

DOI: 10.20103/j.stxb.202409052131

田瑞杰, 杨永川, 李宏. 三峡库区消落带植被特征变化研究. 生态学报, 2025, 45(16): - .

Tian R J, Yang Y C, Li H. Study on the vegetation characteristics change in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16): - .

三峡库区消落带植被特征变化研究

田瑞杰, 杨永川, 李 宏*

重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 40045

摘要: 三峡库区消落带是一个由于水位波动形成的特殊地理单元, 造成了库区区域内消落带植被的特殊变化节律。然而, 在长时间尺度下的三峡库区消落带植被在中小尺度上的变化特征少有报道。本研究通过对 2002 年至 2022 年所有相关文献进行数据收集与整理统计, 对三峡库区消落带植被的变化进行了分析。结果显示: (1) 在蓄水前后, 消落带植被物种类型、丰度、覆盖度等发生了显著变化, 呈显著下降趋势。蓄水前的植被物种数较多, 在蓄水初期最高录得 481 种植物, 而到了 2022 年, 物种数量减少到 77 种, 减少幅度达 81%。乔灌木物种数分别下降了 86.8%、90.7% 和 38.2%。乔灌木植物覆盖度显著降低, 草本植物覆盖度则增加明显; (2) 优势植物从乔灌木共存转变为以多年生和一年生草本为主导的植被群落, 其中狗牙根的重要值从蓄水前的 9.38 上升到蓄水后的 17.28, 成为最具优势的物种; (3) 在不同高程上, 植被梯度覆盖度和物种数变化显著, 覆盖度整体表现为上层>中层>下层, 物种数整体表现为上层(11 种)>中层(9 种)>下层(7 种); (4) 在结构方程模型中, 淹水时长是影响植被变化最显著的因素(标准化总影响为 0.46), 对物种数和覆盖度的变化具有重要影响。因此, 适应性物种的选择及其生态位适应性、植被特征和环境响应的深入研究是三峡库区消落带生态恢复中的重要内容。本文研究结果为认识消落带植被变化规律以及植被生态恢复提供了重要依据。

关键词: 三峡库区; 消落带; 植被; 物种变化

Study on the vegetation characteristics change in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area

TIAN Ruijie, YANG Yongchuan, LI Hong*

Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 40045, China

Abstract: The water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area is a special geographical unit formed by water level fluctuations, which causes a special change rhythm of vegetation in the water level fluctuation zone in the reservoir area. However, there are few reports on the change characteristics of vegetation in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area on small-medium scales in a long-term observation. In this study, we conducted an in-depth analysis of the vegetation changes in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area by collecting and collating data from all relevant literature published between 2002 and 2022. The results revealed that significant changes occurred in the species composition, abundance, and coverage of riparian vegetation before and after impoundment, showing a marked decline. More vegetation species were recorded before impoundment, with a maximum of 481 species in the initial stage of impoundment. This was decreased to 77 species in 2022, representing a reduction of 81%. Meanwhile, the numbers of tree, shrub, and herb species declined by 86.8%, 90.7%, and 38.2%. Tree and shrub coverage showed a significant decrease, and herbaceous plant coverage significantly increased. The dominant vegetation has shifted from a co-led of woody

基金项目: 国家自然科学基金(52370199); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2023TIAD-KPX0092); 重庆英才计划“包干制”项目(cstc2022ycjh-bgzxm0204)

收稿日期: 2024-09-05; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongli@cqu.edu.cn

and herbaceous plants to a community predominantly dominated by perennial and annual herbaceous plants, with *Cynodon dactylon* (L.) Pers. being the most dominant species, whose importance value increased from 9.38 before impoundment to 17.28 after impoundment. Additionally, there was a significant gradient change in vegetation coverage at different elevations, with the upper layer > middle layer > lower layer. There was a significant gradient change in vegetation species, with the upper layer (11 species) > middle layer (9 species) > lower layer (7 species). In the structural equation model, the duration of submergence was the most significant factor affecting vegetation change (the total effect of standardization is 0.46), which had an important impact on the change of species number and coverage. Therefore, the selection of adaptive species and the in-depth study of niche adaptability, vegetation characteristics, and environmental response is important in the ecological restoration of the water level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir Area. The results of this study provide information for understanding the alternation in vegetation community and restoration of the vegetation in the water level fluctuating zone.

Key Words: Three Gorges Reservoir Area; the water level fluctuation zone; vegetation; species change

三峡水库是全球最大水利枢纽工程,采用“蓄清排浑”的运行方式,每年在汛期(6月至9月)水位最低可降至海拔 145m,在蓄水期(10月至次年5月)最高可升至海拔 175m,形成了垂直落差 30m 的消落带区域,总面积达 349km²。自 2003 年起,水位周期性变动使原有山地区域形成典型消落带植被动态变化区域,致使原有陆生植物难以适应,逐渐消失或死亡,对陆地生态环境产生巨大干扰^[1-3]。2010 年库区满蓄后,消落带生态系统经历了快速演化,已有研究表明建库后消落带原有陆地生态系统植被大幅减少,优势物种类群和植物群落类型发生改变^[4-6]。三峡库区消落带植被对库区湿地生态系统意义重大,是维持库区健康环境和生态功能的关键。目前对库区消落带植被变化特征和规律的研究是热点,但缺乏长期植被特征的动态变化研究。

已有研究证明,三峡水库运行显著改变了植物群落组成和丰富度。蓄水初期维管束植物种类减少 43%,优势植物生活型从多年生草本和灌木显著变化为一年生草本植物,木本植物种类从 108 种减少到 39 种^[1]。库区植被被多年生和一年生草本所主导,乔灌木物种数减少明显^[7]。植物物种变化以及优势物种适应性的生理和生态机制对于减少退化和改善恢复实践的研究逐渐成为重要课题。

因此,了解植被动态与变化特征,探索其影响因子对于深入理解库区消落带植被变化、植被与影响因子关系,对三峡库区的土地利用的科学管理和生态保护的政策制定具有重要意义。目前,有关消落带植物变化的研究主要集中在库区植被覆盖度变化^[8]、植消落带生物群落结构和多样性^[9-10]、消落带植被与土壤的耦合机制^[11]等方面,对库区地表植被类型、物种、梯度变化等,特别是长时间尺度下的植被特征的动态变化等方面研究较少。因此,本研究以三峡库区消落带的地表植被的物种类型、丰度、覆盖度、优势植物先锋植物、梯度变化等特征及其影响因子为对象,探讨了库区运行以来的消落带植被在中小空间尺度上的变化动态,分析了包括年均温、年降水、淹水时长和人为干扰等影响因子在植被变化中的影响,为深入探究三峡库区消落带植物、植被的变化规律和进一步开展、指导消落带植被恢复工作提供理论基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

