

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.040

饶洁,唐强,冯韞,等.三峡水库消落带生境特征与植被恢复模式[J].水土保持学报,2024,38(1):310-318.

RAO Jie, TANG Qiang, FENG Yun, et al. Habitat condition and vegetation restoration patterns in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 310-318.

三峡水库消落带生境特征与植被恢复模式

饶洁¹, 唐强¹, 冯韞¹, 韦杰², 贺秀斌³

(1.西南大学地理科学学院,重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站,重庆 400715;

2.重庆师范大学地理与旅游学院,重庆市三峡库区地表生态过程野外科学观测研究站,重庆 401331;

3.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室,成都 610299)

摘要: [目的] 三峡水库蓄水运行后消落带生境破碎斑块化加剧,极端生境胁迫严重损害植被的结构和功能。厘清三峡水库消落带生境状况,提出适宜性植被恢复对策,重建河流受损廊道综合生态功能,对构建区域生态安全格局和保障长江流域水资源安全具有重要意义。[方法] 针对三峡水库消落带植被退化与生态功能受损的突出问题,系统解析了消落带生境特征及其对植被生长的影响,围绕水库河岸受损廊道生态修复重大需求,探讨面向消落带微生境构建与植被格局功能优化的三峡水库消落带植被恢复模式。[结果] 三峡水库消落带生境状况受水库运行形成的独特水位节律、出露期植被生长季气候条件、土壤侵蚀与泥沙沉积过程、土壤环境等多生境因子协同影响,呈现高度空间异质性特征。水位变动形成的淹没时长、出露时令、淹水强度是影响植株繁衍、生长的首要因素;土壤侵蚀、泥沙掩埋、土壤养分条件等影响植被生长状况。[结论] 三峡水库消落带植被恢复需综合考虑水位节律、立地条件与物种形态一功能性状,选育优质抗逆物种,注重土壤基质保育,突出植被格局的分区优化配置。重建消落带综合生态功能,为水库消落带生态治理提供理论支撑和科学依据。

关键词: 生境胁迫; 极端淹水; 土壤侵蚀; 植被恢复; 消落带

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0310-09

Habitat Condition and Vegetation Restoration Patterns in the Water Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir

RAO Jie¹, TANG Qiang¹, FENG Yun¹, WEI Jie², HE Xiubin³

(1. Chongqing Jinpo Mountain Karst Ecosystem National Observation and Research Station, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Observation and Research Station of Earth Surface Ecological Processes in the Three Gorges Reservoir Area, School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 3. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China)

Abstract: [Objective] The Three Gorges Reservoir's impoundment has speed up habitat fragmentation and patching in the water level fluctuation zone, and extreme habitat stress has seriously damaged the structure and function of vegetation. Clarifying the habitat status of the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, proposing an adaptive vegetation restoration strategy, and reconstructing the comprehensive ecological function of damaged river corridor are of utmost importance for building regional ecological security pattern and ensuring water resources security of the Yangtze River Basin. [Methods] In response to the prominent issues of vegetation degradation and ecological function damage, we systematically analyzed multiple habitat conditions and their influence on riparian vegetation growth. Focusing on the basic requirements for ecological restoration of damaged river corridor along reservoir banks, a vegetation

收稿日期: 2023-09-30

修回日期: 2023-10-24

录用日期: 2023-10-28

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-12-14

资助项目: 重庆市杰出青年科学基金项目 (cstc2021jcyj-jqX0026); 西南大学先导计划青年团队项目 (SWU-XDJH202306); 国家自然科学基金项目 (U2040207); 中央高校基本科研业务费项目 (SWU020013)

第一作者: 饶洁 (1998—), 女, 硕士, 主要从事水库消落带植被监测与生态修复研究。E-mail: rj2020@email.swu.edu.cn

通信作者: 唐强 (1985—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与生态修复研究。E-mail: qiangtang@swu.edu.cn

restoration pattern for construction of suitable microhabitats and optimization of vegetation functional pattern was explored. [Results] The habitat conditions of the water level fluctuation zone were jointly regulated by unique water level rhythm formed by reservoir, operation, climate condition during the exposed, soil erosion and sedimentation and soil environment, which presented a distinctive spatial heterogeneity pattern. Among these, inundation duration, emergence time, and inundation intensity by seasonal water fluctuation were the primary factors affecting plant reproduction and development, while soil erosion, sedimentation burial and soil substrates affected vegetation growth. [Conclusion] Accordingly, water level, site conditions and morphological-functional trait characteristics of various vegetation should be comprehensively considered when planning vegetation restoration in the water level fluctuation zone. Meanwhile, the high-quality stress-resistant species selection, site preparation measures for soil condition improvement, and the zonal optimization of vegetation patterns were beneficial for rebuilding the comprehensive ecological function of the water level fluctuation zone. This provided theoretical support and scientific basis for the ecological management of the water level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir.

