般消落区,入

流消落区除了受到水库水位周期性涨落影响外,还受到支流径流冲淤影响,使得入流消落区除了存在以上消落区的共性问题外还呈现出表层土壤沙化、河道下切等更为复杂的生态环境问题,限制了其对支流的净化能力。改善入流消落区的生态环境,提高入流消落区对支流的净化能力,对削减入库污染物,保障水库水质安全具有重要的意义。

近年来,由水库水位消涨引起的消落区生态环境问题及其治理技术已成为热点问题,尤其是有关

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0400903);国家自然科学基金面上项目(51879031)

作者简介:许士国(1958—),男,教授,博士,主要从事环境水利研究。E-mail:sgxu@dlut.edu.cn

三峡水库消落区生态环境的问题,国内学者已开展了大量的研究工作。现有研究多围绕适应消落区自然条件的耐水淹植物的筛选和库区原有植物在水淹胁迫下的生理生态适应性开展^[6-10],范小华等^[11-12]根据消落区特点提出了不同的消落区生态治理思路。但是对于水库入流消落区的复杂生态环境问题及其治理技术却鲜有研究。

本文以碧流河水库八家河入流消落区为研究对象,针对入流消落区面临的生态环境改善需求,开展入流消落区生态改善的潜坝技术研究,分析潜坝对区域植被的影响,以期为类似工程提供参考。

1 研究区概况

碧流河水库是大连市的中心水源地,总库容 9.3 亿 m³。由于来水量不均,碧流河水库水位波动大,消落区面积广,落干期长。碧流河水库正常蓄水位 69.0 m,汛限水位 68.1 m,1985 年至今碧流河水库仅有 16 年最高水位达到或接近正常蓄水位,1985—2017 年年初平均水位仅为 62.91 m,大面积消落区长期处于落干状态。2013—2019 年水库水位连续维持在较低水平,由于各支流入库段地形普遍平坦开阔,低水位条件导致大面积消落区长期落干,碧流河水库三大支流入流消落区落干期面积与水库水位关系如图 1 所示,在 1985—2017 年年初平均水位条件下,3 条支流入流消落区落干期面积合计达 12.11 km²。

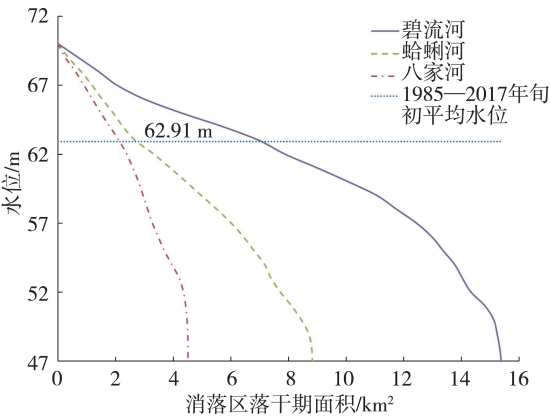


图 1 碧流河水库支流入流消落区落干期面积与水位关系
Fig. 1 Relationship between arid area and water level in IWLFFZ of tributaries of Biliuhe Reservoir

八家河位于碧流河水库右岸,是碧流河水库继碧流河和蛤蜊河之后的第三大支流,河道全长 20.2 km,流域面积 113.7 km²(图 2)。八家河流域内土壤以砂质土壤为主,流域内没有工矿企业等点源污染,流域污染以种植污染、农村生活污水、畜禽养殖等农业非点源污染为主,水质总体能够达到地

表Ⅲ类水质标准,但总氮超标严重。八家河入流消落区与普通河口滩地类似,地形相对平坦,河道在入流消落区变宽。当发生洪水,尤其是在较高水位条件下发生洪水时,洪水裹挟的粒径较大的砂粒由于流速降低沉积在入流消落区,长此以往,使得八家河入流消落区表层基本为粗砂,部分区域粗砂层厚度可达 1 m 以上,种植层土壤持水性差。近年来水库持续低水位运行,径流的持续冲刷使得八家河入流消落区内形成了河岸陡峭的主河道,支流通过主河道直接入库,水流流速快,水力停留时间短,径流在入流消落区内基本得不到净化。河道下切也导致入流消落区地下潜水位降低,主河道与两岸滩地地面高差基本在 1 m 以上,高差由上游至下游逐渐增大,下游最大高差可接近 3 m。而且消落区土壤持水能力差,地表植物很难得到充足的水分补给,地表植被较稀疏并以低矮的一年生草本植物为主,消落区内还有部分土地被村民侵占用于种植玉米等农作物,区域生态环境问题突出。

