

郭俊秀, 许秋瑾, 金相灿, 等. 2009 不同磷质量浓度对穗花狐尾藻和轮叶黑藻生长的影响 [J]. 环境科学学报, 29(1): 118-123

Guo JX, Xu Q J, Jin X C, et al. 2009. Effect of phosphorus concentration on growth of *Myriophyllum spicatum* and *Hydrilla Verticillata* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(1): 118-123

# 不同磷质量浓度对穗花狐尾藻和轮叶黑藻生长的影响

郭俊秀<sup>1,2</sup>, 许秋瑾<sup>1</sup>, 金相灿<sup>1\*</sup>, 扈学文<sup>1</sup>, 李涵<sup>1,3</sup>

1 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地/国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012

2 内蒙古农业大学农学院, 呼和浩特 010018

3 中国矿业大学, 北京 100083

收稿日期: 2008-03-23 录用日期: 2008-11-26

**摘要:** 实验研究了不同质量浓度 (0.02, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 mg L<sup>-1</sup>) 磷对穗花狐尾藻和轮叶黑藻生长状况的影响。结果显示, 当磷质量浓度为 0.2 mg L<sup>-1</sup> 时, 是轮叶黑藻适宜生长的磷质量浓度, 表现为分枝数、株高和根长均显著增加且达到最大, 而穗花狐尾藻的适宜生长磷质量浓度为 0.4 mg L<sup>-1</sup>。两种沉水植物株高和根长增加量在磷质量浓度小于 0.2 mg L<sup>-1</sup> 时, 表现为轮叶黑藻大于穗花狐尾藻; 当磷质量浓度大于 0.4 mg L<sup>-1</sup> 时, 表现为穗花狐尾藻大于轮叶黑藻。实验结果表明, 穗花狐尾藻比轮叶黑藻更能耐受高质量浓度的磷, 并且两种沉水植物适宜生长的磷质量浓度都高于目前富营养化湖泊水体中的磷质量浓度, 也远高于湖泊富营养化的磷质量浓度标准 (0.02 mg L<sup>-1</sup>)。因此, 单纯的磷质量浓度并不是富营养化水体中沉水植物退化消亡的直接原因。

**关键词:** 磷质量浓度; 穗花狐尾藻; 轮叶黑藻

文章编号: 0253-2468(2009)01-118-06 中图分类号: X172 文献标识码: A

## Effect of phosphorus concentration on growth of *Myriophyllum spicatum* and *Hydrilla Verticillata*

GUO Junxi<sup>1,2</sup>, XU Q iujin<sup>1</sup>, JIN X iangcan<sup>1\*</sup>, HU Xuwen<sup>1</sup>, LI H an<sup>1,3</sup>

1 State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control/Research Center of Lake Eco-environment Chinese Research Academy of Environmental Sciences Beijing 100012

2 College of Agronomy Inner Mongolia Agriculture University, Huhhot 010018

3 China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083

Received 23 March 2008 accepted 26 November 2008

**Abstract** The effect of different phosphorus nutrition conditions (0.02, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 mg L<sup>-1</sup>) on the growth of the macrophytes *Myriophyllum spicatum* and *Hydrilla Verticillata* was investigated. The growth of *Hydrilla Verticillata* was promoted when the concentration of phosphorus was 0.2 mg L<sup>-1</sup>. Branch height and root length all notably increased and were maximized under these conditions. But for *Myriophyllum spicatum*, the optimal concentration of phosphorus was 0.4 mg L<sup>-1</sup>. At 0.2 mg L<sup>-1</sup> phosphorus, the height and root length of *Hydrilla Verticillata* was greater than that of *Myriophyllum spicatum*, while at 0.4 mg L<sup>-1</sup> phosphorus the reverse was true. The results demonstrate that *Myriophyllum spicatum* could tolerate higher phosphorus concentrations than *Hydrilla Verticillata*. However, the optimal phosphorus concentrations for the growth of both *Myriophyllum spicatum* and *Hydrilla Verticillata* exceed the phosphorus concentrations in eutrophic water bodies. So the phosphorus concentration alone cannot directly cause the degradation of submerged macrophytes in eutrophic water bodies.

