

# 三峡库区消落带狗牙根群落生物量和物种多样性对刈割的响应\*

董智<sup>1,2</sup>, 张丽苗<sup>1</sup>, 谭雪<sup>1</sup>, 袁中勋<sup>1</sup>, 李昌晓<sup>1</sup>

(1. 西南大学 生命科学学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 重庆 400715;  
2. 重庆市林业投资开发有限责任公司, 重庆 401120)

**摘要:**【目的】探究三峡库区消落带不同高程狗牙根(*Cynodon dactylon*)群落的生物量和物种多样性对刈割的响应。【方法】在三峡库区汝溪河消落带160 m和170 m高程选择狗牙根群落,设置不刈割、留茬30 cm、留茬20 cm和留茬10 cm共4种刈割强度处理,研究刈割处理后不同高程狗牙根群落生物量和物种多样性的变化。【结果】刈割明显降低了狗牙根的盖度、密度、重要值和地上生物量,且170 m高程处生长的狗牙根生物量下降幅度更大;除了生长在170 m高程经留茬30 cm处理的狗牙根群落以外不同刈割强度处理下的狗牙根群落生物量无统计学意义上的差异,160 m高程处狗牙根群落生物量明显高于170 m高程处狗牙根群落生物量;生长在170 m高程处狗牙根生物量占比与生长在160 m高程处的狗牙根相比下降幅度更大,而狗牙根群落中其他物种的生物量占比随刈割强度增加逐渐上升;刈割处理明显增加了狗牙根群落的丰富度指数、Simpson指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数;群落生物量与物种多样性之间无统计学意义上的相关性,但狗牙根生物量与物种多样性呈统计学意义上的负相关关系( $p < 0.05$ )。【结论】三峡库区消落带160 m高程处生长的狗牙根比170 m高程处生长的狗牙根更能耐受刈割胁迫,一定程度的刈割可以明显提高狗牙根群落的物种多样性。

**关键词:** 三峡库区; 消落带; 刈割; 狗牙根; 生物量; 物种多样性

**中图分类号:** Q14

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6693(2023)02-0065-11

三峡工程建成并投入运行后,三峡库区内形成了面积达350 km<sup>2</sup>的库区消落带。由于三峡大坝“冬蓄夏排”的特殊水位调度方式,使得水库的水文节律变化与自然季节变化相反<sup>[1-2]</sup>。随着三峡库区水文的变化,库区内物种多样性下降、污染物滞留、群落结构化单一、消落带土壤侵蚀等问题日益凸显,库区适生植物在冬季水淹期的分解及养分释放问题也因此得到了广泛的关注和研究<sup>[3-4]</sup>。近些年来,学者们开展了大量有关三峡库区内各种适生植物养分释放的研究,结果表明在水淹期植物释放的氮、磷等营养元素对水体富营养化的贡献不可忽视<sup>[5-6]</sup>,但有关如何消除或减少这种负面影响的研究还不多见。

减少三峡库区植物养分释放最有效的方式为水淹前减少植物地上生物量。刈割作为一种传统的草地人工管理方式,它通过生物量输出、减小光照水分等资源限制、改变种间竞争关系等对生态系统的生产力和物种多样性产生直接或者间接的影响<sup>[7-8]</sup>。长期实践经验证明,刈割可以有效地管理草地的生产力<sup>[9-10]</sup>和去除养分<sup>[11-12]</sup>。植物在受到刈割处理后会利用自身特性对生物量的分配做出调整,如:提高分株的养分供给,往往会表现出补偿性生长<sup>[13]</sup>;但如果刈割强度超过植物的耐受范围,植物常表现为欠生长<sup>[14]</sup>。此外,刈割可以抵消群落中具有高竞争力的优势物种的优势度,促进群落物种多样性的增加<sup>[15]</sup>。与一般陆生环境不同,水库消落带植被会经历水淹一落干的环境变化。因此,对水库消落带植被采取刈割处理后,植物将经历刈割和水淹的双重干扰,而植物在落干期的恢复生长情况还不得而知。

狗牙根(*Cynodon dactylon*)在三峡库区消落带各个高程广泛分布,对三峡库区水位周期性涨落和长时间水淹有极强的适应性,为重要的建群种和优势种,可作为库区人工植被修复的主要物种<sup>[16-17]</sup>。本研究对三峡库区不同高程的狗牙根群落施加不同强度的刈割处理,探究狗牙根群落在水淹结束以后的生长情况以及生物多样性

\* 收稿日期:2022-03-02 修回日期:2022-07-18 网络出版时间:2023-04-20T15:18

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 31960038);重庆市科技兴林项目(No. 2021-9);宁夏回族自治区重点研发计划项目(No. 2020BFG03006);中央林业改革发展资金科技推广示范项目(渝林科推 2020-2)

第一作者简介:董智,男,研究方向为环境生态学,E-mail:zhidong@email.swu.edu.cn;通信作者:李昌晓,男,教授,博士生导师,E-mail:lichangx@email.swu.edu.cn

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20230420.1329.012.html

的变化情况,旨在为三峡库区消落带植被刈割管理提供理论与实践参考。

## 1 材料与方

### 1.1 研究地点与材料

实验样地位于重庆市忠县汝溪河流域(东经  $107^{\circ}32'$ ~ $108^{\circ}14'$ 、北纬  $30^{\circ}03'$ ~ $30^{\circ}35'$ )的消落带植被修复示范基地,面积为  $0.133 \text{ km}^2$ <sup>[18]</sup>。示范基地原为弃耕梯田,本研究团队于 2012 年利用前期研究筛选出适合在三峡库区消落带生长的多年生草本植物狗牙根进行人工草地的恢复和重建,经过多年的自然恢复,现已形成以狗牙根为优势种且长势良好的草本植物群落。

### 1.2 实验设计

为尽可能减少夏季洪汛影响和边缘效应,在消落带 160 m 高程和 170 m 高程各设置 3 条样带,样带之间间距在 50 m 以上。在每条样带内随机布设 4 个  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  大样方,样方之间间距在 1 m 以上;每个样方内狗牙根盖度在 95% 以上,样方四周用塑料管标记。水淹前对狗牙根进行刈割,将每条样带内的 4 个样方分别进行不刈割(NC)、留茬 30 cm(S30)、留茬 20 cm(S20)、留茬 10 cm(S10)共 4 种不同的刈割强度处理。两个高程的植被于 2020 年 9 月中旬三峡水库蓄水前进行刈割,通过刻度尺设定留茬高度后,用镰刀收割留茬以上部分;每种刈割强度 3 次重复,2 个高程的样带内共有 24 个大样方。为防止污染水体,将刈割收获物移出实验基地所在的消落带区域。

