

干旱年澜沧江小湾水库典型消落带 植被制图及其空间分布分析

江维薇, 朱 颂, 肖衡林

(湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 武汉 430068)

摘要: [目的] 调查研究干旱年澜沧江小湾库区消落带植被自然恢复现状, 为消落带植被恢复和维护等相关研究提供本底资料和参考。[方法] 以 2019 年消落带典型区域固定样地调查为依托, 综合运用无人机遥感、GNSS 定位和 GIS 空间分析, 于 2020 年 7 月进行干旱年复位调查, 绘制研究区消落带植被分布图, 定量刻画干旱年研究区消落带植被自然恢复的物种组成、面积、覆盖率、沿地形梯度分布特征, 并与 2019 年非干旱年进行对比分析。[结果] 研究区消落带统计植物共 14 种, 为一年生或多年生草本植物, 其中狗牙根、习见蓼、柳叶菜、藿香蓟为优势物种, 分别占植被总面积的 85.62%, 4.22%, 3.72%, 3.12%。狗牙根在消落带高, 中, 低段比例分别为 50.21%, 9.94%, 39.85%; 柳叶菜有 95.53% 分布于高段; 藿香蓟有 54.48% 分布于中段; 87.22% 的习见蓼分布于中段和低段。绝大多数植物偏好生长于 25° 以下缓坡消落带, 而柳叶菜在坡度 60° 以下均覆盖良好。消落带植被受到地形因子的影响中: 最近邻水体距离 > 高程 > 坡度 > 坡向。旱情导致植被年度退化 59.75%, 集中体现在消落带中下部, 习见蓼大量枯萎退化。[结论] 消落带上半部相对于下半部植被恢复更稳定, 优势物种的稳定性明显优于非优势物种, 其中狗牙根和习见蓼耐淹性较好, 而狗牙根相对于习见蓼表现出了更强的耐旱性和恢复稳定性; 干旱胁迫和淹水胁迫对消落带植被的空间分布有显著影响, 并且, 在干旱年, 前者的影响略大于后者。

关键词: 消落带; 3S 技术; 干旱年; 无人机遥感; 小湾水库; 澜沧江

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)01-0240-10

中图分类号: X87, TV697.4⁺2

文献参数: 江维薇, 朱颂, 肖衡林. 干旱年澜沧江小湾水库典型消落带植被制图及其空间分布分析[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 240-249. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.032; Jiang Weiwei, Zhu Song, Xiao Henglin. Vegetation mapping and analysis of its spatial distribution in typical water level fluctuating zone of Xiaowan Reservoir on Lantsang River in drought year [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 240-249.

Vegetation Mapping and Analysis of Its Spatial Distribution in Typical Water Level Fluctuating Zone of Xiaowan Reservoir on Lantsang River in Drought Year

Jiang Weiwei, Zhu Song, Xiao Henglin

(School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China)

Abstract: [Objective] The natural restoration of vegetation in the water level fluctuating zone (WLFZ) of the Xiaowan Reservoir on Lantsang River during a drought year were investigated to provide background information and a reference for studies related to the restoration and maintenance of vegetation in the area. [Methods] Based on a fixed sample site survey in a typical area of WLFZ in 2019, a drought year reset survey was conducted in July 2020 using a combination of unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing, GNSS positioning, and GIS spatial analysis to map the distribution of vegetation in WLFZ in the study area; quantitatively portray the species composition, area, cover, and distribution characteristics along a topographic gradient of vegetation in WLFZ in the drought year; and conduct a comparative analysis with the non-drought year of 2019. [Results] A total of 14 species of plants were counted, all of which were annual or perennial herbs. *Cynodon dactylon*, *Polygonum plebeium*, *Epilobium hirsutum*, and *Ageratum conyzoides* were the dominant

收稿日期: 2021-06-29

修回日期: 2021-09-10

资助项目: 国家重点研发计划项目“大型水库消落带生态系统演替规律及恢复技术”(2016YFC0502208); 湖北省自然科学基金项目(2020CFB409); 湖北省自然科学基金重点类项目(2020CFA046); 国家自然科学基金项目(42101375, 52078195)

第一作者: 江维薇(1988—), 女(汉族), 湖北省随州市人, 博士, 研究方向为生态遥感。Email: 626834986@qq.com。

通信作者: 肖衡林(1977—), 男(汉族), 湖南省衡阳市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事边坡生态修复、路基稳定、路桥融雪化冰等方面的研究。Email: xiao-henglin@163.com。

species, accounting for 85.62%, 4.22%, 3.72%, and 3.12% of the total vegetation area, respectively. The proportions of *C. dactylon* in WLFZ were 50.21%, 9.94%, and 39.85% in sections H, M, and L (high, medium, and low), respectively; 95.53% of *E. hirsutum* was distributed in section H; 54.48% of *A. conyzoides* was distributed in section M; and 87.22% of *P. plebeium* was distributed in sections M and L. Most plants preferred to grow on gentle slopes below 25° in WLFZ, while *E. hirsutum* covered well on slopes less than 60°. Vegetation in WLFZ was influenced by topographic factors: distance to the nearest neighboring water body > elevation > slope > aspect. Drought resulted in an annual degradation of 59.75% of the vegetation, concentrated in the middle and lower parts of WLFZ, where a large amount of *P. plebeium* withered. [Conclusion] Vegetation recovery was more stable in the upper half of the zone than in the lower half, and the dominant species were significantly more stable than the non-dominant species, with *C. dactylon* and *P. plebeium* being more tolerant of flooding, while *C. dactylon* showed greater drought tolerance and recovery stability than *P. plebeium*. Drought stress and inundation stress had significant effects on the spatial distribution of vegetation in WLFZ. In drought years, drought stress had a slightly greater effect than inundation stress.

Keywords: water level fluctuating zone; 3S technology; drought years; unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing; Xiaowan reservoir; Lantsang River

澜沧江是中国西南地区的大河之一,是世界第七长河,源出青海省玉树藏族自治州杂多县吉富山,主干流总长度 4 909 km,其中国内长 2 139 km。澜沧江地形起伏很大,蕴藏水能丰富,是中国“西电东送”重点开发的梯级水电基地^[1-2]。小湾水库^[3-5]位于澜沧江中游,是两库八级梯级开发中的第二级高坝大库,属于特大型水库。自 2010 年蓄水运行后,小湾水库水位呈现周期性、反季节性涨落,使库岸周边形成落差 60 m 的消落带,库水位变动落差是三峡水库的 2 倍,对消落带地形地貌、植被土壤等的冲击无疑比三峡水库更为剧烈。库岸周边消落带原有生态系统被打破,原有植被大量退化,引发一系列生态环境问题,例如水土流失、泥沙淤积、河岸崩塌甚至山体滑坡等地质灾害,亟待开展小湾水库消落带相关生态环境的研究。