**Keywords** phosphorus concentration; *Myriophyllum spicatum*; *Hydrilla Verticillata*

### 1 引言 (Introduction)

水体的富营养化问题已成为全球重大的水环境问题之一。水生植物是湖泊生态系统中的初级生

产者, 能够通过营养竞争、抑制风浪和藻类、促进营养物质的沉积、稳定沉积物、降低湖水的营养盐含量以及为水生动物提供觅食和庇护场所等 (刘春光等, 2004; 李文朝, 1996), 因此, 水生植物是湖泊生

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (No. 2002CB412307)

Supported by the National Basic Research and Development Program of China (No. 2002CB412307)

作者简介: 郭俊秀 (1981-), 女, E-mail: guojunxi@163.com; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: jinxian@publibta.net.cn

Biography: GUO Junxi (1981-), female, E-mail: guojunxi@163.com; \* Corresponding author, E-mail: jinxian@publibta.net.cn

态系统结构和功能的重要组成部分. 其中, 沉水植物因其根、茎、叶对水体中营养盐等污染物都能发挥较好的吸收作用, 是净化水体较为理想的水生植物(王海珍等, 2001; 王超等, 2004). 沉水植物的生长受多种因子的影响, 如光照、透明度、pH、温度等(Santamaría 1998; Rooney, 2000; Irfanullah, 2004; 刘晓艳等, 2004; Havens, 2004); 水体中营养盐对沉水植物的生长也起到重要作用. 有报道提出, 富营养条件下沉水植物主要吸收水体中的营养物质, 水体中磷质量浓度与沉水植物的生长密切相关(Short 1987; Duare, 1990; Bulhuis, 1993). 以往关于磷与沉水植物的研究往往侧重于植物对底泥中磷的吸收(金相灿等, 2005), 而关于水体中磷水平对常见沉水植物生长影响方面的研究还没有系统的报道.

本实验选取轮叶黑藻(*Hydrilla Verticillata*(L.) Royle)和穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)为实验材料, 研究了不同磷质量浓度对沉水植物轮叶黑藻和穗花狐尾藻株高、根长、分枝数及植株干样中磷含量的影响, 试图比较两种沉水植物对不同磷质量浓度的响应规律, 以期富营养化湖泊的沉水植物修复与选择先锋物种提供理论依据.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 供试材料

穗花狐尾藻和轮叶黑藻采自北京房山区拒马河, 取回后在温室预培养1个月, 选取生长良好、长势一致的15cm顶枝做试验材料.

### 2.2 实验设计

营养液采用改良的1/10倍的Hoagland's溶液, 磷质量浓度按不同的实验组配成0.02、0.1、0.2、0.4、0.8 mg·L<sup>-1</sup>, 氨氮质量浓度为0.2 mg·L<sup>-1</sup>.

选取生长良好、形状、质量较为一致的长15cm的穗花狐尾藻和轮叶黑藻顶枝, 移栽到装满石英砂的培养杯中, 每个培养杯中扦插4株长势一致的植物顶枝作为平行样. 培养杯置于10L无色玻璃缸(20cm×20cm×30cm)中, 每缸放培养杯5个, 培养液8.5L. 玻璃缸中培养液的磷质量浓度分别设置为: 0.02、0.1、0.2、0.4、0.8 mg·L<sup>-1</sup>. 培养缸置于1.5m×0.6m×0.4m的温控培养箱中, 白天温度为25℃, 晚上温度为20℃, 光照强度为3500 lx, 光暗比为14h:10h, 湿度为70%. 实验进行28d, 每隔3d换1次培养液.

### 2.3 取样与测试指标

实验开始每隔7d从各处理的培养缸中取出3

株植物, 记录植物的株高、根长、根数、分枝数. 根长和株高用直尺测量.