### 1.3 调查与取样

于 2021 年 7 月下旬三峡库区退水后对样方进行调查并取样,此时植物经过前期生长,生物量有较高的积累。调查样方内种子植物的种类和数量,每个物种的盖度、高度、多度和频度,以及群落总盖度。测定地上生物量时,在每个样方内随机选择 3 个  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  的小样方<sup>[19]</sup>,齐地剪掉所有植株的地上部分装袋带回实验室,去除杂质后将它们分为狗牙根和其他植物,然后在  $65^{\circ}\text{C}$  下烘干至质量恒定,最后测定质量从而获得植株的地上生物量。地下生物量的测定方法为:用铁铲完整挖出  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  小样方内  $0 \sim 30 \text{ cm}$  土层的所有植物根系,装袋后带回实验室,经冲洗和分离后装入信封,将信封置于  $65^{\circ}\text{C}$  恒温烘箱内烘干至质量恒定,然后测定质量。生物量测定精度为  $0.01 \text{ g}$ 。

### 1.4 测定方法

植物高度采用卷尺测定。采用万分之一电子天平测定植物各部分干质量,单位面积的总生物量为单位面积上植株地上部分与地下部分的生物量之和(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )。由于三峡库区消落带内植物多为草本植物,灌木和乔木较少,因此本研究参考郭燕等人<sup>[20]</sup>的研究,采用相对频度、相对密度及相对盖度作为重要值的计算依据,将上述指标数据求平均值即可得到重要值。

$\alpha$  多样性指数用于群落中植物种类数量和植物间相对多度的测量,主要包括物种丰富度指数( $R$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Simpson 指数( $D$ )和 Pielou 均匀度指数( $E$ )<sup>[21-22]</sup>,它们的具体计算公式分别为: $R = S$ ,  $H' = -\sum P_i \ln P_i$ ,  $D = 1 - \sum P_i^2$ ,  $E = H' / \ln S$ 。其中: $P_i$  为第  $i$  个物种的重要值, $S$  为样方中出现的物种总数<sup>[23]</sup>。

### 1.5 数据处理

用 Excel 2020 软件对原始数据进行处理,所得数据以“平均值±标准误”来表示。用 SPSS 22 软件中双因素方差分析高程、刈割强度及两者交互作用对狗牙根生长和群落物种丰富度指数的影响。采用单因素方差分析揭示同一高程不同刈割强度对狗牙根生长和群落物种丰富度指数的影响,并用 Duncan 法进行多重比较<sup>[24]</sup>;采用独立样本  $t$  检验对同一刈割强度下不同高程处狗牙根的生长、物种丰富度指数差异进行分析。当  $p < 0.05$  时,上述统计分析结果具有统计学意义。用 Origin 8.5 软件进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 刈割和高程对狗牙根种群特征的影响

如表 1 所示,高程和刈割对狗牙根的株高、盖度、密度和重要值的影响在  $p < 0.001$  水平上均具有统计学意义;二者的交互作用对狗牙根的盖度、密度和重要值在  $p < 0.001$  水平上均具有统计学意义,对株高的影响在  $p < 0.05$  水平上具有统计学意义。表 2 显示:1) 生长在 170 m 高程处经过不同强度刈割处理的狗牙根株高无统计学意义上的差异;但与经 NC 处理的狗牙根相比,经 S30、S20 和 S10 处理的狗牙根盖度、密度和重要值均有统

计学意义上的降低( $p < 0.05$ )。2) 生长在 160 m 高程处经 S10 处理的狗牙根株高、盖度和密度与经其他 3 种处理的狗牙根相比有明显降低,且与后三者的这 3 个指标均有统计学意义上的差异( $p < 0.05$ );同时此高程处的狗牙根重要值随刈割强度的增加而逐渐降低,除 S30 与 S20 处理间的数据差异无统计学意义外,其余情况下不同处理间的数据差异在  $p < 0.05$  水平上均具有统计学意义。3) 生长在不同高程经 NC 处理的狗牙根株高和重要值无统计学意义上的差异;不同高程处经 S30 和 S10 处理的狗牙根株高也无统计学意义上的差异;但在其余情况下,生长在 160 m 高程的狗牙根与生长在 170 m 高程的狗牙根在经过同一刈割强度处理后,前者的各项种群特征数据更高,且与后者的差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ )。

表 1 狗牙根种群特征的双因素方差分析

Tab. 1 Two-Way ANOVA for population characteristics of *C. dactylon*

指标	高程		刈割		高程×刈割		指标	高程		刈割		高程×刈割	
	F	p	F	p	F	p		F	p	F	p	F	p
株高	14.59	<0.001	24.15	<0.001	3.645	0.015	密度	175.37	<0.001	54.83	<0.001	11.62	<0.001
盖度	148.35	<0.001	44.80	<0.001	10.89	<0.001	重要值	147.20	<0.001	91.23	<0.001	13.51	<0.001

表 2 刈割及高程对狗牙根种群特征的影响

Tab. 2 Effect of mowing and altitude on the growth of *C. dactylon*

指标	高程/m	NC	S30	S20	S10
株高/cm	170	42.00±5.00 <sup>Aa</sup>	44.67±12.06 <sup>Aa</sup>	43.33±3.51 <sup>Aa</sup>	35.67±7.37 <sup>Aa</sup>
	160	47.67±5.69 <sup>Ab</sup>	48.67±3.79 <sup>Ab</sup>	53.67±3.06 <sup>Ba</sup>	44.00±2.65 <sup>Ab</sup>
盖度/%	170	84.33±6.03 <sup>Aa</sup>	43.00±7.21 <sup>Ab</sup>	27.67±5.51 <sup>Abc</sup>	17.33±4.04 <sup>Ac</sup>
	160	96.67±1.53 <sup>Ba</sup>	85.00±2.00 <sup>Ba</sup>	86.00±3.46 <sup>B</sup>	59.00±14.53 <sup>Bb</sup>
密度/(株·m <sup>-2</sup> )	170	916.67±41.63 <sup>Aa</sup>	433.33±57.74 <sup>Ab</sup>	221.67±82.82 <sup>Ac</sup>	143.33±70.24 <sup>Ac</sup>
	160	1 050.00±50.00 <sup>Ba</sup>	883.33±28.87 <sup>Ba</sup>	900.00±43.59 <sup>Ba</sup>	650.00±160.94 <sup>Bb</sup>
重要值	170	0.77±0.04 <sup>Aa</sup>	0.48±0.02 <sup>Ab</sup>	0.38±0.02 <sup>Ac</sup>	0.29±0.05 <sup>Ad</sup>
	160	0.80±0.06 <sup>Aa</sup>	0.69±0.03 <sup>Bb</sup>	0.67±0.03 <sup>Bb</sup>	0.55±0.05 <sup>Bc</sup>

注:不同小写字母表示同一高程、不同刈割强度处理的狗牙根种群特征数据差异具有统计学意义( $p < 0.05$ ),不同大写字母表示同一刈割强度处理、不同高程的狗牙根种群特征数据具有统计学意义( $p < 0.05$ )。

