

DOI: 10.5846/stxb201809061909

李强, 丁武泉, 王书敏, 朱启红, 杨俊, 柯胜钱, 秦露, 杨林静, 郑捷月, 孟燧雯. 三峡库区多年高水位运行对消落带狗牙根生长恢复的影响. 生态学报, 2020, 40(3): 985-992.

Li Q, Ding W Q, Wang S M, Zhu Q H, Yang J, Ke S Q, Qin L, Yang L J, Zheng J Y, Meng Y W. Influence of multi-year high water level running on growth recovery of *Cynodon dactylon* population in water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3): 985-992.

## 三峡库区多年高水位运行对消落带狗牙根生长恢复的影响

李 强\*, 丁武泉, 王书敏, 朱启红, 杨 俊, 柯胜钱, 秦 露, 杨林静, 郑捷月, 孟燧雯

环境材料与修复技术重庆市重点实验室, 重庆文理学院, 重庆 402160

**摘要:**为深入了解三峡库区多年高水位运行对消落带优势植物生长恢复的影响, 分别于 2008 年和 2017 年定量调研了库区长寿段消落带狗牙根 (*Cynodon dactylon*) 种群的变化, 探讨了库区高水位运行对消落带狗牙根萌发、生长和物质分配的影响。结果表明, 多年的高水位运行导致不定芽形成和萌发显著被促进, 形成更多的分株; 高水位运行导致狗牙根分株的株高、茎宽和叶片数被显著抑制, 而叶长和种群的总叶片数被显著促进, 且随着消落带水位的降低叶长呈降低趋势, 而叶宽和总叶片数呈增加趋势; 高水位运行导致狗牙根种群匍匐茎和地下茎的茎长、茎节数和总茎长均被显著促进, 且随着消落带水位降低匍匐茎茎长和茎节数呈显著的降低趋势, 而地下茎茎长和茎节数呈增加趋势; 高水位运行导致狗牙根地下茎储存的干质量呈增加趋势, 而分株和匍匐茎的干质量呈降低趋势, 而且在种群物质分配中地下茎所占的比例呈增大趋势, 低水位狗牙根种群的分株和高水位种群的匍匐茎所占的比例也呈增加趋势。因此, 狗牙根不仅具有很强的耐淹和生长恢复能力, 也具有很强的拓殖能力, 可以作为库区中低位消落带恢复和重建的主要原生物种。

**关键词:** 三峡库区; 高水位; 蓄水; 消落带; 狗牙根

### Influence of multi-year high water level running on growth recovery of *Cynodon dactylon* population in water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir

LI Qiang\*, DING Wuquan, WANG Shumin, ZHU Qihong, YANG Jun, KE Shengqian, QIN Lu, YANG Linjing, ZHENG Jieyue, MENG Yiwen

Chongqing Key Laboratory of Environmental Materials & Remediation Technologies, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China

**Abstract:** To clarify influence of multi-year high water level running on growth recovery of dominant plants in water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir, the quantitative changes of *Cynodon dactylon* population in Changshou area were investigated in 2008 and 2017. We also discussed the influences of high water level on the germination, growth, and material allocation of *C. dactylon*. The results showed that multi-year high water level running significantly promoted the formation and germination of adventitious buds which made more ramets to be formed. Multi-year high water level running significantly restrained plant height, stem width, and leaf number of the ramets, while leaf length and total leaf number of the population were significantly promoted. Furthermore, the leaf length was decreased with water level decreasing. However, the leaf width and total leaf number showed the opposite increasing trend. Simultaneously, multi-year high water

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51409030); 重庆市科委自然科学基金计划项目 (cstc2015jcyjA 20028); 重庆高校创新团队建设计划项目 (CXTDX201601037); 重庆市技术创新与应用发展专项面上项目 (csc2019jcsx-msxm0578)

收稿日期: 2018-09-06; 网络出版日期: 2019-11-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lq1973\_2002@163.com

level running led to the significant promotion of stem length, stem nodes number and total stem length of stolons and rhizomes. The stem length and stem nodes number of the stolons were decreased with the water level decreasing. On the contrary, stem length and stem nodes number of the rhizomes were increased with water level decreasing. As a result of high-water-level operation for many years, dry mass of the rhizomes showed an increasing trend, while dry mass of the ramets and the stolons showed an opposite decreasing trend. In addition, the proportion of the rhizomes, ramets in low water level, and stolons in high water level also showed an increasing trend in material distribution of the population. Therefore, *C. dactylon* not only have strong flood resistance and growth recovery ability, but also have strong colonization ability, which can be used as one of the primary native species for vegetation recovery and reconstruction of in low or middle water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir.

**Key Words:** Three Gorges Reservoir; high water level; water accumulation; water-level-fluctuating zone; *Cynodon dactylon*