Keywords: habitat stress; extreme flooding; soil erosion; vegetation restoration; water level fluctuation zone

Received: 2023-09-30

Revised: 2023-10-24

Accepted: 2023-10-28

Online(www.cnki.net): 2023-12-14

三峡工程是全球装机容量最大的水利枢纽工程, 兼顾发电、防洪、改善航运等综合社会效益。然而, 水库阻隔河流水文连通性, 改变河流自然水文态势, 对水库毗邻陆域生态系统产生深远复杂的影响^[1]。水库消落带是水库运行在建库河段形成的周期性淹没和出露的水陆交错地貌景观单元, 是河流与陆域生态系统进行物质、能量迁移转化的关键带, 受河流和坡面水文过程的复合作用, 存在明显的环境、生态过程和群落分布梯度^[2-3]。植被是消落带生态系统重要的结构和功能组分, 承担河岸缓冲带和河流生态走廊的重要角色, 提供固土护岸、拦沙截污、调节径流、维持生物多样性等诸多关键生态功能。

三峡水库蓄水运行导致消落带经历周期性的淹没一出露交替过程。长时间、高强度的极端淹水使原有陆生系统转变为水陆交错带, 导致土壤环境劣化和植被退化恶性循环, 生境破碎化加剧, 严重损害消落带生态系统结构和功能, 进而威胁水库水环境安全和水生态健康以及三峡工程的可持续运行^[4]。极端水淹胁迫导致消落带原有陆生植被快速消亡, 适生物种发生逆向演替并出现形态和功能性状适应性变化, 单一优势物种重要性凸显, 造成植被多样性锐减, 群落组成、结构及分布格局呈现趋同趋势^[5-6]。水库水位周期性涨落、降雨径流冲刷和波浪掏蚀共同调控水土环境, 诱发土壤侵蚀、泥沙淤积、土壤贫瘠化等生境问题, 土壤理化学特性加速劣化, 导致消落带土壤结构和地理景观格局发生重构, 植被演替过程受多重生境限制^[7-8]。

大型水库消落带植被退化与生态功能受损是当

前我国西南地区河流梯级水电开发面临的突出问题, 开展河流受损廊道生态修复, 提升水库消落带综合生态功能对保障流域水资源安全、服务国家生态文明建设意义重大^[9]。植被恢复是维持水库消落带生态系统稳定, 重建生态系统结构和功能的重要途径。然而, 对水库消落带高度异质的生境特征尚缺乏系统梳理, 多种生境要素对植被生长和生态系统演替的影响仍不明晰。因此, 本文以三峡水库消落带为对象, 在系统分析水位节律、土壤侵蚀、泥沙沉积和土壤环境等要素综合形成的消落带生境特征基础上, 探讨了面向消落带适宜微生境构建与植被结构功能优化的植被重建与生态恢复对策, 以期消落带生态恢复提供重要的理论支撑, 并为三峡水库乃至西南地区梯级水库消落带生态治理提供借鉴。

1 三峡水库消落带概况

三峡水库蓄水运行在湖北宜昌至库尾重庆江津段形成了垂直落差达 30 m、长 661 km、总面积 349 km² 的水库消落带(图 1)。

三峡库区属于亚热带湿润季风气候类型, 年均气温 16~18℃, 年平均降水量 1 172 mm。奉节以东为岩溶地质, 地形以高山峡谷为主, 消落带出露岩性为裸岩、石灰岩和白云质灰岩等碳酸盐岩; 奉节以西为川东平行岭谷低山丘陵区, 以冲击平坝、阶地和河滩为主, 消落带主要由侏罗系沙溪庙组紫色砂、泥岩及第四系冲积土覆盖^[10]。三峡水库消落带在高程、坡度上的分布存在差异。总体上, 消落带在 170~175 m 内面积较大, 占消落带总面积的 20.92%; 在 145~150 m 高程处面积最小, 占比为 12.07%。消落带分

布面积随坡度增加而减少,缓坡($\leq 25^\circ$)区域面积占总面积的 79.49%以上,陡坡面积相对较小^[11]。消落带土壤类型多样,平缓开阔的河流阶地、向斜低丘谷地和台盆地消落带出露地层以易风化的紫色砂泥岩和第三系灰岩为主,并覆盖第四系冲积物,主要土壤类型为冲积土、紫色土与水稻土;而以峡谷陡岩地貌为主的消落带广布石灰岩、泥沙岩和砂岩,主要土壤类型为石灰岩土。其中紫色土分布最广,但其母岩松脆,土层浅薄,结构水稳性差,具有抗蚀性能低下,遇水易分解的特点^[12]。

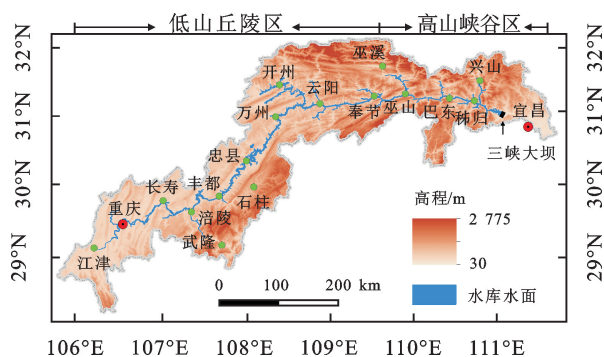


图 1 三峡水库地理位置

Fig. 1 Geographical location of Three Gorges Reservoir

2 三峡水库消落带生境特征

伴随长江上游梯级电站建设导致的水文情势变化,三峡水库消落带植被时空分异格局受水位涨落节律、气候条件、土壤侵蚀与泥沙沉积过程、土壤基质环境等非生物环境要素共同调控,具有层次性影响效应(图 2)。其中,水库水位季节性波动决定植被形态和功能性状,成为驱动植被生长动态的首要胁迫因子;而气候条件、土壤侵蚀、泥沙沉积过程及土壤基质环境发挥次要胁迫作用,造成植被生长局部变化。