## 2.2 刈割和高程对狗牙根生物量的影响

研究结果显示,高程对狗牙根各部分生物量的影响均具有统计学意义( $p < 0.01$ );刈割对狗牙根的地上生物量和总生物量的影响也具有统计学意义( $p < 0.01$ ),但它对狗牙根地下生物量的影响无统计学意义;高程和刈割的交互作用对狗牙根各部分生物量的影响均具有统计学意义( $p < 0.05$ )(表 3)。生长在 170 m 高程的狗牙根各部分生物量随刈割强度的增加而逐渐降低,且大部分不同刈割强度处理下的狗牙根生物量数据差异具有统计学意义( $p < 0.05$ )(图 1a、图 1b 和图 1c);生长在 160 m 高程经 S30、S20 和 S10 处理的狗牙根地上生物量明显比生长在统一高程且经 NC 处理的狗牙根地上生物量更低,与后者差异具有统计学意义( $p < 0.05$ )(图 1a),而前三者的地下生物量和总生物量与后者的这两项指标相比无统计学意义上的差异(图 1b 和图 1c)。在各刈割强度处理下,生长在 160 m 高程的狗牙根各部分生物量始终比生长在 170 m 高程的狗牙根各部分生物量更高,且差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ )(图 1a、图 1b 和图 1c)。

## 2.3 刈割和高程对狗牙根群落生物量的影响

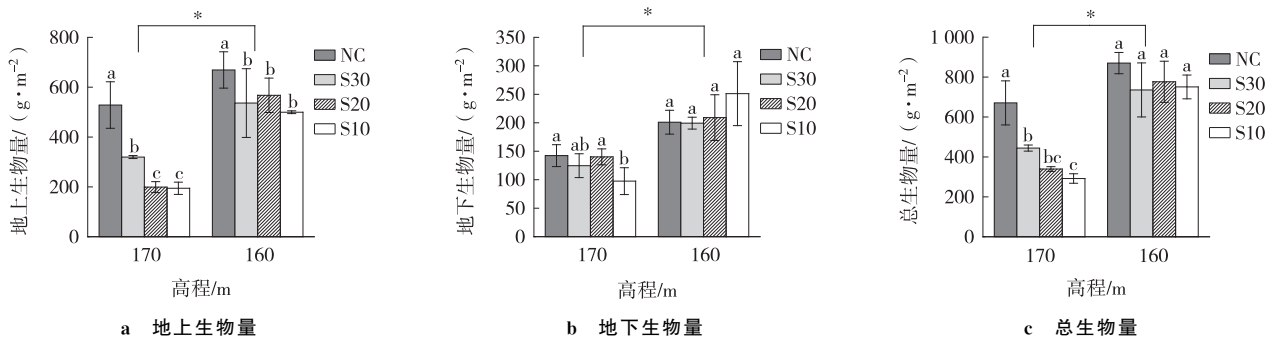
图 2a 显示:随着刈割强度的增加,生长在 170 m 高程的群落生物量呈现出先减少后增加的变化趋势;生长在 160 m 高程的群落生物量随着刈割强度的增加也有类似的变化趋势,但不同强度刈割处理下的群落生物量没有统计学意义上的差异。图 2b 显示:生长在 170 m 和 160 m 的狗牙根生物量占比均随着刈割强度的增加而逐渐降低,且生长在 170 m 高程的狗牙根生物量占比降幅更大。此外,生长在 160 m 高程的狗牙根生物量占比最低可维持在 74%(S10 处理);而其他植物的生物量占比随刈割强度的增加而逐渐上升,在 170 m 高程的 S10 处

理中,其他植物的最高生物量占比可达 67%(图 2b)。

表 3 狗牙根生物量的双因素方差分析

Tab. 3 Two-Way ANOVA for biomass of *C. dactylon*

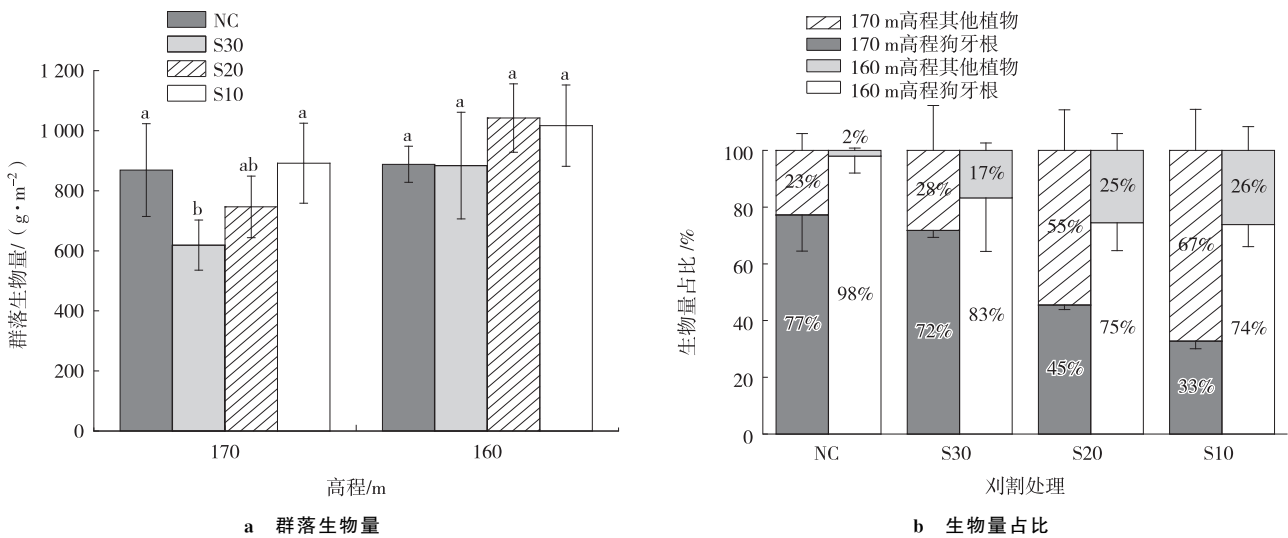
指标	高程		刈割		高程×刈割	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
地上生物量	148.936	<0.001	27.822	<0.001	5.579	0.008
地下生物量	68.251	<0.001	0.580	0.636	4.458	0.019
总生物量	119.200	<0.001	12.137	0.001	3.761	0.032



注：“\*”表示不同高程的狗牙根生物量数据差异具有统计学意义( $p < 0.05$ ),不同小写字母分别表示同一高程、不同刈割强度处理的狗牙根生物量数据差异具有统计学意义( $p < 0.05$ )。

图 1 刈割和高程对狗牙根生物量的影响

Fig. 1 Effect of mowing and altitude on biomass of *C. dactylon*



注:不同小写字母分别表示同一高程、不同刈割强度处理的群落生物量数据差异具有统计学意义( $p < 0.05$ )。其他植物主要包括酸浆 (*Physalis alkekengi*)、狼把草 (*Bidens tripartite*)、苍耳 (*Xanthium strumarium*)、酸模叶蓼 (*Polygonum lapathifolium*)、稗 (*Echinochloa crusgalli*)、鳢肠 (*Eclipta prostrata*) 等。

