

# 苦草对富营养化水体中氮磷营养盐的生理响应

宋玉芝<sup>1</sup>, 杨美玖<sup>1</sup>, 秦伯强<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

**摘要:**为认识湖泊富营养化过程中沉水植物衰退机制, 通过室内模拟试验, 利用水下饱和脉冲荧光仪 (Diving-PAM) 测定了苦草 (*Vallisneria natans*) 在水体富营养化过程中不同氮磷营养盐水平下的荧光参数, 并结合苦草其它生理指标, 研究了苦草对水体富营养化过程中氮磷等营养盐浓度升高的响应. 结果表明, 苦草对水体氮、磷营养盐浓度的改变响应迅速, 各处理组在处理 2~6 h 后最大量子产量都显著下降, 处理 12 h 后与处理前相比没有显著的差异, 各处理组之间没有显著差异; 水体氮、磷营养浓度偏高 (处理组 D) 或偏低 (处理组 A) 都增强强光对苦草的抑制作用, 从而影响光合作用, 处理组 B、C 苦草实际光合作用能力 (平均量子产量) 显著高于处理组 A、D 苦草实际光合作用能力 ( $p < 0.05$ ); 在一定的水体氮磷营养盐水平范围, 苦草叶绿素含量随氮磷水平的提高而增大, 水体氮磷营养盐浓度达到处理组 D 水平, 苦草植物体内叶绿素含量下降; 植物体内丙二醛 (MDA) 的含量在不同处理组中存在变化, 处理组 B 丙二醛最低, 处理组 D 最高. 这说明, 苦草比较适合在富营养化水体生长, 但富营养化水体中, 过高浓度的氮、磷浓度可抑制苦草光合生理活动, 进而影响苦草的生长.

**关键词:**营养盐; 荧光参数; 苦草; 富营养化水体; 生理响应

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2011) 09-2569-07

## Physiological Response of *Vallisneria natans* to Nitrogen and Phosphorus Contents in Eutrophic Waterbody

SONG Yu-zhi<sup>1</sup>, YANG Mei-jiu<sup>1</sup>, QIN Bo-qiang<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science & Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The response of *Vallisneria natans* to the increase contents of nitrogen and phosphorus were studied under laboratory conditions by measuring chlorophyll fluorescence parameters of *V. natans* using a pulse-amplitude modulated fluorometer (Diving-PAM), combined with measuring some other physiological indexes of *V. natans*. The results showed that *V. natans* responded quickly to water nitrogen and phosphorus concentration changes, the maximum quantum yield decreased significantly after 2 h and 6 h, the maximum quanta yield returned to normal levels 12 h after the treatment. There was no significant difference between treatment groups for the maximum quantum yield. Inhibitory effect of light intensity on photosynthesis of *V. natans* was more obvious under higher (treatment D) or lower (treatment A) concentrations of nitrogen and phosphorus. The average quantum yields of four measurements in the treatment B or C was significantly higher than that of A or D ( $p < 0.05$ ). Within a certain range, chlorophyll content increased significantly with the nitrogen and phosphorus concentrations. When nitrogen and phosphorus concentrations further increased and reached the level of D treatment, chlorophyll content of *V. natans* decreased. Malondialdehyde (MDA) content of *V. natans* changed in the different treatment groups, MDA content of treatment B was the lowest while treatment D was the highest. It shows that *V. natans* is more suitable for growing in eutrophic waterbodies, but excessive nitrogen and phosphorus could inhibit the physiological activities of *V. natans*.

**Key words:** nutrient; fluorescence parameters; *Vallisneria natans*; eutrophic water; physiological response

随着水体富营养化的发展, 水生植被特别是沉水植物衰退和消失的现象在世界范围内普遍出现<sup>[1,2]</sup>. 沉水植物是水生生态系统中的重要组成部分, 对水体环境有重要影响<sup>[3]</sup>, 因此, 沉水植物的保护和恢复对维护健康水生生态系统至关重要, 水生植被的恢复已被认为是湖泊富营养化治理的关键<sup>[4-6]</sup>. 实践证明, 在富营养化水体要恢复沉水植物, 必须了解富营养化水体沉水植物衰退的机制<sup>[7-9]</sup>, 而目前, 有关富营养化水体中沉水植物衰退

及消失的机制众说纷纭, 也是国内外湖泊专家研究的热点<sup>[10]</sup>. 水体氮、磷等营养盐浓度的增加是水体富营养化以及蓝藻暴发主要因素, 也是影响沉水植物生长的重要因素<sup>[11]</sup>. 已有关于水体营养盐浓度对

收稿日期: 2010-10-06; 修订日期: 2010-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41071341); 国家自然科学基金重点项目 (40730529); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07101-013-03); 湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目

作者简介: 宋玉芝 (1970~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为污染环境的生态修复, E-mail: syz70@nuist.edu.cn

沉水植物影响的研究主要集中在植物体内保护酶体系的响应、形态指标及生物量的变化上<sup>[12,13]</sup>,而光合作用是沉水植物最重要的代谢活动,有关沉水植物光合生理对水体营养盐响应的研究目前报道还不系统<sup>[14]</sup>.

