

# 收割强度对粉绿狐尾藻生长和水质的影响

俞新慧<sup>1</sup>, 吴晓东<sup>1,2</sup>, 葛绪广<sup>1,2</sup>, 桂智凡<sup>1,2</sup>, 周梦蝶<sup>1</sup>, 卞玲玲<sup>1</sup>, 刘 恋<sup>1</sup>

(1. 湖北师范大学城市与环境学院 湖北黄石 435002

2. 黄石市土壤污染防治重点实验室 湖北黄石 435002)

**摘要:** 研究 5 种收割强度对粉绿狐尾藻生长和水质的影响, 为沉水植物调控管理提供参考。设不收割组作为对照组, 收割组收割强度分别为株高的 15%、30%、45%、60% 和 75%。将收割的植物称量干重和鲜重, 统计株高、分枝数, 测定新生枝条的恢复长度。每次收割前 1 d 对所有处理组的水样进行水质测定。结果表明: (1) 收割对粉绿狐尾藻枝条生长恢复和株高影响显著 ( $P < 0.01$ )。对照组最终株高最高, 达到 187.0 cm, 并在水面形成冠层。第 1 次收割后 20 d, 低强度 (15% 和 30%) 收割组恢复或超过收割前水平, 中强度 (45%) 收割组枝条全部恢复, 但高强度 (60% 和 75%) 收割组的恢复率明显低于低、中强度收割组, 恢复率分别为 80.68% 和 62.00%。第 2 次收割后 20 d, 15% 和 30% 收割组的粉绿狐尾藻全部恢复, 45% 收割组的恢复率为 91.44%, 高强度收割组的恢复率明显降低, 恢复率分别为 76.09% 和 42.22%, 至实验结束时高强度收割组都未恢复。随着收割频次的增加, 枝条恢复的时间延长。(2) 收割减少了粉绿狐尾藻分枝数。对照组分枝数最高, 达到 6.9 枝/株, 15%~75% 收割组分别为 4.3、4.0、3.6、2.2 和 1.8 枝/株。(3) 收割显著降低了粉绿狐尾藻的生物量 ( $P < 0.01$ )。15%~75% 收割组的生物量分别下降为对照组的 10.11%、3.23%、2.47%、2.29% 和 0.80%。(4) 粉绿狐尾藻收割对水质影响显著。收割后, 水体中总氮、总磷浓度降低, 且收割强度与收割次数对氮磷浓度影响显著 ( $P < 0.01$ )。与第 1 次收割相比, 第 2 次收割后, 15% 收割组总氮、总磷浓度分别较前次下降 13.63% 和 24.82%, 30% 收割组下降 12.90% 和 22.87%, 45% 收割组下降 8.24% 和 25.04%, 高强度 (60% 和 75%) 收割组下降 6.66% 和 34.91%、9.64% 和 17.64%。收割强度会对水体中悬浮颗粒物 (SS) 和叶绿素 (Chl-a) 有影响, 高强度收割使得水体中的 SS 和 Chl-a 含量明显升高。收割对控制粉绿狐尾藻生长效果明显, 结合水质指标, 以低强度收割 2~3 次为宜。

**关键词:** 粉绿狐尾藻; 收割强度; 生长; 水质

**中图分类号:** X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2022)01-0095-08

沉水植物是水生态系统的初级生产者, 具有较强的水质净化效果, 对维持水生态系统结构和功能起到重要的作用 (龚梦丹, 2020)。它生长快、适应能力强, 生长发育过程中可同化吸收水体和底泥的氮磷来合成自身物质, 以此达到去除多种污染物 (如氮、磷) 的目的 (谭凯婷等, 2019; Steffen et al, 2013; 苏云华等, 2018; 姜义帅等, 2013)。但沉水植物过度生长会带来许多不良后果, 如影响生态系统, 阻塞河道等 (杨卫东等, 2014; 李春华等, 2018)。世界上许多湖泊中, 肆意生长的沉水植物被认为是生态系统管

理的一个重要问题 (Maiko et al, 2019)。随着我国湖泊富营养化加剧和水位人为调控, 部分湖泊的沉水植物疯长。发达国家如英国、美国等常通过收割来管理沉水植物。收割是用机械或人工将沉水植物从水体中以不同强度收取并运输至岸上的过程 (吴晓东等, 2012)。合理的收割有利于水生植物的生长, 也能避免它到后期衰亡时对水体的二次污染。收割的沉水植物可以通过生产沼气、加工成有机肥料或作为动物的饲料等方式进行合理开发, 为当地增加经济收入 (左进城等, 2009; 2011)。

国内外学者关注并研究了收割方式对沉水植物生长的影响。高强度、高频次的收割会减少轮叶黑藻的枝条数目和枝条长度, 抑制后期的无性繁殖; 3 种收割强度 (6、12 和 18 cm) 的 3 次收割, 使穗花狐尾藻干重的相对增长率呈下降趋势, 且收割强度越大, 植物的再恢复时间越长, 但最终均能完全恢复; 中等强度的收割将会促进伊乐藻的分枝和生长 (左进城等, 2009; 2012; 2014)。收割限制了冠层的形成, 对菹草枝条影响明显, 低强度收割后菹草在短期恢复,

收稿日期: 2020-04-04

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目 (Q20182502, D20152503); 湖北师范大学湖泊流域重金属污染机理与生态修复创新团队项目。