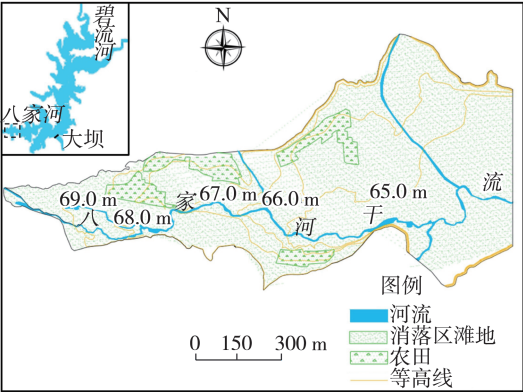


图 2 研究区域概况
Fig. 2 Overview of study area

2 入流消落区生态改善的潜坝技术

在充分考虑洪水影响和河道行洪需求的前提下,本文提出以入流消落区生态改善为目的的潜坝技术,即在入流消落区适当位置设置多级垂直于水流方向的不透水潜坝,用于拦截地表径流和地下水渗流,提高主河道水位,降低主河道流速,提高水力停留时间和入流消落区对入库径流携带的悬浮物及污染物的净化能力,避免径流对河道主槽的持续冲刷,为水生植物的生长提供更适宜的流速条件。在一般植物生长旺盛的春夏季节,入流消落区滩地的地下潜水多受河水补给,提高主河道水位还能够提高滩地的地下潜水位,保证植物的水分供给,从而促进入流消落区滩地植被的恢复和生态条件的改善^[13-14]。其中,潜坝的位置、高程和结构等是影响最终运行效果的关键参数。

2.1 潜坝高程及坝址的确定

选定合理的坝址有利于发挥潜坝对入库径流的降速拦截作用,使潜坝的生态环境效果最大化。坝址的选定应优先考虑支流交汇的下游和断面收窄处,并尽量避开较大支流交汇处等受洪水影响大的位置。潜坝高程范围的选择决定了工程的运行保证率,因此首先根据水库的水位频率分布曲线合理地选择坝顶高程的变化范围,即第一级和最后一级潜坝坝顶高程,区域整体水力坡度一般控制在 0.5% 以内。相关研究表明,随着地下潜水埋深的降低,植被覆盖度逐渐下降,地下潜水埋深 1.0 m 以内时植被覆盖度相对较高,埋深 1.6 m 处为湿生植物和旱生植物的生态交错带^[15]。湿生植物更有利于消落区退水后植被的快速恢复,因此,一般相邻潜坝坝顶高差不宜大于1 m,特殊情况最大不大于 1.6 m。为了降低潜坝对河道行洪影响,一般潜坝不宜高出滩地过多。综合考虑以上因素确定各级潜坝位置及坝顶高程。

2.2 潜坝坝体结构

潜坝的主要作用是拦蓄主河道地表径流和地下水潜水,在保证拦蓄效果的同时降低结构复杂度和成本是结构优化的关键。潜坝主体深埋于地面以下,对稳定性要求低,因此采用竖置土工膜作为阻水防渗的主要措施,上部使用叠砌的格宾网箱起到稳固和保护作用,网箱层数根据露出地面高度不同而相应调整。土工膜上端固定在石笼网箱上,下端折回焊接结构,在折回的空隙内填充碎石。潜坝具体结构如图 3 所示。