苦草 (*Vallisneria natans*) 属水鳖科苦草属多年生沉水植物,为我国常见沉水植物之一,由于其生态适应性广,较强的吸污能力和耐污性,常被作为富营养化水体植被恢复工程的主要选用品种<sup>[15]</sup>. 因此,本研究利用荧光动力学技术采用水下饱和脉冲荧光仪 (Diving-PAM) 进行原位、快速、无损伤测定苦草叶片的叶绿素荧光参数,结合苦草生长其它生理指标的测定,分析了苦草对湖泊富营养化过程中水体氮磷营养盐浓度响应,以期认识沉水植物在水体富营养过程中生长及发展提供试验依据,为水生生态系统的保护和持续利用提供基础资料.

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

从东太湖湖区采集苦草 (*Vallisneria natans*) 块茎种植于室内的塑料整理箱 (44.5 cm × 44 cm) 中,每个整理箱在种植前铺上 15 cm 厚的粗砂,种植后放在室内培养,培养期间定期更换自制的营养液.

### 1.2 试验设计

本试验于 4 月 25 日开始,从塑料整理箱中选取长势基本一致的完整植株,清洗并去除枯黄和衰败的叶子,称重后等量种植在清洗干净的沙粒作为基质的小塑料杯 (底部具有小孔) 中. 再把种植好的苦草连杯一起移入玻璃水族箱 (29 cm × 19 cm × 40 cm), 每个玻璃水族箱移入苦草 25 株. 向玻璃水族箱中注入自来水 15 L, 并将移植好苦草的玻璃水族箱排列于室内向阳的窗前,待苦草适应 2 d (此时苦草最大量子产量已恢复正常) 后开始向玻璃水族箱中加入事先配制好的氮 ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ )、磷 ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) 营养盐,参考太湖水体营养盐水平及文献资料<sup>[16,17]</sup>,各处理组水体的总氮 (TN)、总磷 (TP) 浓度设置如表 1. 每个处理重复 3 次. 根据预试验水体营养盐含量的变化规律,试验期间每 2 d 将玻璃水族箱中的培养液用虹吸的方法更换 1/2,保持各处理组中营养盐水平的稳定. 各组分别在处理 0、2、6、12、24、48 h 随机选择 6 株苦草,测定苦草最长叶片的最小荧光和最大荧光. 在培养期间选择晴朗的天气,测定苦草实际光量子产量的日变化及快速光响应曲线,并于次日取样,测定苦草叶片的叶绿素

含量及丙二醛的含量<sup>[18]</sup>.

表 1 营养盐的处理方案

Table 1 Treatments of nutrient

处理组	A	B	C	D
富营养状况	中营养	中度富营养	重度富营养	超富营养
TN/mg·L <sup>-1</sup>	0.40	1.50	4.50	12.50
TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.04	0.15	0.45	1.25

## 1.3 测定方法

### 1.3.1 叶绿素荧光参数

从氮、磷营养盐加入前及加入 2 h 后开始用水下饱和和脉冲荧光仪 Diving-PAM (德国 WALZ 公司) 和数据采集软件 Wincontrol 进行测定. Diving-PAM 配备了一个发射峰为 650 nm 的红外二极管,所发射的红外光为测量光;一个内置的卤素灯提供光化光照明和饱和脉冲光.

连体叶片使用叶夹遮光处理 (暗适应) 20 min 后,打开叶夹,开启测量光测得光系统 II (PS II) 最小荧光 ( $F_0$ ),再开启饱和脉冲光 [饱和脉冲光强度  $4000 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ] 测得 PS II 暗适应下的最大荧光 ( $F_m$ ),根据  $F_0$  和  $F_m$  计算出 PS II 最大量子产量 [ $F_v/F_m$ ,  $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$ ].

### 1.3.2 苦草叶片快速光响应曲线

用 Diving-PAM 在处理第 7 d 上午 11:00 时左右测定苦草叶片的快速光响应曲线. 开启光强度分别为: 0、17、49、104、176、248、342、505 和 684  $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$  的光化光,在任一光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 强度下,测得开启饱和脉冲前的荧光为 ( $F$ ),打开饱和脉冲得到的最大荧光为 ( $F'_m$ ),可变荧光  $\Delta F = F'_m - F$ ,由此得出光适应条件下水生植物 PS II 的有效量子产量 ( $Y$ ):  $Y = \Delta F/F'_m = (F'_m - F)/F'_m$ ,根据  $Y$  和 PAR 计算出相对电子传递速率 (relative electron transport rate, rETR)<sup>[19]</sup>:

$$\text{rETR} = Y \times \text{PAR} \times 0.5 \times 0.84$$

### 1.3.3 快速光曲线拟合

采用 SPSS 16.0 软件进行快速光曲线拟合. 曲线拟合采用最小二乘法,快速光曲线的拟合采用文献 [19,20] 提出的方程. 其方程形式如下:

$$\text{rETR} = \text{rETR}_m (1 - e^{-\alpha \cdot \text{PAR}/\text{rETR}_m}) e^{-\beta \cdot \text{PAR}/\text{rETR}_m}$$