目前,消落带问题已经列为三峡库区防治的重点之一,研究人员围绕三峡水库消落带开展了大量的研究和实践工作^[6-7]。相比之下,由于地处偏远高山峡谷区,地形极其复杂,小湾水库消落带相关的研究较少,直到 2017 年以后,才陆续有相关的研究报道。钟荣华等^[8]基于高分一号和 Google Earth 影像数据统计了小湾库区消落带总体面积及其沿各地州、不同高程和坡度梯度的面积分布。徐雪婷等^[9]分析了小湾库区消落带土壤各形态氮含量及其分布特征,并基于间隙水浓度梯度法和质量衡算法估算了小湾库区沉积物—水界面氮交换通量。Jiang 等^[10]调研了 2019 年澜沧江黄登水库消落带、小湾水库消落带和糯扎渡水库消落带植被物种组成、覆盖率及其分布,为澜沧江梯级水库消落带植被恢复现状提供了第一手资料。植被是消落带生态系统的核心元素^[11-13],肩负着水土

保持、控制沉积、截污过滤等重要作用^[14-18],消落带生态系统的评价、保护和修复等都需要大量的植被数据和信息作为支撑。例如,作为消落带生态修复的关键,适生植物的筛选和配置离不开对消落带本土植物的认识。通常消落带适生物种的筛选主要是通过文献查阅、模拟淹水实验、示范区实地种植、野外实地观测等方式来筛选^[19-22],其中野外实地观测往往是其他几种方式的基础。目前小湾库区消落带植被基础调查资料仍然较匮乏。

小湾水库消落带由于 60 m 的巨大落差,其植被受到水淹深度和强度相较三峡库区消落带植被更甚。同时,由于海拔高出三峡库区 1 000 m 多,日照强度和蒸发量均显著高于三峡库区,尤其是处于干旱河谷段的部分消落带,气候特点进一步加剧了消落带受到的干旱胁迫,三峡库区消落带植被修复的研究成果能否适用于澜沧江小湾库区充满了不确定性,亟需针对小湾库区开展消落带植被相关研究。本文基于 3S 技术,对干旱年小湾库区消落带固定样地植被恢复现状进行了复位调查,绘制了植被分布图,以直观定量地方式展示了干旱年研究区消落带自然恢复的植被物种组成、面积、覆盖率,并与非干旱年进行了对比分析;通过构建研究区地形数据,并与植被分布图进行叠加分析来探究植被沿地形梯度的分布特征以及地形因子对植被空间分布的影响,以期为消落带植被适生物种筛选及其合理空间配置提供一定的参考,也为相关后续研究提供本底资料。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

小湾水电站位于云南省西部南涧县与凤庆县交

界的澜沧江中游河段,是澜沧江中下游水电规划“两库八级”中的第二级,总库容约 $1.50 \times 10^{10} \text{ m}^3$,调节库容近 $1.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$,具多年调节能力,正常蓄水位为海拔 1 240 m,死水位为海拔 1 166 m^[23]。根据小湾水库多年水位调度情况,通常 1—5 月库水位从海拔 1 240 m 逐渐消落到海拔 1 180~1 186 m,6—9 月中旬为了防洪,水位控制在海拔 1 232 m 以下,9 月中旬至 10 月底,水位逐渐上升至海拔 1 232~1 240 m,11—12 月水库完全蓄水,水位稳定在海拔 1 240 m。因此,多年来,库区已经形成落差最大可达 60 m 且与自然洪枯规律相反的季节性消落带。

消落带研究区位于云南省保山市隆阳区水寨乡平坡村的澜沧江西岸,河谷深切,地形狭窄,岸坡陡峭,属于低纬度高海拔亚热带河谷型季风气候区,日照充足,年平均气温 18 ℃,年降水量 900 mm,干湿两季分明,一般 5—10 月为湿季,11 月至次年 4 月为干季,约 85% 以上的降水集中在湿季,而又以 6—8 月为最集中。研究区采样时间为 2020 年 7 月 10 日,处于 1 193 m 低水位枯水期。采样当年,小湾库区水位从 1 月开始逐渐消落,至 7 月采样当月,累计降雨量仅 348 mm,相对历史同期平均降雨量下降 26.6%,日降雨量超过 3 mm 的累计 23 d,相对历史平均值减少 35.9%,消落带植被恢复遭遇严重干旱。

1.2 野外数据采集

采用 DJI 大疆 M600 PRO 六旋翼无人机搭载包含红绿蓝三波段、1 200 万像素的可见光传感器作为遥感数据获取平台,根据研究区地形特点规划航迹,设置航向重叠度为 86%,旁向重叠度为 75%,飞行速度为 2 m/s,航高 28 m,并于研究区均匀布设 10 个像控点,使用科利达 K9 系列 GPS(静态平面精度:±3 mm+1 ppm,静态高程精度:±5 mm+1 ppm),基于 CORS 站测量像控点的经度、纬度及高程(指椭球高,海拔高=椭球高-高程异常,根据 UNAVCO(university navstar consortium facility)数据,研究区高程异常约-39.249 m(下文中高程均指椭球高))。

航飞完成之后,对研究区进行现场调研,记录植物种名、高度并拍摄植物照片;根据岸边水淹痕迹分析消落带边界并拍照记录,为消落带无人机影像采集解译标志。根据消落带现场实测水淹梯度,将研究区划分为低(L段,高程 1 154~1 169 m)、中(M段,高程 1 169~1 184 m)、高(H段,高程 1 184~1 199 m) 3 个区段,在各区段间隔均匀布设 3 个采样点,分别测量每个点 0—10, 10—20, 20—30 cm 土层的温度和含水率,每个点测 3 次取平均值,汇总土壤参数信息如表 1 所示。

表 1 研究区消落带土壤平均温度和含水率

高程/m	土层/cm	温度/℃	含水率/%
1 154~1 169 (L段)	0—10	26.09	14.43
	10—20	26.51	19.52
	20—30	26.52	23.52
1 169~1 184 (M段)	0—10	28.29	13.08
	10—20	28.29	17.73
	20—30	27.93	19.08
1 184~1 199 (H段)	0—10	32.58	16.23
	10—20	32.13	14.19
	20—30	31.38	10.49

注:L, M, H 为根据不同高程划分的消落带。下同。

1.3 消落带植被信息提取

将无人机影像和像控点坐标导入 Pix4Dmapper 软件进行内定向、外定向、空三加密以生成数字地表模型(digital surface model, DSM),基于 DSM 进行影像正射纠正,最终通过影像镶嵌生成全测区数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)。

之后,采用 FNEA 算法^[24]对研究区正射影像进行多尺度分割,从单像素开始,基于光谱和形状同质性特征,迭代循环合并相似对象,直至两个对象的内同质性小于给定阈值,本实验中影像的分割尺度、形状和紧致性参数分别为 15, 0.4, 0.7,对于欠分割对象进行人工编辑拆分。分割完成之后,采用基于专家分类器的分层分类方法,结合目视解译,对分割对象进行消落带植被分类:

第一步,将现场调查获取的消落带上边界解译标志与 DOM、DSM 进行图层映射,根据规则集(1),将影像分为消落带、水体和非消落带。

$$\begin{cases} \text{DSM} > 1\ 115.3 \text{ and } \text{DSM} \leq 1\ 151.7 \\ \text{DSM} \leq 1\ 115.3 \end{cases} \quad (1)$$

第二步,根据公式(2—3)计算归一化绿—红差值指数 NGRDI(normalized green-red difference index)和归一化绿—蓝差值指数 NGBDI(normalized green-blue difference index),式中 R 为红外波段, G 为绿光波段, B 为蓝光波段;基于公式(4)将消落带进一步分为植被与非植被类。

$$\text{NGRDI} = (G - R) / (G + R) \quad (2)$$

$$\text{NGBDI} = (G - B) / (G + B) \quad (3)$$

$$\{\text{NGRDI} < 0 \text{ and } \text{NGBDI} < 0\} \quad (4)$$

第三步,按公式(5—6)计算植被颜色指数 CIVE(color index of vegetation)和可见光波段差异植被指数 VDVI(visible-band difference vegetation index),建立规则集如公式(7)所示,初步提取狗牙根。

$$\text{CIVE} = 0.44R - 0.88G + 0.39B + 18.79 \quad (5)$$

$$VDVI = (2G - R - B) / (2G + R + B) \quad (6)$$

$$\{CIVE > 0 \text{ and } 0 < VDVI < 0.1\} \quad (7)$$

最后,根据现场调查,研究区主要优势物种为狗牙根、柳叶菜、习见蓼和藿香蓟,其他植物类型数量稀少,且零散分布,因此,将现场调查获取的植被优势物种的解译标志与 DOM 进行空间映射,通过目视解译优化提取狗牙根类和其余优势物种类型,而将其他植物种类统一归为其他植被类,最终绘制出研究区消落带植被分布图,并在其基础上统计各植被面积和覆盖率。

1.4 消落带植被分布的空间分析

基于 DSM 和消落带植被分布图,利用 ArcGIS 10.5 进行空间分析,沿水淹梯度分别统计 L, M, H 各高程区段植被及其各子类覆盖面积,并分别提取研究区坡度图、坡向图和最近邻水体距离图,其中最近邻水体距离是基于消落带植被分布图中提取的包括江水、冲水沟和水洼在内的研究区所有水体进行计算获取的最短水平距离。

根据中国水利部颁布的《水土流失危险程度分级标准》(SL718-2015),将水力侵蚀危险程度划分为微度($0^{\circ} \sim 8^{\circ}$),轻度($8^{\circ} \sim 15^{\circ}$),中度($15^{\circ} \sim 25^{\circ}$),重度($25^{\circ} \sim 35^{\circ}$),极度($> 35^{\circ}$)5 个等级。本文在此基础之上增加一个等级划分,将消落带坡度等级划分为 $0^{\circ} \sim 8^{\circ}$, $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$, $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$, $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$, $35^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 和 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 共 6 个等级进行研究。利用提取的消落带坡度图和植被分布图,基于 ArcGIS10.5 空间分析,统计各坡度等级范围内消落带植被及其子类覆盖面积。

以正北方向为 0° ,将研究区坡向分为平坡(-1°),北坡($0^{\circ} \sim 22.5^{\circ}$ 和 $337.5^{\circ} \sim 360^{\circ}$),东北坡($22.5^{\circ} \sim 67.5^{\circ}$),东坡($67.5^{\circ} \sim 112.5^{\circ}$),东南坡($112.5^{\circ} \sim 157.5^{\circ}$),南坡($157.5^{\circ} \sim 202.5^{\circ}$),西南坡($202.5^{\circ} \sim 247.5^{\circ}$),西坡($247.5^{\circ} \sim 292.5^{\circ}$),西北坡($292.5^{\circ} \sim 337.5^{\circ}$),利用 ArcGIS 10.5 对消落带坡度图和植被分布图进行空间分析,统计消落带不同坡向等级范围的植被及其子类覆盖面积。

根据消落带最近邻水体距离范围,并考虑水流和涌浪对消落带的综合影响程度,将研究区最近邻水体距离划分为 $0 \sim 5$, $5 \sim 10$, $10 \sim 15$, $15 \sim 20$, $20 \sim 30$, $30 \sim 40$, $40 \sim 60$, $60 \sim 80$, $80 \sim 100$, $100 \sim 133.01$ m 共 10 个分级,利用提取的消落带最近邻水体距离图和植被分布图,基于 ArcGIS 10.5 空间分析,统计各分级范围内消落带植被及其子类覆盖面积。

1.5 基于 BP 神经网络模型的地形因子影响分析

从研究区消落带植被分布图和对应的 DSM 图、坡度图、坡向图、最近邻水体距离图中采集了 976 973

个植被分布样本数据,每个样本有 4 个变量特征,即高程、坡度、坡向和最近邻水体距离,输出为地形环境适宜性。在 BP 神经网络模型中,输入节点通过隐含层节点作用于输出节点,经过非线性变换,产生输出量。网络迭代训练的过程,是通过不断调整输入节点与隐含层节点的连接权重和模型误差阈值,使误差沿梯度下降,经过迭代学习,得到最小误差下对应的权重和阈值。

如图 1 所示,构造的 BP 神经网络输入层有 5 个神经元,隐藏层有 6 个神经元,输出层有 1 个神经元。其中,激活函数采用 Sigmoid 函数,学习率设为 0.01。将 976 973 个植被分布样本数据中的 50% 作为训练集,30% 作为测试集,剩下的 20% 作为验证集,根据计算出的输入变量的重要性值分析各地形因子对消落带植被恢复的相对影响。

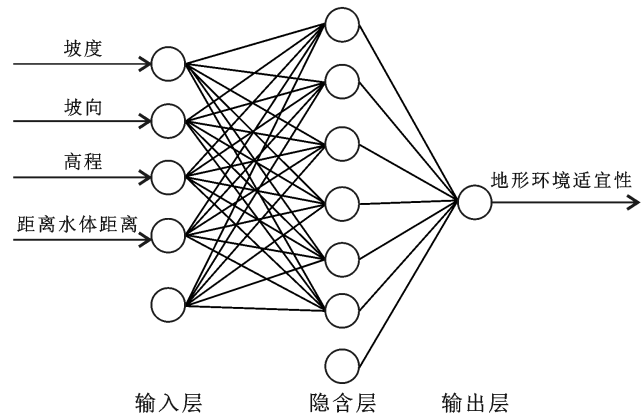


图 1 BP 神经网络结构示意图

2 研究结果

2.1 消落带植被覆盖分类

图 2 展示了研究区正射影像和消落带植被覆盖分布特征,其中各植被面积和比例如表 2 所示。根据 Pix4Dmapper 结果报告,研究区整体面积为 $36\,169.35\text{ m}^2$,其中消落带、水体和非消落带面积分别为 $32\,145.07$, $1\,023.96$, $3\,000.32\text{ m}^2$ 。由表 2 可知,研究区消落带植被覆盖率为 22.23%,其中狗牙根为最大优势物种,面积达 $6\,119.44\text{ m}^2$,占植被总面积的 85.62%,主要生长于消落带上部、下部以及冲刷沟附近;其次习见蓼、柳叶菜、藿香蓟分别占总面积的比例为 4.22%, 3.72%, 3.12%, 集中分布于消落带两条冲刷沟附近,其中柳叶菜分布于冲刷沟上部;剩余 3.31% 的植被为土荆芥、苍耳、小蓬草、蔊菜、牛筋草、艾、天名精、月见草、香附子及钻叶紫菀,每种仅寥寥数棵,统归为其他植被类,主要沿冲刷沟水流分布,其他区域偶尔出现一两株。