作者简介: 俞新慧, 1998 年生, 女, 本科在读, 研究方向为水环境生态修复。Email: 1924309671@qq.com

通信作者: 吴晓东, 1985 年生, 讲师, 研究方向为水污染控制与生态修复。E-mail: wuxd03@163.com

而中高强度的收割则恢复时间变长(吴晓东等, 2012)。低强度收割菹草易产生断枝并且整株上浮, 从而促进菹草的生长并延长菹草生命周期, 中等强度收割使菹草维持较高生物量(徐伟伟等, 2015)。收割次数过多不仅会加大人力物力, 而且会使植物的郁闭度减少, 破坏生态系统; 收割次数过少对生物量控制有限, 因此需要考虑合理的收割次数(Ayato et al, 2018)。对穗花狐尾藻进行多次收割与 1 次收割的生物量差异显著, 且一次收割的生物量远小于多次收割(余红兵等, 2013)。适当对大型植物进行上部剪除式收割就可以避免连根拔起清除植物而引起的沉积物再悬浮(Xu et al, 2014), 不合理的收割会引起鱼类产卵和幼鱼生活区域面积下降, 大型植被覆盖率下降, 整个生态系统的生产力减少(Xu et al, 2014; 2016)。沉水植物对外界干扰很敏感, 不恰当的收割强度和过多的收割次数都会对其有较大的影响, 可能导致重新构建的草型湖泊生态系统失败(左进城等, 2011)。因此, 合理的收割措施是管理沉水植物的重要环节。

粉绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)是入侵种, 在长江中下游许多湖泊均已发现, 具有生长快、适应性强、易繁殖等特点, 是污水生态处理和农业面源污染的常用植物, 被称为“净水精灵”(陈鸿等, 2016; 金春华等, 2011; 柏祥等, 2011)。目前, 国内对粉绿狐尾藻的净化污染效果和生态修复工程应用方面的研究较多。在重庆市苦溪河长生桥镇河段生态修复工程中, 粉绿狐尾藻起着重要的作用(钟成华等, 2013)。以粉绿狐尾藻为主构建的生态系统中, 前 0~12 d 是净水的关键时期, 是去除能力最强的时期(孙宏等, 2020)。粉绿狐尾藻对氨氮具有很强的偏好性和耐受性, 故对氨氮的去除率高于硝氮(马永飞等, 2017; 金春华等, 2011)。3 种水生生物(空心菜、苦草和粉绿狐尾藻)中, 粉绿狐尾藻对水体的 TN 净化效果最好(陈双等, 2018)。在 12 种水生植物中, 粉绿狐尾藻去除富营养水体中氨氮和磷的能力最突出(陈巧玲等, 2019)。但关于收割对粉绿狐尾藻生长和水质影响的研究鲜有报道。本文通过模拟实验, 研究 5 种收割强度对粉绿狐尾藻的生长和水质的影响, 揭示最佳收割强度对粉绿狐尾藻的生长和水质的效果, 以为外来物种调控提供参考。

## 1 材料与方

### 1.1 供试材料

植物材料为粉绿狐尾藻的顶枝, 长 14~16 cm, 生

长良好, 且长势一致, 重量相同。实验以长江中游典型富营养化湖泊青山湖的底泥作为基质, 总磷、总氮平均值为 0.103 mg/L 和 1.14 mg/L。实验用水为经过滤藻类的湖水。

### 1.2 实验设计

实验在湖北师范大学水环境生态修复实验室进行。实验时间为 2018 年 3 月 31 日~7 月 16 日, 共 108 d。实验装置为高 70 cm、直径 40 cm 的塑料大桶。每桶种植长 14~16 cm 的粉绿狐尾藻顶枝 30 株, 每个桶铺设底泥 10 cm, 并缓慢注入经过滤的湖水至桶面。收割强度分别为植株高度的 15%、30%、45%、60% 和 75%, 分别记为 C15、C30、C45、C60、C75。其中 C15、C30 为低强度组, C45 为中强度组, C60、C75 为高强度组。另设不收割组作为对照组 CK。每个处理设置 3 个平行。待 90% 的植物长到水面后, 按照收割强度进行第 1 次收割, 称量收割植物的干重和鲜重。植物恢复至水面后, 即再次进行收割。在整个实验中及时清理附着桶内的丝状藻类和螺类并补水。

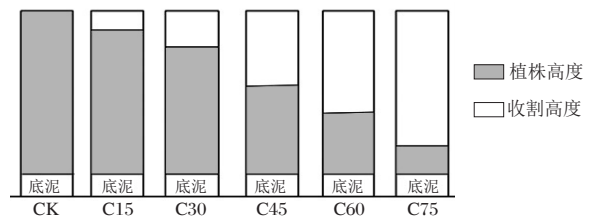


图 1 粉绿狐尾藻收割强度示意

Fig.1 Schematic diagram of harvest intensity of *M. aquaticum*

### 1.3 指标测定

实验过程中, 在未收割前每隔 5 d 每桶随机选取 9 株粉绿狐尾藻, 测定其株高。在收割后每隔 10 d 每桶随机选取 9 株粉绿狐尾藻, 统计株高、分枝数, 测定新生枝条的恢复长度。在每次收割后称量收割植株的生物量。实验结束时, 测量各处理组的生长指标, 用游标卡尺测量植株的茎直径, 收割的植株烘干后用电子天平称量现存生物量。每次收割前一日对所有处理组的水样进行水质测定。水质指标悬浮物(SS)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl-a)等测定参照《水和废水监测分析方法》(国家环境保护总局, 2002)。