式中,  $\text{rETR}_m$  为无光抑制时的最大潜在相对电子传递速率;  $\alpha$  为  $\text{rETR}$ -PAR 曲线的初始斜率,反映了植物对光能的利用能力;  $\beta$  为光抑制参数. 由此可以得出半饱和光强 ( $I_k = \text{rETR}_m/\alpha$ ).

## 1.4 数据处理

采用 EXCEL 2003 和 SPSS 16.0 软件对所有数据进行统计分析,采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 比较不同数据组间的差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 苦草最大量子产量 ( $F_v/F_m$ ) 对水体氮、磷营养盐浓度变化的快速响应

$F_v/F_m$  是最大量子产量. 图 1 是各处理组苦草在处理 48 h 内  $F_v/F_m$  变化情况. 从图 1 可知,各处理组苦草的  $F_v/F_m$  对水体营养盐浓度的变化反应比较迅速,且均表现为先下降后上升的规律. 与处理前相比,在处理 2 h、6 h 时,处理组 A、B、C 苦草的  $F_v/F_m$  降低了 10% 左右,处理组 D 的  $F_v/F_m$  下降更快,高达 17%,处理前苦草的  $F_v/F_m$  和处理 2 h、6 h 时的  $F_v/F_m$  差异显著 ( $p < 0.01$ ); 在处理 12 h 时,各处理组苦草的  $F_v/F_m$  与处理前相比稍低但差异不大,而与处理 2 h、6 h 时相比已显著上升 ( $p < 0.05$ ). 在相同的时间,不同处理组苦草的  $F_v/F_m$  相比有所不同,通过方差分析可知,除了处理组 D 在处理 2 h 时与其它处理组差别显著 ( $p < 0.05$ ),其余处理组的苦草在同一时间的  $F_v/F_m$  差异不显著 ( $p < 0.05$ ). 已有的研究表明, $F_v/F_m$  反映的是光系统 II 反应中心的最大 PS II 的光能转换效率,非胁迫条件下该参数变化极小,胁迫条件下该参数明显降低<sup>[21]</sup>. 这说明,苦草  $F_v/F_m$  对水体氮、磷营养盐水平改变响应很快(2 h),在 2 h 时均下降明显,但在本研究处理的氮、磷营养盐浓度范围内,苦草通过自生的调节,  $F_v/F_m$  很快又恢复到处理前的水平。