自三峡库区开始蓄水以来,消落带原生态系统受到了极大的破坏,其恢复和重建的关键技术体系研究一直受到重点关注<sup>[1-3]</sup>。已有的淹水实验发现,中华蚊母树<sup>[4]</sup>、疏花水柏枝<sup>[5]</sup>、狗牙根、野地瓜藤<sup>[6]</sup>、菖蒲<sup>[7]</sup>、香附子<sup>[8]</sup>、牛鞭草<sup>[9]</sup>、野古草、秋华柳<sup>[10]</sup>等植物采取“忍耐”、“逃避”或其他策略(如克隆整合),通过形态和生理的变化来适应淹水环境,具有较强的耐淹能力。但是,经对比分析已有的研究发现,部分普遍认为很耐淹的物种在试验示范区长期定位观测的结果与模拟淹水试验、短期定位观测的结果不同,出现大面积死亡的现象<sup>[11-12]</sup>,而且某些短期模拟淹水和群落学调查的长期定位观测结果也不一致<sup>[13-15]</sup>,推测与三峡库区水位理论调度和实际调度下不同高程消落带出露时间存在很大差异有关,特别是中低水位消落带实际淹水时间显著增加,植被在生长恢复期受到的淹水胁迫程度显著增大,而与三峡库区实际水位调运节律相符的有关植物出露后恢复生长方面的研究很少<sup>[11]</sup>。因此,有必要进一步调研三峡库区实际运行水位对消落带植被生长恢复的影响,以准确评估消落带原生物种的生态适应性、分布格局和演替趋势。2008年第四期蓄水时,三峡库区水位首次超过156m,当年最高运行水位达172m,2010年时运行水位首次达到175m,至此库区试验性蓄水全部结束,至2017年时库区保持高水位运行已达10年。但是,高水位运行对库区消落带优势植被恢复影响的野外定量研究报道很少,多为群落动态调查。研究表明,高水位蓄水运行后三峡库区消落带植被主要以一年生草本植物为主,群落结构趋于简单,物种多样性、盖度和地上生物量与淹水时间呈负相关,并从下往上沿水位梯度呈先增后减的抛物线状变化<sup>[14,16-17]</sup>。狗牙根作为三峡库区中低水位消落带植被恢复的主要原生物种之一,前期的研究表明高水位运行一至两年后其根、茎、叶的生长适应策略和生物量分配在不同的水位高程条件下存在显著的差异<sup>[18-20]</sup>。本文以三峡库区消落带狗牙根为研究对象,在前期定量调研的基础上,原位研究第四期蓄水后高水位运行对库区长寿段典型消落带狗牙根种群的影响,以期为三峡库区消落带恢复和重建物种的选择提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查样地

样地位于三峡库区长寿段的消落带(29°48'46" N, 107°04'32" E),坡度约30°,基质为沙质。2008年第四期蓄水前该消落带150—158m水位处具有成片的单一狗牙根种群(*C. dactylon* L.),158—165m水位处为狗牙根、双穗稗草、酸模叶蓼、苍耳、青蒿、莎草、白茅、草木犀等多个物种的混生种群。至2017年样地调查时,由于水流的强烈冲刷作用,≤153m水位消落带的基质由沙质变为砾石质,导致狗牙根种群消失;154—165m水位处样地基质仍为沙质,为单一的狗牙根种群;>165m水位处为水柳、狗牙根、双穗稗草、酸模叶蓼、苍耳和鳢肠等物种的混生种群。

## 1.2 调查植物

狗牙根(*C. dactylon*),禾本科,狗牙根属,为多年生草本植物,具根状茎和匍匐茎,其茎节上均能生根和形成不定芽,抽出新分株由不定芽发育成分株(不定芽发育),;其营养繁殖力甚强,一般4月下旬至6月上旬进行分蘖生长,特别是在沙土基质中分蘖率高,匍匐蔓延,交织成网,易形成以狗牙根占绝对优势的植物群落<sup>[21]</sup>。实地调查狗牙根种群时,地上主要为地下茎萌发形成的匍匐茎和分株,地下为地下茎和根。

## 1.3 生物统计

分别于2008年6月18日和2017年6月10日调查样地的狗牙根种群生长发育情况。2008年调查了156m水位处的狗牙根种群状况,由于之前库区运行水位低于156m,样地未经历长期淹水,所以将其作为对照(记为 $S_{08-156}$ );2017年调查了156m、160m和165m水位处狗牙根种群状况(分别记为 $S_{17-156}$ 、 $S_{17-160}$ 和 $S_{17-165}$ )。调查时,每个水位间隔20m均匀选择3个 $1m \times 1m$ 的样方,统计各样方的分株数,并于各样方内均匀选择20株分株,统计各分株的株高、茎宽、叶片数、叶长和叶宽。然后,将样方内的所有植物样带回实验室,统计狗牙根匍匐茎和地下茎的茎长、茎宽、茎节数、不定芽数、萌发芽数,计算样方的总茎长、总茎节数、总芽数和总萌发芽数,以及茎长/茎节数和不定芽的萌发率(萌发率 = 总萌发芽数/总芽数)。

## 1.4 生物量测定

样方内所有分株、匍匐茎和地下根茎均先称取鲜质量,然后经 $105^{\circ}C$ 杀青15min,于 $80^{\circ}C$ 过夜,称重,得干质量。并分别计算各部分的干鲜质量比,以及各部分的鲜质量与样方总鲜质量比、干质量与样方总干质量比。

## 1.5 数据处理

采用SPSS 19.0软件对实验数据进行平均值和标准差运算,对各组实验参数的成组样本采用 $t$ 检验法(Independent Samples Test)判断它们的差异显著性。文中的图表由Microsoft Excel软件制作完成。

## 2 结果

### 2.1 狗牙根种群萌发的变化

由表1可知,高水位运行导致狗牙根不定芽的形成和萌发显著被促进,且随着消落带水位的降低促进作用呈增加趋势, $S_{17-165}$ 、 $S_{17-160}$ 和 $S_{17-156}$ 不定芽总数和萌发率分别为 $S_{08-156}$ 的4.4倍、6.8倍、7.0倍和2.1倍、2.1倍、2.2倍,差异显著( $P < 0.05$ );同时,高水位运行也导致狗牙根分株的形成被显著促进,且随着消落带水位的降低分株数呈显著的增加趋势。 $S_{17-165}$ 、 $S_{17-160}$ 和 $S_{17-156}$ 分株数分别为 $S_{08-156}$ 的8.4倍、13.0和13.9倍,差异显著( $P < 0.05$ )。