图 2 刈割和高程对狗牙根群落生物量的影响

Fig. 2 Effect of mowing and altitude on *C. dactylon* community biomass

2.4 刈割和高程对狗牙根群落多样性的影响

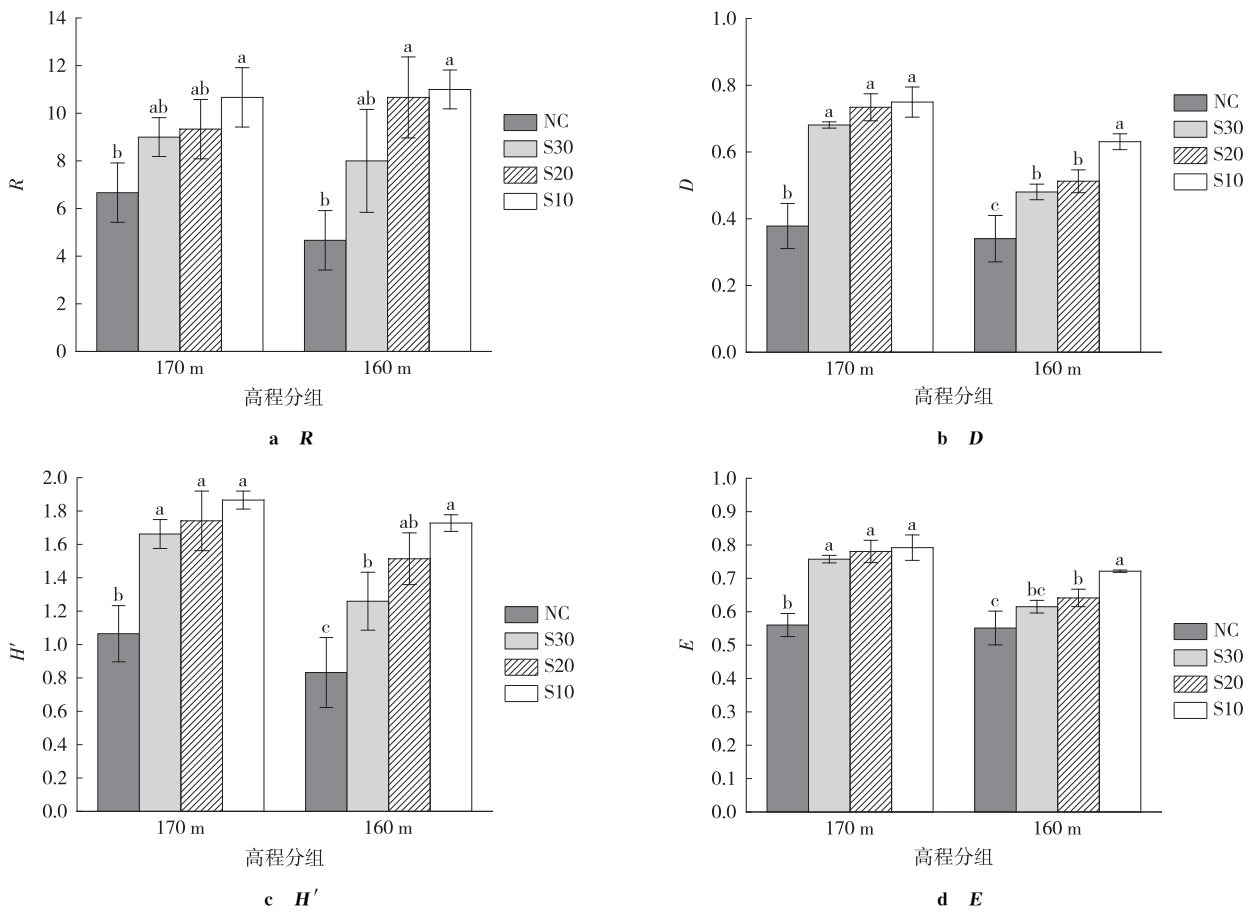
如表 4 所示,高程对 *R* 无统计学意义上的影响,但对 *H'*、*D* 和 *E* 均有统计学意义上的影响( $p < 0.001$ );刈割对上述各多样性指标均有统计学意义上的影响( $p < 0.001$ );刈割与高程的交互作用对 *D* 和 *E* 有统计学意义上的影响( $p < 0.05$ )。 *R* 在 160 m 和 170 m 高程均随刈割强度的增加而逐渐增加,且 S10 处理与 NC 处理的该指标数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ )(图 3a)。生长在 160 m 高程的狗牙根群落 *H'*、*D* 和 *E* 随刈割强度

的增加而逐渐上升,且 S10 处理与 NC 处理的这 3 个多样性指数数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ ) (图 3b~d)。生长在 170 m 高程经 S10、S20 和 S30 处理的狗牙根群落的  $H'$ 、 $D$  和  $E$  均明显高于同一高程处经 NC 处理狗牙根群落的这 3 个多样性指数,差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ );但不同刈割强度处理的狗牙根群落的  $H'$ 、 $D$  和  $E$  无统计学意义上的差异(图 3b~d)。

表 4 群落物种多样性双因素方差分析结果

Tab. 4 Results of Two-Way ANOVA analysis of species diversity in *C. dactylon* dominated community

指标	高程		刈割		高程×刈割		指标	高程		刈割		高程×刈割	
	F	P	F	P	F	P		F	P	F	P	F	P
R	0.235	0.634	10.922	<0.001	1.137	0.364	$H'$	11.511	<0.001	25.339	<0.001	0.578	0.638
D	41.249	<0.001	44.712	<0.001	4.224	0.020	E	34.684	<0.001	31.660	<0.001	4.293	0.021



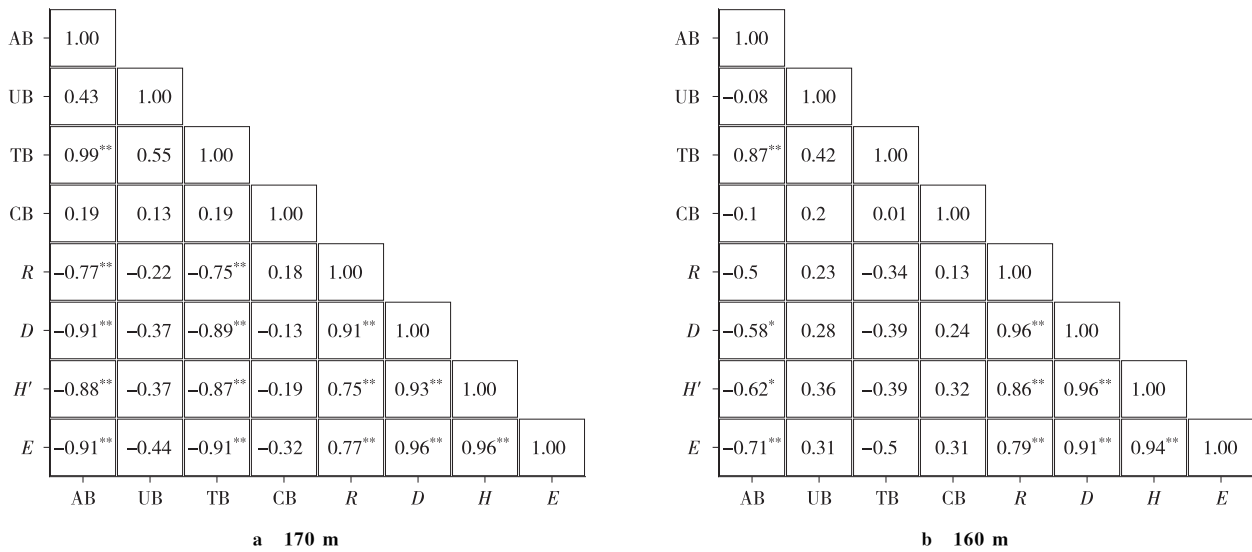
注:不同小写字母表示同一高程、不同刈割强度处理的狗牙根群落多样性指数的数据差异具有统计学意义( $p < 0.05$ )。