### 1.4 数据处理

实验所得数据采用 SPSS13.0 统计软件进行方差分析, 各组数据之间相关分析采用皮尔森相关系数法,  $P < 0.01$  为极显著相关,  $P < 0.05$  为显著相关; 差异

性用单因素 ANOVA 检验(同组数据上不同小写字母代表  $P < 0.05$  差异显著水平)。用 origin8.5 对实验测得的 TN、TP、SS 等指标进行数据分析, 并对粉绿狐尾藻的生长指标进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 收割对粉绿狐尾藻生长的影响

2.1.1 恢复时间 实验期间, C15、C30、C45 组均能收割 4 次, C60 组收割 3 次, C75 组只能收割 2 次。每次收割后粉绿狐尾藻恢复至水面的时间见表 1。

表 1 每次收割后粉绿狐尾藻的恢复时间

Tab.1 Recovery time of *M. aquaticum* after harvest

收割强度/%	收割频次/次	恢复时间/d
15	1	19
	2	25
	3	36
	4	-
30	1	21
	2	28
	3	43
	4	-
45	1	21
	2	30
	3	45
	4	-
60	1	26
	2	34
	3	-
75	1	39
	2	-

C15 组第 1 次收割和第 2 次收割恢复时间相差不大(6 d), 第 3 次收割恢复时间比第 2 次多 11 d。随着收割频次不断增加, 恢复时间相延长。C30 和 C45 组的收割恢复时间无明显差异。C60 和 C75 组的恢复时间较长。C75 的恢复时间明显比 C60 长, 说明收割强度越大, 沉水植物后期恢复的能力越弱, 恢复时间则会越长( $P < 0.01$ )。随着收割频次的逐渐增加, 高强度收割组一直未恢复甚至出现烂根现象。

2.1.2 株高及枝条恢复率 不同收割强度下粉绿狐尾藻枝条恢复率和最终株高见图 2。实验结束时, 对照组最终株高为 187.0 cm, 在水面形成明显的冠层。收割导致粉绿狐尾藻的生长受到影响, 高强度收割对其枝条和生物量的恢复影响显著( $P < 0.01$ )。

第 1 次收割后第 20 天(1st20d), 低强度组

(15% 和 30%) 收割后恢复超过收割前水平, 平均株高分别为 67.4 cm 和 73.5 cm, 但未形成冠层; 中强度组(45%)收割后枝条全部恢复, 长势较好; 但高强度组(60% 和 75%)收割后恢复率显著低于低、中强度组, 恢复率分别为 80.68% 和 62.00%(图 2a)。

第 2 次收割后第 20 天(2nd20d), 15% 收割组全部恢复到收割之前, 平均株高为 76.3 cm; 至实验结束前高达 101.0 cm, 与对照组差异显著( $P < 0.05$ ), 未在水面形成冠层; 30% 收割组的粉绿狐尾藻亦全部恢复, 第 2 次收割后第 20 天测量的高度为 72.3 cm; 实验结束时的高度为 65.0 cm。中强度(45%)收割组的恢复率低于低强度收割组, 恢复率为 91.44%, 实验结束时株高为 58.0 cm。高强度(60% 和 75%)收割组的恢复率显著降低, 分别为 76.09%、42.22%。至实验结束时, 高收割强度的 2 组绝大多数植物已经烂根停止生长, 未测量其生长高度。随着收割强度和次数不断增加, 枝条的恢复率均与之呈负相关, 收割强度越高收割次数越多则枝条恢复率越低(图 2b)。

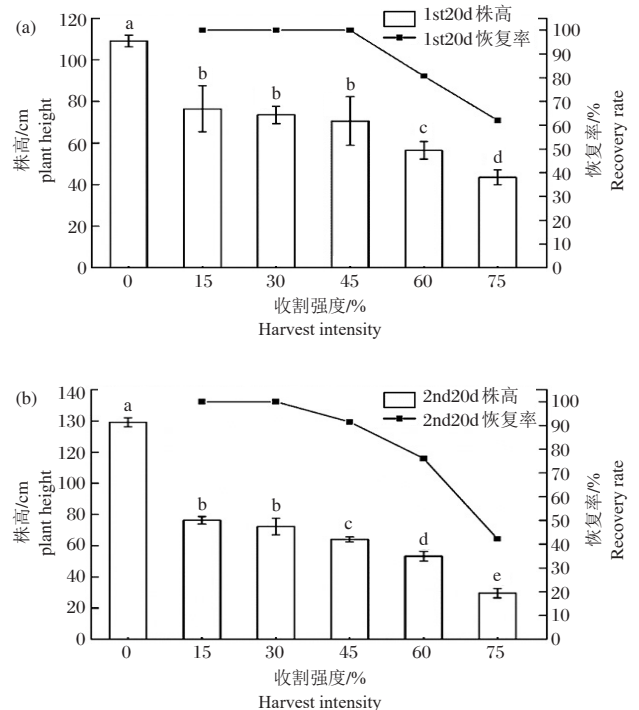


图 2 不同收割强度下粉绿狐尾藻枝条恢复率和最终株高  
Fig.2 Recovery rate and plant height of *M. aquaticum* for each treatment group