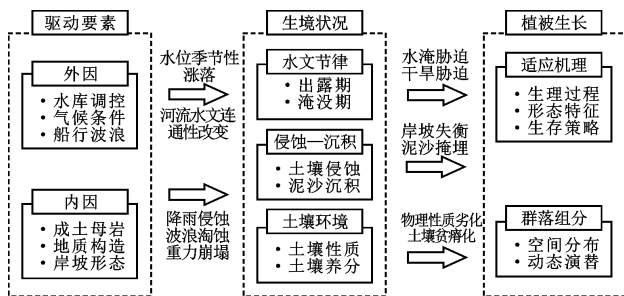


图 2 消落带环境调控—生境状况—生态响应关系解析

Fig. 2 Analysis of the relationship between environmental regulation, habitat condition and ecological response in the water level fluctuation zone

2.1 水位节律与植被生长周期

三峡水库采取独特的“蓄清排浊”运行模式,即 9 月中旬起水库逐渐蓄水至 175 m 最高水位,并维持峰值水位运行至翌年 1 月。非生长季高压淹水减少植被根际环境氧气,降低其代谢速率和碳水化合物消

耗,植被始终维持休眠状态。在每年夏季汛期长江上游来沙量达最大之前,水库水位逐渐降至防洪限制水位 145 m,消落带沿高程梯度自上而下呈现阶梯式出露,其成陆期与夏季光热水资源同期,为植被生产活动奠定物质环境基础。3—5 月,适生植被依靠种子或地下茎萌发占据土壤块,通过伸长茎、产生新叶和不定根等结构和形态积极适应对策“补偿生长”。但受退水初期土壤水过饱和抑制,植被只能采取“忍耐”策略削弱气孔导度和根系导水率,并调整代谢速率以减弱光合同化物运移,其生长速率普遍较低^[13-14]。6—7 月,最优化资源配置为植被生长提供物质保障,植被采取“逃避”策略加快光合速率,提高群落生产代谢活动,其生长速率显著升高^[15]。8—9 月,水位保持 145 m 防洪限制水位运行,植被生长趋于稳定。但受长江上游自然洪峰影响,水位出现小规模上涨,对低海拔段植被生长造成短期浅淹,改变植株体含氧量,导致适应性较弱的植被难以存活。

三峡水库水位季节性波动导致累积淹水时长、平均淹水深度等水文变量随高程增加呈逐步递减的趋势,进而造成植被存在明显的高程梯度分布格局,影响群落结构与生产力(表 1)。

表 1 消落带出露期不同高程水文变量统计值

Table 1 Statistical values of hydrological variables at different elevations during the exposure period

指标	月份	145~150 m	150~160 m	160~170 m	170~175 m
平均淹水深度/m	3	18.44	10.94	1.97	0
	4	15.93	8.43	0.84	0
	5	8.88	2.73	0.14	0
	6	0.74	0.02	0	0
	7	3.61	0.82	0.02	0
	8	3.57	0.83	0.04	0
	9	11.71	5.66	0.74	0
	3	31.00	31.00	18.39	0
	4	30.00	29.76	2.73	0
累积淹水时长/d	5	30.98	18.27	1.55	0
	6	12.65	0.38	0	0
	7	21.83	6.28	0.4	0
	8	22.42	5.85	0.54	0
	9	28.29	20.98	7.25	0
出露时令	6 月	5 月	4 月	3 月	

注:数据来源于长江水文网三峡水库 2010 年 9 月至 2022 年 9 月

逐日水位数据(<http://www.cjh.com.cn/>)。

170~175 m 高程段整体成陆期为 3—10 月,出露时令早且持续时间约为 270 天,累积淹水时长和平均淹水深度均最小;160~170,150~160 m 高程段在 4 月、5 月渐次成陆,出露时长约为 100 天和 170 天;145~150 m 高程段消落带在 6—9 月出露,时长约为

70 天, 累积淹水时长和平均淹水深度均最大。受制于高强度淹水胁迫, 消落带植被物种多样性、群落组分和生物量 3 方面均呈现典型的高程梯度分异规律。物种多样性指数随海拔增加大致呈先增后减的“单峰”分布格局, 即受水淹最严重的低高程段和基本不受水淹影响的高高程段植被群落构成较为单一, 多样性指数均较小; 而在中间高程段物种多样性达到峰值, 表明该区段植被更易形成共优群落维持生态系统稳定性^[16]。消落带异质生境导致植被生物量在不同组织和器官纵向重新配置呈现差异性^[17]。中高海拔植被将资源投资到地上部分再生产过程, 但中间高程段丰富的物种多样性加快群落生产力, 植被生物量出现峰值。低海拔植被光合同化作用、水分运输和物质生产代谢过程被极端水淹胁迫显著抑制, 只能通过“低投入—高储备”对策减缓植株地上部分生长并降低整个植株生物量的积累, 进而造成植被生物量沿高程梯度自低向高呈现先增后减的单峰型趋势^[18]。