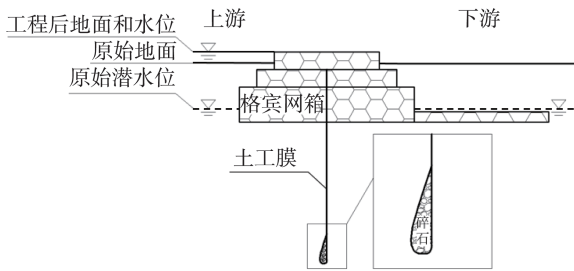
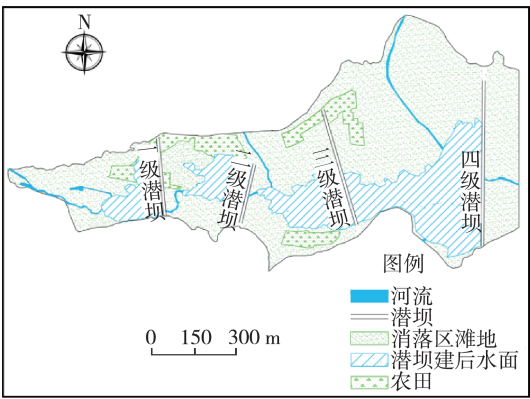


图3 潜坝滩地坝段结构示意图

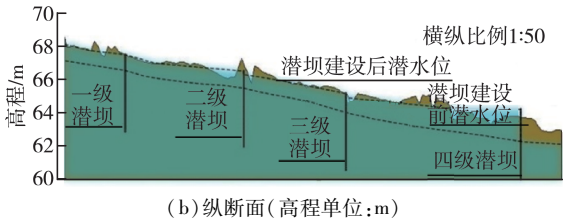
Fig.3 Structural diagram of submerged dam on beach land

2.3 八家河入流消落区潜坝参数

在八家河入流消落区设置 4 级潜坝,具体分布见图 4,坝顶高程分别为 68.1 m、67.0 m、65.5 m 和 64.5 m,相应的运行保证率为 86.12%、75.92%、63.11% 和 56.04%,潜坝截潜深度 5 m。八家河入流消落区湿地设计流量取八家河多年平均径流量 43 561.6 m³/d,水面总面积 540 950 m²,水力负荷 0.08 m³/(m²·d),水力停留时间 4.3 d。



(a) 平面



(b) 纵断面(高程单位:m)

图4 八家河入流消落区潜坝示意图

Fig.4 Structural diagram of submerged dam in IWLFLZ of Bajiahe River

3 潜坝生态效应分析

八家河主河道在八家河入流消落区右侧,右岸滩地面积较小且多被居民抢占为农田,左岸有大面积自然状态下的滩地,因此选取左岸高程 64.5 ~ 68.5 m 间的滩地作为潜坝生态效应分析的研究区。

3.1 研究方法

3.1.1 植被典型样地调查

根据无人机采集的可见光影像,将农田以外的区域按不同植物群落划分为 11 块样地,各样地设置 3 个以上 1 m×1 m 草本样方^[16],分别于 2019 年 12 月、2020 年 6 月和 2020 年 8 月对研究区进行调查。现场分类记录各样方植物类型,统计各植物种类出现频度,确定优势植物种类。

3.1.2 植被覆盖度获取

植被覆盖度反映了植物进行光合作用面积的大小以及植被生长的茂盛程度,能够在一定程度上代表植被的生长状态和生长趋势。研究选取哨兵 2 号高分辨率多光谱成像卫星影像数据,覆盖 13 个光谱段,地面最高分辨率 10 m,单颗卫星重访周期 10 d,两颗卫星互补周期 5 d^[17]。哨兵 2 号影像数据下载于欧洲航天局网站(https://scihub.copernicus.eu/)。八家河入流消落区潜坝于 2019 年 11 月开工建设,2020 年 1 月完工,2020 年 9 月以后研究区绝大部分被水淹没无法统计植被覆盖度,而 2019 年 8 月和 2020 年 8 月因云层遮蔽无法获取有效影像,因此,选取 2019 年和 2020 年植被生长期和较为茂盛