2.1.3 生物量 不同收割强度下粉绿狐尾藻的生物量见图 3, 收割强度影响粉绿狐尾藻生物量的积累( $P < 0.01$ )。至第 2 次收割结束, 15% 收割组生物量比

第 1 次收割增加 1.10 倍, 30%~75% 收割组生物量比第 1 次收割显著下降, 分别下降了 44.44%、42.53%、54.95% 和 63.64%。收割组生物量增加明显低于对照

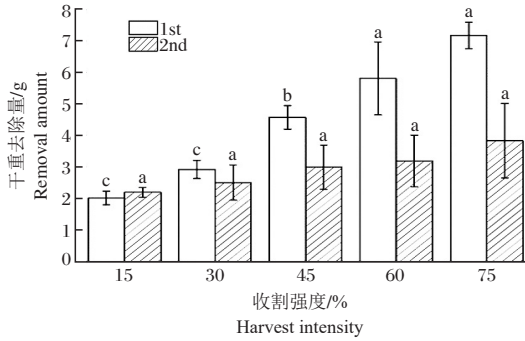


图 3 不同收割强度下粉绿狐尾藻生物量

Fig.3 Biomass of *M. aquaticum* for each treatment group

2.1.4 分枝数 不同收割强度下粉绿狐尾藻分枝数存在显著差异 ( $P < 0.01$ ) (图 4)。对照组分枝数最多, 达到 6.9 枝/株, 15% 收割组为 4.3 枝/株, 30% 收割组为 4.0 枝/株, 45%~75% 收割组分枝数分别为 3.6、2.2 和 1.8 枝/株。

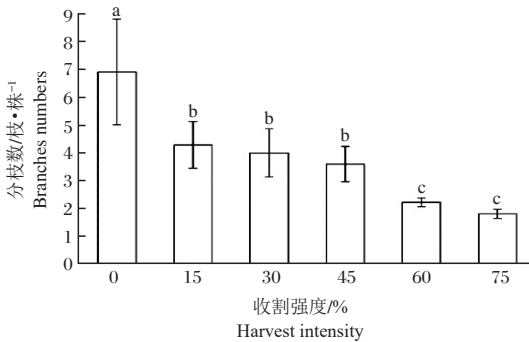


图 4 不同收割强度下粉绿狐尾藻分枝数

Fig.4 Branches number of *M. aquaticum* for each treatment group

2.1.5 茎直径 不同收割程度下粉绿狐尾藻的茎直径存在显著差异 ( $P < 0.01$ ) (图 5)。对照组的茎直径最大, 分别为低、高收割组的 16.75 倍和 12.38 倍。低收割组的茎直径大小相当, 中、高收割组的大小相当且略高于低收割组。

## 2.2 收割粉绿狐尾藻对水质的影响

2.2.1 水体悬浮物 收割粉绿狐尾藻对 SS 影响显著 ( $P < 0.01$ ) (图 6)。对照组实验水体悬浮物指标明显低于收割组, 且收割强度越大, 水体的悬浮物浓度增幅越明显。对照组 SS 浓度低, 60% 收割组 SS 浓度为对照组的 6.05 倍, 75% 收割组为对照组的 6.35 倍。低、中收割组悬浮物浓度表现出小幅度的递增趋势, 而高收割组则显著增加。

组。对照组粉绿狐尾藻最终生物量最大, 15%~75% 收割组最终生物量下降为对照组的 10.11%、3.23%、2.47%、2.29% 和 0.80%。

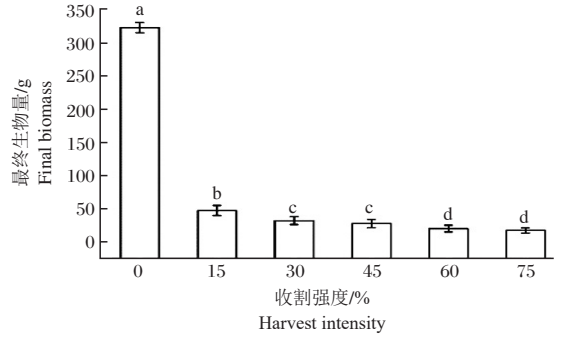


图 5 不同收割强度下粉绿狐尾藻的茎直径

Fig.5 Stem diameter of *M. aquaticum* for each treatment group

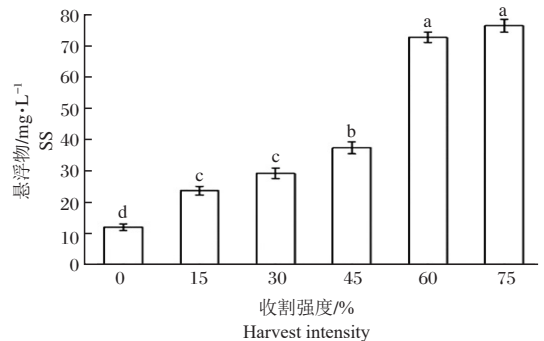


图 6 不同收割强度下水体的悬浮物浓度

Fig.6 Suspended solid concentration of *M. aquaticum* for each treatment group

2.2.2 总氮 不同收割强度对水体 TN 浓度影响差异显著 (图 7)。对照组 TN 浓度始终保持较低水平, 小于收割组。各收割组中, 低收割组 (15%、30%) TN 浓度最低, 中、高收割组 (45% 以上) TN 显著高于低收割组。收割强度越大, TN 浓度越高 ( $P < 0.01$ ), 且高收割组 TN 维持较高水平。第 1 次收割后, 对照组的 TN 浓度为 0.77 mg/L; 低、中收割组的差异并不太大, 分别为