三峡工程库区作为一个现代地理概念,系指按照位于宜昌县中堡岛的三峡大坝蓄水 175m 方案,因水位升高而受淹没影响的有关行政区域。三峡水库消落带地理位置(29°16'—31°25'N, 106°—110°50'E),海拔 33.6—3105m,面积共计 348.92km²,东起湖北宜昌,西至重庆江津,共涉及 26 个区县。库区气候属亚热带季风气候,处在南温带和亚热带过渡地带,四季分明,雨量充沛。三峡水库消落带(图 1)是因水库调度引起水库水位变动而使库区周围土地周期性地出露于水面形成垂直高差为 30m、长约 600km 的一段湿地生态系统和陆生生态系统交替演变的过渡地带。高水位蓄水运行后,引起库区消落带区域地表覆被发生变化,给三峡库区

消落带的生态环境带来一定影响。

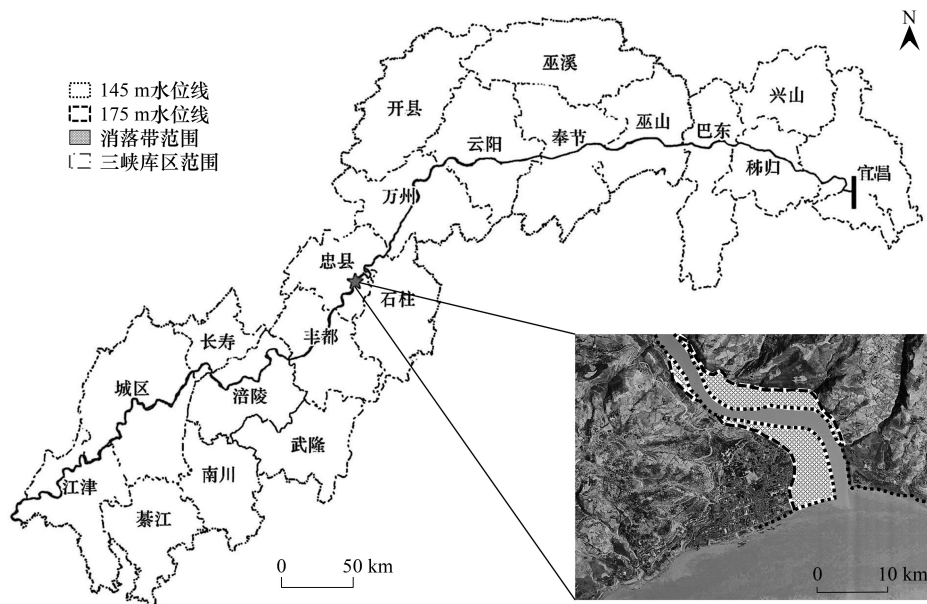


图 1 研究区域概况

Fig.1 Overview of the study area

WL: Water line; WLFZ: Water level fluctuation zone; TGRA: Three Gorges Reservoir Area

1.2 研究方法

2022 年作为三峡工程的结项之年,自 2003 年三峡库区首次蓄水开始,至 2022 年标志着三峡工程的全面竣工验收,因此本文使用关键词(“三峡”或“三峡水域”或“三峡水库”或“三峡工程”或“三峡库区”)和(“消落带”或“消落区”或“水位波动带”)和(“植物”或“植被”),搜集自 2002 年 1 月至 2022 年 12 月间发表于科学引文索引([www. web of science. com](http://www.webofscience.com))和中国知网([www. cnki. net](http://www.cnki.net))的同行评议出版物,包括文章、出版书籍和学术论文。为了更便于纳入所需的数据集,本文拟定了几个标准确定适当的文献数据提取范围:(i)至少提及了六类指标中的其中一种(即梯度变化、影响因子等);(ii)所提取数据应该是研究调查的实际数据,预估预测数据不作为数据来源;(iii)文献数据来源以区域性、概况性、总结性的文章为主,区域生态研究、资源调查研究、植被更新研究等方面的研究为佳。

根据这些标准,本文从我们数据集的 84 本刊物中提取整理了 1012 个数据结果进行分析,其中大部分数据结果来自中国学者。数据直接从主要研究的表格、图表、主要文本和(或)附录中提取。如果数据以图形形式呈现,本文使用工程数字化仪 v.12(<http://markummitchell.github.io/engauge-digitizer>)对图形进行数据化后提取这些数据。

标准化所有提取到的数据,统一单位后去除重复值与异常值,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较方法中的最小显著差异法(LSD)对年均植物物种多样性等指标进行显著性检验。应用 Excel16、Origin2019、Spss22.0 分析软件对数据进行分析处理和显著性检验,采用 Amos 对所提取的环境影响因子进行因果关系建模。

2 结果

2.1 消落带植被物种类型和丰度变化

据历史资料整理可知(图 2)三峡库区在蓄水前一年,2002 年的植被物种数为 405,后 2003 年开始蓄水,至第一次蓄水位到达 175m 时。库区消落带物种数呈现一个递增的趋势,最高在 2004 年观测到物种数为