图 3 刈割对不同高程狗牙根群落物种多样性的影响

Fig. 3 Effect of mowing on species diversity in *C. dactylon* dominated community

2.5 狗牙根群落物种多样性与生物量的相关性

图 4a 显示:在 170 m 高程处生长的狗牙根地上生物量与它的总生物量呈正相关关系,且相关关系在  $p < 0.01$  水平上具有统计学意义;各物种多样性指数两两之间的正相关关系具有统计学意义( $p < 0.01$ );狗牙根的地上生物量和总生物量与物种多样性指数之间均呈负相关关系,且相关关系在  $p < 0.01$  水平上具有统计学意义。由图 4b 可知:生长在 160 m 高程的狗牙根地上生物量与它的总生物量之间呈正相关关系,且相关关系具有统计学意义( $p < 0.01$ );各物种多样性指标两两之间的正相关关系具有统计学意义( $p < 0.01$ );狗牙根的地上生物量与  $H'$ 、 $D$  和  $E$  之间的负相关性均具有统计学意义( $p < 0.05$ )。



注：“\*”“\*\*”分别表示相关关系在  $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$  水平上具有统计学意义。AB 为狗牙根的地上生物量；UB 为狗牙根的地下生物量；TB 为狗牙根的总生物量；CB 为群落生物量。

图 4 物种多样性与生物量的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between species diversity and biomass

### 3 讨论

#### 3.1 刈割对狗牙根群落生物量分配的影响

有研究表明,水淹对植物的影响因物种而异,且不同的植物也表现出不同的适应策略<sup>[25-26]</sup>。湿地植物通过最优的生物量分配策略以适应水淹环境,湿地植物生物量分配模式的可塑性是应对环境变化的重要适应策略之一<sup>[27-28]</sup>。三峡库区消落带的狗牙根经过长期的水淹环境胁迫,耐水淹能力持续增强,能在长期水淹中保持高存活率,在三峡库区春夏季出露期迅速恢复生长<sup>[17,29]</sup>。何蕊廷等人<sup>[30]</sup>发现:三峡库区消落带植物生物量随高程增加呈先增加后减少的变化趋势,且高耐淹低竞争能力型植物如狗牙根、扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa*)等的生物量变化趋势与之类似。而本研究发现:160 m 高程处生长的狗牙根在盖度、密度和生物量方面均比 170 m 处生长的狗牙根更高,此外 160 m 高程的狗牙根群落生物量也有比 170 m 高程的狗牙根群落生物量更高的趋势。狗牙根在较高海拔处表现为直立生长,这与它和一年生植物之间的光资源竞争有关;而在中等海拔处,狗牙根存在多种生长模式,如匍匐生长、直立生长和簇状生长,这样可以增加该物种的叶片覆盖率并增强光合作用<sup>[31]</sup>。因此,这一结果与本研究结果基本一致。刈割对群落生产力的影响目前无统一的结论,补偿性生长是植物对刈割的积极反应<sup>[32]</sup>,刈割后的植物可能表现出等补偿、欠补偿或过度补偿的生长,这取决于刈割与未刈割草地(对照)是否具有相同、更少或更多的地上累积生物量<sup>[33-34]</sup>。适度割草可以提高草地生产力,过长或过短的留茬均不利于生物量积累,刈割后优势植物凋落物的减少有利于其他物种获取更多的光照,加速后者的生长和扩散<sup>[15,35]</sup>。三峡库区消落带春夏季出露以后,狗牙根经过刈割处理而自身优势度降低,这就会加速群落中酸浆、狼把草、苍耳、酸模叶蓼、稗等其他植物的生长,以此补偿狗牙根损失的生物量,因而最终体现为:S30、S20 和 S10 处理下狗牙根群落生物量与 NC 处理下相比无明显下降,而狗牙根的生物量随刈割强度增加而逐渐降低(图 2a)。此外,生长在 170 m 高程处经 S30 处理的狗牙根群落生物量明显低于同一高程处经其他处理的狗牙根群落生物量(图 2b),这应该与 S30 处理对狗牙根群落生长干扰强度不大(未达到中等强度干扰水平)、其他一年生植物生长受限、狗牙根无明显的补偿性生长等因素有关<sup>[36]</sup>。

#### 3.2 刈割对狗牙根群落物种多样性的影响

物种沿水淹梯度的分布通常与自身耐淹性密切相关<sup>[25,37]</sup>,三峡库区消落带水淹强度和出露时间与物种多样性呈现负相关性,物种多样性随海拔高程的增加而逐渐上升<sup>[38]</sup>。本研究在比较了经过长期恢复的生长在两个高程的狗牙根群落的 R、H'、D、E 等 4 个多样性指数差异后发现:无论刈割强度如何,两个高程的狗牙根群的 R 无统计学意义上的差异;与生长在 160 m 高程的狗牙根群落相比,部分刈割处理下生长在 170 m 高程的狗牙根群