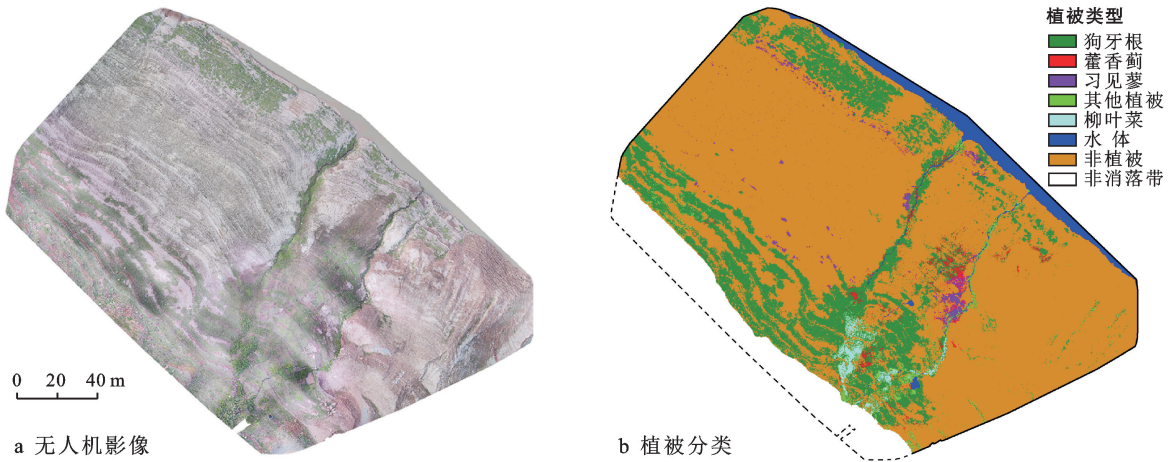


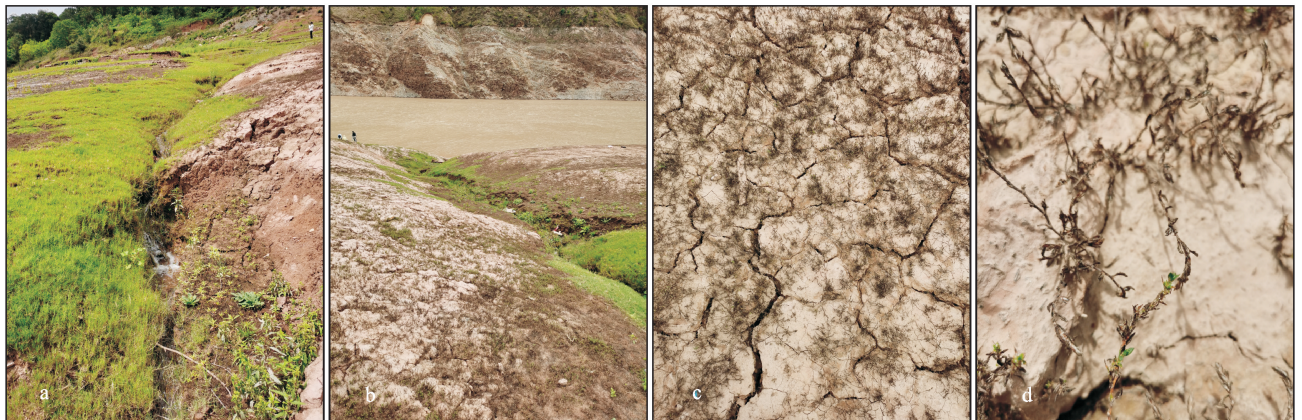
图 2 澜沧江小湾水库典型消落带植被的无人机正射影像(a)及其植被分类(b)

表 2 研究区植被面积及覆盖率

类别	面积/m ²	各植被比例/%	总比例/%
消落带	32 145.07	—	100.00
非植被	24 998.27	—	77.77
狗牙根	6 119.44	85.62	22.23
柳叶菜	265.92	3.72	
其他植被	236.73	3.31	
习见蓼	301.48	4.22	
藿香蓟	223.23	3.12	
植被总计	7 146.8	100.00	

值得注意的是,消落带中部大面积为非植被类。根据现场调查(图 3),中部覆盖大片枯萎凋亡的习见蓼。参考 Jiang 等^[10]的研究,2019 年同期,研究区中部大面积为习见蓼类,为进一步对比分析,将两期数据重叠区域进行变化检测分析,结果如图 4 和表 3 所示。两年重叠区面积为 10 315.05 m²,其中 45.23% 的区域未发生类别变化,54.77% 的区域发生了类别变化,其中消落带下部变化最为显著,主要为习见蓼

大量转化为非植被,实际是 2020 年习见蓼大量枯萎被划分为非植被类,面积达 2 591.27 m²,占重叠区消落带总面积的 25.12%。由图 4b 可见,植被类型之间的相互转化以及植被增长(非植被→植被)主要发生在消落带顶部和下部近水区,植被退化(植被→非植被)主要发生在消落带中下部,而消落带中上部相对稳定,其中 2020 年 7 月 10 日相对于 2019 年 7 月 9 日,植被退化率 59.75%,结合图 4c 可见,消落带中下部植被退化类型主要为:习见蓼→非植被和狗牙根→非植被。然而,虽然狗牙根有 1 208.25 m² 退化成非植被,但由于消落带各部也存在其他覆盖类型转化成狗牙根,尤其是在消落带顶部,狗牙根大量取代原有的习见蓼,因此狗牙根相较于 2019 年,总面积仍然扩增 382.37 m²。而习见蓼同比锐减 97.86%,是植被整体退化的典型代表。从原位未变率(表 3)可见,优势物种的稳定性明显优于非优势物种(其他植被),而狗牙根相对习见蓼更加稳定。