植株干样中磷含量测定: 称磨细烘干的植物样品(过0.25~0.50mm筛)0.1~0.2g于消化管中, 加5mL浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>摇匀, 放置过夜后消煮. 消煮时逐渐升温, 至溶液全部呈棕黑色时, 取下消煮管逐滴加入300g·L<sup>-1</sup>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>10滴, 加热至微沸10~20min, 再加入H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>5~10滴, 如此反复2~3次, 直至消煮液呈清亮色, 冷却, 定容至100mL, 过滤. 吸取消煮后的过滤液2~5mL于50mL比色管中, 采用钼锑抗比色法(鲍士旦, 2005)测定, 单位mg·g<sup>-1</sup>.

磷的相对增加率(R) = (实验28d时植株磷含量 - 初始植株磷含量) / 初始植株磷含量.

## 3 结果 (Results)

### 3.1 不同磷质量浓度对沉水植物分枝数的影响

由图1可见, 不同磷质量浓度对穗花狐尾藻和轮叶黑藻分枝能力影响的动态变化趋势相同, 均表现为随着培养时间的延长分枝数逐渐升高, 且实验28d时分枝数都达到最大. 实验28d时穗花狐尾藻各处理组分枝数大小为0.4 mg·L<sup>-1</sup> > 0.2 mg·L<sup>-1</sup> > 0.1 mg·L<sup>-1</sup> > 0.8 mg·L<sup>-1</sup> > 0.02 mg·L<sup>-1</sup>, 0.4

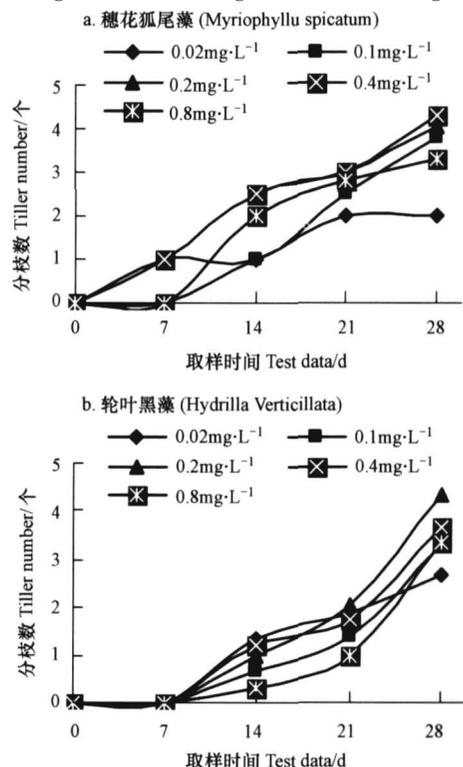


图1 不同磷质量浓度对沉水植物分枝能力的影响

Fig. 1 Effect of phosphorus concentration on tiller number of macrophytes

$0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组与  $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组有明显差异 ( $p < 0.05$ ); 轮叶黑藻各处理组分枝数大小为  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $p < 0.05$ ),  $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组分枝数明显低于其它处理组, 说明低磷浓度对沉水植物的分枝产生了一定的影响, 但  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组分别与  $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组差异达显著水平 ( $p < 0.05$ ). 由图 2 显示, 穗花狐尾藻随着磷质量浓度的增加新增分枝数增加, 在  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组时表现出分枝上的显著优势, 分枝数达到最大, 比  $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组的平均分枝数高 2 倍多,  $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组较  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组有所降低; 轮叶黑藻在  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组时分枝数达到最大, 随着质量浓度的进一步增加, 轮叶黑藻的分枝能力呈下降趋势. 实验结束时, 除  $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外的各处理组的新增分枝数均表现为穗花狐尾藻 > 轮叶黑藻.

