

# 不同水深和底质对太湖马来眼子菜 (*Potamogeton malaianus*) 生长的影响

翟水晶<sup>1,2</sup>, 胡维平<sup>1,\*</sup>, 邓建才<sup>1</sup>, 陈 桥<sup>1,2</sup>, 韩红娟<sup>1,2</sup>, 刘伟龙<sup>3</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;  
3. 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘要:**在野外通过用钢管在水泥池中用吊盆悬挂试验,研究了在 1a 生长周期内不同底质(软泥和黄土)、不同水深(30、60、90、120 cm 和 150 cm)对太湖马来眼子菜(*Potamogeton malaianus* Miq.)生长的影响,试图探询太湖马来眼子菜的最佳生长习性,为太湖进行沉水植物生态修复提供科学依据。结果表明:(1)水深对马来眼子菜的影响比底质的影响大。马来眼子菜的株长、生物量和分蘖数在不同的水深梯度呈显著性差异,而两种底质间却没有显著性差异。(2)马来眼子菜适合在水温为 20~30°C 的范围内快速生长。(3)马来眼子菜的最佳生长深度是 60~120 cm。在 60~120 cm 的水深范围内马来眼子菜的分蘖数随着时间变化在缓慢增加,株长、株长增加量、相对生长速率和干重增加量均随水深的增加而增大,而水深较大或较小时马来眼子菜都会因为光照不足或者容易脱水等因素限制其生长和繁殖。(4)在经过冬季越冬期后马来眼子菜的营养生长能力下降,繁殖能力上升。

**关键词:**水深;底质;太湖;马来眼子菜;吊盆试验

文章编号:1000-0933(2008)07-3035-07 中图分类号:Q948.8 文献标识码:A

## Effects of different water depths and sediments on *Potamogeton malaianus* in Lake Taihu

ZHAI Shui-Jing<sup>1,2</sup>, HU Wei-Ping<sup>1,\*</sup>, DENG Jian-Cai<sup>1</sup>, CHEN Qiao<sup>1,2</sup>, HAN Hong-Juan<sup>1,2</sup>, LIU Wei-Long<sup>3</sup>

1 Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041 China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3035 ~ 3041.

**Abstract:** The effects of different water depths and sediments on the growth of *Potamogeton malaianus* Miq. were studied from Sept. 2006 to Sept. 2007 at Taihu Laboratory for Lake Ecosystem Research. Experiments were carried out with *Potamogeton malaianus* in plastic pots from steel tubes placed on a concrete pond. Two types of sediments, mud and loess; and five water depths of 30, 60, 90, 120 cm and 150 cm were used in this experiment. The objective of the experiment was to determine the best growth habitat of *Potamogeton malaianus* and provide scientific basis for ecological restoration of submersed vegetation in Lake Taihu. The results show that water depth has a greater effect on the growth of *Potamogeton malaianus* than sediment type. With increased water depth, the length, dry biomass, and tiller numbers significantly

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30670351)

收稿日期:2008-01-24; 修订日期:2008-03-24

作者简介:翟水晶(1979~),女,山东烟台人,博士生,主要从事湖泊生态研究. E-mail: s2008shuijing@163.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wphu@niglas.ac.cn

致谢:感谢美国 Christine Lockert 对论文摘要的润色.

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30670351)

Received date: 2008-01-24; Accepted date: 2008-03-24

Biography: ZHAI Shui-Jing, Ph. D. candidate, mainly engaged in lake ecology. E-mail: s2008shuijing@163.com; strawzsj@hotmail.com

changed; however, these indices experienced no significant changes between the two sediment types (mud and loess). *Potamogeton malaianus* had a stronger adaptability within water temperatures ranging from 22 to 30°C and grows best in water depths ranging from 60–120 cm. In this range, plant length, relative growth rate (RGR) and dry biomass increased with water depth. The tiller numbers produced by *Potamogeton malaianus* plants also increased with time at these depths. In shallower or deeper water, the plant growth and reproduction may be limited due to many factors, such as light capacity or dehydration. Vegetative growth ability of *Potamogeton malaianus* decreased while reproductive ability increased through the whole winter.