表1 狗牙根萌发和分株生长的变化

Table 1 Changes in germination and ramets growth of *C. dactylon*

| 组别<br>Group  | 种群 Population               |   |                              | 分株 Ramet                     |                          |                        |                       |                         |                        |
|--------------|-----------------------------|---|------------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
|              | 总芽数<br>Total buds<br>number | 分株数<br>Ramets<br>number/<br>(株/ $m^2$ ) | 萌芽率<br>Germination<br>rate/% | 总叶片数<br>Total leaf<br>number | 株高<br>Plant<br>height/cm | 茎宽<br>Stem<br>width/cm | 叶片数<br>Leaf<br>number | 叶长<br>Leaf<br>length/cm | 叶宽<br>Leaf<br>width/cm |
| $S_{08-156}$ | 1145±176c                   | 574±85b                                 | 45.1±1.1c                    | 6723±495c                    | 19.7±2.0a                | 1.23±0.14a             | 13.3±1.9a             | 3.65±0.55b              | 0.19±0.02a             |
| $S_{17-156}$ | 8010±2038ab                 | 7959±1988a                              | 99.4±0.5a                    | 31310±1838b                  | 12.6±5.4a                | 0.90±0.09b             | 5.2±1.0b              | 5.97±0.95a              | 0.21±0.03a             |
| $S_{17-160}$ | 7755±663a                   | 7483±907a                               | 96.3±3.7ab                   | 35731±1581a                  | 16.3±4.4a                | 0.90±0.15b             | 5.9±1.2b              | 7.58±1.66a              | 0.22±0.04a             |
| $S_{17-165}$ | 5000±1955b                  | 4796±2048a                              | 95.1±3.5b                    | 25476±10308ab                | 21.2±9.9a                | 0.83±0.13b             | 5.9±2.5b              | 8.20±2.52a              | 0.18±0.04a             |

$S_{17-156}$ :2017年156m水位调查的样方组 The quadrat group of 156m water level was investigated in 2017; $S_{17-160}$ :2017年160m水位调查的样方组 The quadrat group of 160m water level was investigated in 2017; $S_{17-165}$ :2017年165m水位调查的样方组 The quadrat group of 165m water level was investigated in 2017;不同字母代表差异显著( $P < 0.05$ ),相同字母表示差异不显著( $P > 0.05$ )

### 2.2 狗牙根种群分株的变化

由表1可知,除165m水位外,高水位运行导致狗牙根分株株高被显著抑制,且随着消落带水位的降低株

高呈降低趋势,  $S_{17-165}$ 、 $S_{17-160}$ 、 $S_{17-156}$  株高分别为  $S_{08-156}$  的 107.6% ( $P>0.05$ )、82.7% ( $P<0.05$ ) 和 64.0% ( $P<0.05$ ); 而高水位运行导致狗牙根分株茎宽也被显著抑制,  $S_{17-165}$ 、 $S_{17-160}$ 、 $S_{17-156}$  茎宽分别为  $S_{08-156}$  的 66.7%、75.0%、75.0%, 差异显著 ( $P<0.05$ )。

由表 1 还可知, 高水位运行导致狗牙根分株叶片形成被显著抑制, 随着消落带水位的降低分株叶片数呈降低趋势; 但是, 种群的总叶片数增加显著, 且随着消落带水位的降低总叶片数呈显著增加趋势。  $S_{17-165}$ 、 $S_{17-160}$ 、 $S_{17-156}$  分株叶片数分别为  $S_{08-156}$  的 44.4%、44.4% 和 39.1%, 总叶片数分别为  $S_{08-156}$  的 3.8 倍、5.3 倍和 4.7 倍, 差异显著 ( $P<0.05$ )。此外, 高水位运行导致狗牙根分株叶长被显著促进, 随着消落带水位的降低叶长呈显著的降低趋势,  $S_{17-165}$ 、 $S_{17-160}$ 、 $S_{17-156}$  分株叶长分别为  $S_{08-156}$  的 2.2 倍、2.1 倍和 1.6 倍, 差异显著 ( $P<0.05$ ); 同时, 随着消落带水位的降低分株叶宽也呈增加趋势,  $S_{17-165}$ 、 $S_{17-160}$ 、 $S_{17-156}$  分株叶宽分别为  $S_{08-156}$  的 94.7%、115.8% 和 110.5%, 差异不显著 ( $P>0.05$ )。

### 2.3 狗牙根种群茎的变化

由表 2 可知, 高水位运行导致狗牙根种群茎的伸长生长被显著促进, 且随着消落带水位的降低茎长呈显著的降低趋势,  $S_{17-165}$ 、 $S_{17-160}$ 、 $S_{17-156}$  匍匐茎茎长、地下茎茎长和总茎长分别为  $S_{08-156}$  的 4.3 倍 ( $P<0.05$ )、2.8 倍 ( $P<0.05$ )、1.7 倍 ( $P<0.05$ )、2.3 倍 ( $P>0.05$ )、1.6 倍 ( $P>0.05$ )、2.5 倍 ( $P>0.05$ )、3.5 倍 ( $P<0.05$ )、2.5 倍 ( $P<0.05$ )、2.0 倍 ( $P<0.05$ ); 而高水位运行导致狗牙根种群茎的茎宽显著被抑制,  $S_{17-165}$ 、 $S_{17-160}$ 、 $S_{17-156}$  种群茎的茎宽均为  $S_{08-156}$  的 56.4% ( $P<0.05$ )。