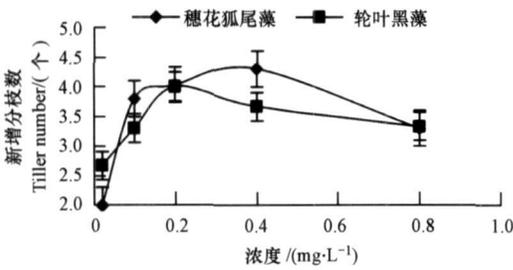


图 2 不同磷质量浓度对 2 种沉水植物新增分枝数影响的比较  
Fig. 2 Effect of phosphorus concentration on increased tiller number of the two macrophytes

### 3.2 不同磷质量浓度对沉水植物株高的影响

不同磷质量浓度对穗花狐尾藻和轮叶黑藻株高影响的动态变化如图 3 表 2 所示. 穗花狐尾藻随着培养时间的延长株高显著增加, 实验第 21d 时  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组与  $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组株高差异达显著水平, 实验第 28d 时各处理组株高达到最大, 株高大小顺序为  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 轮叶黑藻在实验第 0~14d 各处理组的株高随着培养时间的延长略有增加, 但各处理组增加幅度不显著, 之后各处理组株高均逐渐增加, 实验 21d 时,  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与  $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组差异达显著水平, 实验 28d 时各处理组株高均达最大, 各组株高大小顺序为  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

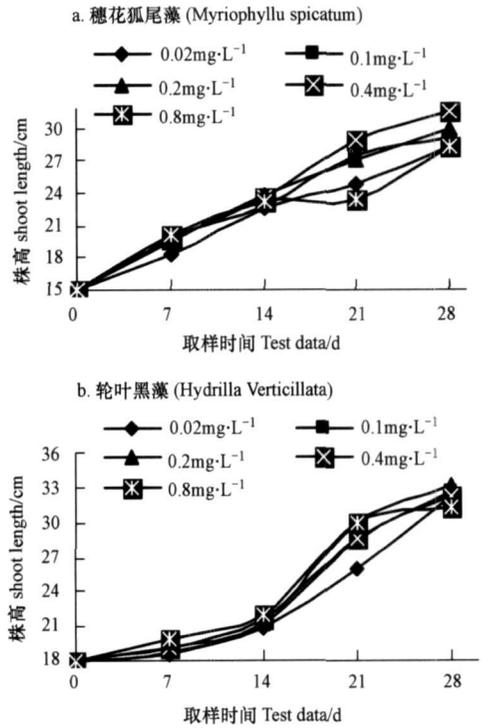


图 3 不同磷质量浓度对沉水植物株高的影响  
Fig. 3 Effect of phosphorus concentration on the shoot length of the two macrophytes

实验结束时不同磷质量浓度对穗花狐尾藻和轮叶黑藻株高增加量的影响见图 4. 由图 4 可知, 在小于  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷质量浓度处理条件下, 穗花狐尾藻和轮叶黑藻株高增加量均随浓度的升高逐渐增加, 两种植物的株高增加量大小表现为轮叶黑藻 > 穗花狐尾藻 ( $p < 0.05$ ), 且轮叶黑藻株高增加量在  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组时达到最大;  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组时, 两种植物株高增加量差异达显著水平, 表现为穗花狐尾藻 > 轮叶黑藻, 此浓度穗花狐尾藻株高增

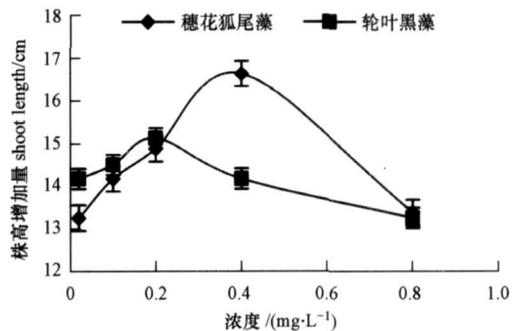


图 4 不同磷质量浓度对 2 种沉水植物株高增加量影响的比较  
Fig. 4 Effect of phosphorus concentration on increased shoot length of the two macrophytes