481。2010 年之后,经历反复长期的水位波动,物种数逐渐降低,到 2022 年当年度野外调查时,观测到物种数为 77 种。物种自蓄水以来减少明显。

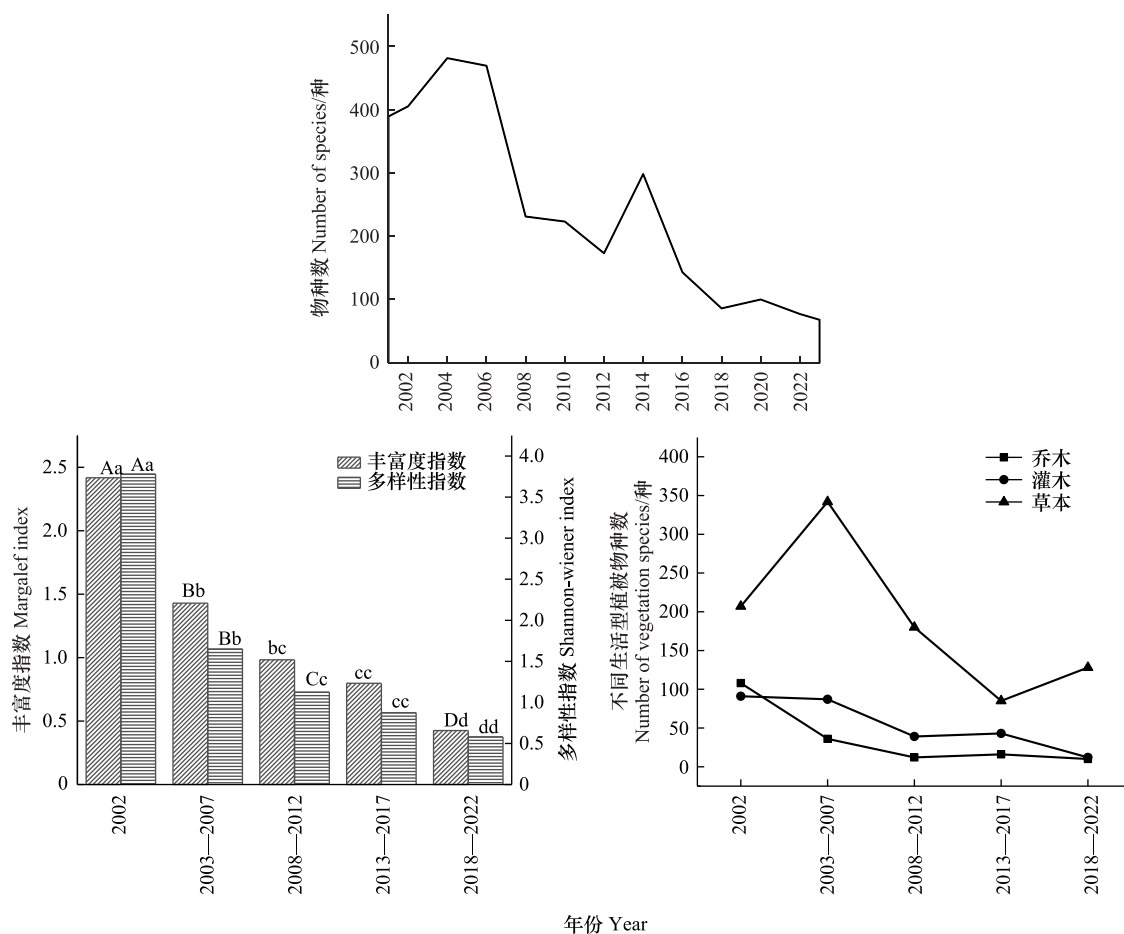


图 2 2002—2022 年三峡库区消落带植被物种数、物种丰富度指数和物种多样性指数与不同生活型物种数变化

Fig.2 Changes in vegetation species number, species richness index, species diversity index, and number of species with different life forms in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area from 2002 to 2022

大写字母表示 $P < 0.01$, 小写字母表示 $P < 0.05$

而物种丰富度和物种多样性(图 2)在蓄水开始后,乔灌木比例显著下降,蓄水开始后至 2010 年第一次水位达到 175m 的设计高度时,2003—2007 年度的物种丰富度和物种多样性的年平均指数相较 2002 年未蓄水时下降了 48% ($P < 0.01$) 和 52% ($P < 0.01$); 2008—2012 年度的物种丰富度和物种多样性年平均指数相较 2003—2007 年度下降了 27% ($P < 0.05$) 和 45% ($P < 0.01$); 2013—2017 年度的物种丰富度和物种多样性年平均指数相较 2008—2012 年度下降了 15% 和 12%, 差异性不显著 ($P > 0.05$); 2018—2022 年度的物种丰富度和物种多样性年平均指数相较 2013—2017 年度下降了 50% ($P < 0.01$) 和 32% ($P < 0.05$); 2018—2022 年度的物种丰富度和物种多样性年平均指数相较 2002 年蓄水前下降了 83% ($P < 0.01$) 和 85% ($P < 0.01$), 蓄水对三峡库区植被造成了巨大损害, 导致消落带植物的物种丰富度和生物多样性严重丧失。

不同生活型植被物种数(图 2)自 2003 年蓄水以来, 总体呈现下降趋势。在 2018—2022 年度, 乔木、灌木和草本仅仅录得 10 种、12 种和 128 种。乔灌木物种数较蓄水前分别下降了 86.8% ($P < 0.01$)、90.7% ($P < 0.01$) 和 38.2% ($P < 0.01$), 各个生活型植物物种数均下降明显。在 2003—2007 年度, 草本物种数呈现上升趋势, 最大到达 342 种, 可能是因为蓄水开始后, 迫使一些物种的原有生态位丧失, 原本在生态位上不占优势, 但是水淹耐性较强的物种受到胁迫刺激得以首次萌发, 而在后续的持续水淹环境下逐渐消失。

2.2 消落带植被覆盖度变化

在水库蓄水初期(2003—2007),不同生活型植被的物种数(图2)和总覆盖度(图3)显著下降($P<0.05$)。乔木和灌木物种的物种数和覆盖度随着蓄水年限的增加而下降($P<0.05$)。在经历水淹初期时,2003—2007年度草本植物的数量增加($P<0.05$)而覆盖度降低($P<0.05$),至2008—2012年度草本植物的物种数降低($P<0.05$)而覆盖度增加($P<0.05$),在2012年后乔灌植物的物种数和覆盖度趋于稳定($P>0.05$);在2008—2012年度后,草本植物的覆盖度出现波动变化,但是整体增加显著($P<0.05$)。多年生物种数量和覆盖度随淹没年限显著降低(表1)。

2.3 三峡库区消落带优势植物变化

历史资料分析(表1和表2)三峡水库的调蓄影响了消落带的植被演替,在2002年水库蓄水前,消落带草本植物与木本植物共存,以狗牙根、白茅、黄茅等草本植物和荆条、铁仔、马尾松等木本植物为主;水库蓄水后至2008—2012年度淹水初期消落带植物群落以狗牙根、苍耳、喜旱莲子草为主,在2013—2017年度逐渐演替为以狗牙根、牛鞭草、苍耳、鬼针草、酸模叶蓼为主,最后在2018—2022年度形成了现在的以狗牙根、牛鞭草、喜旱莲子草、水蓼、稗草、苍耳、酸模叶蓼、苍耳等为优势植物的植物群落。从物种生活型看,自2010年水库满蓄以来,植物逐渐从以多年生草本为主要优势植物的模式过渡到为多年生和一年生草本共同主导的模式,并且在持续反复的水位波动年份中,一年生草本的重要值逐渐提升,优势植物中一年生草本的物种数也在增加。其中,狗牙根是最重要的先锋植物和优势植物,不论在满蓄前还是满蓄后,都是出现频次和重要值最多最大的物种。乔灌木仅在满蓄前作为优势种,其中马尾松是重要值最大的乔木植物。在水库满蓄后,从重要值来看再无乔灌木成为库区消落带的优势植物。

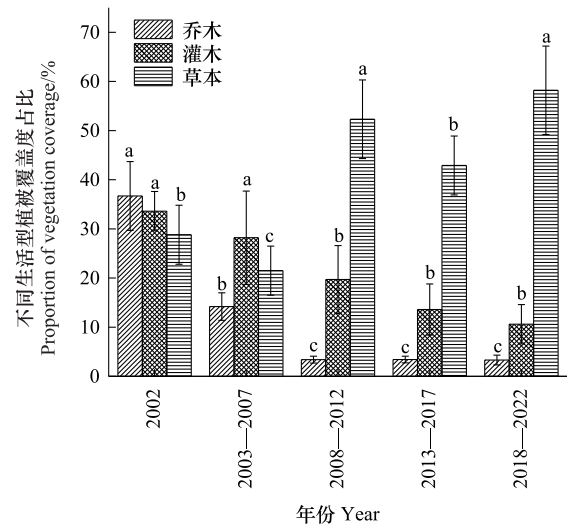


图3 2002—2022年三峡库区消落带不同生活型植被覆盖度面积占比

Fig.3 Proportion of vegetation coverage of different life forms in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area from 2002 to 2022