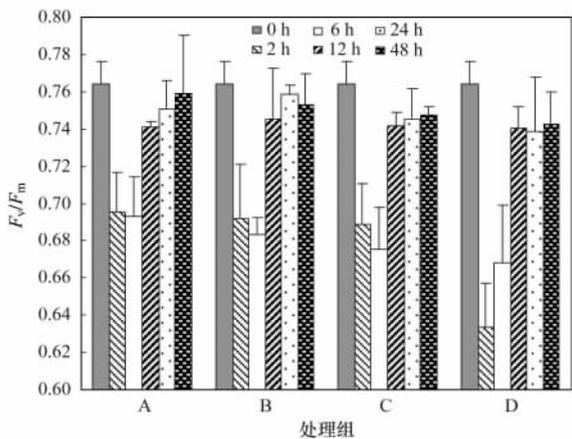


图 1  $F_v/F_m$  对水体营养盐浓度变化的快速响应

Fig. 1 Rapid-response of  $F_v/F_m$  to nutrient changes

### 2.2 苦草实际量子产量 ( $\Delta F'_v/F'_m$ ) 对不同水体氮、磷营养盐浓度的响应

图 2 是在培养期间选取晴朗无云的第 7 d 测定各处理组苦草叶片在 09:00、11:00、13:00、15:00 实际量子产量 ( $\Delta F'_v/F'_m$ ). 从这 4 个时刻测定的  $\Delta F'_v/F'_m$  平均值来看,处理组 C > B > D > A. 与处理组 A 相比,处理组 B、C、D 的  $\Delta F'_v/F'_m$  分别增加了 9.3%、10.6%、2.8%. 通过方差分析可知处理组 A 与 D 之间,处理组 B 与 C 之间  $\Delta F'_v/F'_m$  差别不显著,而处理组 A、D 与处理组 B、C 间  $\Delta F'_v/F'_m$  差别显著 ( $p < 0.05$ ). 从时间序列看,各处理组苦草的  $\Delta F'_v/F'_m$  均在 11:00 最大,分别比 09:00 的  $\Delta F'_v/F'_m$  增加了 4.5%、13.3%、9.9%、4.6%. 与 11:00 时相比 13:00 以及 15:00 有所下降. 通过对比分析,13:00 各处理组  $\Delta F'_v/F'_m$  值与 11:00 相比,各处理组苦草的  $\Delta F'_v/F'_m$  下降比较显著 ( $p < 0.05$ ). 通过比较不同的处理组可知,在 09:00 时,随着处理浓度的升高,各处理组的  $\Delta F'_v/F'_m$  都有所增加,但差异不显著 ( $p < 0.05$ ). 在 13:00、15:00 时,处理组 B 和 C 的  $\Delta F'_v/F'_m$  与处理组 A 及 D 的  $\Delta F'_v/F'_m$  差异显著,而处理组 A、D 之间以及处理组 B、C 之间的  $\Delta F'_v/F'_m$  差异不显著 ( $p < 0.05$ ). 由此可见,当 TN 和 TP 浓度较高(处理组 D)或较低(处理组 A)时,苦草的  $\Delta F'_v/F'_m$  较低,当 TN 和 TP 浓度处于相对适中时(处理组 B、C),苦草  $\Delta F'_v/F'_m$  相对较高,这可能与中午的强光抑制作用有关。

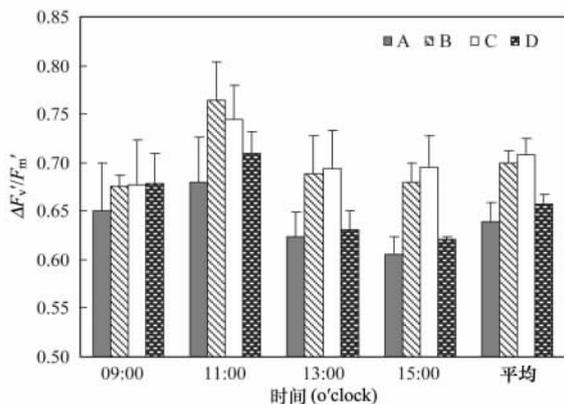


图 2 各处理组  $\Delta F'_v/F'_m$  的变化

Fig. 2 Changes of  $\Delta F'_v/F'_m$  in 4 groups

### 2.3 苦草光合荧光参数对水体氮、磷营养盐浓度的状况的响应

水体营养盐浓度对苦草叶片 PS II 的影响还反映在苦草叶片的光响应能力上. 根据试验中测定快速光响应曲线可以确定苦草叶片的光合参数<sup>[19]</sup>. 图 3 是各处理组苦草叶片在 11:00 左右的快速光响应

曲线. 由图 3 可见, 处理组 A 与其他 3 个处理组相比, 苦草叶片的快速光曲线差异明显, 光响应能力的大小依次为处理组 B > C > D > A.

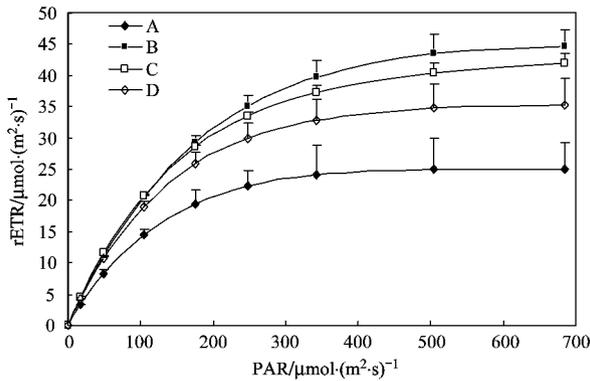


图 3 各处理组苦草快速光响应曲线

Fig. 3 Rapid-light curves of *V. natans* in 4 groups

光曲线的初始斜率( $\alpha$ )可以反映植物叶片对光能的利用效率, 表现了植物叶片捕光能力的大小<sup>[19]</sup>. 由图 4 可见, 各处理组初始斜率( $\alpha$ )随着营养盐质量浓度的升高而增加. 与处理组 A 相比, 处理组 B、C、D 的初始斜率( $\alpha$ )增加了 21.9%、24.2%、22.7%, 均达到极显著水平( $p < 0.01$ ). 处理组 C 初始斜率( $\alpha$ )最高, 但处理组 B、C、D 之间变化较小, 没有显著差异( $p < 0.05$ ). 由此可见, 尽管不同的氮、磷营养盐浓度均对苦草叶片捕光系统产生促进作用, 但氮、磷营养盐浓度越高产生的促进作用越不明显.

最大电子传递速率(rETR<sub>m</sub>)能够反映植物叶片的光合活性<sup>[19]</sup>. 由图 4 可知, 不同氮、磷营养盐浓度下, 各处理组苦草叶片 PS II 的 rETR<sub>m</sub> 不同, 处理组 B 苦草叶片的 rETR<sub>m</sub> 最高, 其次是处理组 C 和 D, 处理组 A 最小. 与处理组 A 相比, 处理组 B、C、D 苦草 PS II 的 rETR<sub>m</sub> 分别是处理组 A 的 76.47%、30.25%、23.83%; 处理组 C、D 相对于处理组 B 而言, PS II 的 rETR<sub>m</sub> 减少了 27.19%、29.82%.