由表 2 还可知, 高水位运行导致狗牙根种群茎节数呈增加趋势, 而且茎节的伸长显著被促进。  $S_{17-165}$ 、 $S_{17-160}$ 、 $S_{17-156}$  种群匍匐茎茎节数、地下茎茎节数、总茎节数、匍匐茎茎长/茎节数和地下茎茎长/茎节数分别为  $S_{08-156}$  的 3.2 倍 ( $P<0.05$ )、2.0 倍 ( $P<0.05$ )、1.5 倍 ( $P>0.05$ )、1.5 倍 ( $P>0.05$ )、1.4 倍 ( $P>0.05$ )、2.4 倍 ( $P<0.05$ )、2.7 倍 ( $P<0.05$ )、1.8 倍 ( $P<0.05$ )、1.8 倍 ( $P>0.05$ )、1.6 倍 ( $P>0.05$ )、1.4 倍 ( $P<0.05$ )、1.3 倍 ( $P<0.05$ )、1.3 倍 ( $P>0.05$ )、1.1 倍 ( $P>0.05$ )、1.1 倍 ( $P>0.05$ )。

表 2 狗牙根茎的生长变化

Table 2 Changes in stolons and rhizomes growth of *C. dactylon*

| 组别<br>Group  | 匍匐茎 Stolons                                  |                             |  | 地下茎 Rhizomes                              |                            |  | 总茎长<br>Total<br>stem<br>length/<br>(m/m <sup>2</sup> ) | 茎宽<br>Stem<br>width/cm | 总茎节数<br>Total<br>number of<br>stem nodes/<br>(株/m <sup>2</sup> ) |
|--------------|--|-----------------------------|--|---|----------------------------|--|--|------------------------|--|
|              | 茎长<br>Stem<br>length/<br>(m/m <sup>2</sup> ) | 茎节数<br>Stem nodes<br>number | 茎长/茎节数<br>Stem length/<br>stem nodes<br>number | 茎长<br>Stem length/<br>(m/m <sup>2</sup> ) | 茎节数<br>Stem nodes<br>numbe | 茎长/茎节数<br>Stem length/<br>stem nodes<br>number |  |                        |  |
| $S_{08-156}$ | 123.867±16.391c                              | 4589±853b                   | 2.72±0.15b                                     | 64.267±30.867b                            | 1896±260b                  | 3.49±1.98a                                     | 181.005±14.762b  | 0.195±0.02a            | 6486±1056a   |
| $S_{17-156}$ | 207.313±142.570c                             | 7109±7010ab                 | 3.54±0.95ab                                    | 163.435±6.480a                            | 4575±1472a                 | 3.77±0.90a                                     | 370.748±149.051a                                       | 0.11±0.02b             | 11684±8484a  |
| $S_{17-160}$ | 340.833±49.092b                              | 8997±2218a                  | 3.85±0.39a                                     | 105.952±57.774ab                          | 2738±1549ab                | 3.90±0.15a                                     | 446.786±105.181a                                       | 0.11±0.01b             | 11735±3726a  |
| $S_{17-165}$ | 526.956±161.458a                             | 14847±9723a                 | 4.44±2.60ab                                    | 148.469±80.892ab                          | 2925±2522ab                | 4.59±2.62a                                     | 647.704±238.731a                                       | 0.11±0.02b             | 17772±12067a   |

### 2.4 狗牙根种群生物量的变化

由表 3 可知, 随着消落带水位的降低狗牙根种群分株的鲜质量呈增加趋势, 而干质量呈相反的降低趋势, 导致干鲜质量比呈降低趋势。  $S_{17-165}$ 、 $S_{17-160}$ 、 $S_{17-156}$  种群的分株鲜质量、干质量和干鲜质量比分别为  $S_{08-156}$  的 77.5% ( $P>0.05$ )、127.5% ( $P>0.05$ )、122.8% ( $P>0.05$ )、79.2% ( $P>0.05$ )、85.8% ( $P<0.05$ )、72.9% ( $P<0.05$ )、99.5% ( $P>0.05$ )、66.4% ( $P<0.05$ )、57.9% ( $P<0.05$ )。

由表 3 还可知, 随着消落带水位的降低狗牙根种群匍匐茎的生物量呈显著降低趋势。  $S_{17-165}$ 、 $S_{17-160}$ 、 $S_{17-156}$  种群的匍匐茎鲜质量、干质量和干鲜质量比分别为  $S_{08-156}$  的 109.6% ( $P>0.05$ )、87.3% ( $P>0.05$ )、57.2% ( $P<0.05$ )、100.1% ( $P>0.05$ )、92.8% ( $P>0.05$ )、43.3% ( $P<0.05$ )、106.2% ( $P>0.05$ )、121.3% ( $P>0.05$ )、83.1% ( $P>0.05$ )。