小写字母表示不同年份同一生活型植被覆盖度占比的差异, $P<0.05$

表1 2002—2022年三峡库区消落带先锋植物变化

Table 1 Changes of pioneer plants in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area from 2002 to 2022

年份 Year	物种 Species	频度 Frequentness	重要值 Importance value	年份 Year	物种 Species	频度 Frequentness	重要值 Importance value
2002—2007	狗牙根**	21	12.72	2013—2017	狗牙根**	27	12.36
	牛鞭草**	16	10.41		牛鞭草**	18	7.83
	藜草**	12	7.63	2018—2022	狗牙根**	18	15.33
2008—2012	狗牙根**	16	16.23		牛鞭草**	15	9.36
	灰化藜草**	9	8.86				

频度表示在所搜索的该年度中,文献中出现该物种的次;重要值取大于5的物种为优势植物;*表示乔灌木,**表示多年生草本,***表示一年生草本

2.4 消落带植被梯度变化

由于季节性蓄水导致水位高程的年际变化较大,因此根据水位高程,三峡库区消落带可分为上层(165—175 m)、中层(155—165 m)和下层(145—155 m)。

三峡库区不同高程的消落带呈现“下层面积最小、中层面积较大、上层面积最大”的分布特征。下层、中层和上层的面积分别为68.85、133.74和146.33 km²,分别占消落带总面积的19.73%、38.33%和41.94%^[12-13]。

表 2 2002—2022 年三峡库区消落带优势植物变化

Table 2 Changes of dominant plants in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area from 2002 to 2022

年份 Year	物种 Species	频度 Frequentness	重要值 Importance value	年份 Year	物种 Species	频度 Frequentness	重要值 Importance value
2002—2007	马尾松*	17	7.52	2018—2022	苍耳***	11	12.63
	荆条*	11	5.66		鬼针草***	9	6.7
	铁仔*	7	4.38		酸模叶蓼***	17	6.67
	狗牙根**	28	9.38		狗牙根**	33	17.28
	白茅**	12	8.17		牛鞭草**	12	10.57
	黄茅**	12	6.72		喜旱莲子草**	6	8.23
2008—2012	狗牙根**	36	10.36		水蓼**	11	7.6
	喜旱莲子草**	27	5.33		稗草***	28	10.33
	苍耳***	7	16.81		酸模叶蓼***	27	10.21
2013—2017	狗牙根**	36	18.36		苍耳***	12	8.53
	牛鞭草**	28	13.67				

频度表示在所搜索的该年度中,文献中出现该物种的次;重要值取大于 5 的物种为优势植物;*表示乔灌木,**表示多年生草本,***表示一年生草本

整理历史资料,从图 4 可以看出,在未开始蓄水的 2002 年,还没有形成水位波动区域,不同高程梯度间的物种数和覆盖度占比没有显著差异;在蓄水初期(2003—2007),下层植被覆盖度占比显著降低($P<0.05$),中层和高层植被覆盖度占比变化不明显。自 2010 年以后,库区形成连续而持续的周期性水位波动,各年度不同海拔梯度间的植被覆盖度占比表现出显著差异($P<0.05$),表现为高程越高,植被覆盖度越大的趋势,且占消落带区域最大的高层植被覆盖度在不同年度间表现出先降低($P<0.05$)后增加($P<0.05$)的趋势。同时,在形成稳定的水位波动后,高层一直是植被覆盖度最大的区域,植被覆盖度占比表现为上层>中层>下层。

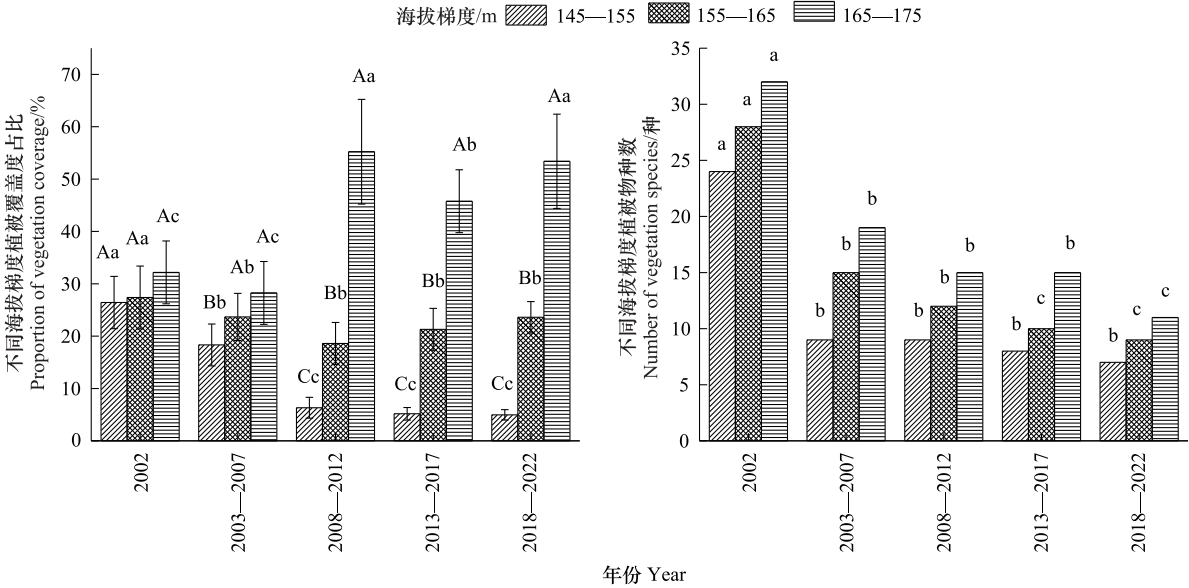


图 4 2002—2022 年三峡库区消落带不同海拔梯度植被覆盖度占比和不同海拔梯度植被物种数变化

Fig.4 Changes in vegetation coverage proportion and vegetation species number at different elevation gradients in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area from 2002 to 2022

图不同海拔梯度植被覆盖度占比中大写字母表示同一年度不同海拔梯度植被覆盖度占比间的差异,小写字母表示不同年度同一海拔梯度植被覆盖度占比, $P<0.05$;图不同海拔梯度植被物种数中小写字母表示不同年度同一海拔梯度植物物种数量, $P<0.05$