0.88、0.93和0.97mg/L;高收割组为1.05和1.14mg/L。第2次收割后,水体TN浓度降低,但随着收割强度的增大,水中TN浓度不断增加。与第1次收割后相比,C15收割组TN下降13.63%,C30收割组下降12.90%,C45收割组下降8.24%,高强度(60%和75%)收割组下降6.66%和34.91%。

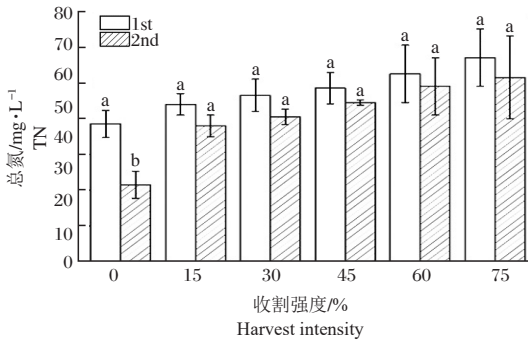


图7 不同收割强度下水体TN浓度

Fig.7 TN concentration for each treatment group

2.2.3 总磷 收割粉绿狐尾藻对实验水体的TP浓度影响显著(图8)。总体来看,对照组和低收割组一直处于低浓度,中、高收割组水体TP一直维持高浓度水平( $P<0.01$ )。第1次收割后,对照组的TP浓度为0.015 mg/L;低、中收割组的差异并不明显,分别为0.018、0.024和0.017 mg/L,高收割组为0.025和0.028 mg/L。第2次收割后,水体TP浓度降低,但随着收割强度的增大,TP浓度不断增加。与第1次收割后相比,C15收割组TP浓度下降24.82%;C30收割组下降22.87%;C45收割组下降25.04%,高强度(60%和75%)收割组下降9.64%和17.64%。

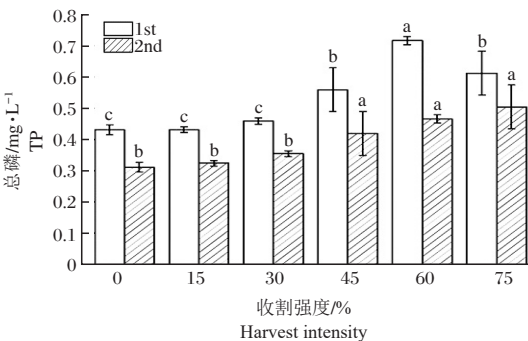


图8 不同收割强度下水体TP浓度

Fig.8 TP concentration for each treatment group

2.2.4 叶绿素a 收割粉绿狐尾藻对实验水体的Chl-a浓度影响显著(图9)。总体看,对照组和中低收割组Chl-a一直处于低浓度,高收割组Chl-a一直维持在高浓度水平,60%收割组Chl-a浓度为对照组的7.02倍,75%收割组Chl-a浓度为对照组的11.15倍,

高强度收割组水体Chl-a浓度与中、低强度收割组差异极显著( $P<0.01$ )。

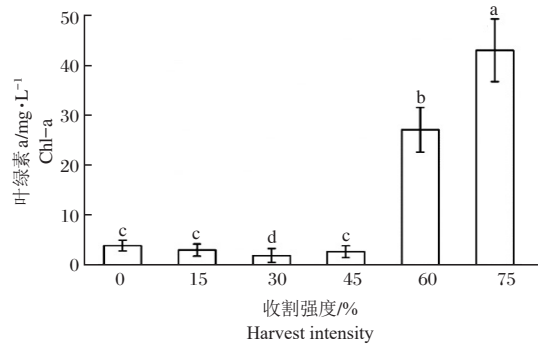


图9 不同收割强度下水体叶绿素a浓度

Fig.9 Chl-a concentration for each treatment group

### 3 讨论

#### 3.1 收割对粉绿狐尾藻生长和繁殖的影响

不同收割强度下,粉绿狐尾藻的恢复情况存在差异。第1次收割后,各收割组粉绿狐尾藻均未出现死亡现象,但粉绿狐尾藻恢复能力不同。15%收割组在收割后第20天全部恢复甚至超过收割前的水平,30%和45%收割组亦全部恢复,高收割组的恢复率为80.68%和62.00%,表明中低强度下粉绿狐尾藻的恢复能力较强,能在短期恢复。第2次收割后,各收割组的恢复状况差异较大,低收割组的恢复时间较第1次略长,但依然恢复至之前的高度。45%和60%组经过约1个月后恢复,但75%组因收割强度过大,植株未恢复,在实验后期因温度升高后出现烂根现象。第3次收割后,60%收割组因收割次数过多和收割强度过大尚未恢复,同时也出现烂根现象。这与武海涛等(2007)研究结果相似,即温度越高越有利于植物分解过程中重要的好氧纤维素分解菌等生长,加快了微生物分解残体速度,从而降低植物剩余的干质量,导致收割后未能恢复。整个实验期间都处于粉绿狐尾藻的生长期,除了高强度收割组(75%)收割过强,对粉绿狐尾藻生长恢复破坏过大外,其他强度的收割组都进行了第3次收割,这与李佳民(2015)研究结果相似。通过对前2次收割后20d的恢复情况进行统计分析,结果表明收割强度越大,收割后的株高恢复情况越差,与对照组差异极显著。