表 3 狗牙根分株和匍匐茎的生物量变化

Table 3 Biomass changes in rhizomes and ramets of *C. dactylon*

| 组别<br>Groups        | 分株 Ramets           |                     |  | 匍匐茎 Stolons         |                   |  |
|---------------------|---------------------|---------------------|--|---------------------|-------------------|--|
|                     | 鲜质量<br>Fresh mass/g | 干质量<br>Dry mass/g   | 干鲜质量比<br>Ratio of fresh mass<br>and dry mass/% | 鲜质量<br>Fresh mass/g | 干质量<br>Dry mass/g | 干鲜质量比<br>Ratio of fresh mass<br>and dry mass/% |
| S <sub>08-156</sub> | 694.6195±166.9646ab | 260.6621±30.3871a   | 38.7±8.4a                                      | 320.6342±113.1672ab | 147.1564±36.7007a | 40.3±13.3ab                                    |
| S <sub>17-156</sub> | 852.9847±105.0188a  | 190.0476±14.0567c   | 22.4±1.2b                                      | 183.5323±81.5507b   | 63.9065±37.4217b  | 33.5±4.4b                                      |
| S <sub>17-160</sub> | 885.3980±136.5678a  | 223.5663±4.0034b    | 25.7±4.2b                                      | 280.0391±23.1157ab  | 136.5408±19.9471a | 48.9±6.7a                                      |
| S <sub>17-165</sub> | 538.4303±178.8185b  | 206.3316±65.6055abc | 38.5±1.1a                                      | 351.5629±62.8591a   | 147.3265±20.8813a | 42.8±9.1ab                                     |

由表 4 可知,除 156m 水位外高水位运行导致狗牙根种群地下部分的鲜质量呈降低趋势,而干质量和鲜干质量比呈增加趋势,S<sub>17-165</sub>、S<sub>17-160</sub>、S<sub>17-156</sub> 地下部分的鲜质量、干质量和干鲜质量比分别为 S<sub>08-156</sub> 的 61.0%、62.3%、131.8%、107.3%、112.5%、165.7%、133.1%、141.8%、97.6%,差异不显著( $P>0.05$ )。

由表 4 还可知,随着消落带水位的降低狗牙根种群总鲜质量呈增加趋势,而总干质量及干鲜质量比呈降低趋势,S<sub>17-165</sub>、S<sub>17-160</sub>、S<sub>17-156</sub> 种群的总鲜质量、总干质量和干鲜质量比分别为 S<sub>08-156</sub> 的 84.1% ( $P>0.05$ )、107.7% ( $P>0.05$ )、106.1% ( $P>0.05$ )、88.6% ( $P>0.05$ )、90.5% ( $P>0.05$ )、71.6% ( $P<0.05$ )、101.6% ( $P>0.05$ )、81.0% ( $P>0.05$ )、64.3% ( $P<0.05$ )。

表 4 狗牙根样方和地下部分的生物量变化

Table 4 Biomass changes in a quadrat and underground part of *C. dactylon*

| 组别<br>Group         | 地下部分 Underground part |                   |  | 样方 Quadrat                 |                          |  |
|---------------------|-----------------------|-------------------|--|----------------------------|--------------------------|--|
|                     | 鲜质量<br>Fresh mass/g   | 干质量<br>Dry mass/g | 干鲜质量比<br>Ratio of fresh mass<br>and dry mass/% | 总鲜质量<br>Total fresh mass/g | 总干质量<br>Total dry mass/g | 干鲜质量比<br>Ratio of fresh mass<br>and dry mass/% |
| S <sub>08-156</sub> | 158.6792±55.8337ab    | 40.3073±22.3091a  | 33.5±12.4a                                     | 1173.9330±432.6929a        | 448.1258±64.5464a        | 40.27±8.2ab                                    |
| S <sub>17-156</sub> | 209.2143±53.640556a   | 66.7891±9.6795a   | 32.7±4.4b                                      | 1245.7310±77.1087a         | 320.7432±13.6856b        | 25.90±2.8c                                     |
| S <sub>17-160</sub> | 98.8299±58.0398b      | 45.3418±24.4851a  | 47.5±5.1a                                      | 1264.2670±193.9759a        | 405.4490±7.7288a         | 32.60±4.9bc                                    |
| S <sub>17-165</sub> | 96.7381±59.6363b      | 43.2398±26.6221a  | 44.6±0.9a                                      | 986.7313±299.4453a         | 396.8980±87.0513ab       | 40.90±3.3a                                     |

由表 5 可知,随着消落带水位的降低狗牙根种群分株与样方的质量比呈显著的增加趋势,而匍匐茎与与样方的质量比呈显著的降低趋势,S<sub>17-165</sub>、S<sub>17-160</sub>、S<sub>17-156</sub> 种群分株与样方的鲜质量比和干质量比分别为 S<sub>08-156</sub> 的 89.2% ( $P>0.05$ )、114.9% ( $P<0.05$ )、112.2% ( $P>0.05$ )、87.6% ( $P>0.05$ )、93.9% ( $P>0.05$ )、101.2% ( $P>0.05$ ); S<sub>17-165</sub>、S<sub>17-160</sub>、S<sub>17-156</sub> 种群匍匐茎与样方的鲜质量比和干质量比分别为 S<sub>08-156</sub> 的 133.2% ( $P<0.05$ )、82.1% ( $P<0.05$ )、55.1% ( $P<0.05$ )、117.5% ( $P>0.05$ )、103.4% ( $P>0.05$ )、60.1% ( $P<0.05$ )。

由表 5 还可知,除 156m 水位外高水位运行导致狗牙根种群地下部分与样方的鲜质量比呈降低趋势,而干质量比呈增加趋势,S<sub>17-165</sub>、S<sub>17-160</sub>、S<sub>17-156</sub> 种群地上部分与样方的鲜质量比和干质量比分别为 S<sub>08-156</sub> 的 78.6% ( $P>0.05$ )、64.1% ( $P>0.05$ )、142.7% ( $P>0.05$ )、118.4% ( $P>0.05$ )、127.6% ( $P>0.05$ )、240.2% ( $P<0.05$ )。