**Key Words:** water depth; sediments; Lake Taihu; *Potamogeton malaianus*; experiments about suspending plastic basins

太湖自 20 世纪 80 年代以来,社会经济的迅速发展引起水质急剧下降<sup>[1]</sup>,水生植物面积不断萎缩,一些对生态环境变化敏感和不耐污的种类从湖泊中消失<sup>[2]</sup>,种群向单一化发展。而马来眼子菜(*Potamogeton malaianus* Miq.)在太湖水环境持续恶化的情况下,分布面积却逐年扩大,在不同水域和底质条件下均能存活,是目前太湖沉水植物优势种之一<sup>[3]</sup>。马来眼子菜在太湖不同水域的生物量差异较大,这种差异是水深、水体营养盐、底质特征、水体透明度、人类活动等因素综合作用的结果<sup>[4]</sup>。目前关于不同环境要素对马来眼子菜生长的影响研究存在一定的分歧,尤其是底质方面<sup>[5~8]</sup>,而且目前的研究侧重于在野外湖泊中进行随机样方采样<sup>[5,9]</sup>,不能保证初始条件和植物生长周期的一致性,同时受人为干扰较大。本文于 2006 年 9 月~2007 年 9 月在太湖湖泊生态系统国家野外观测研究站(简称太湖站)通过在静水环境条件下的吊盆悬挂试验,观察研究不同水深和底质对马来眼子菜在 1a 生长周期内生长的影响,探询马来眼子菜的最佳生长习性,为利用马来眼子菜修复太湖富营养化生态系统提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

太湖底质主要为次生的软泥和硬质下蜀黄土<sup>[10]</sup>。本试验模拟上述两种底质:软泥和黄土,软泥是从太湖捞取上层软泥搅拌均匀,黄土来自湖边上下的蜀黄土,挖取后也混匀。软泥的有机质及氮磷含量均高于黄土,软泥中有机质含量是黄土的两倍多(见表 1),说明试验中所用的软泥营养负荷高于黄土。本试验在太湖站船坞东侧规格为 4.0 m(长)×4.0 m(宽)×2.0 m(高)的水泥池中进行,试验所用马来眼子菜是 2006 年 9 月 5 日在太湖人工采集后经催生萌发具根的幼苗。试验用水来自太湖梅梁湾。

### 1.2 试验设计

2006 年 9 月 11 日将软泥和黄土分别装入 48 个直径 40 cm、高 20 cm 的塑料盆中,黄土装盆后即用水浸湿,防止栽植时损伤马来眼子菜。挑选形态一致的马来眼子菜,并截取具根和新芽的高度均为 10 cm 的幼苗栽种在盆内,每盆 8 株,并在每棵植株上挂上防水标签进行编号。将内径 10 cm 的钢管东西向均匀横在试验池上,钢管南北两边各距池内壁 50 cm。用结实的尼龙绳将装有马来眼子菜和两种底质的试验盆迅速挂在钢管上,并调整深度。为了使植物能够获得充分的光照,从北到南每根钢管上试验盆所处的深度依次为 30、90、150、180、120 和 60 cm。为了保证数据的可靠性共设 4 个盆作为平行,即每种底质每种水深共有 32 棵马来眼子菜。挂好试验盆后,向水池缓慢注入湖水,直至注满水池。

### 1.3 测定项目

马来眼子菜在试验水池中稳定 4d 后,试验从 2006 年 9 月 15 日开始至 2007 年 9 月 15 日结束,具体测量时间为:2006 年 9 月 15 日、10 月 3 日、10 月 23 日、11 月 9 日、11 月 23 日、12 月 9 日,2007 年 4 月 13 日、4 月

表 1 试验底质的氮磷及有机质含量

Table 1 Content of TKN, TP and organic substance in different sediment types

底质 Sediment type	w(凯氏氮 TKN) (%)	w(总磷 TP) (%)	w(有机质) (%)
软泥 Mud	0.0645	0.0375	8.248
黄土 Loess	0.054	0.028	3.638

27 日、5 月 13 日、5 月 25 日、6 月 12 日、7 月 1 日、7 月 12 日、7 月 23 日、7 月 29 日、8 月 9 日、8 月 18 日、9 月 7 日和 9 月 15 日,共计 19 次。测量时把试验盆轻轻拎出水面,用精度为 1 mm 的钢尺按照栽种时标签标记的顺序测量整个株长,小于 10 cm 的植株不在计算范围之内。同时,从每个平行中用手慢慢取出 2~3 株完整的马来眼子菜,用水冲洗掉底泥,将样品带回室内小心清洗掉烂叶和附着在植株上的虫卵、水绵,在烘箱内 105 °C 杀青后 80 °C 烘 24h 至恒重,取出后迅速放入干燥皿,冷却后称干重,取平均值。