注:a,b 为消落带冲刷沟附近植被;c,d 为消落带枯萎的习见蓼。

图 3 澜沧江小湾水库典型消落带植被的现场

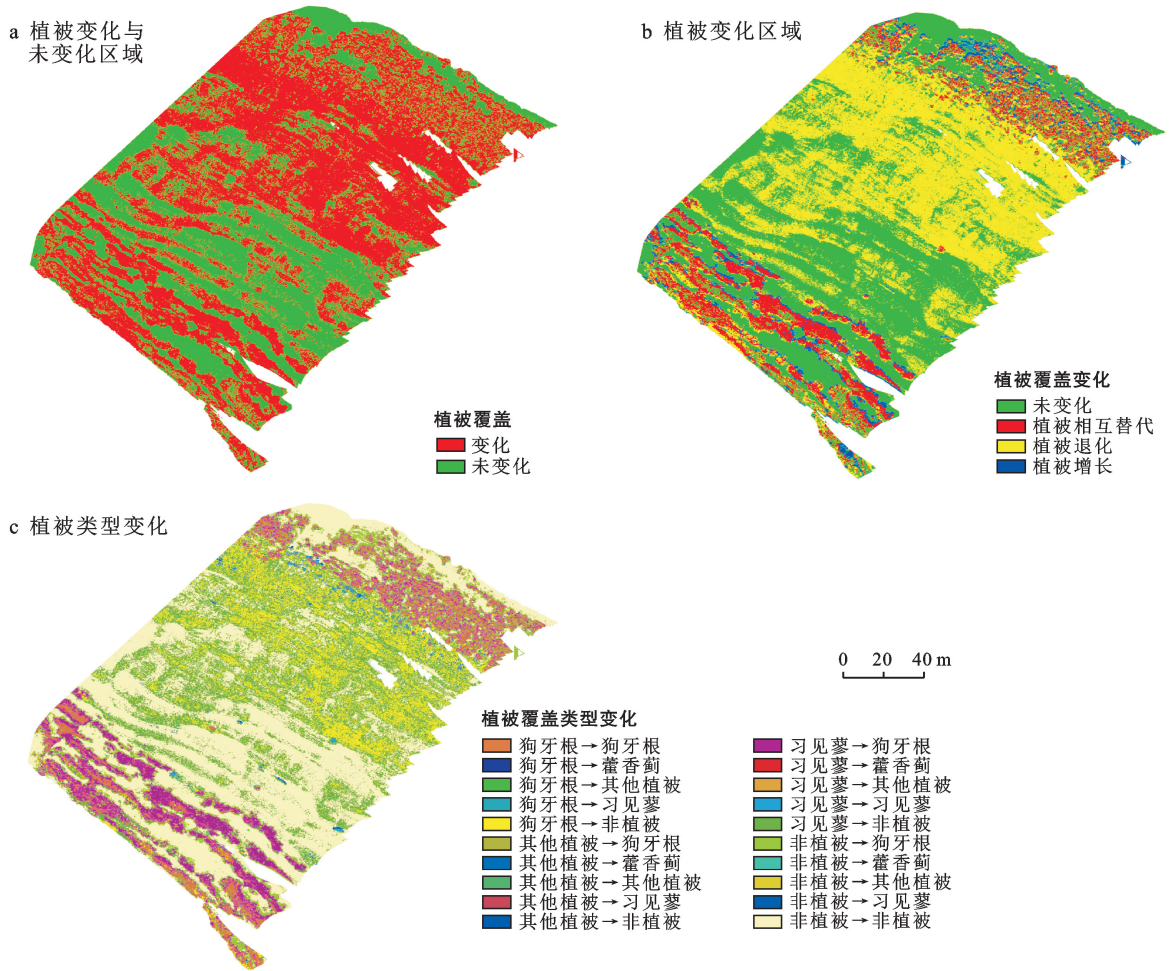


图 4 2019 年 7 月 9 日,2020 年 7 月 10 日重叠采样区植被时空变化特征

表 3 2019 年 7 月 9 日至 2020 年 7 月 10 日重叠采样区植被覆盖变化转移矩阵

m²

项目	2020 年面积					合计
	狗牙根	习见蓼	藿香蓟	其他植被	非植被	
2019 年						
面积	狗牙根	习见蓼	藿香蓟	其他植被	非植被	合计
	狗牙根	24.51	0.36	5.49	1 208.25	1 786.48
	习见蓼	30.10	2.03	26.19	2 591.27	3 624.28
	其他植被	4.77	0.07	0.16	132.60	291.59
	非植被	18.13	2.54	12.20	4 087.55	4 612.70
	合计	77.50	5.01	44.03	8 019.66	10 315.05
变化	382.37	-3 546.78	5.01	-247.56	3 406.96	—
增长率/%	21.40	-97.86	—	-84.90	73.86	—
原位未变率/%	30.67	0.83	—	0.05	88.62	—

2.2 植被分布特征

2.2.1 沿高程分布特征 如表 4 所示,消落带 H 段植被有 3 568.44 m², 占总植被面积的 49.96%; 消落带 M 段植被仅有 937.52 m², 比例为 13.12%; 剩余的 2 640.84 m² 的植被分布于消落带 L 段, 比例为 36.95%。消落带植被覆盖率从下往上呈现先减少后增大的抛物线状变化, 至消落带 H 段达到最大。这种现象比较少见, 与 2019 年调研结果^[10] 也表现出显著差别, 主要原因在于 M 段优势物种习见蓼大量枯死, 因此

在影像处理的时候, 将这一大片区域都划分为非植被区。

各优势物种也表现出明显的高程分布偏好。其中狗牙根有 50.21% 分布于 H 段, 39.85% 分布于消落带 L 段, 而 M 段仅 9.94%; 柳叶菜有 95.53% 集中分布在消落带 H 段; 藿香蓟有 54.48% 分布在消落带 M 段; 其他植被有 59.43% 分布于消落带 H 段; 习见蓼有 40.09% 零散分布于消落带 L 段, 有 47.13% 成片分布于消落带 M 段。消落带不同高程区段反映了不同

的淹水时间和淹水深度, L 段淹水胁迫最为强烈, 因而能够在 L 段生长良好的狗牙根、习见蓼耐淹性相对较好。

表 4 植被沿不同高程梯度的分布面积

高程 梯度	植被面积/m ²				
	狗牙根	习见蓼	其他植被	藿香蓟	柳叶菜
L 段	2 438.74	120.87	42.13	39.09	0.00
M 段	608.03	142.09	53.90	121.62	11.88
H 段	3 072.67	38.52	140.69	62.52	254.04

2.2.2 沿坡度分布特征 根据表 5 可知, 研究区消落带坡度主要集中在 0°~25°范围内, 面积达 26 035.2 m², 占总消落带面积的 80.99%, 而 0°~25°坡度范围内的植被面积只占了总植被面积的 75.14%; 坡度在 25°~35°范围内的面积为 3 770.91 m², 占总消落带面积的 11.73%, 而此坡度范围内的植被面积占总植被面积