时期能够获取有效影像的月份,即 2019 年 6 月、7 月、9 月以及 2020 年 3—7 月,作为研究时段,选取尽量接近每月中旬的一景有效影像用于分析。通过计算归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)推求植被覆盖度。归一化植被指数^[18]计算公式为

$$I_{NDVI} = \frac{I_{NIR} - I_R}{I_{NIR} + I_R} \tag{1}$$

式中: I_{NDVI} 为 NDVI 值; I_{NIR} 、 I_R 分别为近红外和红光波段的反射率。

通过 I_{NDVI} 可推求植被覆盖度^[19],公式为

$$F_C = \frac{I_{NDVI} - I_{soil}}{I_{veg} - I_{soil}} \tag{2}$$

式中: F_C 为植被覆盖度; I_{soil} 为纯土壤背景像元的 NDVI 值,取各月 NDVI 值分布频率后 5% 的低值; I_{veg} 为纯植被像元的 NDVI 值,取各月 NDVI 值分布频率前 5% 的高值。

首先使用 SNAP 软件提取研究区近红外和红光两个波段反射率数据转存为 TIF 文件,将 TIF 文件导入 ArcGIS10.2,并根据式(1)计算得到各月各像元 NDVI 值。分别统计各月 NDVI 数值的分布频率,取位于前 5% 的高值作为纯植被像元的 NDVI 值(即 I_{veg}),位于后 5% 的低值作为纯土壤背景像元的 NDVI 值(即 I_{soil}),根据式(2)计算各月各像元的植被覆盖度,得到区域植被覆盖度分布,分别计算各月所有像元植被覆盖度的平均值作为各月份平均植被覆盖度值。

3.2 潜坝对植物物种影响分析

对 3 次调查的研究区各植物种类进行频度排序,频度前 5 名排序如表 1 所示。2019 年 12 月,研究区的植物以旱生植物为主,出现频度最高的物种为中旱生一年生草本植物青蒿,出现频度为 0.648,表明青蒿在研究区分布十分广泛。工程实施后的 2020 年 6 月和 2020 年 8 月的优势物种中,青蒿出现频度大幅降低,水蓼和茵草等湿生植物成为新晋优势种。这表明潜坝的建设使得研究区植物获得的水分供给更加充足,区域优势植物种类由中旱生植物向湿生植物转化。

表 1 优势植物频度排序
Table 1 Frequency ranking of dominant plants

2019 年 12 月		2020 年 6 月		2020 年 8 月	
植物种	频度	植物种	频度	植物种	频度
青蒿	0.648	水蓼	0.412	野艾蒿	0.455
野艾蒿	0.310	野艾蒿	0.412	马唐	0.364
香附子	0.310	披碱草	0.353	水蓼	0.273
披碱草	0.241	茵草	0.353	酸膜叶蓼	0.273
马唐	0.172	艾	0.353	戟叶蓼	0.182

3.3 潜坝对植被覆盖度影响分析

研究时段内,2019 年 6 月至 2020 年 6 月水库水位较低,研究区处于落干状态,仅在四级潜坝坝前由于地面高程低于坝顶存在一定面积的覆水区;2020 年 7 月,由于水库水位上涨,四级潜坝上游大部分区域被淹没。2019 年和 2020 年典型月份研究区域植被覆盖度如图 5 所示,区域植被覆盖度总体呈现春夏两季升高,秋冬两季降低的趋势。