消落带植被生长不仅遭受长时间淹水逆境, 还面临成陆期夏季高温干旱胁迫。根据各区县 2011—2022 年逐月平均气温数据, 三峡库区从下游的秭归、巫山、万州和开州, 到中上游的忠县和江津, 其平均气温 >22℃, 植被成熟期平均气温多数可达 29℃, 部分区域极端高温超过 40℃, ≥35℃ 的高温天气年均可达 39 天以上(表 2)。

表 2 三峡库区气温变化特征
Table 2 Climate conditions in the Three Gorges Reservoir Area

月份	忠县	万州	巫山	开州	秭归	江津	月平均 气温/℃
3	14.4	15.1	14.0	15.2	12.5	16.0	14.5
4	19.1	20.1	18.7	20.0	17.8	20.3	19.3
5	22.0	23.2	22.0	23.2	21.7	23.0	22.5
6	25.3	26.8	25.5	26.7	25.0	26.1	25.9
7	28.8	29.4	28.5	29.2	27.6	29.7	28.8
8	29.4	30.3	29.2	29.5	27.3	30.1	29.3
9	24.0	25.0	24.2	23.8	23.7	24.3	24.2
≥35℃ 时间/d	37.1	47.3	37.5	47.8	21.0	46.3	

注: 数据来源于各区县 2011—2022 年逐月平均气温数据 (<http://lishi.tianqi.com/>)。

夏季高温伏旱大幅削减土壤速效水分, 土壤薄弱处因干燥失水产生裂隙, 导致土体表面积增加而进一步加剧土壤蒸发, 影响植被与土壤之间水分运移过程。耐旱能力较差植被的蒸腾耗水过程难以及时补给而出现水分亏缺现象, 只能采取关闭叶片气孔, 加速分枝和老叶片枯萎减少叶面积, 有效防止水分过度蒸发^[19](图 3)。而耐旱性较强植被通过调节分株高、叶长和叶宽等形态特征提高自身水分利用效率, 呈现出较强的适应性与抗逆性。因此, 夏季干旱对消

落带植被生存生长产生重要的限制作用, 造成植被生长差异。

2.2 土壤侵蚀和泥沙沉积

长期水淹的浸润软化作用改变岩土自重及动、静水压力, 加之库水顺坡向爬升和逆坡向回流的往复淘蚀过程, 导致岸坡整体稳定性下降, 频繁发生崩塌、滑坡等重力侵蚀^[20-21](图 3)。同时, 反复淹水胁迫导致消落带原有陆生植被大面积减少甚至消亡, 严重损害植被固土护岸功能, 进而降低土壤抗蚀性能和抗剪强度, 使得成陆初期裸露土壤更易遭受降雨径流顺坡向侵蚀的直接作用^[22]。因此, 淹没期上覆水体水力扰动导致的波浪淘蚀、成陆期降雨和径流驱动的坡面侵蚀, 以及由重力或机械力控制的堤岸坍塌等多营力复合侵蚀过程共同造成消落带水土流失强度大, 且土壤侵蚀速率和外在主导营力在横向断面高程梯度上具有差异^[23]。170~175 m 土质岸坡土壤侵蚀剧烈, 其中波浪掏蚀和降雨径流侵蚀问题突出, 土壤分离与运移以片蚀、沟蚀为主; 在中部平缓台阶地处, 土壤侵蚀常发生在田坎与陡坎部位, 主要受坡度影响, 表现为降雨径流侵蚀、波浪淘蚀, 以及崩塌引起的重力侵蚀等; 145~155 m 的低海拔段土体含水量因长时间水位停留而浸泡饱和, 土质岸坡软化崩解, 波浪侵蚀与河岸崩塌占主导地位。土壤侵蚀直接通过机械作用力干扰和破坏植被, 或间接影响与植被生长相关的土壤特性, 致使植被萌发、幼苗建植和根叶生长过程被显著抑制, 最终减缓植被恢复进程。

三峡大坝减缓水体入库流速, 降低水流携沙能力, 导致部分悬移质和推移质泥沙淤积(图 3)。受水库调控和长江上游流域输沙季节性特征的叠加作用, 三峡水库干流悬浮泥沙具有明显的季节性旋回特征^[10]。雨季消落带沉积物由长江干流、上游主要入库支流(嘉陵江、乌江)悬浮泥沙纵向输入和库周坡面侵蚀输沙组成, 旱季消落带沉积物主要来源于河岸侵蚀泥沙。沿消落带横断面高程梯度, 泥沙沉积速率在雨季最大洪水位以下的平坦阶地处最高, 且沉积厚度随高程的增加显著降低, 形成下部过度沉积而上部适度沉积的空间分布差异。不同泥沙埋深对消落带植被生长产生强烈的选择压力, 影响植被萌发、幼苗出土与存活。适度泥埋对植被生长产生正效应, 主要促进植被萌发出苗并激励分株发育, 有利于提高对土壤肥力、水分和光照的吸收率^[24]。而过度泥沙掩埋不仅对种子萌发、幼苗出土和植被建植产生机械阻力, 同时降低根际土壤层的透光度、透氧度和通气性, 显著减缓植株光合作用能力, 造成植被生长发育减缓、停滞甚至出现种群衰退现象^[25]。