1.4 数据处理

由于受水位压力、水绵等因素的影响,水深 180 cm 试验盆内的马来眼子菜在经过冬季越冬期后损伤最大,断枝、茎叶腐烂、整株死亡的现象最多,在 2007 年 7 月就已经所剩无几。所以为了保持数据的连贯性,本文只采用水深 30、90、60、120 cm 和 150 cm 的数据进行分析,并对每个平行进行逐月平均,采用 SPSS11.5 的两独立样本 *T* 检验以及两配对样本 *T* 检验对数据进行差异性分析。植物的相对生长速率 *RGR* (relative growth rate) 采用测定期间前后两次植株株长自然对数的增加量与时间的比。

2 结果与分析

2.1 马来眼子菜在软泥和黄土底质的月平均株长

从本试验 1a 生长期内的观察结果来看,在软泥和黄土两种底质中马来眼子菜均呈双峰型特征,将其暂定为两个快速生长阶段:第 1 阶段(2006 年 9~11 月)马来眼子菜初次快速生长,第 2 阶段(2007 年 5~7 月)马来眼子菜经过冬季越冬期后自然萌发后快速生长。两种底质的马来眼子菜各深度在第 1 阶段稳定生长时期平均株长均比第 2 阶段高 15~30 cm,经统计分析两个阶段平均株长相差显著 ( $P < 0.05$ ),而两种底质间却没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。从图 1 可以看出马来眼子菜的株长随水深的增加明显增加,在水深 150 cm 软泥底质生长的马来眼子菜株长最高可达 136.38 cm,平均为 92.82 cm,黄土底质生长的马来眼子菜株长最高可达 134.56 cm,平均为 78.04 cm。水深 30 cm 生长的马来眼子菜在湖泥和黄土底质的平均株长分别为 36.08、42.86 cm。从 2006 年 11 月开始随着水温降低马来眼子菜生长缓慢,12 月份水温最低为 17.93 °C,马来眼子菜逐渐枯黄开始进入冬芽越冬期,一直到翌年的 3 月份重新萌发。2007 年 4~7 月随着水温上升,马来眼子菜又开始快速生长,但一直有枯枝烂叶。在 7~9 月份,试验水池日均水温最高达到 36.77 °C,马来眼子菜出现断枝、烂茎和整株死亡等现象开始明显增多,特别是水深比较大的植株损伤率和死亡率更高,水深 150 cm 软泥底质生长的 4 盆马来眼子菜从 8 月 9 日就已经全部死亡。

2.2 马来眼子菜在两个生长阶段的株长增加量

马来眼子菜的株长增加量在两个阶段有明显的差异 ( $P < 0.05$ ),而两种底质间却没有明显差异 ( $P > 0.05$ )。以软泥底质为例,在第 1 阶段马来眼子菜的株长增加量随着深度的增加缓慢增加,水深 150 cm 株长增加量最大为 122.54 cm,水深 30 cm 的株长增加量最小为 63.62 cm,水深 60、90 cm 和 120 cm 的株长增加量依次呈现递增趋势分别为 91.19、94.89 cm 和 100.60 cm。在第 2 阶段,马来眼子菜的株长增加量随深度增加变化的规律性不强,但变化较大,水深 150 cm 株长增加量的最大为 78.21 cm,水深 30 和 60 cm 的株长增加量最小仅 19.97 cm 和 20.00 cm,水深 120 cm 和 90 cm 的株长增加量依次为 44.93 和 46.92 cm。