表 5 狗牙根各部分与样方的质量比变化

Table 5 Changes in mass ratios of different part and a quadrat of *C. dactylon*

| 组别<br>Group         | 分株/样方<br>Ramet/quadrat     |                          | 匍匐茎/样方<br>Stolon/quadrat   |                          | 地下部分/样方<br>Underground part/quadrta |                          |
|---------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
|                     | 鲜质量比<br>Fresh mass ratio/% | 干质量比<br>Dry mass ratio/% | 鲜质量比<br>Fresh mass ratio/% | 干质量比<br>Dry mass ratio/% | 鲜质量比<br>Fresh mass ratio/%          | 干质量比<br>Dry mass ratio/% |
|                     | S <sub>08-156</sub>        | 60.9±7.2bc               | 58.7±7.7a                  | 27.4±1.1b                | 32.6±4.4a                           | 11.7±7.5ab               |
| S <sub>17-156</sub> | 68.3±4.4a                  | 59.4±6.8a                | 15.1±7.8c                  | 19.6±10.6a               | 16.7±3.4a                           | 20.9±3.8a                |
| S <sub>17-160</sub> | 70.0±0.7a                  | 55.1±0.6a                | 22.5±4.1bc                 | 33.7±5.4a                | 7.5±3.8b                            | 11.1±5.9b                |
| S <sub>17-165</sub> | 54.3±2.0c                  | 51.4±5.9a                | 36.5±4.3a                  | 38.3±9.3a                | 9.2±3.1b                            | 10.3±4.3b                |

### 3 讨论

#### 3.1 三峡库区高水位运行对狗牙根繁衍的影响

地下茎是狗牙根的营养繁殖器官,其上形成的不定芽是种群无性繁殖扩展和持续更新的基础<sup>[22]</sup>。前期研究表明地下茎持续萌生不定芽是狗牙根适应水淹逆境的主要方式之一<sup>[6]</sup>;而且,高水位运行 1 年的野外调查发现三峡库区高水位运行会导致地下茎的芽数/茎长、总芽数和萌发芽数显著增加,形成更多分株<sup>[18]</sup>。本文研究也表明,作为狗牙根繁殖主要结构的不定芽,10 年的高水位运行导致其形成和萌发显著被促进,是狗牙根种群营养繁殖的主要适应策略。而且,随着库区消落带水位的降低不仅其形成受到显著的促进,数量显著增多,而且其萌发能力也被显著促进,萌发率增大,从而在消落带露滩后有利于狗牙根种群迅速萌发、形成更多的分株。因此,在三峡库区高水位运行条件下消落带狗牙根种群繁衍方面具有很强的适应能力。

#### 3.2 三峡库区高水位运行对狗牙根生长发育的影响

消落带淹水季节、持续时间、强度以及出露时期、持续时间、短期频繁淹水胁迫等水位波动节律,对物种适应性、群落生物多样性水平均有至关重要的影响<sup>[23]</sup>,特别是消落带出露后植被恢复生长快慢、整个出露期植株个体对裸露地表的拓殖能力以及出露期的生长状况决定了植物对消落带生态位的占据能力,是消落带物种筛选的核心指标。三峡库区水位在理论调度下,146、152、158、164、170m 消落带的出露时间分别为 128、152、176、260、286d,而高水位运行以来其实际出露时间分别为 2.25、78.5、130.25、196、263.75d,淹水时间明显延长;加之,春夏季洪水影响导致植物生长季内水位明显波动,淹水干扰频繁<sup>[11]</sup>。因此,三峡库区消落带植被恢复与演替不仅取决于其对长期水淹胁迫耐受能力的强弱,也取决于淹水胁迫解除后其生长恢复能力的强弱。已有的研究表明,不同季节的淹水胁迫导致种的生长响应不一致,相对于非生长季淹水某些植物对生长季淹水的敏感度要高得多<sup>[24]</sup>,而短期夏季淹水后群落盖度可能会显著降低<sup>[25]</sup>;某些植物在淹水胁迫解除后常会出现“补偿生长”现象<sup>[26]</sup>,其生理代谢活动、生长速率甚至比未受胁迫植株更为活跃<sup>[27]</sup>,并且光合作用和蒸腾速率显著增大<sup>[28-29]</sup>。前期三峡库区狗牙根种群生长恢复的研究发现,完全淹水胁迫解除 30 天后狗牙根谷胱甘肽、总谷胱甘肽含量、谷胱甘肽还原酶、 $\gamma$ -谷氨酰半胱氨酸合成酶活性、可溶性糖和淀粉含量恢复至未淹对照水平<sup>[30]</sup>,狗牙根种群的分株数、匍匐茎与地下茎茎长、分枝数与茎节数、总叶片数等显著被促进<sup>[9,18-19]</sup>;生长季短期水淹狗牙根可通过提高对 N、P、K 等营养元素的吸收,促进其生长,维持较高的净光合速率,以有效应对水淹环境<sup>[31]</sup>。本文进一步研究表明,三峡库区消落带狗牙根种群在生长恢复方面适应库区高水位运行的策略主要体现在如下两个方面:一方面虽然作为分株个体来说其生长发育受到显著的抑制,株高、茎宽、叶片数显著减少,但是作为种群来说其总叶片数显著增加,并且叶片的伸长能力显著被促进,加之叶宽也呈增加趋势,从而种群的光合作用面积显著增大,光合作用能力显著被促进,有利于种群合成与储备更多的光合物质;另一方面库区蓄水显著促进了狗牙根种群匍匐茎与地下茎的茎节和茎长的伸长,茎长/茎节数显著增加,总茎长显著增大,从而有利于狗牙根拓展其生存生境以逃避不利环境的影响。因此,在三峡库区高水位运行条件下消落带狗牙根种群具有很强的生长恢复能力。