从 3 个不同海拔高程区段物种数量均值来看(图 4),不同年度间物种数从下层到上层呈现上升趋势,上层(165—175m)区域的物种数量最多,其次是中层(155—165m),下层(145—155m)的物种数量最少。其中,2002 年未蓄水时,下层植被中主要建群物种有 24 种;中层植被中主要建群物种有 28 种;上层植被中主要建群物种有 32 种。2003—2007 年度下层植被中主要建群物种有 9 种;中层植被中主要建群物种有 15 种;上层植被中主要建群物种有 15 种。2008—2012 年度下层植被中主要建群物种有 9 种;中层植被中主要建群物种有 12 种;上层植被中主要建群物种有 15 种。2013—2017 年度下层植被中主要建群物种有 8 种;中层植被中主要建群物种有 10 种;上层植被中主要建群物种有 15 种。2018—2022 年度下层植被中主要建群物种有 7 种;中层植被中主要建群物种有 9 种;上层植被中主要建群物种有 11 种(表 3)。2018—2022 年度录得的各层植被主要建群物种数均不到未蓄水时的三分之一,物种多样性和物种丰富度降低明显(图 2)。主要建群物种中,乔灌木不再具有优势,淹水导致了可以快速生长建立种群的一年生草本植物和耐水特性较高、可以在反复淹水条件下存活的多年生草本植物成为各层次的主要优势物种,且物种数量显著降低(表 3)。

不同海拔梯度植被特征反映了消落带淹水的时间长短和水体深浅,海拔梯度越低,淹水干扰影响越大。不同海拔梯度物种丰度的变化情况表明(图 2)淹水干扰影响越大的区域,植物群落内的物种丰度相对越低;淹水干扰对上层群落植被覆盖度和物种数影响差异不明显($P>0.05$)(图 4),但对植物物种数量的影响存在差异。

表 3 不同海拔梯度植被物种名录

Table 3 Vegetation species at different altitude gradients

物种 Species	年份 Year		
	上层 Upper levels	中层 Middle levels	下层 Lower levels
2002	马尾松、桑树、楝树、黄荆、狼把草、香附子、狗牙根、苍耳、稗、中华蚊母树、野艾蒿、水葱、牛鞭草、莲子草、升马唐、疏花水柏枝、水蓼、鼠鞠草、藿香蓟、黄花酢浆草、苘麻、鳢肠、叶下珠、附地菜、牛筋草、鬼针草、狗尾草、土荆芥、香根草、酢浆草、翅茎冷水花、酸模	马尾松、桑树、黄荆、香附子、狗牙根、苍耳、稗、中华蚊母树、牛鞭草、莲子草、水田稗、疏花水柏枝、水蓼、鼠鞠草、藿香蓟、黄花酢浆草、苘麻、鳢肠、叶下珠、附地菜、牛筋草、鬼针草、狗尾草、碎米莎草、铁苋菜、喜旱莲子草、灯芯草、双穗雀稗	马尾松、桑树、黄荆、香附子、狗牙根、苍耳、稗、中华蚊母树、喜旱莲子草、牛鞭草、飘拂草、水蓼、鼠鞠草、藿香蓟、黄花酢浆草、苘麻、鳢肠、叶下珠、附地菜、牛筋草、鬼针草、狗尾草、升马唐、酸模
2003—2007	苍耳、狗尾草、狗牙根、黄花蒿、狼把草、藜、鳢肠、龙葵、升马唐、水蓼、铁苋菜、尾穗苋、小白酒草、白茅、蜜甘草、马齿苋、飞扬草、碎米莎草、稗	苍耳、狗尾草、狗牙根、黄花酢浆草、黄花蒿、狼把草、鳢肠、升马唐、小飞蓬、铁苋菜、喜旱莲子草、小白酒草、白茅、通泉草	苍耳、狗尾草、狗牙根、黄花酢浆草、白茅、一年蓬、狼把草、鳢肠、升马唐、水蓼、铁苋菜、喜旱莲子草、牛鞭草、野艾蒿
2008—2012	苍耳、狗尾草、狗牙根、黄花蒿、狼把草、藜、鳢肠、龙葵、苘麻、水蓼、铁苋菜、尾穗苋、小白酒草、小蓬草、马唐	苍耳、狗尾草、狗牙根、黄花酢浆草、黄花蒿、狼把草、鳢肠、白茅、水蓼、铁苋菜、喜旱莲子草、小白酒草	苍耳、狗牙根、牛鞭草、水蓼、喜旱莲子草、毛马唐、水蓼、白茅、水葱
2013—2017	狗牙根、牛鞭草、苍耳、鬼针草、野艾蒿、稗、酸模、一年蓬、草木犀、酸模叶蓼、狼把草、香附子、稗、喜旱莲子草、香根草	狗牙根、牛鞭草、喜旱莲子草、异型莎草、黄花酢浆草、香根草、狗尾草、碎米莎草、鬼针草、酸模叶蓼	狗牙根、蜜甘草、牛鞭草、香根草、鳢肠、白茅、水蓼、酸模叶蓼
2018—2022	狗牙根、牛鞭草、苍耳、鬼针草、野艾蒿、稗、酸模、香根草、黄花酢浆草、狼把草、喜旱莲子草	狗牙根、牛鞭草、喜旱莲子草、小白酒草、雾水葛、苘麻、狗尾草、碎米莎草、鬼针草	狗牙根、香附子、牛鞭草、附地菜、异型莎草、白茅、香根草

物种以在所搜索的该年度中文文献所提及的主要植被种群、群落类型为准

2.5 消落带植被变化的影响因子结构方程模型

通过建立的影响因子与植被之间的结构方程模型看(图 5)。年均温、淹水时长和人为干扰对植被变化有正向影响,其中淹水时长($\lambda = 0.48, P < 0.01$)影响最大。相比之下,年降水对植被变化有负向影响($\lambda = -0.46, P < 0.05$)。此外,该模型表明,年均温和淹水时长可能通过影响物种和覆盖度来间接影响植被变化,人为干扰可能通过影响覆盖度来间接影响植被变化,上述三种影响因子表现出正向影响;而年降水可能通过影响覆盖度来间接影响植被变化,此影响因子表现出负向影响。单独从覆盖度和物种看,物种和覆盖度变化也是植被变化的影响因子,其中物种($\lambda = 0.32, P < 0.01$)的影响要大于覆盖度的影响($\lambda = 0.19, P < 0.01$)。从影响因子的

标准化总影响看(图5),人为干扰(标准化总影响为0.30)和淹水时长(标准化总影响为0.46)是植被变化的两个最显著的影响因子,其中年均温、淹水时长、人为干扰总体呈现正向影响、年降水总体呈现负向影响。