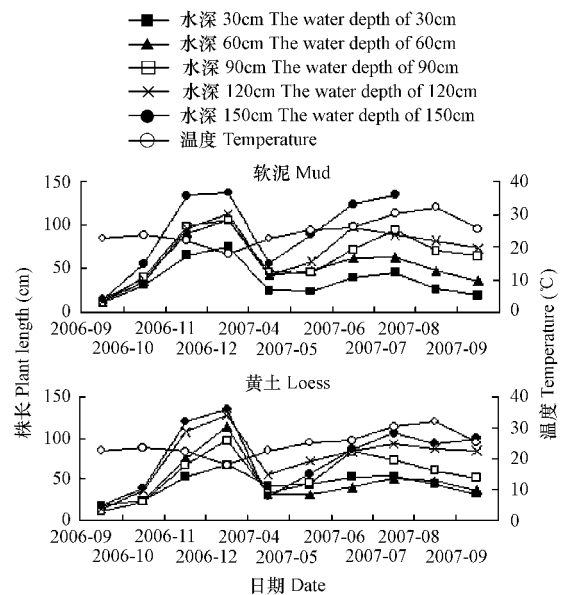


图 1 马来眼子菜在软泥和黄土底质的平均株长  
Fig. 1 Average plant length of *P. malaianus* in mud and loess

### 2.3 马来眼子菜在两个生长阶段的相对生长速率

马来眼子菜在第 1 阶段内的相对生长速率明显高于第 2 阶段 ( $P < 0.05$ )。在第 1 阶段内,马来眼子菜在软泥底质中相对生长率平均为  $0.034 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,黄土底质中为  $0.028 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,二者差异性显著 ( $P < 0.05$ )。两种底质中马来眼子菜在 30 ~ 120 cm 内的相对生长速率均随水深增加而增大,水深 150cm 时相对生长速率开始减小。在第 2 阶段马来眼子菜的相对生长速率随水深的增加变化平缓,变化于  $0.004 \sim 0.012 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  之间,而且两种底质间没有显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

### 2.4 马来眼子菜在两个生长阶段的干重增加量

在马来眼子菜整个生长期内,其生物量随时间不断变化。生物量的变化可反映马来眼子菜的同化速率<sup>[11]</sup>。马来眼子菜在第 1 阶段的干重增加量明显高于第 2 阶段 ( $P < 0.05$ ),软泥与黄土之间没有显著性差异 ( $P > 0.05$ )。从图 4 可以明显看出,马来眼子菜在水深 30 ~ 120 cm 时干重增加量随着水深增加而增加,但水深 150cm 时迅速下降。以第 1 阶段软泥底质为例,马来眼子菜干重增加量在水深 30 cm 时为  $0.76 \text{ g}$ ,而在水深 60 ~ 120 cm 时干重增加量均超过  $1.20 \text{ g}$ ,并且随着深度的增加而增加,但在 150 cm 时干重迅速减为  $0.42 \text{ g}$ 。在第 2 阶段和黄土底质也有类似趋势,其中第 2 阶段软泥底质的马来眼子菜在水深 120 cm 的干重增加量突增至  $1.36 \text{ g}$ ,这可能与采样的随机性有关。

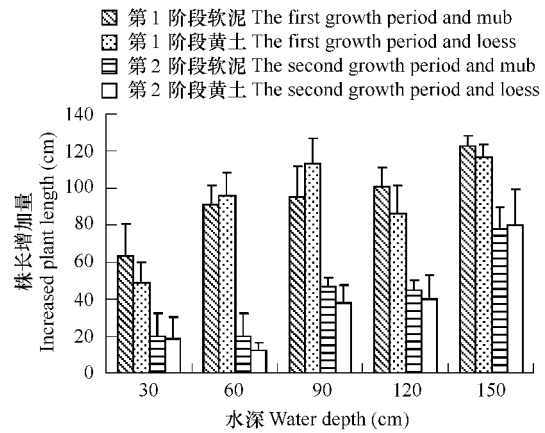


图 2 马来眼子菜在两个生长阶段的株长增加量  
Fig. 2 Increased plant lengths of *P. malaianus* in the two growth periods

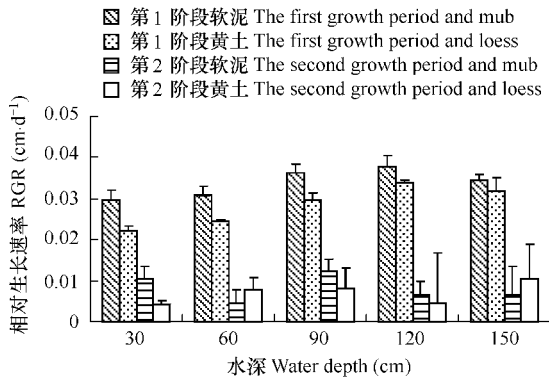


图 3 马来眼子菜在两个生长阶段的相对生长速率  
Fig. 3 The RGR of *P. malaianus* in the two growth periods