图 3 三峡水库消落带

Fig. 3 Water level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir

2.3 土壤环境

周期性淹水一出露干湿交替过程导致消落带岩土体含水量易发生饱和—不饱和—饱和的快速变化,土壤物理结构和化学性质呈现劣化趋势。消落带土壤受淹没期上覆水体压缩固结作用而出现软化和泥化现象,一方面导致土壤孔隙度呈现复杂多孔结构向简单少孔结构的转变,增加了土壤容重并降低土壤持水性能;另一方面,改变土壤黏结力,导致大粒径团聚体崩解为小粒径团聚体或微团聚体,团聚体稳定性显著减小^[26-27]。同时,伴随库水长期溶蚀、冲刷过程,消落带表层土壤被侵蚀搬移,深层土壤暴露,造成土壤黏粒、粉粒和砂粒在不同高程段重新分布,增加土壤颗粒组成和土层厚度空间异质性^[23]。土壤物理结构劣化不仅导致维持植被生存的固着基质丧失,并通过阻碍水分深层渗透和地下水向上补给影响土壤与植被之间的水动态过程,进而降低植被蒸腾用水和养分利用效率,极大程度削减其固碳能力^[28]。

水位季节性涨落加速土壤养分向水体的物理释放、扩散和转化,土壤养分大量流失,造成消落带土壤贫瘠状态^[29]。土壤有机质是土壤固相重要组分,可

促进团粒结构的形成,提高土壤养分有效性。然而,消落带土壤表层有机质在高强度侵蚀作用下加速分解、流失,同时植被的减少切断了土壤有机质主要输入渠道,导致有机质侵蚀损失量激增但难以被及时补给,其含量大幅下降^[30]。土壤有机质的积累和分解决定土壤氮的积累和消耗,因此土壤全氮消涨趋势与有机质一致,均呈现降低趋势。土壤磷、钾主要源于成土母质的风化与淋失^[31]。消落带表层土壤通过吸附上覆水体中的外源性养分,或通过沉积物输入磷、钾。但长时间干湿交替过程一方面降低土壤酸碱度,减轻土壤母岩侵蚀风化程度;另一方面,加剧土壤养分的还原反应而溶解释放,土壤磷、钾直接来源减少而显著降低^[32]。土壤养分协调供应植被稳定生长所需营养元素,但消落带土壤养分呈现贫瘠化,较大程度减缓土壤肥力向根系的运输,降低植被叶吸通道的光合转化效率,进而阻碍植株体内能量与物质的储存、传递与转化,影响植被群落类型、分布和动态。

3 三峡水库消落带植被恢复模式

当前三峡水库消落带植被恢复仅考虑植被水淹

耐受性,采用室内模拟淹水试验、试验示范区实地种植、群落学调查等方式选育多种优势抗逆物种,关注植株成活率、植被覆盖度和生物量等,在物种筛选与植被组配等方面取得重大进展^[33-34]。但现有植被重建模式粗放,植被群落结构单一,忽略了植物过度恢复导致生源要素在淹水期大量释放可能带来的次生水环境污染风险^[35]。已有研究^[36]提出,采用工程措施(消浪植生型生态护坡、基塘工程、生态袋、串珠式柔性护坡等)构造植被生境,以促进植被与土壤良性互动,增强消落带固土护岸功能,但现有生态护坡形式对土壤扰动大,不利于维持消落带景观美学需求。因此,在系统梳理分区立地条件基础上,因地制宜筛选适生物种,采取以自然恢复为主、人工干预为辅的方式分区配置不同功能性状植被,并提出局部微地形整治方式提高库岸保土、保肥和保水能力,最大化区位生态服务功能效益。

适生物种选育是消落带生态修复的首要任务。首先,需根据水库水位实际调度节律,选育多种水陆两栖生长的本土抗逆物种,重点强调植被高耐淹性、抗蚀性与抗旱性、发达的根系与良好减污截污能力等特征,并避免植被生长周期与水库淹没期重叠。其次,加强对出露后植被恢复生长的长期跟踪,构建具有自稳定维持机制的植被优势群落。