落的  $H'$ 、 $D$  和  $E$  明显更高(图 3b~d)。刈割处理后,随着狗牙根的优势地位降低,酸浆、狼把草、苍耳、酸模叶蓼、稗等一年生植物对光照和养分的竞争能力增强,它们的优势度随刈割强度的增加而上升。由图 5 可知,本研究区域的 170 m 高程处出露时间较 160 m 高程处出露时间更长。因此,在 170 m 高程的植物恢复生长时间更长,能够满足不同生活型植物的生长要求,在  $R$  没有明显变化的前提下非狗牙根物种的重要值增加,因此相关指标明显比 160 m 高程处狗牙根群落的这些指标更高,这与王国良<sup>[39]</sup>和穆建平<sup>[40]</sup>的研究一致。有研究发现:一年生植物繁殖方式主要为种子繁殖,种子质量较小但具有保护组织,适宜水媒传播,且可以在土壤中存活较长时间,加上一年生植物的生活史与三峡库区落干期大致相近,因此经刈割处理后的环境条件适宜这些植物迅速萌发和生长<sup>[39,41]</sup>。与 170 m 高程位置相比,160 m 高程位置的水淹时间更长,种子库受水淹影响更大,狗牙根在 160 m 高程处受刈割的影响明显小于在 170 m 高程处,可能是因为 160 m 高程处一年生植物种子的萌发受到更强的限制,狗牙根的竞争力始终比一年生植物更强并维持在较高水平<sup>[42]</sup>。在本研究中,刈割对 170 m 高程处狗牙根群落的各多样性指数均有明显的提升作用,但经不同刈割强度处理的狗牙根群落的各多样性指数没有统计学意义上的差异;160 m 高程处狗牙根群落的 4 个多样性指数随刈割强度的增加而增加,这种变化也与 160 m 高程处狗牙根的优势度下降有关。群落优势种过量积累凋落物会降低土壤表面的辐照度、形成物理屏障或改变竞争环境,从而抑制种子萌发,降低物种数量<sup>[43]</sup>。刈割通过去除部分地上生物量和移除凋落物,能够增加光照与水分的利用效率,并为低竞争力物种提供机会,促进一年生植物的生长<sup>[7,44]</sup>。

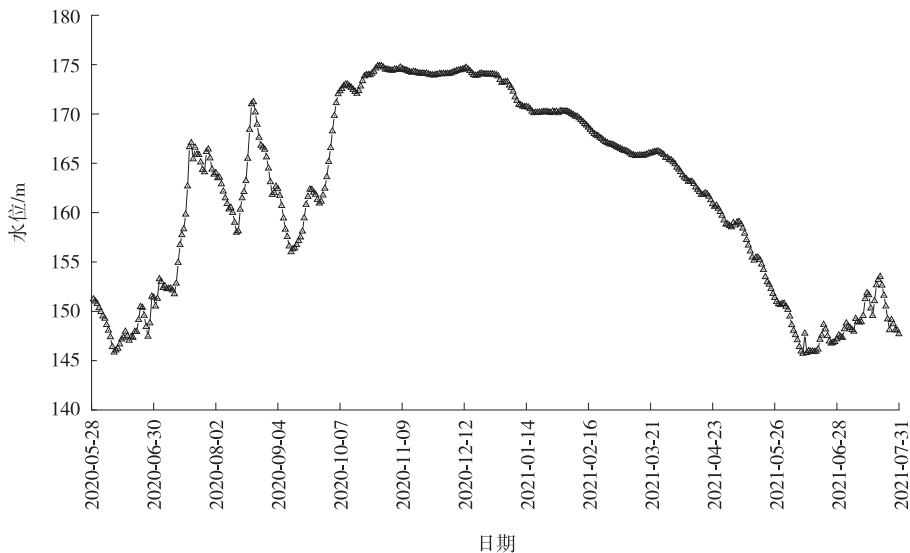


图 5 忠县汝溪河 2020 年 5 月—2021 年 7 月水位变化

Fig. 5 Water level change of Ruxi river in Zhongxian county from May 2020 to July 2021

### 3.3 生物量与物种多样性的相关性

探究物种多样性与生产力之间的相互关系是生物多样性与生态过程研究中的一项重要内容<sup>[39,45]</sup>。当刈割、放牧等外界干扰导致植物的部分生物量或功能群被去除后,补偿效应成为了影响生物多样性和生物量之间关系的重要机制,它的作用强度和方向可以导致不同的生物多样性与生产力关系<sup>[46]</sup>。根据补偿系数的数值,其中的相关性格局主要表现为随群落生产力的增加单调上升、单调下调和呈现单峰函数关系(即在中等生产力水平时物种多样性最高)<sup>[47-48]</sup>。

在本研究中,物种多样性与 170 m 高程处狗牙根地上、总生物量和 160 m 高程处狗牙根地上生物量呈统计学意义上的负相关关系( $p < 0.05$ );物种多样性也与 170 m 和 160 m 高程处狗牙根群落生物量分别呈正相关关系和负相关性关系,但不具有统计学意义。这一结果表明刈割处理后群落补偿性生长不明显,但会使狗牙根表现出明显的欠补偿性生长(图 4),与其他已有的研究结果类似<sup>[39,49]</sup>。此外,本研究还发现生产力和物种多样性之间未表现出“单峰”变化趋势,这可能与消落带季节性水淹有关:周期性的水淹—落干—水淹环境可以为消落带输送大量的一年生植物种子,加上刈割处理降低了狗牙根的优势度,在资源分配改变的情况下,土壤种子库的种子萌发增加了物种多样性,一年生植物生物量也因此增加<sup>[50]</sup>。在本研究中,刈割干扰后群落生产力和物种多样性的关系可能处于“单峰”上升段,未达到中度干扰水平,这一情况也表明三峡库区中以狗牙根为单一优势种的

群落具有较高的抗干扰能力<sup>[31,51]</sup>。与此同时,本研究还发现季节性水淹与刈割等生物量去除手段相结合,可以削弱水淹诱导的狗牙根等高竞争力植物的优势,促进群落向多物种发展,并使不同生存策略的植物共生<sup>[44]</sup>。

## 4 结论

本研究结果显示:刈割处理对生长在三峡库区消落带 160 m 和 170 m 高程的狗牙根生长和生物量分配均有明显影响,且对 170 m 高程处生长的狗牙根影响更高;刈割处理后狗牙根群落未表现出明显的补偿性生长现象,其中生长在 170 m 高程经留茬 30 cm 处理的狗牙根群落生物量明显比经其他刈割强度处理的狗牙根群落生物量更低;狗牙根在群落中的生物量占比随刈割强度增加而逐渐降低,但生长在 170 m 高程的狗牙根生物量占比下降幅度更大,刈割处理明显增加了狗牙根群落中其他物种的生物量占比;刈割处理明显增加了各高程狗牙根群落的  $R$ 、 $H'$ 、 $D$ 、 $E$  等 4 个多样性指数;物种多样性与群落生物量之间无统计学意义上的相关性,但与狗牙根呈现统计学意义上的负相关性( $p < 0.05$ )。总之,三峡库区消落带 160 m 高程处生长的狗牙根比 170 m 高程处生长的狗牙根更能耐受刈割胁迫,一定程度的刈割可以明显提高狗牙根群落的物种多样性。