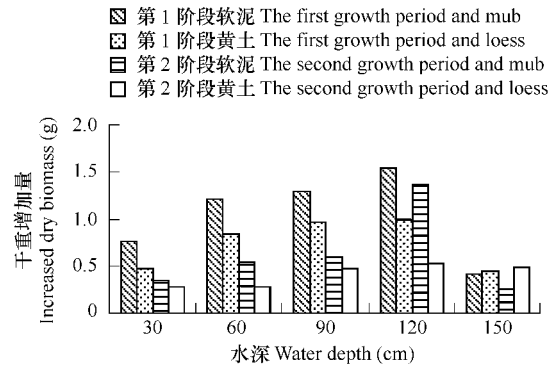


图 4 马来眼子菜在两个生长阶段的干重增加量  
Fig. 4 Increased dry biomass of *P. malaianus* in the two growth periods

### 2.5 马来眼子菜在第 2 阶段的分蘖数

在两种底质中,马来眼子菜分蘖数(总株数)随着水深增加相应减少的趋势比较明显。水深 30 cm 和 60 cm 的马来眼子菜在 4 ~ 6 月份的分蘖数明显增加,从 7 月份开始随着温度升高试验水池蒸发量增加,由于没有及时补给湖水导致水位下降,水深 30 cm 的试验盆出现很多株长小于 10 cm 的新生植株体,没有计算在内,因而导致分蘖数急剧下降。而水深 150 cm 的马来眼子菜因水位压力,不断出现断茎、死亡现象,分蘖数从 6 月份就开始下降,到 8 月份时已经全部死亡。而水深 90 和 120 cm 的马来眼子菜分蘖数一直保持缓慢上升的趋势,从 8 月份开始水深 60 ~ 120 cm 的马来眼子菜分蘖数又开始显著增加。

### 3 讨论

底质是沉水植物生根、繁殖并能够稳定生长的基本条件,同时也是沉水植物养分的直接来源之一<sup>[12~15]</sup>。

有人认为马来眼子菜适合在硬泥质或粉砂含量大的基质条件中生长<sup>[6,7]</sup>,也有人认为生长在软泥底质的马来眼子菜生物量高于生土或者黄土<sup>[5,8]</sup>。从本文的分析结果来看,虽然软泥底质比黄土底质的营养负荷含量高,但是马来眼子菜的月均株长、株长增加量和相对生长速率以及干重增加量在太湖两种主要底质中并没有显著性差异。以干重增加量为例,在第1阶段内,水深30 cm和120 cm软泥底质生长的马来眼子菜干重增加量分别为0.76、1.54 g,比黄土底质分别高0.27、0.54 g;在第2阶段,水深30 cm和120 cm软泥底质生长的马来眼子菜干重增加量分别为0.35 g和1.37 g,比黄土底质分别高0.07g和0.83 g。经统计分析马来眼子菜在两种底质的干重增加量之间没有显著性差异( $P > 0.05$ )。

杨清心、李文朝<sup>[16]</sup>认为7~9月份(24.6~29.8℃)是太湖马来眼子菜的高速生长期。而本试验发现马来眼子菜从7月开始出现断枝、烂茎和整株死亡等现象,水深比较大的植株损伤率和死亡率更高,2006年9

~11月和2007年5~7月是试验期内的两个生长高峰。但从水温变化来看,这两个阶段内试验水池的月平均水温变化范围为22.04~30.17℃,与文献16中温度变化范围相近。这与20多年来全球气候变暖太湖的生态环境发生变化有很大的关系。在7~9月份,水下50 cm的日平均水温为30.17~32.18℃,最高可以达到36.77℃,从7月下旬到8月底水温超过32℃达到28d。表层日平均水温变化于31.98~32.38℃,最高可以达到37.11℃,有30d水温超过32℃,对马来眼子菜的生长造成一定的威胁。所以在22~30℃的水温范围内马来眼子菜能够快速生长。