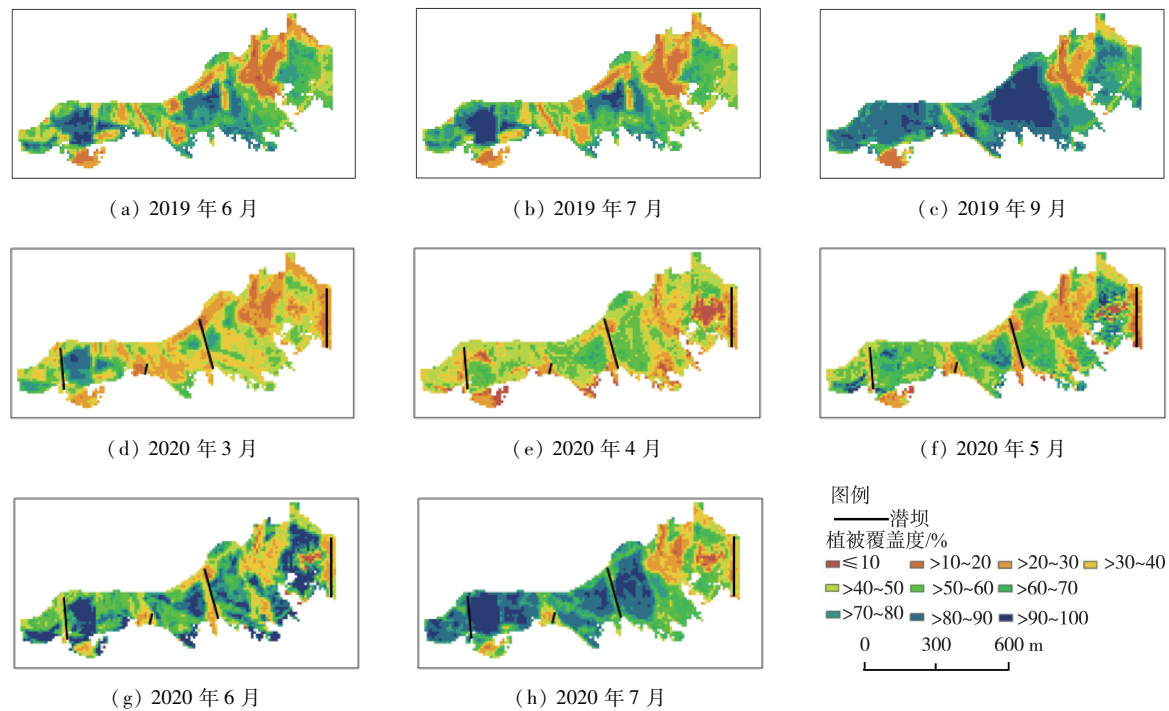


图 5 2019 年和 2020 年典型月份研究区域植被覆盖度分布

Fig.5 Vegetation coverage distribution of study area in typical months in 2019 and 2020

潜坝建设前,中上游植被覆盖度较高,中下游外侧存在植被覆盖度极低区域。对东北草地植被的研究表明,水分是草地植被变化的重要驱动因子^[20-22]。据此进行分析,上游河道与滩地高差较小,植物获得的水分补给更为充足,中上游外侧有一条支流,能够为植物补给水分,而中下游外侧是此前挖沙堆积形成较高的平台,土壤水分条件差,因此,水分补给的充足与否很可能是研究区域植物生长的重要影响因素,设置潜坝改善水分供给有利于促进植物生长,提高植被覆盖度^[23]。

潜坝建设后,在植物的主要生长期(2020年3—7月),一至三级潜坝上下游植被覆盖度随着与潜坝距离的增加呈减小趋势,而在四级潜坝坝前区,除2020年7月大面积被淹没外,其他时段覆水区植被覆盖度较低,覆水区外的陆地区域植被覆盖度也随着与潜坝距离的增加总体呈减小趋势。由此可以推测,潜坝对于促进消落区落干期植被生长具有积极作用,其效果随着与潜坝距离的增加而减弱,但是自然条件下对覆水区植被的改善效果有限,也可能与该区域挺水植物分布少有关,在后续应用中可以考虑人工种植挺水植物提高效果。除四级潜坝上游部分区域在2020年7月被淹没和潜坝坝址处之外,其他区域2020年6月和7月植被覆盖度总体比2019年有所改善。潜坝设置后的2020年6、7月,该区域平均植被覆盖度分别为59.04%和64.75%,相比于设置前的2019年同期平均植被覆盖度分别提高8.23%和20.94%。综上所述可以看出,潜坝通过改善植物水分供给能够有效促进水库入流消落区落干期滩地植被条件的改善。