#### 3.3 三峡库区高水位运行对狗牙根物质分配的影响

长期淹水结束后植物初期的恢复生长主要依赖于体内的营养储备,如果营养储备低可能会导致恢复生长差甚至死亡<sup>[32-33]</sup>。地下茎既是狗牙根的营养繁殖器官,也是物质储藏器官<sup>[22]</sup>,狗牙根的初期恢复生长主要依靠地下茎储备的营养物质。前期研究发现,模拟完全淹水会导致狗牙根植株地上和地下部分生物量增量均显著降低<sup>[9]</sup>;2009 年库区长寿段消落带狗牙根种群的野外调查发现高水位蓄水导致 156m 消落带狗牙根分株、地下茎和根的生物量显著降低<sup>[18]</sup>;2010 年库区巫山段野外调查发现低水位消落带狗牙根种群叶的生物量分配增加,而高水位消落带狗牙根种群茎的生物量分配增加<sup>[19]</sup>。本文进一步研究表明,三峡库区高水位运行 10 年后消落带狗牙根种群在物质分配方面的适应策略主要体现在如下 3 个方面:一方面库区高水位运行不仅导致狗牙根地下茎储存的干物质呈增加趋势,而且在种群物质分配中所占的比例也呈增大趋势,特别是低水位

消落带(156m 水位)狗牙根种群地下茎的生物量显著增加,从而有利于提供更多的物质和能量于地下芽的形成和萌发,以利于种群的繁衍;另一方面虽然狗牙根种群分株干质量显著降低,但是随着水位的降低其鲜质量显著增加,加之随着水位的降低分株在种群物质分配中的比例呈显著的增加趋势,从而有利于分株的形成和发育,以利于更快的合成光合物质;第三,虽然随着消落带水位的降低狗牙根种群匍匐茎的生物量呈显著的降低趋势,但是 165m 水位消落带狗牙根种群匍匐茎的生物量无显著变化,其在种群物质分配中的比例呈增加趋势,有利于匍匐茎的伸长生长以及地上芽的形成与发育,有利于种群的繁衍和生境拓展。张立冬等<sup>[20]</sup>的研究也表明,周期性水淹显著影响狗牙根植株非结构性碳水化合物的水平分配,增强匍匐茎 NSC 积累,为植株应对再次水淹提供必要的物质储备。因此,在三峡库区高水位运行条件下消落带狗牙根种群具有很好的物质分配策略。

#### 4 小结

克隆习性对于消落带物种筛选可能具有很重要的地位。已有的研究发现,一些具有克隆习性的多年生草本可以部分增强植物的耐淹能力及个体拓殖能力,并且游击型的克隆植物要强于密集型的克隆植物<sup>[34-35]</sup>。前期研究发现,狗牙根、喜旱莲子草、牛鞭草等多年生草本植物具有克隆习性,具有较强的水淹耐受能力和出露后的生长恢复能力,多分布于三峡库区中低水位消落带。本文的研究也发现,三峡库区高水位运行 10 年后消落带狗牙根种群的地下茎物质储存与分配、营养芽形成与萌发、匍匐茎茎节与茎长伸长、分株形成与叶片伸长、光合叶面积增量等均被显著促进,从而导致狗牙根比该消落带原有的其他物种(如双穗稗草、酸模叶蓼、青蒿、莎草等)更适应库区水位的变化,显著拓展了其作为单一物种的生境范围(由 $\leq 158\text{m}$  拓展至 $\leq 165\text{m}$ ),表明狗牙根作为多年生的游击型克隆植物,不仅具有很强的耐淹和生长恢复能力, also 具有很强的拓殖能力,是一种适宜长期分布于三峡库区中低水位消落带的原生物种,可以将其作为库区消落带恢复和重建的主要物种。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 陈亮,陈世俭,蔡晓斌,刘惠.基于时序 NDVI 的三峡库区植被覆盖时空变化特征分析.华中师范大学学报:自然科学版,2017,51(3): 407-415.
- [ 2 ] 孙荣,邓伟琼,李修明.三峡库区典型次级河流河岸植被分布格局——以重庆东河为例.生态学杂志,2015,34(10): 2733-2741.
- [ 3 ] 王业春,黄健盛,刘玠,由永飞,刘建辉,雷波,张晟.不同土地利用方式对三峡库区消落带植被组成和多样性的影响.环境影响评价,2015,37(4): 68-71.
- [ 4 ] 刘泽彬,程瑞梅,肖文发,郭泉水,王娜.模拟水淹对中华蚊母树生长及光合特性的影响.林业科学,2014,50(9): 73-81.
- [ 5 ] 秦洪文,刘正学,钟彦,刘锐,郑丽丹,苏华英.水淹对濒危植物疏花水柏枝生长及恢复生长的影响.中国农学通报,2014,30(23): 284-288.
- [ 6 ] 马利民,唐燕萍,张明,滕衍行,刘东燕,赵建夫.三峡库区消落区几种两栖植物的适生性评价.生态学报,2009,29(4): 1885-1892.
- [ 7 ] 李强,高祥,丁武泉,朱启红,欧媛,刘瑜.常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响.环境科学,2012,33(8): 2628-2633.
- [ 8 ] 裴顺祥,洪明,郭泉水,秦爱丽,马凡强,肖文发,简尊吉,陈俊.香附子光合生理对三峡库区消落带陆生环境的响应.西北植物学报,2017,37(3): 561-568.
- [ 9 ] 王海锋,曾波,李娅,乔普,叶小齐,罗芳丽.长期完全水淹对 4 种三峡库区岸生植物存活及恢复生长的影响.植物生态学报,2008,32(5): 977-984.
- [ 10 ] 罗芳丽,曾波,叶小齐,陈婷,刘巖.水淹对三峡库区两种岸生植物秋华柳(*Salix variegata* Franch.)和野古草(*Arundinella anomala* Steud.)水下光合的影响.生态学报,2008,28(5): 1964-1970.
- [ 11 ] 樊大勇,熊高明,张爱英,刘曦,谢宗强,李兆佳.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.植物生态学报,2015,39(4): 416-432.
- [ 12 ] 贺秀斌,谢宗强,南宏伟,鲍玉海.三峡库区消落带植被修复与蚕桑生态经济发展模式.科技导报,2007,25(23): 59-63.
- [ 13 ] 王海锋,曾波,李娅,乔普,叶小齐,罗芳丽.完全水淹条件下空心莲子草的生长、存活及出水后的恢复动态研究.武汉植物学研究,2008,26(2): 147-152.