水深对于水生植物的分布和群落结构具有重要的影响<sup>[17]</sup>。能够通过影响光合作用直接影响植物的生长,同时,也可通过改变底泥的理化性状对植物生长造成间接影响<sup>[18]</sup>。水生植物对水深的变化能在形态上产生一系列的响应<sup>[19]</sup>。不同的植物适应不同的水位范围<sup>[20]</sup>,沉水植物生长的适宜水深为60~200 cm<sup>[21]</sup>,野外调查发现马来眼子菜在1~4 m的深度范围内均有分布<sup>[22]</sup>,随着水深增加其长度相应增加,不同水深下马来眼子菜的长度比生长区域水深稍长,一般高出20~50 cm,有利于叶片对光辐射的吸收<sup>[9]</sup>。本试验中,马来眼子菜的株长随水深增加而增加的趋势比较明显,但水深150 cm软泥底质的马来眼子菜株长最高只有136.38 cm,黄土底质最高仅134.56 cm。与野外调查的结果不一致,这与静水条件以及试验池中营养盐含量有一定的关系。马来眼子菜的株长增加量随着水深的增加而增加,这说明水深对马来眼子菜的营养生长起到了决定性作用。从干重增加量、相对生长速率和分蘖数来看这些指标来看,150 cm水深的马来眼子菜生长最差。这主要是因为马来眼子菜的“觅食(光)行为”。Cain<sup>[23]</sup>研究发现某些克隆植物通过在不同生境中缩短匍匐茎(或根茎)节间长度或增加分枝的“觅食行为”在形态上做出“觅食反应(foraging response)”。影响沉水植物生存的主要因素是光,水深越大的马来眼子菜对光的趋向性导致产生较多的节间数和较长的节间距以获得更多的光,从而导致植株的株长随水深的增加而增加,干重增加量、相对生长速率和分蘖数却呈下降趋势。

在自然状况下马来眼子菜主要依赖营养繁殖来实现种群的更新与扩展,地下根茎及其上形成的块茎状芽体(具鳞根出条)是主要的营养繁殖体<sup>[22]</sup>。马来眼子菜不但具有发达的地下根状茎系统,而且节部生有须根,其上的芽体向上发展即成为新的马来眼子菜植株(抽条)。分蘖数能够表征马来眼子菜在某种生境条件下的生长能力和繁殖能力。本试验结果表明,马来眼子菜随着水深的增加分蘖数也相应减少,这与崔心红

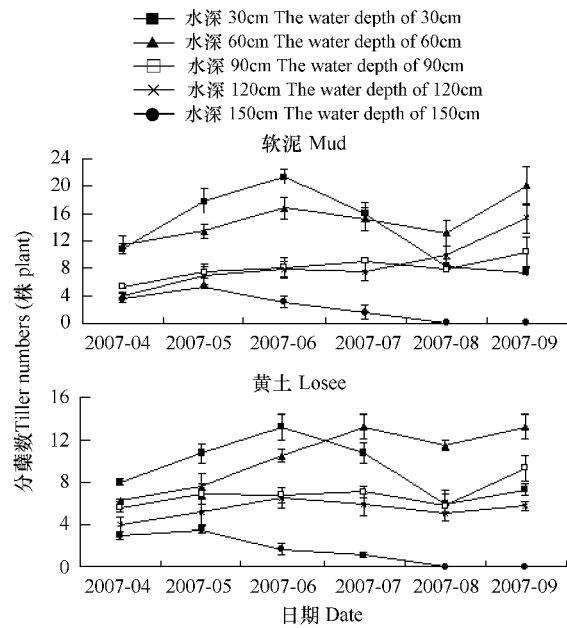


图5 马来眼子菜在第二阶段的分蘖数

Fig. 5 The tiller numbers of *P. malaiianus* in the second growth period

等<sup>[9]</sup>得出的“马来眼子菜抽条数和花序数沿着水深梯度有递减的趋势”结论相吻合。在 60 ~ 120 cm 的水深范围内马来眼子菜的分蘖数随时间变化均在缓慢增加,而水深较大时马来眼子菜在水位压力、低透明度和光照不足等因素的限制下分蘖数从 5 月份就开始急剧下降,植株体也逐渐死亡,水深较浅的马来眼子菜也容易受到夏季水分蒸发或干旱季节水位下降而限制其生长和繁殖。而且在水深 60 ~ 120 cm 内,马来眼子菜的株长增加量、相对生长速率和干重增加量均有随着水深的增加而增大的趋势。因此,在静水环境下的水池吊盆试验结果表明 60 ~ 120 cm 的水深环境最适合马来眼子菜的生长。