由图 4 可知, 不同处理组苦草叶片半饱和和光照强度( $I_k$ )不同. 与处理组 A 相比, 处理组 B 苦草  $I_k$  增加了 46.23%, 差异极显著( $p < 0.01$ ); 处理组 C、D 仅增加了 5.65%、0.89%, 差异不显著( $p < 0.05$ ).

光合荧光参数  $I_k$  反映了植物耐受强光的能力, 而耐受强光能力强的植物具有较高的最大光合速率(rETR<sub>m</sub>)<sup>[19]</sup>. 对试验苦草叶片的 11:00 左右的快速光响应曲线和光合荧光参数进行综合分析发现, 苦

草 rETR<sub>m</sub> 和  $I_k$  在处理组 B 最高, 处理组 A 中最低, 处理组 B 苦草叶片耐受强光的能力( $I_k$ )以及光合活性(rETR<sub>m</sub>)均显著高于处理组 C、D. 这一结果与已有的理论及 11:00 时所测得实际量子产量相吻合.

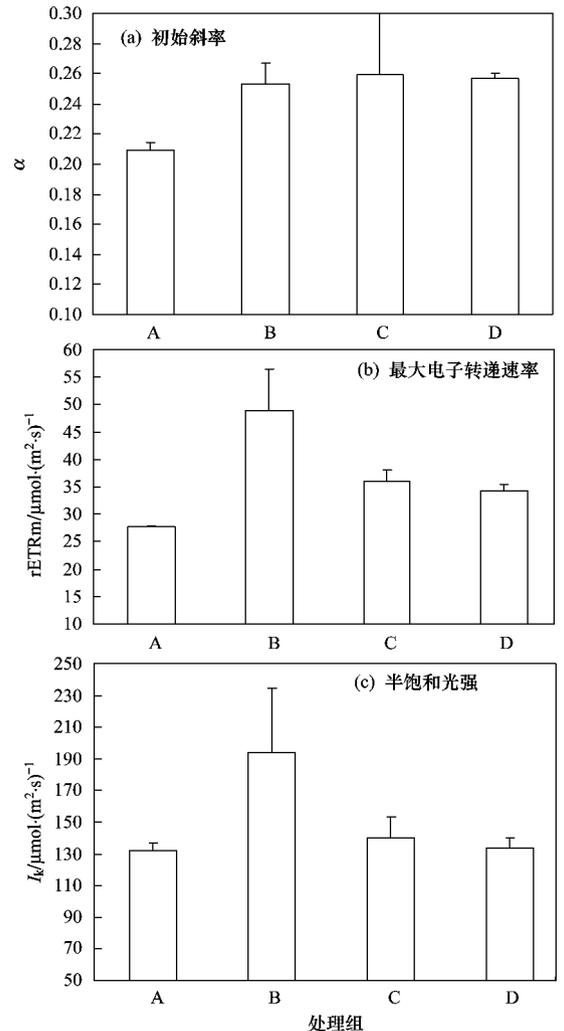


图 4 各处理组苦草植物的初始斜率( $\alpha$ )、最大电子传递速率(rETR<sub>m</sub>)和半饱和和光强( $I_k$ )

Fig. 4 Initial slopes( $\alpha$ ), the maximum electron transport rates (rETR<sub>m</sub>) and half saturation point of light intensity ( $I_k$ ) of *V. natans* in 4 groups

## 2.4 苦草其它生理指标对水体氮、磷营养盐浓度的响应

### 2.4.1 叶绿素对水体氮、磷营养盐浓度的响应

图 5 是不同氮磷营养盐浓度下苦草叶片的叶绿素(Chl.)含量. 从图 5 可看出, 随着氮磷营养盐浓度的升高, Chl. 含量显著增加, 当营养盐增加到一定的程度, Chl. 含量略有下降. 处理组 B、C、D 的 Chl. 含量分别是处理组 A 的 3.85 倍、5.67 倍、5.13 倍, 处理组 A 与处理组 B、C、D 之间的差异达到极其

显著水平( $p < 0.01$ ). 不同氮磷营养盐浓度下苦草叶片的叶绿素 a (Chl. a) 变化与总的 Chl. 变化相似, 即随着水体氮磷营养盐水平的升高, Chl. a 含量显著增加( $p < 0.01$ ), 当营养盐增加到一定的程度(处理组 D), Chl. a 含量与处理组 C 相比不仅不升高反而有所下降. 不同氮磷营养盐浓度下苦草叶片的叶绿素 b (Chl. b) 的变化情况与 Chl. a 变化规律相似, 但又有差别(图 5), 处理组 B、C、D 与处理组 A 相比, Chl. b 均显著增加( $p < 0.01$ ), 但处理组 B、C、D 之间 Chl. b 差异不大. 总的来看, 随着水体中氮、磷营养浓度的升高, Chl. 会显著增加, 当 Chl. 增加到一定的程度时, 氮磷营养盐升高, 植物 Chl. 含量会下降.