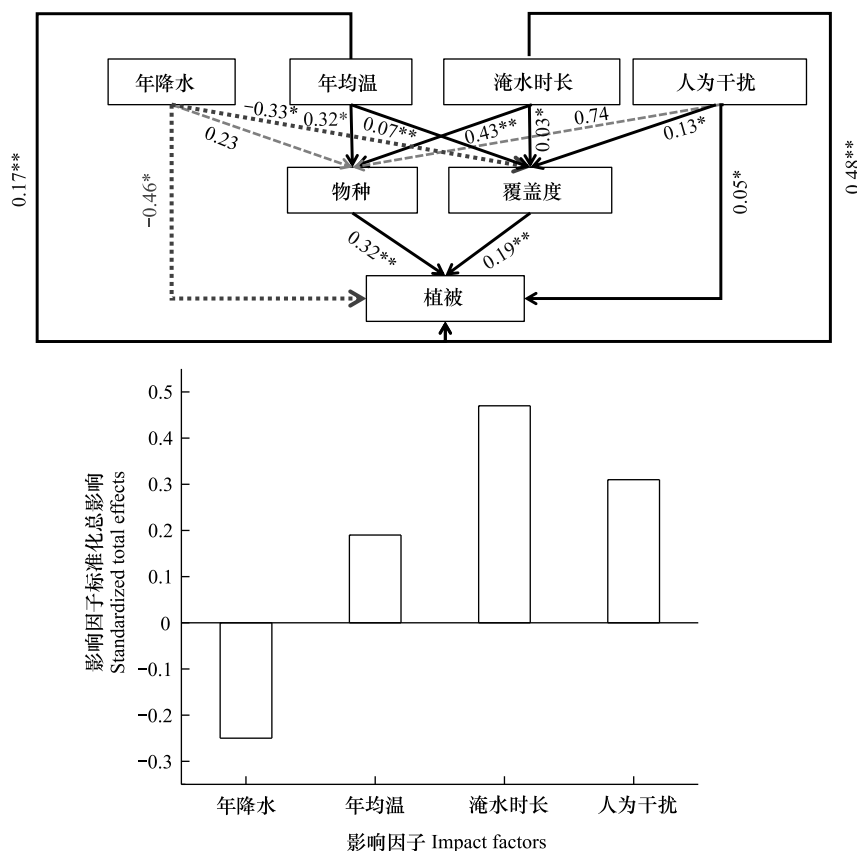


图5 影响因子对植被的直接和间接影响的结构方程模型和影响因子的标准化总影响

Fig.5 Structural equation model of the direct and indirect effects of influencing factors on vegetation and normalized total impact of influencing factors

实线表示正影响路径、点线表示负影响路径、虚线表示无显著影响路径,路径旁的值表示相关系数

3 讨论

3.1 三峡库区消落带植被变化的主要特征及外在影响因素

三峡库区消落带植被物种数在蓄水初期逐渐增加,达到最高峰 481 种,但随着水位波动,到 2022 年仅为 77 种,呈明显减少趋势。物种丰富度和多样性的年平均指数也反映了这一趋势,自蓄水开始至 2018—2022 年度间分别下降了 50% 和 32%,不同生活型植被物种数分别下降了 86.8%、90.7% 和 38.2%。在水库蓄水初期 (2003—2007),不同生活型植被的物种数和总覆盖度显著下降。乔木和灌木的物种数和覆盖度随着蓄水年限的增加而明显下降。在 2010 年后,草本植物的数量增加,但覆盖度降低,表现出复杂的动态调整,多年生植物的数量和覆盖度随淹没年限显著降低,进一步说明水位变化对植被的影响。这与文献中对水位波动引起的湿地植物群落结构变化的观点相符,突出了水位波动对湿地植被覆盖度的影响^[13]。同时,毁灭性的淹水过程对植物物种的演替具有重要影响^[14],其中狗牙根被视作三峡库区消落带最重要的先锋植物与优势植物,被视作是库区生态恢复造林种的推荐植物之一受到广泛关注^[15]。蓄水前海拔 145—175m 间的植被覆盖度无显著差异,蓄水初期,消落带下层植被覆盖度下降明显,满蓄后各年度中,不同海拔梯度间的植被覆盖度整体表现为上层>中层>下层,且上层由于受周期性的水位波动淹水时长影响最小,上层植被受外因干扰后为趋于稳定

始终处于动态平衡中^[16],上层植被覆盖度呈现先降低后增加的趋势。从不同海拔梯度的物种数量均值来看,下层到上层物种数量逐渐上升,而 2018—2022 年度录得的各层植被主要建群物种数均不到未蓄水时期的三分之一,物种多样性和物种丰富度降低明显。这些结果与郑杰等关于水位波动对不同海拔梯度植被群落结构的影响相符^[17],进一步强调了水位变化对植被梯度分布的重要性。结构方程模型表明了多个影响因子对植被变化的综合影响,年均温和淹水时长可以直接和间接影响物种数和覆盖度来影响植被变化,人工干扰可以直接影响植被变化,但只能间接通过影响覆盖度来影响植被变化,年降水可以直接影响植被变化,但只能间接通过影响覆盖度来影响植被变化。年均温、淹水时长和人为干扰对植被变化有正向影响,其中淹水时长的影响最大(标准化总影响为 0.46)。相比之下,年降水对植被变化有负向影响(标准化总影响为-0.25)。表明在消落带自然演替过程中,覆盖度变化受到所有环境因素的影响,植物种类变化主要受到温度和水淹胁迫的影响,说明覆盖度变化可能是植物物种变化的一种响应。

这些特征和影响因素与同类湖泊和水库植被变化的趋势相符^[8,18-19]。水位波动作为水库调蓄的直接结果,对消落带植被产生了深刻的影响。研究表明,水位波动可能引起湿地植物的适应性变化,进而影响其生命周期和群落结构^[20]。湿地植物对水位变化的响应包括生理生态层面的调整,如气孔导度和根系结构的变化,以适应湿润和干旱交替的环境。这种植物生理生态的适应性调整在三峡库区消落带的植被动态中发挥了关键作用,同时也是消落带植被变化的一个重要研究方向^[21]。气候是影响植物生长的关键因素之一,与文中提到的年均温对植被变化的正向影响相吻合,气候因素对植物生长和分布具有显著作用。研究表明,升高的气温可能加速植物的生命周期,推动植被向纬度更高的地区扩展,从而改变植被类型和物种组成^[22]。这一气候驱动的植被变化与三峡库区植被动态的关系值得进一步深入研究。从植物自身的生理生态角度,消落带植被的根系结构和土壤互动也是导致植被变化的重要因素。水位波动引起的湿地土壤湿润度的变化影响植物根系的发育和分布,进而改变消落带植被的空间格局^[23]。此外,消落带植被的适应性进化涉及到根际微生物的互作^[24],这对消落带植被的养分吸收和土壤健康有着重要影响。人为活动对消落带植被的影响主要通过改变土地利用变化,以及农业活动进而影响库区消落带的地表条件^[25-26]。人类活动通过改变地表类型对消落带植被的结构与健康产生重要影响。总的来说,通过综合考虑水位波动、气候条件、人为活动和植物自身生理生态等多个层面的因素,能够更全面地理解三峡库区消落带植被变化的机制^[27]。