通过对马来眼子菜在两个生长阶段的比较分析,发现在第一阶段马来眼子菜的株长增加量、相对生长速率和干重增加量都明显比第 2 阶段高,主要表现在以营养生长为主,经过一个冬季越冬期后,分蘖数明显增多,马来眼子菜由营养生长阶段进入了繁殖生长阶段。这说明在经过冬季越冬期后马来眼子菜的营养生长能力开始下降,而繁殖能力开始上升。众所周知,沉水植物净化水质效果是最好的。在本试验中,马来眼子菜的株长、株长增加量、干重增加量和相对生长速率在第 1 阶段均好于第 2 阶段,而且在翌年春季随着马来眼子菜的萌发逐渐有枯茎烂叶进入水体,尤其是水深较大的植株,研究发现植物幼叶对水质的敏感性要高于老叶<sup>[24]</sup>,酶活性偏高,净化效果好。所以在利用马来眼子菜等沉水植物净化水质时应在越冬期之前就开始收割,以减少水中的营养盐含量。

#### 4 结论

(1) 水深对马来眼子菜的影响比底质的影响大。马来眼子菜的株长、株长增加量、相对生长速率和干重增加量随水深的增加而增加,差异性显著。在软泥和黄土两种底质中,却没有显著性差异。

(2) 马来眼子菜适合在水温为 22 ~ 30 ℃ 的范围内快速生长。2006 年 9 ~ 11 月和 2007 年 5 ~ 7 月是试验期内的两个快速生长的阶段,试验水池的月平均水温变化范围为 22 ~ 30 ℃。

(3) 马来眼子菜的最佳生长深度是 60 ~ 120 cm。在 60 ~ 120 cm 的水深范围内马来眼子菜的分蘖数随时间变化在缓慢增加,株长、株长增加量、相对生长速率和干重增加量均随水深的增加而增大,而水深较大或较小时都会因为光照不足或者容易脱水等因素限制其生长和繁殖。

(4) 经过冬季越冬期后马来眼子菜的营养生长能力开始下降,繁殖能力开始上升。所以在利用马来眼子菜等沉水植物净化水质时应在越冬期之前就开始收割,以减少水中的营养盐含量。

#### References:

- [ 1 ] Hu W P, Sven E J, Zhang F B. A vertical-compressed three-dimensional ecological model in Lake Taihu, China. *Ecological Modelling*, 2006, 190 (4): 367—398.
- [ 2 ] Gu X H, Zhang S Z, Bai X L, *et al.* Evolution of community structure of aquatic macrophytes in East Taihu Lake and its wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1541—1548.
- [ 3 ] Liu W L, Hu W P, Chen Y G, *et al.* Temporal and spatial variation of aquatic macrophytes in west Taihu Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (1): 0159—0170.
- [ 4 ] Liu W L, Hu W P, Gu X H. The biomass variation of *Potamogeton malaianus* and its influential factors in Lake Taihu. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3324—3333.
- [ 5 ] Liu W L, Hu W P, Chen Q. The phenotypic plasticity of *Potamogeton malaianus* Miq. on the effect of sediment shift and Secchi depth variation in Taihu Lake. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 363—368.
- [ 6 ] Ren C J, Dai J C, Dong W, *et al.* Study on Niche and Community Succession of Submerged Macrophyte in Jingmi Canal, Beijing. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1999, 35(4): 523—528.
- [ 7 ] Lei Z X, Xie Y F, Liu Z W. Effects of different sediments from Meiliang Bay of Taihu Lake on the growth of three submersed aquatic macrophytes. *Journal of Central China Normal University (Nat. Sci.)*, 2006, 40(2): 260—264.
- [ 8 ] Chen K N, Sun X F, Chen W M, *et al.* Effects of sediments on submerged macrophytes growth. *Appl. Ecol.*, 2006, 17(8): 1511—1516.
- [ 9 ] Cui X H, Pu Y H, Xiong B H, *et al.* The growth and reproduction response of *Potamogeton malaianus* Miq. to water depth gradient. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, 23(3): 269—272.
- [ 10 ] Huang Y P. Water environment of Lake Taihu and its pollution control. Beijing: Science Press, 2001. 20—22.