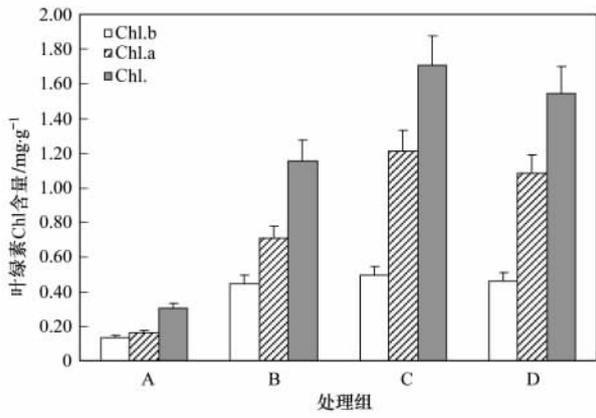


图 5 各处理组苦草的叶绿素 (Chl.) 含量

Fig. 5 Chlorophyll content of *V. natans* in 4 groups

#### 2.4.2 丙二醛 (MDA) 对水体氮、磷营养盐浓度的响应

图 6 是不同氮磷营养盐浓度梯度下的苦草叶中丙二醛 (MDA) 的含量. 从图 6 中可看出, 处理组 B 含量最低, 随着水体氮磷浓度的升高, MDA 量均升高, 处理组 C、D 与处理组 B 相比, 分别增加了 17.48%、74.38%, 处理组 A 与处理组 B 相比, MDA 的浓度差别不大, 仅增加了 2%. 处理组 D 中 MDA 含量最高, 与其它处理组相比均有显著差异( $p < 0.01$ ). 这说明, 水体氮磷浓度过高(处理组 D), MDA 含量显著增大.

### 3 讨论

不同营养环境对水生植物生长的影响国内外均有所报道, 沉水植物对富营养化的反应机制一直存在分歧<sup>[22]</sup>, 部分研究者认为沉水植物对富营养化的敏感性受水体透明度和植物生长型的影响, 而不受

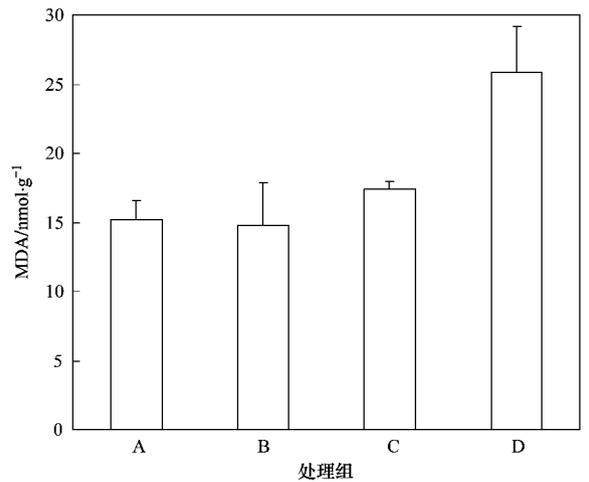


图 6 各处理组丙二醛 (MDA) 的含量

Fig. 6 Malondialdehyde (MDA) content of *V. natans* in 4 groups

水体中氮、磷浓度变化所直接引起的生理反应的影响<sup>[23,24]</sup>. 另一些学者则认为光衰减和生长型并不能完全解释目前所观察到的沉水植物的衰退, 水体中较高的氮、磷浓度对沉水植物而言, 与盐胁迫、环境污染胁迫一样是一种逆境胁迫, 影响其正常生理活动<sup>[22,25,26]</sup>, 可能是湖泊富营养化过程中影响沉水植物退化的机制之一.

光合作用是植物生长发育和生物量积累的基础,  $F_v/F_m$  为 PS II 最大光化学量子产量, 又叫 PS II 潜在最大量子产量, PS II 反应中心均处于开放状态时的量子产量, 是研究环境胁迫对植物光合作用影响的重要指标<sup>[21]</sup>. 在陆生植物研究中已发现,  $F_v/F_m$  随温度、光和重金属等因子<sup>[27]</sup> 的胁迫程度加重而降低; 而在水生植物对比试验中, 已有关于 UV-B 辐射、多环芳烃污染、水体悬浮物浓度以及网状藻的附着对水生植物  $F_v/F_m$  影响的报道<sup>[28-32]</sup>. 从本试验结果可知, 水体氮磷浓度的改变,  $F_v/F_m$  会显著降低, 但很快恢复. 这说明在本试验处理的水体氮、磷浓度范围内, 短时间内苦草通过调节自身机制抵御外界环境胁迫因子的干扰, 适应新的环境. 这一研究结果和文献报道苦草耐污染强的特性相吻合<sup>[17,33]</sup>. 从本试验实际量子产量变化可看出, 水体氮磷浓度不同, 在不同光照强度下, 实际光合作用不同. 在强光作用前 (11:00), 苦草的实际量子产量在中营养化水体与富营养化水体中存在显著差异, 但在富营养化水体中, 随氮磷浓度的增加实际量子产量增加并不显著. 在经强光作用后 (11:00), 水体氮、磷浓度过高(处理组 D) 或过低(处理组 A) 都不利于苦草的光合作用. 这说明, 不同营养盐水体中, 苦草对