不同收割强度下,粉绿狐尾藻的分枝数有较大差异。沉水植物具有自动形成断枝的特点,当断枝形成后首先在茎端15~20 cm位置形成不定根,然后从不定根的部位断开形成一个新的植株(闵奋力等,2016)。机械折断形成的断枝在各条件下均具有较

强的繁殖生长能力,多数断枝都有不定根和芽的发生(葛绪广等,2009)。粉绿狐尾藻在经过收割(机械折断)后,主干不会继续生长,后期的生长全都依靠不定根形成后侧枝的萌发。收割强度越大,存留的主茎越短,粉绿狐尾藻的生长就越困难,新芽萌发数越少,导致分枝萌芽数减少。故在分枝数上表现为对照组最高,分枝数最多。随着收割强度的增大,植株株高越低,分枝数越少。

收割对粉绿狐尾藻的生物量影响较大。经几次收割后,每次收割带走的生物量最大值均在高收割组中,但第 2 次高收割组的干重仅为第 1 次的 54.16%,生物量大幅降低;中收割组的为第 1 次的 75.42%;低收割组的为第 1 次的 97.28%。实验表明,随着收割次数的增多,各收割组的生物量均降低并且随着收割程度的增加降低的幅度也在增大。因此,收割强度越大最终现存生物量越少。

### 3.2 收割粉绿狐尾藻对水质的影响

沉水植物在富营养化水中生长,在此过程中会吸收水中的氮磷。金树权等(2017)研究表明,在 49 d 时间里,轮叶黑藻、苦草、金鱼藻和穗状狐尾藻的植株氮、磷的增加量分别为:4.22~6、0.83~1.05、2.38~3.86、0.54~2.7、0.36~0.38、0.12~0.2、0.09~0.17、0.15~0.33 g/kg。王智等(2013)研究表明,在 81 d 时间里,水葫芦植株氮、磷增加量为 0.818、3.618 g/kg;轮叶黑藻的植株氮、磷增加量为 0.115、0.636 g/kg。张金秋(2018)研究表明,在 122 d 时间里,菹草植株氮、磷增加量为 19.22、17.68 g/kg;穗花狐尾藻的植株氮、磷增加量为 3.22、2.16 g/kg。收割可以将植株内的氮、磷带走,避免因植株的自然衰亡而造成二次污染。在本次实验中,不同强度的收割组进行了至少 2 次的收割,收割会带走植株中一部分的氮磷。通过本课题组前人研究的数据,估算 15%、30%、45%、60%、75% 收割组带走的植株中氮分别为 35.53~56.64、30.05~51.62 g、46.20~80.79、38.24~93.78、40.48~126.76 g/kg;磷分别为 4.34~6.89、3.67~6.30、5.64~9.87、4.67~12.59、4.94~15.48 g/kg。多次收割带走的富营养化水体中氮磷的量比收割 1 次带走的。

水体总氮主要通过水生植物对营养盐氮素的吸收、微生物的硝化-反硝化作用和基质的吸附沉淀作用去除(李菲菲等,2018)。收割可以移除氮素,而磷的移除更需要收割(Gumbrecht, 1993)。本实验,收割强度与水体 TN 浓度线性拟合度高,表明收割强度越大水体 TN 浓度就越高。水质比较表明, TN 浓度对对照组第 2 次比第 1 次低,收割组也均有不同程度下

降。有研究表明,合理的植物收割能提高植物对氮磷吸附去除能力,还会间接影响系统内微生物数量和活性从而改变系统的脱氮能力(赵梦云等,2019;廖德润等,2013)。对于沉水植物而言,TP 的去除量在生长旺盛的夏秋季节远大于植物停滞乃至死亡的冬春季(陈清锦,2015)。实验表明,水体 TP 浓度从第 1 次收割到第 2 次收割有所下降,原因是温度升高促进粉绿狐尾藻的生长繁殖从而促进它们对水体磷元素的吸收。收割强度与水体 TP 浓度的关系为收割强度越大水体 TP 浓度就越高。沉水植物对悬浮物的去除作用主要通过根茎叶的拦截吸附直接去除;还可阻碍水体流动,使流速变小,从而对悬浮物有着较好的过滤同时促进其沉降(丁玲等,2018;李威,2018)。收割扰动了水体,导致吸附于粉绿狐尾藻叶片及沉降水体底部的 SS 再悬浮,重新进入水体(张兰芳等,2006;王超等,2014)。粉绿狐尾藻在不同收割强度下对悬浮物的影响显著。收割后悬浮物浓度不断上升的主要原因为气温不断升高,底泥中大量营养物质释放,导致水体中的藻类暴发,增加了水体中的悬浮物浓度(李庚辰等,2015)。水体中 Chl-a 的浓度总体反映了藻类的多少,是水质好坏的重要指标。收割使水生植物的化感作用减弱,使其抑制藻类繁殖能力变差,导致 Chl-a 浓度增加显著(徐志婧等,2012; Nakamura et al, 2008; 肖溪等, 2009)。实验表明,粉绿狐尾藻收割强度达到一定程度时(60% 和 75%),存留的主茎变少且植株的生长恢复率低,使其化感作用减弱导致水体中藻类繁殖旺盛,Chl-a 浓度升高。