- [11] Xu C M, Jia Z K, Han Q F. Study on growth characteristics of aboveground part of *Ameristand 201 + z alfalfa*. *Acta Bot. Boreali-Occident. Sin.*, 2003, 23(3):481—484.
- [12] Liu J K. *Advanced hydrobiology*. Beijing: Science Press, 1999. 224—241.
- [13] Ni L Y. Stress of fertile sediment on the growth of submersed macrophytes in eutrophic waters. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, 25(4): 399—405.
- [14] Barko J W, Smart R M. Sediment-related mechanisms of growth limitation in submersed macrophytes. *Ecology*, 1986, 67:1328—1340.
- [15] Barko J W, Gunnison D G, Carpenter S R. Sediment interactions with submerged macrophytes growth and community dynamics. *Aquat Bot*, 1991, 41: 41—65.
- [16] Yang Q X, Li W C. The introduction of *Elodea nuttallii* to Lake Taihu. Collected publication of Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1989. 84—92.
- [17] Paillasson J M, Marion L. Can small water level fluctuations affect the biomass of *Nymphaea alba* in large lakes? *Aquatic Botany*, 2006, 84(3): 259—266.
- [18] Scheffer M. *Ecology of Shallow Lakes*. London: Chapman and Hall, 1998.
- [19] Vretare V, Weisner S E B, Strand J A, Craneli W. Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* as a functional response to water depth. *Aquatic Botany*, 2001, 69: 127—145.
- [20] Wang H Y, Chen J K, Zhou J. Influence of water level gradient on plant growth, reproduction and biomass allocation of wetland plant species. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(3):269—274.
- [21] Andrea J H. Implementation of a GIS to assess the effects of water level fluctuations on the wetland complex at Long Point, Ontario. Waterloo: University of Waterloo, 2003.
- [22] Pu Y H, Li W. Ecological studied on *Potamogeton malaianus* Miq. in China. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1999, 17: 65—72.
- [23] Cain M L. Consequence of foraging in clonal plant species. *Ecology*, 1994, 75(4): 933—944.
- [24] Guilizzoni P. The role of heavy metals and toxicmaterials in the physiological ecology of submersed macrophytes. *Aquat Bot*, 1991, 41: 87—109.

#### 参考文献:

- [2] 谷孝鸿, 张圣照, 白秀玲 等. 东太湖水生植物群落结构的演变及其沼泽化. *生态学报*, 2005, 7(25): 1541~1548.
- [3] 刘伟龙, 胡维平, 陈永根, 等. 西太湖水生植物时空变化研究. *生态学报*, 2007, 27(1): 1~12.
- [4] 刘伟龙, 胡维平, 谷孝鸿. 太湖马来眼子菜生物量变化及影响因素. *生态学报*, 2007, 27(8): 3324~3333.
- [5] 刘伟龙, 胡维平, 陈桥. 不同底质和透明度下马来眼子菜的表型可塑性研究. *生态环境*, 2007, 16(2): 363~368.
- [6] 任久长, 戴长亮, 董巍, 等. 京密引水渠常见沉水植物的生态位和群落演替. *北京大学学报(自然科学版)*, 1999, 35(4):523~528.
- [7] 雷泽湘, 谢贻发, 刘正文. 太湖梅梁湾不同沉积物对3种沉水植物生长的影响. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 40(2):260~264.
- [8] 陈开宁, 陈小峰, 陈伟民, 等. 不同基质对四种沉水植物生长的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(8):1511~1516.
- [9] 崔心红, 蒲云海, 熊秉红, 等. 水深梯度对竹叶眼子菜生长和繁殖的影响. *水生生物学报*, 1999, 23(3):269~272.
- [10] 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制. 北京:科学出版社, 2001. 20~22.
- [11] 徐春明, 贾志宽, 韩清芳. 巨人201+Z苜蓿地上部分生长特性的研究. *西北植物学报*, 2003, 23(3):481~484.
- [12] 刘健康. *高级水生生物学*. 北京:科学出版社, 1999. 224~241.
- [13] 倪乐意. 富营养水体中肥沃底质对沉水植物生长的胁迫. *水生生物学报*, 2001, 25(4): 399~405.
- [16] 杨清心, 李文朝. 伊乐藻在太湖的引种. *中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊*. 北京: 科学出版社, 1989. 84~92.
- [20] 王海洋, 陈家宽, 周进. 水位梯度对湿地植物生长、繁殖和生物量分配的影响. *植物生态学报*, 1999, 23(3): 269~274.
- [22] 蒲云海, 李伟. 中国竹叶眼子菜的生态学研究. *武汉植物学研究*, 1999, 17(增刊): 65~72.