强光的实际耐受能力不同,从而影响苦草的实际生长,从 11:00 不同处理组光合荧光参数  $I_k$ 、rETR<sub>m</sub> 的值也能得出同样的结论. 光合荧光参数  $\alpha$  反映了叶片捕光能力的高低,与叶片的吸光系数和 PS II 对光能的利用能力有关<sup>[19]</sup>. 而植物对光的捕获能力与植物本身叶绿素含量、环境光照条件等密切相关. 本研究结果表明,在环境光照条件相同的情况下,随水体氮、磷浓度的升高,苦草的叶绿素含量与其光合荧光参数  $\alpha$  变化趋势是一致的,即在相同的环境光照条件下,苦草叶绿素含量及光合荧光参数  $\alpha$  均随着水体氮、磷浓度的增加表现先增加后减少的变化规律.

丙二醛(MDA)是脂质过氧化的主要降解产物,它可能与细胞膜上的蛋白质、酶等结合、交联,使之失活,破坏生物膜的结构和功能,是植物受到伤害程度的指标之一<sup>[18]</sup>. 从本试验可以看出,随着水体富营养化程度增加,MDA 含量上升. 处理组 D 的 MDA 含量与其它处理组的 MDA 含量存在显著差异性. 这表示处理组 D 的植株可能受到高浓度氮磷的影响,进而可能影响叶绿素合成,表现出处理组 D 植株的叶绿素含量反而比处理组 C 的低.

综上所述,苦草对水体氮、磷具有较高的耐受范围,在本试验中,处理组 B、C、D 苦草的 chl. 含量、光合效率都高于处理组 A. 在耐受的氮、磷范围内,氮、磷浓度偏高(处理组 A)、偏低(处理组 D)苦草的光合效率都会下降. 氮、磷浓度偏高(处理组 D),会影响苦草对强光的耐受能力,叶片中 MDA 积累量增多,表明植物对逆境条件反应的强,可能对叶肉细胞的伤害越严重,表现在叶绿素含量减少,对光的捕获效率降低,从而影响光合作用;而氮、磷浓度偏低(处理组 A),叶绿素合成相对较少,进而也会影响植物的光合效率.

#### 4 结论

(1)苦草潜在的光合作用能力( $F_v/F_m$ )对水体氮、磷浓度改变反应比较迅速,但在处理的氮、磷浓度范围内,苦草能通过调节自身机制很快适应水环境.

(2)水体氮、磷营养盐浓度偏高(处理组 D)或偏低(处理组 A)都可能影响苦草对强光的耐受能力和光合活性,从而影响苦草的光合作用,表现在苦草在中午强光照下受到的光抑制程度较大,而当氮、磷营养盐浓度(处理组 B、C)适合苦草生长时,苦草在中午强光照下受到的光抑制程度相对较小.

(3)富营养化水体(处理组 B、C、D)中苦草的叶绿素含量及对光的捕光能力均显著高于中营养化水体(处理组 A)中苦草的叶绿素含量及对光的捕光能力. 但在富营养化水体中随水体氮、磷浓度增加叶绿素含量及光捕获能力均表现为先增加后有所下降. 处理组 D 的苦草叶绿素含量及光捕获能力下降可能与叶片中 MDA 含量高有关.

(4)适宜的氮、磷营养盐浓度有利于提高苦草的抗逆性,更有利于苦草的生长,过高或过低的氮、磷营养盐浓度不利于苦草长期健康的生长.

致谢:在野外采集苦草块茎的过程中得到了太湖湖泊生态系统国家野外观测研究站工作人员的帮助,在此表示感谢.