加量达到最大, 而轮叶黑藻呈现了下降趋势; 随着质量浓度的进一步增加, 穗花狐尾藻和轮叶黑藻的株高增加量均呈下降趋势, 但两者差异不显著。

### 3.3 不同磷质量浓度对沉水植物根长的影响

穗花狐尾藻和轮叶黑藻根长的动态变化见图5 穗花狐尾藻随着培养时间的延长各处理组根长显著增加, 在实验第28d时, 各处理组根长顺序为  $0.4 \text{ mg L}^{-1} > 0.2 \text{ mg L}^{-1} > 0.1 \text{ mg L}^{-1} > 0.8 \text{ mg L}^{-1} > 0.02 \text{ mg L}^{-1}$ , 且  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  处理组与  $0.02 \text{ mg L}^{-1}$  差异达到显著水平 ( $p < 0.05$ )。轮叶黑藻各处理组在实验第0~14d根长逐渐增加, 随后各处理组略有增加, 但增加幅度很小, 整个实验期间各处理组根长均无显著性差异。

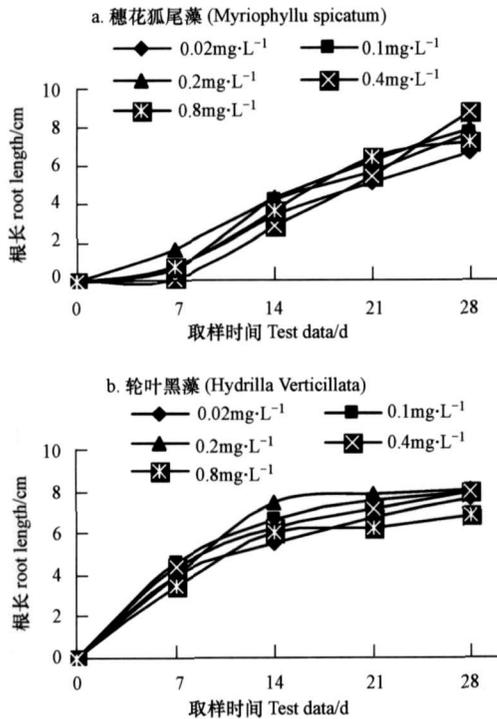


图5 不同磷质量浓度对沉水植物根长的影响

Fig 5 Effect of phosphorus concentration on root length of macrophytes

不同磷质量浓度对穗花狐尾藻和轮叶黑藻根长增加量的影响见图6 由图6可见, 随着处理浓度的增加穗花狐尾藻和轮叶黑藻根长增加量均表现出先增加后降低的变化趋势, 但是, 两种植物对于根系适宜生长的磷质量浓度又有所不同。穗花狐尾藻在小于  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  处理时根长增加量随浓度的增加显著升高, 并在  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  处理组时达到最大, 与  $0.02 \text{ mg L}^{-1}$  处理差异达到显著水平, 而在  $0.8 \text{ mg L}^{-1}$  浓度处理时根长增加量又呈现下降趋势。轮叶黑藻根长增加量随着处理浓度的增加缓慢上升, 在  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  处理时达到最大, 随着处理浓度的进一步增加根长增加量下降。两种沉水植物在不同磷质量浓度处理下, 根长增加量小于  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  处理时表现为轮叶黑藻 > 穗花狐尾藻, 大于  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  处理时表现为穗花狐尾藻 > 轮叶黑藻。在  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  和  $0.8 \text{ mg L}^{-1}$  处理时穗花狐尾藻根长增加量明显高于轮叶黑藻。

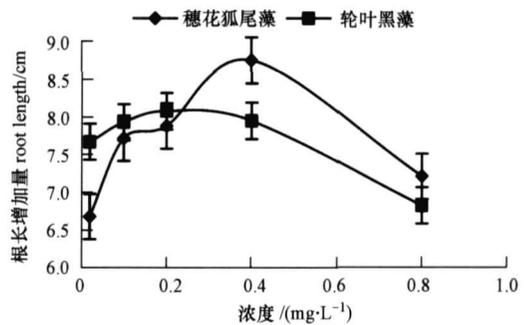


图6 不同磷质量浓度对2种沉水植物根长增加量影响的比较

Fig 6 Effect of phosphorus concentration on increased root length of the two macrophytes