3.2 三峡库区消落带植被变化的内在影响因素

三峡库区消落带植被的变化既受到水位波动等外在因素的影响,更深层次地由物种变化和覆盖度变化这两个关键要素相互作用而成。

淹水耐性是植物在湿地环境中适应水位波动的重要特性,也是决定物种演替方向的主要因素之一^[28-29]。随着三峡库区水位的反复上升和下降,植物的淹水耐性可能经历相应的调整。这种适应性变化不仅关系到植物的生存能力,还对湿地植被的整体生态系统结构和物种生存策略产生深刻的影响^[30]。一些研究表明,三峡库区湿地环境和淹水条件导致一些植物的气孔导度和根系结构等生理生态层面的产生适应性调整,以适应湿润和干旱交替的环境^[23]。近年研究发现三峡库区消落带区域入侵植物有扩散传播的风险,入侵植物如鬼针草、喜旱莲子草等具有快速生长、强大的竞争能力和适应性强等特点而快速成为消落带群落的优势植物^[31],对原生植被的生存环境和生态位产生重大威胁,从而对原生植被的生存环境造成竞争压力^[32-33]。而生态位适应性的调整也是物种变化的重要方面,在湿地环境中,植物可以根据生态位的需求,调整其分布和生长策略^[34]。库区植被在适应水域生态位的同时,对其他生态位的适应性产生变化以适应新的环境。这种生态位的调整与库区消落带植被的整体结构和物种组成密切相关。群落中的优势种在湿地生态系统中扮演着重要的生态角色。其扩张和减少就会引起植被结构的巨大变化^[35]。狗牙根等植物被认为是库区消落带最重要的先锋植物与优势植物,其群落优势地位使得其影响力较大。这些植物的数量和覆盖度的波动,直接塑造了库区消落带植被的演变趋势和景观特征^[23],形成新的植被垫面基础,促进植被向该物种所决定的生态适应性方向演变^[36]。植物资源利用特性和生存策略是植物对生态系统中资源的利用方式的表征^[37],消落带中一年生

草本植物对水热条件、土壤养分等资源的利用能力受到环境变化的调节,这可能包括对农田点面源污染等环境压力胁迫导致的适应性变化,使得一些植物更能够在这些特殊条件下存活。植物与土壤的互动关系对植被结构和覆盖度的变化也至关重要,消落带近水区域土壤水分的变化直接影响植物根系的发育和分布,同时与土壤团聚体的形成和结构有关,影响植被的空间格局^[38-39]。植物根系与土壤中的微生物互动也涉及到养分吸收和土壤健康的调节,促进植物生长^[24,40]。

三峡库区消落带植被变化的内在影响因素涉及物种的淹水耐性、生态位适应性、群落优势、资源利用特性和生存策略、与土壤立地条件、与土壤团聚体的互动、对环境的适应性等多个层面^[36]。这些特性相互影响,推动了植被的演变过程。物种变化及其导致的覆盖度变化是三峡库区消落带植被变化的核心,其影响因素之间存在复杂的相互作用关系还需要进一步验证和解释。

3.3 三峡库区消落带植被变化对植被生态恢复的启示

三峡库区消落带植被的变化研究对植被生态恢复提供了重要启示。在物种选择方面,适应性物种的挑选至关重要,这些物种能够有效应对周期性的水淹胁迫,有助于生态系统的恢复。先锋物种和优势植物在消落带裸露区域的建群过程中起着关键作用,因此对这些物种的生态学特性进行深入研究能够指导物种选择和植被恢复。此外,物种的生态位适应性也应考虑在内,确保选择的植物能够充分利用消落带的生态位,促进系统的稳定和功能恢复。生物多样性的维护和增加有助于提高生态系统的稳定性和抗干扰能力。在进行植被恢复工程时,应尽量遵循“最小干预原则”^[29,41],即减少人为干预,利用自然修复过程来完成植被的恢复与重建。根据结果选择狗牙根、牛鞭草、苍耳、酸模叶蓼、稗草等本地适应性强的植物进行生态修复,并尽可能减少对外来物种的引入,可较大程度地促进植被的恢复和生态系统的健康发展。

4 结论

本文通过数据收集与分析对比了三峡库区消落带在蓄水前后及不同年度间的植被变化。蓄水前消落带有 405 种植物,至 2022 年物种数降至 77 种,物种数减少了 81%。物种丰富度和多样性显著下降,指数分别为 0.672 和 0.783。乔灌木植物的物种数量显著减少,分别降至 10、12 和 128 种,乔灌木覆盖度显著下降,而草本植物的覆盖度则显著增加。尤其是狗牙根等多年生和一年生草本植物成为消落带的先锋种和优势种,主导了当前的植物群落。海拔梯度也影响植被分布,上层植被覆盖度显著高于中下层,耐水性强的狗牙根、牛鞭草、苍耳等植物在各层次均成为建群种,且物种数量明显减少。淹水时长是影响消落带植被变化的最显著因素,对物种数量和覆盖度产生了最大的正向影响。

植被变化不仅由外在水位波动等因素决定,更受到物种特性、植被覆盖度的共同作用驱动。适应性强的物种在不断变化的水位环境中表现出较强的定植和扩展能力,推动了植被垫面的演变。这种覆盖度的变化对土壤团聚体、肥力和结构产生反馈作用,进一步影响植物生长条件。因此,在未来的生态修复工作中,应重点研究具有较强适应性和生态位调整能力的物种,探索其生长机理与恢复策略,以提高消落带植被恢复的长期效益与生态稳定性。

参考文献 (References):

- [1] Yang F, Liu W W, Wang J, Liao L, Wang Y. Riparian vegetation's responses to the new hydrological regimes from the Three Gorges Project: Clues to revegetation in reservoir water-level-fluctuation zone. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 89-98.
- [2] Zheng J, Arif M, Zhang S L, Yuan Z X, Zhang L M, Dong Z, Tan X, Charles W, Li C X. The convergence of species composition along the drawdown zone of the Three Gorges Dam Reservoir, China: implications for restoration. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(31): 42609-42621.
- [3] Bao Y H, Gao P, He X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir—a unique geomorphological unit. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 14-24.
- [4] 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. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(5): 603-610.
- [5] 王晓荣, 程瑞梅, 肖文发, 潘磊, 曾立雄. 三峡库区消落带淹水初期主要优势草本植物生态位变化特征. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(3): 404-411.
- [6] 张晟, 杨春华, 雷波, 王业春, 由永飞. 三峡水库蓄水初期消落带植被分布格局. *环境影响评价*, 2013, 35(5): 45-50.