4 结 论

a. 潜坝改善了八家河入流消落区对植物的水分供给,使得区域优势物种呈现出由中旱生植物向湿生植物演替的趋势。

b. 潜坝建设后,2020年6月和7月八家河入流消落区平均植被覆盖度较2019年同期分别提高了8.23%和20.94%。潜坝技术能够有效改善水库入流消落区落干期滩地的植被条件,缓解入流消落区的生态环境问题。

参考文献:

[1] 刁承泰,黄京鸿. 三峡水库水位涨落带土地资源的初步研究[J]. 长江流域资源与环境,1999,8(1):75-80. (DIAO Chengtai, HUANG Jinghong. A preliminary study on land resources of the water-level-fluctuating zone in the Three-Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment

in The Yangtze Basin,1999,8(1):75-80. (in Chinese))

[2] RIIS T, HAWES I. Effect of wave exposure on vegetation abundance, richness and depth distribution of shallow water plants in a New Zealand lake [J]. Freshwater Biology,2003,48(1):75-87.

[3] 王强,刘红,袁兴中,等. 三峡水库蓄水后澎溪河消落带植物群落格局及多样性[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2009,26(4):48-54. (WANG Qiang, LIU Hong, YUAN Xingzhong, et al. Pattern and biodiversity of plant community in water-level-fluctuation zone of Pengxi River after impoundment of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science),2009,26(4):48-54. (in Chinese))

[4] 常超,谢宗强,熊高明,等. 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,2011,26(7):1236-1244. (CHANG Chao, XIE Zongqiang, XIONG Gaoming, et al. The effect of flooding on soil physical and chemical properties of riparian zone in the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Natural Resources,2011,26(7):1236-1244. (in Chinese))

[5] 潘晓洁,万成炎,张志永,等. 三峡水库消落区的保护与生态修复[J]. 人民长江,2015,46(19):90-96. (PAN Xiaojie, WAN Chengyan, ZHANG Zhiyong, et al. Protection and ecological restoration of water-level-fluctuating zone in Three Gorges Reservoir [J]. Yangtze River,2015,46(19):90-96. (in Chinese))

[6] 罗芳丽,王玲,曾波,等. 三峡库区岸生植物野古草(*Arundinella anomala* Steud.) 光合作用对水淹的响应[J]. 生态学报,2006,26(11):3602-3609. (LUO Fangli, WANG Ling, ZENG Bo, et al. Photosynthetic responses of the riparian plant *Arundinella anomala* Steud. in Three Gorges Reservoir region as affected by simulated flooding [J]. Acta Ecologica Sinica,2006,26(11):3602-3609. (in Chinese))

[7] 王海锋,曾波,乔普,等. 长期水淹条件下香根草(*Vetiveria zizanioides*)、菖蒲(*Acorus calamus*)和空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)的存活及生长响应[J]. 生态学报,2008,28(6):2571-2580. (WANG Haifeng, ZENG Bo, QIAO Pu, et al. Survival and growth response of *Vetiveria zizanioides*, *Acorus calamus* and *Alternanthera philoxeroides* to long-term submergence [J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(6):2571-2580. (in Chinese))

[8] CHEN F Q, XIE Z Q. Survival and growth responses of *Myricaria laxiflora* seedlings to summer flooding [J]. Aquatic Botany,2009,90(4):333-338.

[9] 类淑桐,曾波,徐少君,等. 水淹对三峡库区秋华柳抗性生理的影响[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2009,26(3):30-33. (LEI Shutong, ZENG Bo, XU Shaojun, et al. Effects of submergence on resistance physiology of *Salix virens* franch in Three Gorges