的 16.14%; 剩余 2 338.96 m² 的消落带面积为坡度 35°以上的, 占总消落带面积的 7.28%, 而植被面积占到了总植被面积的 8.71%。植被覆盖率随着坡度增大先增大后减小, 在 25°~35°坡度等级达到最大覆盖率 30.60%; 而在 60°~90°坡度等级植被覆盖率最低, 为 15.70%。具体到某一植被种类来看, 狗牙根、习见蓼、藿香蓟以及其他植被种类的面积随坡度增大呈现出明显的先增后减变化, 在 15°~25°坡度范围内, 覆盖面积达到最大, 随后当坡度大于 25°, 覆盖面积呈现大幅减少; 而柳叶菜在 25°~60°坡度范围内, 随着坡度增大, 覆盖面积变化不大, 相对来说, 柳叶菜对坡度的适应范围较广, 在 60°以内的陡坡也能够生长良好; 各种植被在 60°以上陡坡覆盖面积骤减。总的来看, 对于各种植被来说, 25°以内缓坡最为适宜, 而 60°以上陡坡最不适宜, 柳叶菜在 60°以内坡度均能良好生长。

表 5 澜沧江小湾水库典型消落带植被沿不同坡度等级的分布面积和覆盖率

坡度/ (°)	植被面积/m ²					植被面积 总和/m ²	土地面积/m ²	植被覆 盖度/%	占总植被 比例/%
	狗牙根	习见蓼	其他植被	藿香蓟	柳叶菜				
0~8	979.02	30.71	38.33	48.28	38.82	1 135.16	6 305.87	18.00	15.88
8~15	1 604.99	83.77	49.36	61.43	42.08	1 841.64	10 571.01	17.42	25.77
15~25	2 094.95	110.75	62.89	64.63	60.42	2 393.63	9 158.32	26.14	33.49
25~35	973.57	53.47	42.25	31.01	53.45	1 153.75	3 770.91	30.60	16.14
35~60	434.16	22.05	39.40	17.06	65.61	578.28	2 056.53	28.12	8.09
60~90	32.74	0.74	4.50	0.82	5.54	44.34	282.44	15.70	0.62

2.2.3 沿坡向分布特征 根据表 6 研究区消落带不同坡向上植被面积分布表可以得出, 除了平面植被覆盖率明显较低之外, 其余坡向植被覆盖率相差并不是特别大, 植被覆盖率均超过了 20%。西坡、西南坡、南坡、东南坡覆盖率相对最高, 依次分别为 32.40%, 31.10%, 30.49%, 26.72%; 其次是西北坡、北坡、东北坡和东坡, 依次分别为 26.34%, 22.18%, 21.91%, 20.31%; 平面上的植被覆盖率最低, 仅 9.33%。总体上看, 阳坡的植被覆盖率要大于阴坡的植被覆盖率。

表 6 澜沧江小湾水库典型消落带植被沿不同坡向的分布面积和覆盖率

坡向	植被面积/m ²	土地面积/m ²	植被覆盖率/%
平面	19.54	209.35	9.33
北	1 272.58	5 738.41	22.18
东北	4 068.88	18 566.85	21.91
东	929.89	4 577.54	20.31
东南	248.50	930.01	26.72
南	90.98	298.35	30.49
西南	90.78	291.85	31.10
西	117.04	361.17	32.40
西北	308.62	1 171.55	26.34

2.2.4 沿最近邻水体距离分布特征 水分对于植被生长具有不可忽视的作用, 消落带植被以草本植物为主, 生长周期短, 根系远不如灌木、乔木等发达, 根系大多短浅, 因而其生长受到表层土壤含水量影响极大。最近邻水体距离是指距离包括江水、冲水沟、水洼等在内的研究区所有水体的最短水平距离, 在一定程度上体现了消落带生境所承受的干旱胁迫。

根据栅格数据汇总统计各级最近邻水体距离的植被分布情况(表 7), 经过简单计算可以得出有 24.55%, 16.79%, 14.91%, 11.54% 的植被分别分布于最近邻水体距离 0~5, 5~10, 10~15, 15~20 m 的区段上; 有 67.79% 的植被较为集中的分布在最近邻水体距离较近的 0—20 m 区域内, 而剩余的 32.21% 的植被较为均匀零散分布在距离水体 20~133.01 m 的区域内。总体上看, 植被数量和物种丰富度与距水体距离呈负相关, 离水体距离越远, 植被数量越少, 物种越趋于单一。习见蓼、藿香蓟、柳叶菜以及消落带实地调研发现的一些其他植被, 绝大多数都喜欢生长在田边、溪边等潮湿的环境下, 根据分类结果也可以

看到,这些喜欢潮湿的植物也基本分布于距离水体较近的地方;而距离水体 30~133.01 m 的较远区域,基本只有狗牙根分布,其他植被则很少生长在此区域。距离水体越远,相对来说受旱情影响越大,因此,狗牙根相对来说耐旱性较好。

表 7 植被沿各级最近邻水体距离分布面积

最近邻水体 距离/m	植被面积/m ²				
	狗牙根	习见蓼	其他植被	藿香蓟	柳叶菜
0~5	1 323.36	128.01	128.83	112.00	62.37
5~10	1 052.48	35.07	32.78	54.78	24.71
10~15	950.82	8.02	12.72	32.42	61.65
15~20	700.27	15.48	5.13	15.58	88.41
20~30	359.05	66.86	13.33	4.24	28.79
30~40	202.95	8.34	3.61	0.00	0.00
40~60	463.55	20.69	3.88	0.37	0.00
60~80	461.93	12.56	1.16	0.54	0.00
80~100	330.61	6.45	16.91	2.84	0.00
100~133.01	274.41	0.00	18.38	0.45	0.00

2.3 植被空间分布的影响因素

由于消落带特殊的成因,淹水是影响消落带植被恢复的主要因素之一,通常消落带生境所承受的淹水胁迫与水位高程成反比,无论是淹水深度还是淹水时间,均为:消落带下部>消落带中部>消落带上部。根据消落带植被沿高程分布特征,消落带上部的主要优势物种为狗牙根、柳叶菜;消落带中部的优势物种为藿香蓟和习见蓼;消落带下部的优势物种为狗牙根和习见蓼。消落带植被由于耐淹性差异以及种间竞争等因素的共同作用,表现出明显的带状分布,消落带下部优势物种狗牙根和习见蓼相对较耐淹,可以考虑作为消落带下部修复的先锋物种。

值得注意的是,通常消落带下部由于淹水强度最甚而植被覆盖率最小^[25-28]。但是本文调研结果显示,干旱年研究区植被沿高程梯度分布呈现出反常现象,消落带中部植被覆盖率显著低于消落带下部和上部。对比研究区前一年植被分布情况可见,主要原因在于消落带中部优势物种类型单一,习见蓼占绝对优势,而今年习见蓼大量枯萎发黑,导致中部植被覆盖率骤降。

由于库水位每年 1 月开始逐渐下降,因而消落带从 1 月开始逐渐出露,通常至 5 月底完全出露,消落带植被逐渐复苏萌发。根据中国气象数据网^[29]资料统计显示,自 1 月消落带开始出露至 7 月采样当月,