科学评价各分区突出生态问题并优化不同功能

性状植被空间配置是提高生态系统服务功能的重要途径(图 4)。170~175 m 高程段土质消落带受水淹干扰强度最小,易遭受复合侵蚀营力交替作用,土壤侵蚀强度最大,表层土壤颗粒与养分流失淋溶加剧。因此该区段考虑立体配置耐淹能力相对较弱,但根系发达且固土能力强的乔、灌、草植被,注重防止水土流失;同时需结合局地整地方式实现土壤基质保育,提升该区固土护岸效益。160~170 m 高程区消落带地势放缓,受水淹胁迫强度较小,侵蚀强度下降且主要发生在坡度较大的田坎与陡坎部位,但伴有不同物源泥沙淤积现象,生境条件复杂。因此,该区段考虑采取灌、草复合种植方式以提高群落物种多样性并增加群落固碳能力,最终提升该区拦沙截污和水质保护效益。150~160 m 高程区消落带受水淹胁迫强度较大,地势平缓导致泥沙净沉积量增大,削弱了地表透光度和透氧度,进而限制植物获取光照和进行气体交换的能力,并加剧泥沙颗粒吸附水体重金属等污染物。因此,该区段考虑种植耐淹能力强、能抵御泥沙深埋并具有减污固污的多年生草本,注重提高植被的存活率、覆盖度与生物量,提升该区污染物阻截与缓冲效益。150 m 以下消落带易受短期与长期水淹影响,土体因库水浸泡软化、泥化,土壤抗剪强度降低,易发生坍塌、滑坡等重力侵蚀,水土流失问题严重。因此,该区段难以实行人工修复而考虑采取自然恢复的方式。

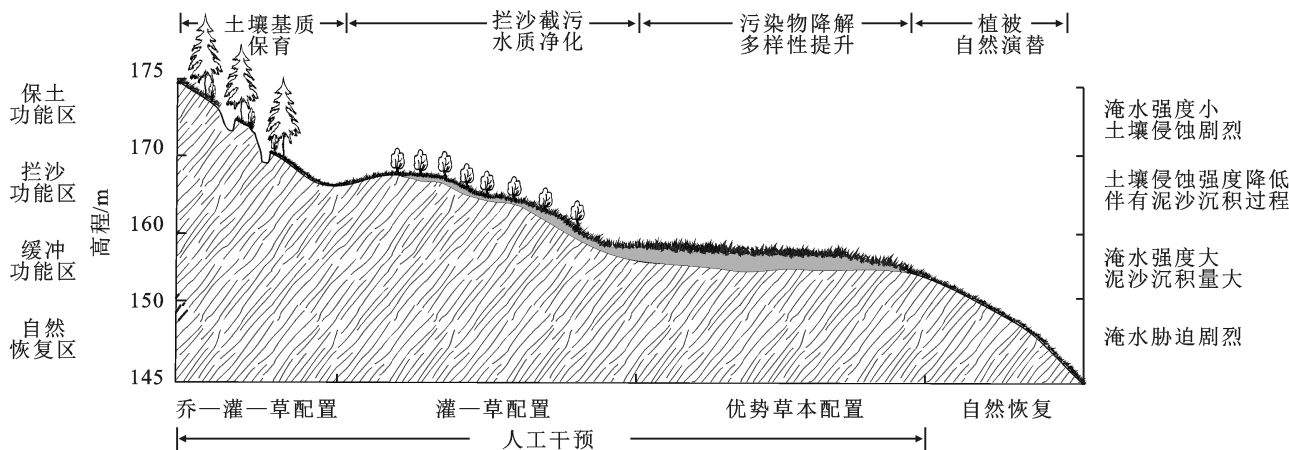


图 4 三峡水库消落带功能分区及植被配置模式

Fig. 4 Functional zoning and vegetation configuration patterns in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir

4 结论

(1)三峡水库消落带生境存在较高的空间异质性,主要受水库水位节律、出露期气候条件、土壤侵蚀与泥沙沉积过程、土壤基质环境等因素共同影响。植被在出露生长季利用充沛的光热水资源完成生长周期,但水库水位季节性波动形成的淹没时长、出露时令、淹水强度等直接决定植被生理适应与生长动态过程,具有显著的负效应;同时库岸易发生土壤侵蚀、泥

沙沉积过程,导致土壤物理结构劣化、土壤养分流失,并对植被生长产生掩埋效应,间接改变植被形态结构和生理过程。

(2)消落带植被恢复与综合生态功能重建需充分考虑水库水位实际调度节律、分区立地条件以及物种的形态—功能性状特征,根据“最大化自然恢复,最小化人工干预”的原则展开,充分发挥生态系统自身调节潜能。以筛选具有高耐淹性、抗旱性、发达的根系

与良好减污截污能力的本土适生物种为首要任务,以局部微地形整治为土壤基质保育的主要方法,以优化不同功能性状植被的分区组配为重要途径,分区提升消落带固土护岸、拦沙截污、保护水质和维持生物多样性等多种生态功能,有效防止植被过度恢复带来的次生水环境污染风险。

参考文献:

- [1] XU X B, TAN Y, YANG G S. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions[J]. *Earth - Science Reviews*, 2013, 124: 115-125.
- [2] NAIMAN R J, DECAMPS H, POLLOCK M. The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity[J]. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 1993, 3(2): 209-212.
- [3] NAIMAN R J, DECAMPS H. The ecology of interfaces: Riparian zones[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28: 621-658.
- [4] FU B J, WU B F, LÜ Y H, et al. Three Gorges Project: Efforts and challenges for the environment[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2010, 34(6): 741-754.
- [5] 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.
YOU Y F, YANG C H, LEI B, et al. Effect of water level regulation on vegetation characteristics in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23(6): 1103-1109.
- [6] 苏琴琴, 俞幸池, 覃红玲, 等. 三峡水库消落区不同生活史类型植物群落的空间分布格局[J]. *生态学报*, 2020, 40(13): 4507-4515.
SU Q Q, YU X C, QIN H L, et al. Spatial distribution of plant communities composed of different life history species in the water-level-fluctuating-zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4507-4515.
- [7] 李强, 王书敏, 丁武泉, 等. 泥沙掩埋和干旱对三峡库区消落带双穗稗草生长的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(3): 649-654.
LI Q, WANG S M, DING W Q, et al. Influence of sand burial and drought on the growth of *Paspalum distichum* in water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(3): 649-654.
- [8] 张志永, 程郁春, 程丽, 等. 三峡库区万州段消落带植被及土壤理化特征分析[J]. *水生态学杂志*, 2016, 37(2): 24-33.
ZHANG Z Y, CHENG Y C, CHENG L, et al. Characteristics of vegetation and soil in the water level fluctuation zone of the Wanzhou region of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydroecology*, 2016, 37(2): 24-33.
- [9] 王金南, 孙宏亮, 续衍雪, 等. 关于“十四五”长江流域水生态环境保护的思考[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1075-1080.
WANG J N, SUN H L, XU Y X, et al. Water eco-environment protection framework in the Yangtze River Basin during the 14th five-year plan period[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1075-1080.
- [10] TANG Q, COLLINS A L, WEN A B, et al. Particle size differentiation explains flow regulation controls on sediment sorting in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 633: 1114-1125.
- [11] 唐敏, 杨春华, 雷波. 基于 GIS 的三峡水库不同坡度消落带分布特征[J]. *三峡环境与生态*, 2013, 35(3): 8-10, 20.
TANG M, YANG C H, LEI B. Spatial distribution investigation on the water-level-fluctuating zone slopes in Three Gorges Reservoir areas based on GIS[J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2013, 35(3): 8-10, 20.
- [12] BAO Y H, GAO P, HE X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir: A unique geomorphological unit[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 14-24.
- [13] 贺燕燕, 王朝英, 袁中勋, 等. 三峡库区消落带不同水淹强度下池杉与落羽杉的光合生理特性[J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2722-2731.
HE Y Y, WANG C Y, YUAN Z X, et al. Photosynthetic characteristics of *Taxodium ascendens* and *Taxodium distichum* under different submergence in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(8): 2722-2731.
- [14] 刘瑞雪, 詹娟, 史志华, 等. 丹江口水库消落带土壤种子库与地上植被和环境的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 801-808.
LIU R X, ZHAN J, SHI Z H, et al. Soil seed bank and its correlations with aboveground vegetation and environmental factors in water level fluctuating zone of Danjiangkou Reservoir, Central China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3): 801-808.
- [15] 简尊吉, 马凡强, 郭泉水, 等. 三峡水库峡谷地貌区消落带优势植物种群生态位[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(2): 328-334.
JIAN Z J, MA F Q, GUO Q S, et al. Niche of dominant plant populations in the water level fluctuation zone of canyon landform area of the Three Gorges Reservoir[J].

- Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(2): 328-334.
- [16] 徐建霞, 王建柱. 三峡库区香溪河消落带植被群落特征与土壤环境相关性[J]. 生态学杂志, 2018, 37(12): 3661-3669.
- XU J X, WANG J Z. Correlation between vegetation community and soil physical-chemical factors in water-level fluctuation zone of Xiangxi River of the Three Gorges Reservoir area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(12): 3661-3669.
- [17] 姚洁, 曾波, 杜琤, 等. 三峡水库长期水淹条件下耐淹植物甜根子草的资源分配特征[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7347-7354.
- YAO J, ZENG B, DU H, et al. Effects of long-term submergence on resource allocation of *Saccharum spontaneum* Linn. in Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7347-7354.
- [18] LIU M Z, LIU Y Y, ZENG B, et al. Lowest elevation of plant growth and soil characteristics in natural draw-down areas in the Jiangjin section of the Yangtze River[J]. Wetlands, 2019, 39(2): 381-391.
- [19] 宋孝玉, 刘雨, 覃琳, 等. 内蒙古鄂托克旗天然草地植被生态需水量研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 107-115.
- SONG X Y, LIU Y, QIN L, et al. Ecological water requirement of natural grassland vegetation in the Otog Banner of Inner Mongolia [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 107-115.
- [20] 贺秀斌, 鲍玉海. 三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 160-168.
- HE X B, BAO Y H. Research advances on soil erosion and ecological restoration in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 160-168.
- [21] SU X L, NILSSON C, PILOTTO F, et al. Soil erosion and deposition in the new shorelines of the Three Gorges Reservoir[J]. The Science of the Total Environment, 2017, 599/600: 1485-1492.
- [22] BAO Y H, HE X B, WEN A B, et al. Dynamic changes of soil erosion in a typical disturbance zone of China's Three Gorges Reservoir[J]. Catena, 2018, 169: 128-139.
- [23] 郑晓岚, 杨玲, 宋娇, 等. 水库消落带土壤颗粒组成分形及其空间分异特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 66-71.
- ZHENG X L, YANG L, SONG J, et al. Fractal characteristics and spatial variation of soil particle composition in the reservoir riparian zone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 66-71.
- [24] 谢婷婷, 刘明辉, 袁中勋, 等. 不同泥沙埋深对几种一年生草本枯落物分解及养分动态特征的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7755-7766.
- XIE T T, LIU M H, YUAN Z X, et al. Effects of different simulative sediment depths on litter decomposition and nutrient dynamic change of several annual herbaceous plants [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7755-7766.
- [25] 李强. 泥沙掩埋和干旱对三峡库区消落带狗牙根生长恢复的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 200-208.
- LI Q. Influence of sand burial and drought on growth recovery of *Cynodon dactylon* in a water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 200-208.
- [26] 张淑娟, 贺秀斌, 鲍玉海, 等. 三峡水库消落带不同水位高程土壤团聚体变化特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 25-30.
- ZHANG S J, HE X B, BAO Y H, et al. Change characteristics of soil aggregates at different water levels in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 25-30.
- [27] 吕发友, 唐强, 张淑娟, 等. 三峡水库消落带紫色土物理性质对反复淹水作用的响应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 276-281.
- LYU F Y, TANG Q, ZHANG S J, et al. Response of purple soil physical properties to repeated water flooding in water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 276-281.
- [28] 许秀丽, 李云良, 谭志强, 等. 鄱阳湖湿地典型植被群落地下水—土壤—植被—大气系统界面水分通量及水源组成[J]. 湖泊科学, 2018, 30(5): 1351-1367.
- XU X L, LI Y L, TAN Z Q, et al. Water fluxes in the groundwater-soil-plant-atmosphere continuum and water sources of typical wetland vegetation communities in Poyang Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(5): 1351-1367.
- [29] 程瑞梅, 刘泽彬, 肖文发, 等. 三峡库区典型消落带土壤化学性质变化[J]. 林业科学, 2017, 53(2): 19-25.
- CHENG R M, LIU Z B, XIAO W F, et al. Changes of soil chemical properties in typical hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(2): 19-25.
- [30] YE C, CHEN C R, BUTLER O M, et al. Spatial and temporal dynamics of nutrients in riparian soils after nine years of operation of the Three Gorges Reservoir, China[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 664: 841-850.
- [31] 郭泉水, 康义, 赵玉娟, 等. 三峡库区消落带土壤氮磷钾、pH值和有机质变化[J]. 林业科学, 2012, 48(3): 7-10.

- GUO Q S, KANG Y, ZHAO Y J, et al. Changes in the contents of N, P, K, pH and organic matter of the soil which experienced the hydro-fluctuation in the Three Gorges Reservoir [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(3): 7-10.
- [32] 郭燕, 程瑞梅, 肖文发, 等. 三峡库区消落带土壤化学性质年际变化特征[J]. *林业科学*, 2019, 55(4): 22-30.
- GUO Y, CHENG R M, XIAO W F, et al. Inter-annual variation of soil chemical properties in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(4): 22-30.
- [33] 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.
- FAN D Y, XIONG G M, ZHANG A Y, et al. Effect of water-level regulation on species selection for ecological restoration practice in the water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(4): 416-432.
- [34] 窦文清, 贾伟涛, 张久红, 等. 三峡水库消落带植被现状、适生策略及生态修复研究进展[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(1): 208-218.
- DOU W Q, JIA W T, ZHANG J H, et al. Research progress of vegetation status, adaptive strategies and ecological restoration in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(1): 208-218.
- [35] TANG Q, FU B J, COLLINS A L, et al. Developing a sustainable strategy to conserve reservoir marginal landscapes [J]. *National Science Review*, 2018, 5(1): 10-14.
- [36] 高进长, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 三峡库区消落带分区固土护岸模式[J]. *世界科技研究与发展*, 2014, 36(6): 623-628.
- GAO J Z, BAO Y H, HE X B, et al. Patterns of soil conservation and revetment by district at water-level-fluctuating zone in Three Gorges Reservoir [J]. *World Sci-tech R & D*, 2014, 36(6): 623-628.
- (上接第 309 页)
- [27] 姚采云, 安睿, 窦超, 等. 基于 MSPA 与 MCR 模型的三峡库区林地生态网络构建与评价研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(9): 1953-1962.
- YAO C Y, AN R, DOU C, et al. Research on construction and evaluation of forest land ecological network in three gorges reservoir area based on MSPA and MCR model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(9): 1953-1962.
- [28] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 771-784.
- HUANG M Y, YUE W Z, FENG S R, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi county of the Dabie Mountain Area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 771-784.
- [29] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. *生态学报*, 1999, 19(1): 8-15.
- YU K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 8-15.
- [30] JIANG B, HUANG J. A new approach to detecting and designing living structure of urban environments [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 88: e101646.
- [31] 国家统计局. 2021 年中国城市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- National Bureau of Statistics. China urban statistics year-book 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [32] 陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1611-1618.
- CHEN X P, CHEN W B. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1611-1618.
- [33] 谢辉, 巴可伟. 长江中游城市群湖北区域综合交通布局规划研究[J]. *综合运输*, 2020, 42(4): 19-24.
- XIE H, BA K W. On the comprehensive transportation planning of Hubei urban agglomeration in the Middle of the Yangtze River [J]. *China Transportation Review*, 2020, 42(4): 19-24.