## 参考文献:

- [1] 王婷. 落羽杉和立柳根系代谢产物对三峡库区消落带冬季水淹的响应[D]. 重庆:西南大学,2018.  
WANG T. The responses of the root metabolites of *Taxodium distichum* and *Salix matsudana* to winter submergence in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [2] 韩文娇. 水淹与干旱胁迫对牛鞭草和狗牙根光合及营养元素含量的影响[D]. 重庆:西南大学,2016.  
HAN W J. Effects of flooding and drought stress on photosynthesis and nutrient contents of photosynthesis and nutrient contents of *Hemarthria altissima* and *Cynodon dactylon*[D]. Chongqing: Southwest university, 2016.
- [3] XIAO L W, ZHU B, KUMWIMBA M N, et al. Plant soaking decomposition as well as nitrogen and phosphorous release in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 592: 527-534.
- [4] 肖丽微, 朱波. 水环境条件对三峡库区消落带狗牙根氮磷养分淹水浸泡释放的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(11): 4580-4588.  
XIAO L W, ZHU B. Impacts of environmental conditions on the soaking release of nitrogen and phosphorus from *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Region[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(11): 4580-4588.
- [5] CHEN X, ZHANG S, LIU D, et al. Nutrient inputs from the leaf decay of *Cynodon dactylon* (L.) Pers in the water level fluctuation zone of a Three Gorges tributary[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 718-723.
- [6] 王建超, 朱波, 汪涛, 等. 三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验[J]. *环境科学*, 2012, 33(4): 1144-1151.  
WANG J C, ZHU B, WANG T, et al. Nitrogen and phosphorus release from herbaceous vegetation under simulated inundation experiment of water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(4): 1144-1151.
- [7] 孙宇, 张峰, 郑佳华, 等. 刈割留茬高度对大针茅草原物种多样性及地上生物量的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(8): 1859-1864.  
SUN Y, ZHANG F, ZHENG J H, et al. Effects of mowing stubble height on species diversity and aboveground biomass of *Stipa grandis* steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(8): 1859-1864.
- [8] CARSON B D, LISHAWA S C, TUCHMAN N C, et al. Harvesting invasive plants to reduce nutrient loads and produce bioenergy: An assessment of Great Lakes coastal wetlands[J]. *Ecosphere*, 2018, 9(6): e02320.
- [9] YANG Z P, MINGGAGUD H, BAOYIN T, et al. Plant production decreases whereas nutrients concentration increases in response to the decrease of mowing stubble height[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 253: 109745.
- [10] ZHENG Y C, WANG X C, GE Y, et al. Effects of annual harvesting on plants growth and nutrients removal in surface-flow constructed wetlands in Northwestern China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 83: 268-275.
- [11] HU L M, HU W P, DENG J C, et al. Nutrient removal in wetlands with different macrophyte structures in eastern Lake Taihu, China[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(12): 1725-1732.
- [12] ÁLVAREZ J A, BÉCARES E. The effect of plant harvesting on the performance of a free water surface constructed wetland [J]. *Environmental Engineering Science*, 2008, 25(8): 1115-1122.
- [13] 王童童. 河岸带优势植物羊蹄对去叶胁迫的生理生态响应特征[D]. 南昌:江西师范大学, 2018.  
WANG T T. The physiological and ecological response characteristics of the dominant plant *Rumex japonicus* Houtt. in riparian zone under the stress of artificial defoliation[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2018.



- [14] JOHNSON O F, LISHAWA S C, LAWRENCE B A. Submerged harvest reduces invasive *Typha* and increases soil macronutrient availability[J]. *Plant and Soil*, 2019, 442(1/2):157-167.
- [15] SUNDBERG S. Quick target vegetation recovery after restorative shrub removal and mowing in a calcareous fen[J]. *Restoration Ecology*, 2012, 20(3):331-338.
- [16] LI Q. Influence of water level on *Cynodon dactylon* population in water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 295/296/297/298:1857-1861.
- [17] 谭淑端, 朱明勇, 党海山, 等. 三峡库区狗牙根对深淹胁迫的生理响应[J]. *生态学报*, 2009, 29(7):3685-3691.  
TAN S R, ZHU M Y, DANG H S, et al. Physiological responses of bermudagrass (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) to deep submergence stress in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7):3685-3691.
- [18] 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.
- [19] DWIRE K A, KAUFFMAN J B, BROOKSHIRE E N J, et al. Plant biomass and species composition along an environmental gradient in montane riparian meadows[J]. *Oecologia*, 2004, 139(2):309-317.
- [20] 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.  
GUO Y, YANG S, SHEN Y F, et al. Study on the natural distribution characteristics and community species diversity of existing plants in the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12):4255-4265.
- [21] 余飞燕, 王坤悦, 叶鑫, 等. 金马河温江段河岸带不同生境草本群落物种多样性和生物量变化研究[J]. *草地学报*, 2020, 28(3):793-800.  
YU F Y, WANG K Y, YE X, et al. Research on species diversity and biomass variation of herbaceous community in different habitats in Wenjiang Section of Jinma River[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(3):793-800.
- [22] 孙鹏飞, 沈雅飞, 王丽君, 等. 三峡库区秭归段水位消落带草本植物多样性分析[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(6):96-104.  
SUN P F, SHEN Y F, WANG L J, et al. Herb species diversity in the water-level-fluctuation zone in Zigui Section of Three Gorges Reservoir Area[J]. *Forest Research*, 2020, 33(6):96-104.
- [23] 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.  
WANG J C, ZHU B, WANG T. Characteristics of restoration of natural herbaceous vegetation of typical water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(5):603-610.
- [24] 谢婷婷. 模拟三峡消落带泥沙埋深对几种一年生草本枯落物分解及养分释放的影响[D]. 重庆:西南大学, 2020.  
XIE T T. Effect of different simulative sediment depths on litter decomposition and nutrient release characteristics of several annual herbaceous species in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [D]. Chongqing: Southwest university, 2020.
- [25] 李亚芳, 陈心胜, 项文化, 等. 不同高程短尖苔草对水位变化的生长及繁殖响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(7):1959-1966.  
LI Y F, CHEN X S, XIANG W H, et al. Effects of water levels on the growth and reproductive characteristics of *Carex brevicuspis* growing on sites with different elevations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(7):1959-1966.
- [26] LEDESMA J L J, GRABS T, BISHOP K H, et al. Potential for long-term transfer of dissolved organic carbon from riparian zones to streams in boreal catchments[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(8):2963-2979.
- [27] RUBIO G, LAVADO R S. Acquisition and allocation of resources in two waterlogging-tolerant grasses[J]. *New Phytologist*, 1999, 143(3):539-546.
- [28] McCONNAUGHAY K D M, COLEMAN J S. Biomass allocation in plants: ontogeny or optimality? a test along three resource gradients[J]. *Ecology*, 1999, 80(8):2581-2593.
- [29] 韩文娇, 白林利, 李昌晓. 水淹胁迫对狗牙根光合、生长及营养元素含量的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25(5):49-59.  
HAN W J, BAI L L, LI C X. Effects of flooding on photosynthesis, growth and nutrient content of *Cynodon dactylon* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(5):49-59.
- [30] 何蕊廷, 杨康, 曾波, 等. 三峡水库消落区植被在差异性水淹环境中的分布格局[J]. *生态学报*, 2020, 40(3):834-842.  
HE R T, YANG K, ZENG B, et al. Distribution pattern of vegetation in water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir as affected by differential flooding regimes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3):834-842.