- Reservoir region [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2009, 26 (3): 30-33. (in Chinese))
- [10] TAN S, ZHU M, ZHAN Q. Physiological responses of bermudagrass (*Cynodon dactylon*) to submergence [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2010, 32 (1): 133-140.
- [11] 范小华, 谢德体, 魏朝富. 三峡水库消落区生态环境保护与利用对策研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20 (2): 165-169. (FAN Xiaohua, XIE Deti, WEI Chaofu. Study on countermeasures for ecological environmental protection and utilization of riparian zone of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20 (2): 165-169. (in Chinese))
- [12] 戴方喜, 许文年, 陈芳清. 对三峡水库消落区生态系统与其生态修复的思考 [J]. 中国水土保持, 2006 (12): 6-8. (DAI Fangxi, XU Wennian, CHEN Fangqing. Consideration on ecosystem and ecological restoration of riparian zone of Three Gorges Reservoir [J]. Soil and Water Conservation in China, 2006 (12): 6-8. (in Chinese))
- [13] 廖淑敏, 薛联青, 陈佳澄, 等. 塔里木河生态输水的累积生态响应 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (5): 120-126. (LIAO Shumin, XUE Lianqing, CHEN Jiacheng, et al. Cumulative ecological response of ecological water transmission in Tarim River [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5): 120-126. (in Chinese))
- [14] 王珊珊, 王金陵, 周可法, 等. 塔里木河下游土地利用/覆被变化对生态输水的响应 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (2): 69-74. (WANG Shanshan, WANG Jinlin, ZHOU Kefa, et al. Response of land-use/land cover change to ecological water conveyance in the lower reach of Tarim River [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (2): 69-74. (in Chinese))
- [15] 张俊, 赵振宏, 王冬, 等. 鄂尔多斯高原地下水浅埋区植被与地下水埋深关系 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27 (4): 141-145. (ZHANG Jun, ZHAO Zhenhong, WANG Dong, et al. The quantitative relationship between vegetations and groundwater depth in shallow groundwater area of Ordos Plateau [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27 (4): 141-145. (in Chinese))
- [16] 朱永华, 张生, 孙标, 等. 西辽河流域通辽平原区地下水埋深与植被及土壤特征的关系 [J]. 水土保持通报, 2019, 39 (1): 29-36. (ZHU Yonghua, ZHANG Sheng, SUN Biao, et al. Relationship between groundwater depth and characteristics of vegetation and soil in Tongliao Plain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39 (1): 29-36. (in Chinese))
- [17] 李煜, 李崇贵, 刘思涵, 等. 应用哨兵 2A 多时相遥感影像对树种的识别 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49 (3): 44-47. (LI Yu, LI Chonggui, LIU Sihan, et al. Tree species recognition with Sentinel-2A multitemporal remote sensing image [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49 (3): 44-47. (in Chinese))
- [18] 韩先明, 左德鹏, 李佩君, 等. 雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (1): 16-23. (HAN Xianming, ZUO Depeng, LI Peijun, et al. Spatiotemporal variability of vegetation cover and its response to climate change in Yarlung Zangbo River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (1): 16-23. (in Chinese))
- [19] 吴志勇, 侍恒, 何海, 等. 岔巴沟流域植被变化特征及其对水沙的影响 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (1): 31-37. (WU Zhiyong, SHI Heng, HE Hai, et al. Characteristics of vegetation change and impact on runoff and sediment in Chabagou Watershed [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (1): 31-37. (in Chinese))
- [20] 史娜娜, 全占军, 韩煜, 等. 东北林草交错区植被 NDVI 时空特征及其与气候因子关系分析 [J]. 水土保持研究, 2016, 23 (5): 175-182. (SHI Nana, QUAN Zhanjun, HAN Yu, et al. Spatio-temporal changes of vegetation NDVI and its relationship with regional climate in wood grass ecotone of Northeast China during 2000-2010 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23 (5): 175-182. (in Chinese))
- [21] 丁蕾. 东北草地生产能力模拟与时空变化分析 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [22] 徐光来, 李爱娟, 徐晓华, 等. 中国生态功能保护区归一化植被指数动态及气候因子驱动 [J]. 植物生态学报, 2021, 45 (3): 213-223. (XU Guanglai, LI Aijuan, XU Xiaohua, et al. NDVI dynamics and driving climatic factors in the protected zones for ecological functions in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45 (3): 213-223. (in Chinese))
- [23] 肖祖香, 朱双, 罗显刚, 等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (6): 515-520. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-07-07 编辑: 王芳)