#### 参考文献:

- [1] Bakker E S, Van Donk E, Declercq S A J, et al. Effect of macrophyte community composition and nutrient enrichment on plant biomass and algal blooms[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2010, **11**(5): 432-439.
- [2] Hilt S, Gross E M, Hupfer M, et al. Restoration of submerged vegetation in shallow eutrophic lakes—A guideline and state of the art in Germany[J]. *Limnologia- Ecology and Management of Inland Waters*, 2006, **36**(3): 155-171.
- [3] Hilt S, Gross E M. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilise clear-water states in shallow lakes? [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2008, **9**(4): 422-432.
- [4] 厉恩华. 大型水生植物在浅水湖泊生态系统营养循环中的作用[D]. 武汉:中国科学院武汉植物园, 2006.
- [5] 秦伯强, 高光, 胡维平, 等. 浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践思考[J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(1): 9-16.
- [6] 方云英, 杨肖娥, 常会庆, 等. 利用水生植物原位修复污染水体[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(2): 407-412.
- [7] 年跃刚, 宋英伟, 李英杰, 等. 富营养化浅水湖泊稳态转换理论与生态恢复探讨[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(1): 67-70.
- [8] 马剑敏, 成水平, 贺锋, 等. 武汉月湖水生植被重建的实践与启示[J]. *水生生物学报*, 2009, **33**(2): 222-229.
- [9] Qin B Q. Lake eutrophication: Control countermeasures and recycling exploitation [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(11): 1569-1573.
- [10] 张浏, 陈灿, 高倩, 等. 两种营养水平下 pH 对轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 生长和抗氧化酶活性的影响[J]. *生态环境*, 2007, **16**(3): 748-752.
- [11] 许磊, 李华, 陈英旭, 等. 南太湖地区小型浅水湖泊自净能力季节变化研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 924-930.
- [12] Wang C, Zhang S H, Wang P F, et al. Metabolic adaptations to ammonia-induced oxidative stress in leaves of the submerged macrophyte *Vallisneria spiralis* (Lour.) Hara [J]. *Aquatic Toxicology*, 2008, **87**(2): 88-98.
- [13] Cao T, Xie P, Li Z Q, et al. Physiological stress of high  $\text{NH}_4^+$  concentration in water column on the submerged macrophyte *Vallisneria spiralis* L. [J]. *Bulletin of Environmental*

- Contamination and Toxicology, 2009, **82**(3):296-299.
- [14] 蔡炜, 宋玉芝. 水体营养盐质量浓度对苦草光合荧光特性的影响[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(8):907-912.
- [15] 陈开宁, 兰策介, 史龙新, 等. 苦草繁殖生态学研究[J]. 植物生态学报, 2006, **30**(3):487-495.
- [16] 郑丙辉, 许秋瑾, 朱延忠. 湖泊营养盐控制标准制订方法的初步研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(9):2497-2501.
- [17] 孙利芳, 孙一香, 周长芳, 等. 植物组合及水体营养梯度对三种功能性植物生物量累积与分配的影响[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(10):2370-2376.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [19] Ralph P J, Gademann R. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity[J]. Aquatic Botany, 2005, **82**(3):222-237.
- [20] Platt T, Gallegos C L, Harrison W G. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton [J]. Journal of Marine Research, 1980, **38**(4):687-701.
- [21] 李晓, 冯伟, 曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展[J]. 西北植物学报, 2006, **26**(10):2186-2196.
- [22] Wang B, Li W. Physiological reactions of *Potamogeton malaianus* to different N and P concentrations in the growth medium [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, **22**(10):1616-162.
- [23] Istvánovics V, Honti M, Kovács Á, et al. Distribution of submerged macrophytes along environmental gradients in large, shallow Lake Balaton (Hungary) [J]. Aquatic Botany, 2008, **88**(4):317-330.
- [24] Hussner A, Hoelken H P, Jahns P. Low light acclimated submerged freshwater plants show a pronounced sensitivity to increasing irradiances[J]. Aquatic Botany, 2010, **93**(1):17-24.
- [25] Jampeetong A, Brix H. Effects of  $\text{NH}_4^+$  concentration on growth, morphology and  $\text{NH}_4^+$  uptake kinetics of *Salvinia natans* [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(5):695-702.
- [26] Thomaz S M, Chambers P A, Pierini S A, et al. Effects of phosphorus and nitrogen amendments on the growth of *Egeria najas* [J]. Aquatic Botany, 2007, **86**(2):191-196.
- [27] 李鹏民, 高辉远, Strasser R J. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, **31**(6):559-566.
- [28] Wang G H, Hao Z J, Anken R H, et al. Effects of UV-B radiation on photosynthesis activity of *Wolffia arrhiza* as probed by chlorophyll fluorescence transients [J]. Advances in Space Research, 2010, **45**(7):839-845.
- [29] Muller R, Schreiber U, Escher B I, et al. Rapid exposure assessment of PS II herbicides in surface water using a novel chlorophyll a fluorescence imaging assay[J]. Science of the Total Environment, 2008, **401**(1-3):51-59.
- [30] Xu Q S, Hu J Z, Xie K B, et al. Accumulation and acute toxicity of silver in *Potamogeton crispus* L. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **173**(1-3):186-193.
- [31] 李强, 王国祥, 马婷, 等. 水网藻附着对亚洲苦草光合特性的影响[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(3):315-320.
- [32] 李强, 王国祥. 水体泥沙对黑藻幼苗生长发育的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(4):995-1002.
- [33] 王沛芳, 王超, 王晓蓉, 等. 苦草对不同浓度氮净化效果及其形态转化规律[J]. 环境科学, 2008, **29**(4):890-895.