### 参考文献

- 陈巧玲,林晓葱,宫本涛,等,2019. 12 种水生植物对氨氮和总磷的净化效果研究[J]. 福建农业科技, (1): 44-49.
- 陈双,王国祥,许晓光,等,2018. 水生植物类型及生物量对污水处理厂尾水净化效果的影响[J]. 环境工程学报, 12(5): 1424-1433.
- 丁玲,李羚君,尹杰,等,2018. 沉水植物净化人工水源湖原水中氮磷和悬浮物的试验研究[J]. 生态环境学报, 27(1): 122-139.
- 葛绪广,王国祥,陆贻超,2009. 4 种沉水植物断枝再生能力研究[J]. 水生态学杂志, 30(4): 23-28.
- 龚梦丹,2020. 沉水植物对水体水质净化效果的研究[J]. 环境与发展, 32(2): 95-97.
- 国家环境保护总局,2002. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社: 40-60.
- 姜义帅,陈灏,马作敏,等,2013. 利用沉水植物生长期收割进

- 行富营养化水体生态管理的实地研究[J]. 环境工程学报, 7(4):1351-1358.
- 金春华, 陆开宏, 胡智勇, 等, 2011. 粉绿狐尾藻和凤眼莲对不同形态氮吸收动力学研究[J]. 水生生物学报, 35(1): 75-79.
- 金树权, 周金波, 包薇红, 等, 2017. 5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J]. 环境科学, 38(1):156-161.
- 李春华, 叶春, 孔祥臻, 等, 2018. 浅水湖泊水生植物适宜生物量评估方法的探讨[J]. 中国环境科学, 38(12): 4644-4652.
- 李菲菲, 褚淑祎, 崔灵周, 等, 2018. 沉水植物生长和腐解对富营养化水体氮磷的影响机制研究进展[J]. 生态科学, 37(4):225-230.
- 李庚辰, 刘足根, 张敏, 等, 2015. 升温对超富营养型浅水湖泊沉积物营养盐动态迁移的影响[J]. 生态学报, 35(12): 4016-4025.
- 李佳民, 2015. 红旗泡水库菹草人工收割对水环境的影响[J]. 黑龙江水利科技, 6(43):11-12.
- 李威, 2018. 6种湖南常见沉水植物对富营养化废水净化效果研究[D]. 长沙:中南林业科技大学:4-6.
- 孙宏, 李宁, 汤江武, 等, 2020. 狐尾藻在养殖污水净化中的作用原理及相关应用进展[J]. 中国畜牧杂志, 56(3):37-42.
- 谭凯婷, 柳君侠, 王志红, 等, 2019. 沉水植物修复富营养化景观水体的研究进展[J]. 水处理技术, 45(6):15-18, 27.
- 王智, 张志勇, 张君倩, 等, 2013. 两种水生植物对滇池草海富营养化水体水质的影响[J]. 中国环境科学, 33(2):328-335.
- 吴晓东, 王国祥, 魏宏农, 等, 2012. 不同收割强度对菹草(*Potamogeton crispus*)生长和光合荧光特性的影响[J]. 湖泊科学, 24(5):732-738.
- 肖溪, 楼莉萍, 李华, 等, 2009. 沉水植物化感作用控藻能力评述[J]. 应用生态学报, 20(3): 705-712.
- 徐伟伟, 胡维平, 邓建才, 等, 2015. 菹草生物量控制对群落中沉水植物生长及水质的影响[J]. 生态环境学报, 24(7): 1222-1227.
- 徐志嫒, 刘维, 赵洁, 等, 2012. 沉水植物对再生水景观水体水质变化的影响和净化效果[J]. 水土保持学报, 26(2): 214-219.
- 杨卫东, 颜培炎, 唐永杰, 等, 2014. 草鱼对沉水植物过度生长的控制技术综述[J]. 天津农业科学, 20(9):92-95.
- 余红兵, 杨知建, 肖润林, 等, 2013. 水生植物的氮磷吸收能力及收割管理研究[J]. 草业学报, 22(1):294-299.
- 张金秋, 2018. 张家口地区水生植物多样性及其对营养物质吸收能力的研究[D]. 上海:华东师范大学:37-50.
- 赵梦云, 熊家晴, 郑于聪, 等, 2019. 植物收割对人工湿地中污染物去除的长期影响[J]. 水处理技术, 45(11):112-116.
- 钟成华, 王涛, 曾雪梅, 等, 2013. 苦溪河长生桥镇河段污染水体的生态修复工程实践[J]. 三峡环境与生态, 35(4):56-59.
- 左进城, 苗凤萍, 王爱云, 等, 2009. 收割对穗花狐尾藻生长的影响[J]. 生态学杂志, 28(4):643-647.
- 左进城, 梁威, 徐栋, 等, 2011. 几种收割策略下轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)的生长恢复研究[J]. 农业环境科学学报, 30(7):1391-1397.
- 左进城, 贺峰, 马剑敏, 等, 2014. 中等强度收割对苦草和伊乐藻种间竞争的影响[J]. 生物学杂志, 33(9):2414-2419.
- Ayato K, Koichi S, Akio I, 2018. Effects of macrophyte harvesting on the water quality and bottom environment of Lake Biwa, Japan[J]. Limnology, 20(1):83-92.
- Gumbrecht T, 1993. Nutrient removal processes in freshwater submersed macrophyte systems[J]. Ecological Engineering, 2(1):1-30.
- Maiko K, Jun N, Takehito Y, 2019. Ecological and limnological bases for management of overgrown macrophytes: introduction to a special feature[J]. Limnology, 20(s):1-2.
- Nakamura K, Kayaba Y, Nishihiro J, et al, 2008. Effects of submerged plants on water quality and biota in large-scale experimental ponds[J]. Landscape and ecological engineering, 4(1): 1-9.
- Steffen K, Becker T, Herr W, et al, 2013. Diversity loss in the macro-phyte vegetation of northwest German streams and rivers between the 1950s and 2010[J]. Hydrobiologia, 713(1):1-17.
- Xu W W, Hu W P, Deng J C, et al, 2014. Effects of harvest management of *Trapa bispinosa* on an aquatic macrophyte community and water quality in a eutrophic lake[J]. Ecological Engineering, 64: 120-129.
- Xu W W, Hu W P, Deng J C, et al, 2016. How do water depth and harvest intensity affect the growth and reproduction of *Elodea nuttallii* (Planch.) St. John[J]. Journal of Plant Ecology, 92:212-223.