### 3.4 不同磷质量浓度对沉水植物植株干样中磷含量的影响

在不同磷质量浓度处理下分别培养轮叶黑藻和穗花狐尾藻28d 植物干样中磷含量变化如表1

表1 不同磷质量浓度对沉水植物干样中磷含量的影响

Table 1 Effect of phosphorus concentration on P contents of the macrophytes

处理组	穗花狐尾藻		轮叶黑藻	
	磷含量 / (mg L <sup>-1</sup> )	相对增加率	磷含量 / (mg L <sup>-1</sup> )	相对增加率
0.02mg L <sup>-1</sup>	0.7 ± 0.2 <sup>a</sup>	0.4	2.6 ± 0.3 <sup>a</sup>	0.3
0.1mg L <sup>-1</sup>	0.7 ± 0.1 <sup>a</sup>	0.5	2.9 ± 0.3 <sup>a</sup>	0.4
0.2mg L <sup>-1</sup>	1.3 ± 0.1 <sup>a</sup>	1.5	3.3 ± 0.9 <sup>a</sup>	0.6
0.4mg L <sup>-1</sup>	3.0 ± 0.1 <sup>b</sup>	5.0	5.5 ± 0.7 <sup>b</sup>	1.6
0.8mg L <sup>-1</sup>	4.2 ± 1.2 <sup>c</sup>	7.3	7.3 ± 1.1 <sup>c</sup>	2.5

注: 数据表示方式为平均值 ± 标准差; 同天数的不同字母表示 0.05 水平上的差异显著

所示。随着磷营养水平的升高植株体内的磷含量均显著升高,且  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  和  $0.8 \text{ mg L}^{-1}$  处理组之间差异以及与其它处理组之间差异都分别达到显著水平,在  $0.8 \text{ mg L}^{-1}$  处理时穗花狐尾藻和轮叶黑藻植株干样中磷含量均达到最大,分别为植株体初始磷含量的 8.3 倍和 3.5 倍。植株体中磷含量的相对增加率穗花狐尾藻 > 轮叶黑藻 ( $p < 0.05$ )。

#### 4 讨论 (Discussion)

磷是导致湖泊富营养化的关键因素 (Vollenweider, 1976)。在富营养化湖泊的治理过程中,当外源磷输入得到有效控制后,湖内的生态恢复是治理中的关键步骤,而重建水生植被是湖泊生态恢复的重要举措之一。因此,了解沉水植物在不同磷水平条件下的生长状况是实现水生植被恢复的先决条件。本实验研究了穗花狐尾藻和轮叶黑藻两种沉水植物各项生长指标对不同磷营养浓度的响应规律。结果可以看出,穗花狐尾藻和轮叶黑藻随着培养时间的延长各处理组分枝数增加。穗花狐尾藻在实验结束时,新增分枝数在  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  处理组时表现出分枝上的显著优势,新增分枝数明显高于其它处理组,并与  $0.02 \text{ mg L}^{-1}$  处理组差异达显著水平 ( $p < 0.05$ ),表明  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  处理组促进了穗花狐尾藻的分枝,低于或高于此质量浓度都不利于穗花狐尾藻的分枝;而轮叶黑藻在实验结束时,  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  处理组分枝能力表现出最强,各处理组新增分枝数的大小顺序为:  $0.2 \text{ mg L}^{-1} > 0.4 \text{ mg L}^{-1} > 0.8 \text{ mg L}^{-1} > 0.1 \text{ mg L}^{-1} > 0.02 \text{ mg L}^{-1}$  ( $p < 0.05$ )。并且在实验结束时,除  $0.02 \text{ mg L}^{-1}$  外的各处理组的新增分枝数均表现为穗花狐尾藻 > 轮叶黑藻。由此可以说明,穗花狐尾藻和轮叶黑藻相比更能耐受高质量浓度的磷,同时也从另一个角度证明了穗花狐尾藻比轮叶黑藻耐污,而轮叶黑藻作为演替早期的水生植物,其生长的水质条件相对较好,耐污能力不如穗花狐尾藻 (严国安等, 1997; 吴振斌, 2003)。