- [31] ZHANG A Y, XIE Z Q.  $C_4$  herbs dominate the reservoir flood area of the Three Gorges Reservoir[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 755: 142479.
- [32] ZHAO W, CHEN S P, LIN G H. Compensatory growth responses to clipping defoliation in *Leymus chinensis* (Poaceae) under nutrient addition and water deficiency conditions[J]. Plant Ecology, 2008, 196(1): 85-99.
- [33] LISHAWA S C, LAWRENCE B A, ALBERT D A, et al. Invasive species removal increases species and phylogenetic diversity of wetland plant communities[J]. Ecology and Evolution, 2019, 9(11): 6231-6244.
- [34] LIU X, MA Z W, HUANG X T, et al. How does grazing exclusion influence plant productivity and community structure in alpine grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau?[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 23: e01066.
- [35] LIU Y S, PAN Q M, LIU H D, et al. Plant responses following grazing removal at different stocking rates in an Inner Mongolia grassland ecosystem[J]. Plant and Soil, 2011, 340(1/2): 199-213.
- [36] 王志锋, 王多伽, 于洪柱, 等. 刈割时间与留茬高度对羊草草甸草产量和品质的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(2): 276-282.  
WANG Z F, WANG D J, YU H Z, et al. Effects of cutting time and stubble height on hay yield and quality of *Leymus chinensis* meadow[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(2): 276-282.
- [37] VERVUREN P J A, BLOM C W P M, De KROON H. Extreme flooding events on the Rhine and the survival and distribution of riparian plant species[J]. Journal of Ecology, 2003, 91(1): 135-146.
- [38] 刘维擘, 王杰, 王勇, 等. 三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5454-5466.  
LIU W W, WANG J, WANG Y, et al. The differences of plant community diversity among the different altitudes in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5454-5466.
- [39] 王国良, 吴波, 杨秋玲, 等. 刈割对灌草丛草地植物多样性和生产力的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(6): 1020-1025.  
WANG G L, WU B, YANG Q L, et al. Effect of cutting on grassland species diversity and productivity of shrub-grass in hilly areas[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(6): 1020-1025.
- [40] 穆建平. 三峡库区消落带植被的生态学研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.  
MU J P. Ecological studies of vegetation in Three Gorges Reservoir hydro-fluctuation zone [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [41] 高芳. 三峡水库消落区地表植被及其土壤种子库时空动态研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2017.  
GAO F. Temporal and spatial variation of vegetation and soil seed bank in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2017.
- [42] SCHOOLER S S, COOK T, PRICHARD G, et al. Disturbance-mediated competition: the interacting roles of inundation regime and mechanical and herbicidal control in determining native and invasive plant abundance[J]. Biological Invasions, 2010, 12(9): 3289-3298.
- [43] DEÁK B, VALKÓ O, KELEMEN A, et al. Litter and graminoid biomass accumulation suppresses weedy forbs in grassland restoration[J]. Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology, 2011, 145(3): 730-737.
- [44] GERARD M, EL KAHLOUN M, RYMEN J, et al. Importance of mowing and flood frequency in promoting species richness in restored floodplains[J]. Journal of Applied Ecology, 2008, 45(6): 1780-1789.
- [45] 马维伟, 李广, 石万里, 等. 甘肃尕斯湖湿地退化过程中植物生物量及物种多样性变化动态[J]. 草地学报, 2016, 24(5): 960-966.  
MA W W, LI G, SHI W L, et al. Changes of plant biomass and species diversity in degradation process of Gahai Wetland in Gansu Province[J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(5): 960-966.
- [46] PAN Q M, SYMSTAD A J, BAI Y F, et al. Biodiversity-productivity relationships in a natural grassland community vary under diversity loss scenarios[J]. Journal of Ecology, 2021, 110(1): 210-220.
- [47] 李晓彤. 施肥和刈割对羊草草地生产力与物种多样性的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2016.  
LI X T. Effects of fertilization and clipping on productivity and species diversity in *Leymus chinensis* grassland [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2016.
- [48] 杨利民, 周广胜, 李建东. 松嫩平原草地群落物种多样性与生产力关系的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 589-593.  
YANG L M, ZHONG G S, LI J D. Relationship between productivity and plant species diversity of grassland communities in Songnen Plain of Northeast China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(5): 589-593.
- [49] LOU Y J, PAN Y W, GAO C Y, et al. Response of plant height, species richness and aboveground biomass to flooding gradient along vegetation zones in floodplain wetlands, Northeast China[J]. PLoS One, 2016, 11(4): e153972.
- [50] BISSELS S, DONATH T W, HÖLZEL, N, et al. Effects of different mowing regimes on seedling recruitment in alluvial grasslands[J]. Basic and Applied Ecology, 2006, 7(5): 433-442.

- [51] LIN J J, ZHOU S, LIU D et al. Relative contribution of environmental and nutritional variables to net primary production of *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers in the riparian zone of a Three Gorges tributary[J]. Ecology and Evolution, 2020, 10(14): 7073-7081.

## Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

### Effects of Mowing on Biomass and Species Diversity of *Cynodon dactylon* Community in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area

DONG Zhi<sup>1,2</sup>, ZHANG Limiao<sup>1</sup>, TAN Xue<sup>1</sup>, YUAN Zhongxun<sup>1</sup>, LI Changxiao<sup>1</sup>

(1. Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in the Three Gorges Reservoir Region, Key Laboratory of Eco-environments in the Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715;

2. Chongqing Forestry Investment Development Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

**Abstract:** [Purposes] To investigate the effect of mowing on the species diversity and biomass of *Cynodon dactylon* communities growing at different elevations in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir Area (TGRA). [Methods] *C. dactylon* communities in the riparian zones of 160 m and 170 m in the Ruxi River were selected. The effects of elevation and mowing on community biomass and species diversity were studied by using no mowing control, stubble 30 cm, stubble 20 cm, and stubble 10 cm mowing treatments. [Findings] Mowing significantly reduced the coverage, density, important value, and aboveground biomass of *C. dactylon*, and the biomass of *C. dactylon* decreased more at 170 m elevation. There was an insignificant difference in *C. dactylon* community biomass under different mowing intensities (except for *C. dactylon* communities grown at 170 m elevation treated with stubble 30 cm), and the *C. dactylon* community biomass at 160 m elevation was significantly higher than that at 170 m elevation. The proportion of *C. dactylon* biomass at 170 m elevation decreased more than that at 160 m elevation, mowing significantly increased the biomass of other species in the community. The mowing treatment significantly increased the Species richness, the Simpson index, the Shannon-Wiener index, and the Pielou evenness index. There was no significant correlation between community biomass and species diversity, but there was a significantly negative correlation between *C. dactylon* community biomass and species diversity. [Conclusions] *C. dactylon* grown at 160 m elevation were more tolerant of mowing stress than at 170 m elevation in the TGRA, a certain degree of mowing can significantly increase the species diversity of the *C. dactylon* community.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir Area; riparian zone; mowing; *Cynodon dactylon*; biomass; species diversity

(责任编辑 方 兴)