(责任编辑 郑金秀)

## Effects of Harvest Intensity on *Myriophyllum Aquaticum* Growth and Water Purification

YU Xin-hui<sup>1</sup>, WU Xiao-dong<sup>1,2</sup>, GE Xu-guang<sup>1,2</sup>, GUI Zhi-fan<sup>1,2</sup>,  
ZHOU Meng-die<sup>1</sup>, BIAN Ling-ling<sup>1</sup>, LIU Lian<sup>1</sup>

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Hubei Normal University, Huangshi 435002, P.R.China;  
2. Huangshi Key Laboratory of Soil Pollution and Control, Huangshi 435002, P.R.China)

**Abstract:** *Myriophyllum aquaticum*, is an invasive species, but commonly used in ecological treatment of sewage and control of agricultural non-point pollution because it is fast growing, highly adaptable and easily reproduced. In this study, we explored the effects of harvesting intensity on *M. aquaticum* and water quality under controlled laboratory conditions, aiming to provide a reference for management of alien species. The experiments were carried out from March 31 to July 16, 2018 in plastic buckets (height: 70cm; diameter: 40cm) and 30 *M. aquaticum* plants (height: 14–16 cm) were planted in each bucket. Five harvesting intensities (15%, 30%, 45%, 60% and 75%) were set with a 0% harvest intensity group as the control, trials were run in triplicate and plants were harvested when they reached the top of the bucket. Nine *M. aquaticum* plants were randomly selected for height measurement every 5 days before harvesting and plant height, branch number and the length of new branches was measured every 10 days after harvesting. Measurements of SS, TN, TP, Chl-a were carried out to determine water quality one day before harvesting, and growth parameters, stocking crop, and stem diameter were measured after the experiment. Results show that: (1) Harvesting had a significant effect on recovery of shoots and plant height of *M. aquaticum*. In the control group, the ultimate plant height reached 187.0 cm, and a canopy formed on the water surface. Plants in the low and medium intensity harvest groups (15% , 30% and 45%) all recovered within 20 days after the first harvest, and some plants actually grew better after low intensity harvesting. The recovery rate of plants in the high harvest intensity groups (60% and 75%) were 80.68% and 62.00%, much lower than that of the low and medium intensity harvest groups. After the second harvest, the recovery rates were 91.44% for the low intensity groups, 76.09% for the medium intensity group and 42.22% for the high intensity groups, and plants in high intensity groups did not recover by the end of the experiment. With increased harvest frequency, the recovery time of branches is longer. (2) Harvesting reduced the number of new branches of *M. aquaticum*. Control group plants had the largest number of new branches (6.9 per plant), while harvest intensities of 15%, 30%, 45%, 60% and 75% yielded plants with 4.3, 4.0, 3.6, 2.2 and 1.8 new branches, respectively. (3) Harvesting significantly reduced the biomass of *M. aquaticum*. The biomasses of the 15%, 30%, 45%, 60% and 75% groups were, respectively, 10.11%, 3.23%, 2.47%, 2.29% and 0.80% of the control group. (4) The harvest of *M. aquaticum* had a significant impact on water quality. Total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the water decreased after harvest, and the harvest intensity and frequency significantly affected nitrogen and phosphorus concentrations. The levels of TN and TP after the second harvest for each harvest intensity (15%, 30%, 45%, 60% and 75% ) decreased, respectively, by 13.63% and 24.82%, 12.90% and 22.87%, 8.24% and 25.04%, 6.66% and 34.91, 9.64% and 17.64% compared with decreases after the first harvest. The harvest intensity also affected the suspended solids and Chl-a concentration in the water, which increased markedly in the high intensity treatments. To summarize, harvesting controls *M. aquaticum* growth and, for effective maintenance of water quality, we recommend harvesting *M. aquaticum* two or three times annually at a low intensity (15%–30%)

**Key words:** *Myriophyllum Aquaticum*; harvest intensity; growth; water quality