- [14] 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.
- [15] Ye C, Zhang K R, Deng Q, Zhang Q F. Plant communities in relation to flooding and soil characteristics in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(3): 1794-1802.
- [16] 徐建霞, 彭刚志, 王建柱. 三峡库区香溪河消落带植被多样性及分布格局研究. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1345-1350.
- [17] 付娟, 李晓玲, 戴泽龙, 张海锋, 罗玉红, 胥焘, 黄应平. 三峡库区香溪河消落带植物群落构成及物种多样性. 武汉大学学报: 理学版, 2015, 61(3): 285-290.
- [18] 李强, 曹优明, 朱启红, 丁武泉, 宋力. 水位变化对三峡库区低位消落带狗牙根种群的影响. 安徽农业科学, 2011, 39(1): 427-430.
- [19] 洪明, 郭泉水, 聂必红, 康义, 裴顺祥, 金江群, 王祥福. 三峡库区消落带狗牙根种群对水陆生境变化的响应. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2829-2835.
- [20] 张立冬, 李新, 秦洪文, 郝艳龙, 刘正学. 三峡水库消落区周期性水淹对狗牙根非结构性碳水化合物积累与分配的影响. 三峡生态环境监测, 2018, 3(2): 27-33.
- [21] 赵玉, 贾娜尔, 李海燕, 刘影, 杨允菲. 新疆伊犁河谷平原狗牙根无性系构件的生长. 应用生态学报, 2009, 20(4): 779-784.
- [22] Dong M, de Kroon H. Plasticity in morphology and biomass allocation in *Cynodon dactylon*, a grass species forming stolons and rhizomes. Oikos, 1994, 70(1): 99-106.
- [23] Nilsson C, Jansson R, Zinko U. Long-term responses of river-margin vegetation to water-level regulation. Science, 1997, 276(5313): 798-800.
- [24] Jackson M B, Ram P C. Physiological and molecular basis of susceptibility and tolerance of rice plants to complete submergence. Annals of Botany, 2003, 91(2): 227-241.
- [25] 艾丽皎, 王胜, 张银龙. 消落带植物南川柳对于旱胁迫的生理响应. 中国农学通报, 2013, 29(13): 14-19.
- [26] 赵威, 王征宏. 植物的补偿性生长. 生物学通报, 2008, 43(3): 12-13.
- [27] 严美玲, 李向东, 林英杰, 王丽丽, 周录英. 苗期干旱胁迫对不同抗旱花生品种生理特性、产量和品质的影响. 作物学报, 2007, 33(1): 113-119.
- [28] Glaz B, Morris D R, Daroub S H. Sugarcane photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance due to flooding and water table. Crop Science, 2004, 44(5): 1633-1641.
- [29] Islam M A, MacDonald S E. Ecophysiological adaptations of black spruce (*Picea mariana*) and tamarack (*Larix laricina*) seedlings to flooding. Trees, 2004, 18(1): 35-42.
- [30] 周大祥, 刘仁华, 秦洪文, 汪开拓, 李彦杰, 杨俊年. 深淹胁迫对三峡库区狗牙根谷胱甘肽代谢途径的影响. 广东农业科学, 2012, 39(11): 161-163.
- [31] 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. 草业学报, 2016, 25(5): 49-59.
- [32] Panda D, Sharma S G, Sarkar R K. Chlorophyll fluorescence parameters, CO<sub>2</sub> photosynthetic rate and regeneration capacity as a result of complete submergence and subsequent re-emergence in rice (*Oryza sativa* L.). Aquatic Botany, 2008, 88(2): 127-133.
- [33] Sarkar R K, Reddy J N, Sharma S G, Ismail A M. Physiological basis of submergence tolerance in rice and implications for crop improvement. Current Science, 2006, 91(7): 899-906.
- [34] 张想英, 樊大勇, 谢宗强, 熊高明, 李兆佳. 克隆整合有助于狗牙根抵御水淹. 植物生态学报, 2010, 34(9): 1075-1083.
- [35] Humphrey L D, Pyke D A. Demographic and growth responses of a guerrilla and a phalanx perennial grass in competitive mixtures. Journal of Ecology, 1998, 86(5): 854-865.