植物根系是活跃的吸收器官和合成器官,根的生长状况和活力水平直接影响地上的生长状况。本实验中两种沉水植物的株高和根长的生长状况变化趋势基本类似,在实验结束时穗花狐尾藻和轮叶黑藻的株高和根长增加量均呈先增加后降低的变化趋势。在低于  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  处理组时,穗花狐尾藻和轮叶黑藻株高和根长增加量随浓度的升高逐渐

增加,轮叶黑藻在  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  处理组时达到最大,并且株高和根长增加量大小表现为轮叶黑藻 > 穗花狐尾藻;在  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  处理组时,穗花狐尾藻株高和根长增加量达到最大,而轮叶黑藻则呈现下降趋势;随着浓度的进一步增加,穗花狐尾藻和轮叶黑藻的株高和根长增加量均逐渐降低,两种植物在大于  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  处理组时株高和根长增加量表现为穗花狐尾藻 > 轮叶黑藻。说明  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  和  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  处理浓度分别是轮叶黑藻和穗花狐尾藻的适宜生长浓度,进一步证明了穗花狐尾藻对水体中磷的耐受性要好于轮叶黑藻。

从植株干样磷含量的变化看,穗花狐尾藻和轮叶黑藻在实验所设的浓度范围内对磷的吸收量随磷质量浓度的增加而增加,在  $0.8 \text{ mg L}^{-1}$  浓度处理时磷含量均达到最大,分别为植株体初始磷含量的 8.3 倍和 3.5 倍。说明穗花狐尾藻和轮叶黑藻在本实验所设磷质量浓度范围内对磷吸收量随水体磷含量的增加而增加,并未表现出高磷质量浓度抑制吸收的现象,表明单纯的磷质量浓度并未对穗花狐尾藻和轮叶黑藻的吸收能力产生影响。

#### 5 结论 (Conclusions)

1) 磷质量浓度为  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  是轮叶黑藻适宜生长的磷质量浓度,表现为分枝数、株高和根长均显著增加且达到最大,而穗花狐尾藻的适宜生长磷质量浓度为  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$ 。两种沉水植物株高和根长增加量在磷质量浓度小于  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  时,表现为轮叶黑藻 > 穗花狐尾藻;当磷质量浓度大于  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  时,表现为穗花狐尾藻 > 轮叶黑藻。表明穗花狐尾藻比轮叶黑藻更能耐受高质量浓度的磷,在水生植被恢复时,穗花狐尾藻可作为水体修复的先锋植物。

2) 目前富营养化水体的磷质量浓度一般是  $0.02 \sim 0.15 \text{ mg L}^{-1}$  之间 (季耿善, 2007), 而本实验条件下,穗花狐尾藻适宜生长的磷质量浓度为  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$ , 轮叶黑藻为  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$ , 且两种植物对磷的吸收量随磷质量浓度的增加而增加,说明在富营养化水体中,单纯磷质量浓度的增加并不是导致沉水植物退化消亡的直接原因,水生植被的退化可能还是由于富营养化导致水华爆发,引起透明度下降、溶解氧变化、pH 升高等多种理化指标变化导致的。

**责任作者简介:** 金相灿 (1945—), 男, 研究员, 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地首席科学家, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室主任, 中国环境科学学会副理事长, 水环境分会会长。长期从事湖泊富营养化发生机制和控制技术研究, 发表文章上百篇, 著作十余部。