2020 年月平均气温与历史同期比较接近,但是整体降雨情况显著低于历史平均水平。由图 5 可知,截至采样当月,消落带植被生长期累计降雨量相比多年同期平均值下降 26.6%,日降雨量超过 3 mm 仅 23 d,相对历史平均值减少 35.9%。尤其是自 5 月底消落带完全出露,6 月正是植被全面恢复的时期,2020 年 6 月月累计降雨量相比 2019 年同期下降 54.7%,相比历史多年平均值下降 64.0%,日累计降雨量超过 3 mm 的仅 2 d,旱情导致占据消落带优势区域的第一大优势种习见蓼大面积枯死,使得消落带中部覆盖率呈现最低的反常现象。这反映了消落带生态系统极度脆弱,消落带植被容易受到气候等外界因素干扰。另一方面,消落带上部和下部优势物种狗牙根在旱情影响下覆盖率并未受到显著影响,狗牙根面积反增 382.37 m²,并且由各植被沿最近邻水体距离分布特征可见,当距离水体大于 30 m,几乎仅狗牙根覆盖良好,相对于习见蓼,狗牙根表现出了较强的耐旱性和恢复稳定性。

根据植被沿坡度分布特征显示,在坡度 25°以下,各种植被均能生长良好,而当坡度大于 25°,植被覆盖面积大幅降低,柳叶菜除外。对于 25°~60°的陡坡消落带,柳叶菜依然能够覆盖良好,可以考虑作为 60°以内陡坡消落带的先锋物种。当消落带坡度大于 60°时,几乎仅剩少数狗牙根和极少数柳叶菜存活,60°以上陡坡极其不适宜消落带植被生长。坡度影响着地表径流^[30-32],相对而言,陡坡土壤侵蚀更为严重,保土保水较差,植物赖以生存的条件较恶劣,因此研究区消落带绝大多数植物偏好生长于 25°以下缓坡消落带。

坡向的变化决定了光照强度的大小,从而影响植被生长发育过程中对光照的需求。总体上看,研究区消落带阳坡的植被覆盖率要大于阴坡的植被覆盖率。通常阳坡光照强度大于阴坡,光热条件更适合植物的生长。

基于 BP 神经网络模型的地形因子综合分析结果如图 6 所示。最近邻水体距离和高程因子的相对重要性值显著大于坡度和坡向,这表明最近邻水体距离和高程因子相对于坡度和坡向因子对植被空间分布的影响更大,而二者在一定程度上分别体现了消落带植被所承受的干旱胁迫和淹水胁迫,这意味着,干旱胁迫和淹水胁迫对消落带植被的空间分布格局有显著影响。并且在干旱年,前者的影响略大于后者(由图 6 可知)。

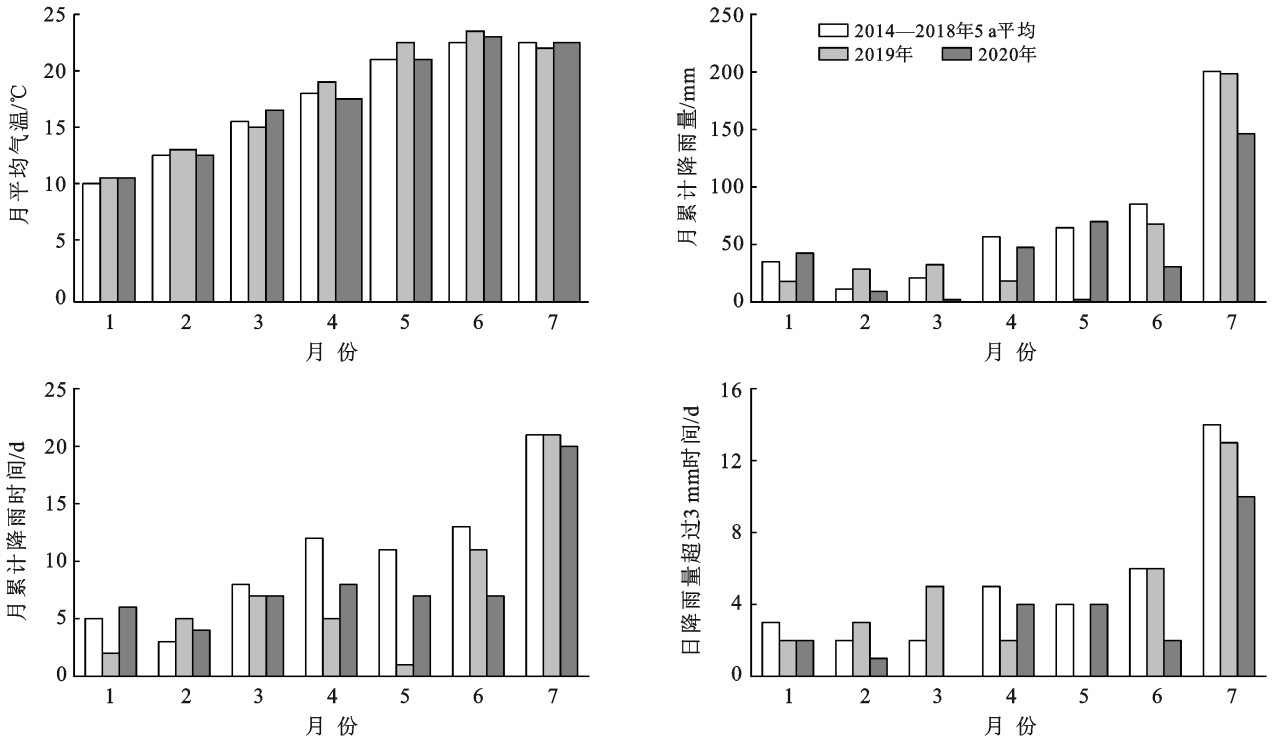


图 5 澜沧江小湾水库消落带植被生长期(截至采样当月)多年气象数据

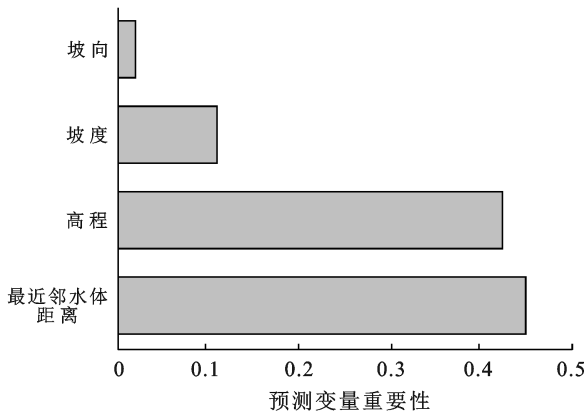


图 6 澜沧江小湾水库地形因子重要性值

3 讨论与结论

小湾水库是中国西南边陲澜沧江流域的特大型高坝深库,水位落差达 60 m,自 2010 年高位蓄水运行之后,消落带原有植被被淹大量退化。在周期性的淹水—落干循环交替中,小湾水库消落带经过了近 10 a 的自我调节和适应,目前急需开展相关研究,为了解小湾水库消落带植被现状、科学维护和修复消落带植被提供基础信息和参考。本文利用无人机遥感结合实地调研,对干旱年研究区消落带植被恢复现状进行了调查,绘制了研究区消落带植被覆盖专题图、获取了消落带植被物种组成、覆盖率、优势物种类型、沿地形因子分布特征,并在此基础上深入分析了消落