- [7] 董智, 李留彬, 向国伟, 耿倩雯, 殷凡, 郑杰, 李昌晓. 三峡库区忠县消落带植物群落特征及其与环境因子的关系. 西南大学学报: 自然科学版, 2022, 44(7): 1-13.
- [8] Zhang S N, Ye L P, Huang C Q, Wang M X, Yang Y, Wang T W, Tan W F. Evolution of vegetation dynamics and its response to climate in ecologically fragile regions from 1982 to 2020: a case study of the Three Gorges Reservoir area. *Catena*, 2022, 219: 106601.
- [9] Sun R, Liang S M, Qiu S K, Deng W. Patterns of plant species richness along the drawdown zone of the Three Gorges Reservoir 5 years after submergence. *Water Science and Technology*, 2017, 75(10): 2299-2308.
- [10] Wang Q, Yuan X Z, Martin Willison J H, Zhang Y W, Liu H. Diversity and above-ground biomass patterns of vascular flora induced by flooding in the drawdown area of China's Three Gorges Reservoir. *PLoS One*, 2014, 9(6): e100889.
- [11] 张媛媛, 王晓峰, 王铁浩, 袁兴中, 李阳兵, 王可洪. 三峡消落带不同坡度狗牙根及实生土壤生态化学计量特征. 生态学报, 2023, 43(11): 4798-4811.
- [12] Rao J, Tang Q, Duan D Q, Xu Y H, Wei J, Bao Y H, He X B, Collins A L. UAV-based modelling of vegetation recovery under extreme habitat stresses in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of The Total Environment*, 2024, 934: 173185.
- [13] Zhu K W, Chen Y C, Zhang S, Lei B, Yang Z M, Huang L. Vegetation of the water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir at the initial impoundment stage. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21: e00866.
- [14] Blom C. Physiological ecology of riverside species: adaptive responses of plants to submergence. *Annals of Botany*, 74(3): 253-263.
- [15] 董智, 张丽苗, 谭雪, 袁中勋, 郑杰, 李昌晓. 刘割与水淹对三峡库区消落带优势物种狗牙根存活及恢复生长的影响. 生态学报, 2023, 43(6): 2440-2451.
- [16] Van Meerbeek K, Jucker T, Svenning J C. Unifying the concepts of stability and resilience in ecology. *Journal of Ecology*, 2021, 109(9): 3114-3132.
- [17] Zheng J, Arif M, Zhang S L, Yuan Z X, Zhang L M, Li J J, Ding D D, Li C X. Dam inundation simplifies the plant community composition. *Science of the Total Environment*, 2021, 801: 149827.
- [18] 崔红婧, 褚琳, 尹雅琦, 潘妍, 孟红杰, 王天巍. 1990—2020 年三峡库区植被物候时空格局及其演变机制. 生态学报, 2024, 44(9): 3775-3790.
- [19] 江维薇, 查子霞, 肖衡林. 金沙江观音岩水库消落带绝对优势植物的表型可塑性及适应策略. 湖泊科学, 2024, 36(1): 261-273.
- [20] 杨娇, 厉恩华, 蔡晓斌, 王智, 王学雷. 湿地植物对水位变化的响应研究进展. 湿地科学, 2014, 12(6): 807-813.
- [21] 韦颖, 李鹏善, 曹晨亮, 洪为, 袁和忠, 安树青. 酸模叶蓼对水位变化的生长响应. 江苏农业科学, 2016, 45(5): 486-489.
- [22] Franklin J, Serra-Diaz J M, Syphard A D, Regan H M. Global change and terrestrial plant community dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(14): 3725-3734.
- [23] 夏振尧, 闫茹冰, 张伦, 张千恒, 朱志恩, 董欣慧, 向瑞, 代运, 肖海. 狗牙根根系抗拉性能对水淹时长的响应. 农业工程学报, 2023, 39(6): 103-110.
- [24] 谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓. 三峡库区消落带草本植物根际细菌群落季节变化特征及功能预测. 生态学报, 2023, 43(23): 9699-9709.
- [25] 曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 雷静品, 王鹏程, 谭本旺. 三峡库区不同退耕还林模式水土流失特征及其影响因子. 长江流域资源与环境, 2014, 23(1): 146-152.
- [26] Xie Y Q, Wang S, Xiang S J, Wang Z F, Li Y Y, Wang Z S, Zhou M, Wang Y, Gao M. Ecological zoning and dynamic assessment of effectiveness in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Ecological Modelling*, 2024, 487: 110563.
- [27] Chen C D, Ma M H, Wu S J, Jia J S, Wang Y C. Complex effects of landscape, habitat and reservoir operation on riparian vegetation across multiple scales in a human-dominated landscape. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 482-490.
- [28] He J B, Bögemann G M, van de Steeg H M, Rijnders J G, Voesenek L A, Blom C W. Survival tactics of *Ranunculus* species in river floodplains. *Oecologia*, 1999, 118(1): 1-8.
- [29] 饶洁, 唐强, 冯韞, 韦杰, 贺秀斌. 三峡水库消落带生境特征与植被恢复模式. 水土保持学报, 2024, 38(1): 310-318.
- [30] Zhang Q, Visser E J W, de Kroon H, Huber H. Life cycle stage and water depth affect flooding-induced adventitious root formation in the terrestrial species *Solanum dulcamara*. *Annals of Botany*, 2015, 116(2): 279-290.
- [31] 张丽苗, 谭雪, 董智, 郑杰, 袁中勋, 李昌晓. 旱喜莲子草入侵对三峡库区重庆主城河岸带植物多样性的影响. 草业学报, 2022, 31(9): 13-25.
- [32] 黄金夏, 易雪梅, 贾伟涛, 刘莹, 张松林, 李小红, 吴胜军, 马茂华. 三峡库区消落带外来植物入侵与景观基质组成结构的关联性. 应用生态学报, 2022, 33(2): 477-488.
- [33] Wen Y, Su X L, Cai F, Qian R Y, Bejarano M D, Wu S, Yang Q, Liu X D, Zeng B. The differences in plant invasion in two types of shorelines under flow regulation of the Three Gorges Reservoir. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 168892.
- [34] 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): 3228-3240.
- [35] 刘明芹. 三峡库区澎溪河流域消落带植物群落特征及优势种群生态位研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [36] 王小晓. 三峡库区消落带先锋植物及其群落对土壤团聚体稳定性影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [37] 汤章城. 植物对环境的适应和环境资源的利用. 植物生理学通讯, 1994, 30(6): 401-405.
- [38] 童笑笑, 陈春娣, 吴胜军, 贾振毅, 易雪梅, 马茂华. 三峡库区澎溪河消落带植物群落分布格局及生境影响. 生态学报, 2018, 38(2): 571-580.
- [39] Jia W T, Huang P, Zhu K, Gao X, Chen Q, Chen J L, Ran Y G, Chen S S, Ma M H, Wu S J. Zonation of bulk and rhizosphere soil bacterial communities and their covariation patterns along the elevation gradient in riparian zones of three Gorges Reservoir, China. *Environmental Research*, 2024, 249: 118383.
- [40] Rahman M S, Quadir Q F, Rahman A, Asha M N, Chowdhury M A K. Screening and characterization of Phosphorus solubilizing Bacteria and their effect on Rice seedlings. *Research in Agriculture Livestock and Fisheries*, 2015, 1(1): 27-35.
- [41] 窦文清, 贾伟涛, 张久红, 易雪梅, 温兆飞, 吴胜军, 马茂华. 三峡水库消落带植被现状、适生策略及生态修复研究进展. 生态学杂志, 2023, 42(1): 208-218.