#### 参考文献 (References):

- 鲍士旦. 2005. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社
- Bao S D. 2005. Soil agro-chemistry analysis [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press (in Chinese)
- Bulthuis D A, Axelrad D M, Mickelson M J. 1992. Growth of the seagrass *Heterozostera tasmanica* limited by nitrogen in Port Phillip Bay [J]. *Mar Ecol Prog Ser* 89: 269—275
- Duare C M. 1990. Seagrass nutrient content [J]. *Mar Ecol Prog Ser* 67: 201—207
- Havens K E, Sharfstein B, Brady M A, *et al*. 2004. Recovery of submerged plants from high water stress in a large subtropical lake in Florida, USA [J]. *Aquatic Botany*, 78: 67—82
- Irfanullah H M, Moss B. 2004. Factors influencing the return of submerged plants to a clear-water, shallow temperate lake [J]. *Aquatic Botany*, 80: 177—191
- 季耿善. 2007. 水域富营养化及对我国洗涤剂“禁磷”的讨论和发展建议报告 [J]. *环境保护*, 24: 1—10
- Ji G S. 2007. Discussion and suggestion on eutrophication in water area and prohibition of phosphorous on detergent in our country [J]. *Environmental Protection*, 24: 1—10
- 金相灿, 王圣瑞, 赵海超, 等. 2005. 磷形态对磷在水-沉水植物-底质中分配的影响 [J]. *生态环境*, 14(5): 631—635
- Jin X C, Wang S R, Zhao H C, *et al*. 2005. Effects of phosphorus form on the distribution of the phosphorus in water-sediment-submerged plant ecosystem [J]. *Ecology and Environment*, 14(5): 631—635 (in Chinese)
- 刘春光, 邱金泉, 王雯, 等. 2004. 富营养化湖泊治理中的生物操纵理论 [J]. *农业环境科学学报*, 23(1): 198—201
- Liu C G, Qiu J Q, Wang W, *et al*. 2004. Advances on theory of biomanipulation in eutrophicated lakes [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 23(1): 198—201 (in Chinese)
- 李文朝. 1996. 浅型富营养湖泊的生态恢复——五里湖水生植被重建实验 [J]. *湖泊科学*, 8: 1—10
- Li W C. 1996. Ecological restoration of shallow, eutrophic lakes—experimental studies on the recovery of aquatic vegetation in Wuli lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 8: 1—10 (in Chinese)
- 刘晓艳, 胡东, 陈卫. 2004. 北京白河沉水植物研究 [J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 25(1): 46—50
- Liu X Y, Hu D, Chen W. 2004. Studies on the submerged vegetation of Beijing [J]. *Journal of Capital Normal University*, 25(1): 46—50 (in Chinese)
- Rooney N, Kalff J. 2000. Inter-annual variation in submerged macrophyte community biomass and distribution: the influence of temperature and lake morphology [J]. *Aquatic Botany*, 68: 321—335
- Santamaría L, Hootsmans M J M. 1998. The effect of temperature on the photosynthesis growth and reproduction of a Mediterranean submerged macrophyte *Ruppia drepanensis* [J]. *Aquatic Botany*, 60: 169—188
- Short F T. 1987. Effects of sediment nutrients on seagrasses: literature review and mesocosm experiment [J]. *Aquatic Botany*, 27: 41—57
- Vollenweider R A. 1976. Advances in Defining Critical Loading Levels of Phosphorus in Lake Eutrophication [J]. *Mem Ist Ital Idrobiol*, 33: 53—83
- 王超, 王沛芳. 2004. 城市水生态系统建设与管理 [M]. 北京: 科学出版社
- 王海珍, 陈德辉, 王全喜. 2001. 水生植被对富营养化湖泊生态恢复的作用 [J]. *自然杂志*, 24(1): 33—36
- Wang H Z, Chen D H, Wang Q X. 2001. The effect of aquatic vegetation on ecological restoration of eutrophication lake [J]. *Journal of Nature*, 24(1): 33—36 (in Chinese)
- 吴振斌, 陈德强, 邱东茹, 等. 2003. 武汉东湖水生植被现状调查及群落演替分析 [J]. *重庆环境科学*, 25: 54—62
- Wu Z B, Chen D Q, Qiu D R, *et al*. 2003. Investigation of the distribution of the aquatic vegetation in lake Donghu, Wuhan [J]. *Chongqing Environmental Science*, 25: 54—62 (in Chinese)
- 严国安, 马剑敏, 邱东茹, 等. 1997. 武汉东湖水生植物群落演替的研究 [J]. *植物生态学报*, 21(4): 319—400
- Yan G A, Ma J M, Qiu D R, *et al*. 1997. Investigation of the community of the aquatic vegetation in lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 21(4): 319—400 (in Chinese)