带植被分布的影响因素等。

(1) 研究区消落带多为一年生或多年生草本植物,包括狗牙根、习见蓼、柳叶菜、藿香蓟、土荆芥、苍耳、小蓬草、蔊菜、牛筋草、艾、天名精、月见草、香附子及钻叶紫菀等,其中狗牙根为最大优势物种,占植被总面积的 85.62%,其次优势物种习见蓼、柳叶菜、藿香蓟分别占比 4.22%,3.72%,3.12%,而其他植被每种仅寥寥数棵。

(2) 消落带绝大多数植物偏好生长于 25°以下缓坡消落带,除柳叶菜在坡度 60°以下均覆盖良好,而坡度 60°以上消落带,植被存活较少。

(3) 各优势物种沿高程梯度表现出明显的带状分布特征。狗牙根集中分布于消落带上部和下部,中部最少;过半藿香蓟生长于消落带中部;习见蓼以中下部居多。消落带下部优势物种主要为狗牙根和习见蓼,反映了二者具有较强的耐淹性。

(4) 消落带植被受到地形因子的影响中:最近邻水体距离>高程>坡度>坡向,前两者在一定程度上分别体现了消落带植被所承受的干旱胁迫和淹水胁迫强度,这意味着,干旱胁迫和淹水胁迫对消落带植被的空间分布格局有显著影响,并且,在干旱年,前者的影响略大于后者。

(5) 受旱情影响,2020 年 7 月 10 日相对于 2019 年 7 月 9 日,研究区消落带植被退化率达 59.75%,植被退化主要发生在消落带中下部,而消落带中上部相

对较稳定,退化类型主要为习见蓼大量枯萎转化为非植被,植被类型之间的相互转化以及植被增长(非植被→植被)主要发生在消落带顶部和下部近水区,优势物种的稳定性明显优于非优势物种,而狗牙根相对习见蓼更加稳定,抗旱性更优。

[参 考 文 献]

- [1] 梁斯琦,陆颖,杨福平,等.澜沧江小湾水电站坝前水温垂向分布特征[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):156-162.
- [2] 王仁坤.我国特高拱坝的建设成就与技术发展综述[J].水利水电科技进展,2015,35(5):13-19.
- [3] 谢洪林,喻建清.小湾水电站分期蓄水实践与拱坝工作性态跟踪评价[J].云南水力发电,2020,36(2):171-175.
- [4] 聂兵兵,张鹏,廖贵能.小湾水电站下游河道冲淤及尾水水位流量关系研究[J].云南水力发电,2019,35(1):33-37.
- [5] 陈维东,尹云坤,朱庭兴.小湾水电站水库库岸管理探讨[J].水力发电,2015,41(10):12-14.
- [6] 郭燕,杨邵,沈雅飞,等.三峡库区消落带现存草本植物组成与生态位[J].应用生态学报,2018,29(11):3559-3568.
- [7] 孔维菁,袁兴中,卢虹宇,等.三峡库区溪溪河消落带典型草本植物养分及生态化学计量特征[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2020,37(5):73-82.
- [8] 钟荣华,成旭鹏,黄江成,等.小湾水库消落带空间分布特征[J].云南大学学报(自然科学版),2017,39(6):1104-1110.
- [9] 徐雪婷.小湾库区消落带氮形态分布特征及其交换通量研究[D].陕西西安:西安理工大学,2020.
- [10] Jiang Weiwei, Liu Lun, Xiao Henglin, et al. Composition and distribution of vegetation in the water level fluctuating zone of the Lantsang cascade reservoir system using UAV multispectral imagery [J]. PLoS One, 2021,16(3):e0247682.
- [11] 胡波,张平仓,任红玉,等.三峡库区消落带植被生态学特征分析[J].长江科学院院报,2010,27(11):81-85.
- [12] 由永飞,杨春华,雷波,等.水位调节对三峡水库消落带植被群落特征的影响[J].应用与环境生物学报,2017,23(6):1103-1109.
- [13] 孔维静,夏会娟,张远,等.辽河保护区及其支流河岸草本植物群落数量分析[J].应用与环境生物学报,2015,21(5):904-911.
- [14] 苏维词.三峡库区消落带的生态环境问题及其调控[J].长江科学院院报,2004,21(2):32-34,41.
- [15] 任雪梅,杨达源,徐永辉,等.三峡库区消落带的植被生态工程[J].水土保持通报,2006,26(1):42-43,49.
- [16] 钟荣华,贺秀斌,鲍玉海,等.狗牙根和牛鞭草的消浪减蚀作用[J].农业工程学报,2015,31(2):133-140.
- [17] 周紫璇,陆颖,钟荣华,等.大坝运行对水库消落带土壤环境影响研究进展[J].水文,2019,39(1):15-19.
- [18] 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.
- [19] 李彦杰,杨俊年,刘仁华,等.水淹胁迫下三峡库区消落带适生狗牙根转录因子的转录组分析[J].西南农业学报,2018,31(2):265-269.
- [20] 卢刚,徐高福,刘乐群,等.中国水库消落带植被恢复研究进展[J].浙江林业科技,2016,36(1):72-80.
- [21] 张爱英,熊高明,樊大勇,等.三峡水库蓄水对长江干流河岸植物组成的影响[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):145-153.
- [22] 樊大勇,熊高明,张爱英,等.三峡库区水位调度对消落带生态修复中物种筛选实践的影响[J].植物生态学报,2015,39(4):416-432.
- [23] 中国大坝工程学会.云南澜沧江小湾水电站[J].城乡建设,2019(17):76-77.
- [24] Baatz M, Schape A, Multiresolution segmentation: An optimization approach for high quality multi-scale image segmentation [C] // Beiträge zum AGIT-Symposium. 2000.
- [25] 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.
- [26] 王建超,朱波,汪涛.三峡库区典型消落带淹水后草本植被的自然恢复特征[J].长江流域资源与环境,2011,20(5):603-610.
- [27] 郭燕,杨邵,沈雅飞,等.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[J].生态学报,2019,39(12):4255-4265.
- [28] 雷波,王业春,由永飞,等.三峡水库不同间距高程消落带草本植物群落物种多样性与结构特征[J].湖泊科学,2014,26(4):600-606.
- [29] 国家气象信息中心.中国气象数据网(2012-08-04)[2021-06-29] http://data.cma.cn/data/cdcdetail/data-Code/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html.
- [30] 王宗明,宋开山,刘殿伟,等.地形因子对三江平原土地利用/覆被变化的影响研究[J].水土保持通报,2008,28(6):10-15,2.
- [31] 蔡宏,何政伟,安艳玲,等.基于RS和GIS的赤水河流域植被覆盖度与各地形因子的相关强度研究[J].地球与环境,2014,42(4):518-524.
- [32] 程圣东,李占斌,鲁克新,等.文安驿流域植被覆盖度时空分异及其与地貌因子关系研究[J].西安理工大学学报,2011,27(2):145-150.