

底质营养盐负荷对轮叶黑藻生长和光合荧光特性的影响

王立志, 王国祥*, 葛绪广, 谷先坤, 陈秋敏, 宋瑞峰

(南京师范大学地理科学学院, 江苏省环境演变及生态建设重点实验室, 江苏南京 210046)

摘要: 在实验室条件下, 研究了用不同营养盐负荷底泥作为底质培育的轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata* (L. f) Royle) 的生长的效应, 结果表明, 在上覆水 TN/TP 为 20—50, TP 变化范围在 0.03—0.05 mg/L 内, 底质磷相对释放速率为 0.33 mg/(m²·d) 时培育的轮叶黑藻生长最好。轮叶黑藻对环境有较强的适应性, 培育期间各组光合荧光参数 F_v/F_m , qP , ETR_{max} 随培养时间均明显的升高; 在非最佳生长条件下轮叶黑藻能通过自身光合荧光参数 qN 的升高, 耗散掉过剩的光能, 来对自身进行保护。

关键词: 营养盐; 轮叶黑藻; 光合荧光特性

Influence of different sediment nutrients on growth and photosynthesis fluorescence characteristics of *Hydrilla verticillata* (L. f) Royle

WANG Lizhi, WANG Guoxiang, GE Xuguang, GU Xiankun, CHEN Qiumin, SONG Ruifeng

Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

Abstract: Effects of different sediment nutrients on the growth and photosynthesis fluorescence characteristics of *Hydrilla verticillata* (L. f) Royle have been investigated in laboratory. It showed that the best environment of *Hydrilla verticillata* (L. f) Royle: TN/TP of overlying water was 20—50, the range of TP was 0.03—0.05 mg/L, relative ratio of phosphor was 0.33 mg/(m²·d). *Hydrilla verticillata* (L. f) Royle showed high adjustability of environment, photosynthesis fluorescence parameter F_v/F_m , qP , ETR_{max} increased obviously. qN increased to dissipate superfluous light protect itself when the environment was not the most suitable one.

Key Words: nutrients; *Hydrilla verticillata* (L. f) Royle; photosynthetic fluorescence characteristic

沉水植物占据了湖泊中水和底质的界面, 是湖泊生态系统中的重要初级生产者, 对生态系统的健康和稳定有重要作用^[1]。在富营养化水体对水生植物的影响方面有大量的报道^[2-5], 试图揭示富营养化水体中沉水植物的退化原因。底质营养盐负荷不仅影响上覆水的营养盐浓度, 而且也是沉水植物生长所需营养物质的主要和直接来源^[6]。然而, 关于底质营养负荷对沉水植物的生理影响和植物光合荧光特性的研究很少。

轮叶黑藻 *Hydrilla verticillata* (L. f) Royle 是长江中下游浅水湖泊中的常见沉水植物, 适应性强, 生长迅速。由于其较强的耐污性, 常在富营养化水体植被恢复工程中作为先锋物种^[7]。本研究利用 3 种营养盐负荷的底泥作为底质来培育轮叶黑藻, 采用水下饱和脉冲叶绿素荧光仪 (DIVING-PAM) (德国 WALZ 公司) 测定其荧光参数, 揭示不同负荷底质对轮叶黑藻的影响规律, 为轮叶黑藻在不同底质水体中的恢复提供理论依据。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40873057); 江苏省重大科技支撑资助项目 (BE2008677) 资助

收稿日期: 2008-10-14; **修订日期:** 2009-03-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验生物——轮叶黑藻

实验用轮叶黑藻采自南京市仙林大学城南部水库,带回实验室后洗净。挑选长势良好、无分枝、长约 30 cm 的植株用于实验。挑选好的植株 3 株为一丛,种植在长 85cm,高 65cm,宽 65cm 的塑料桶中,下面铺 5cm 土壤作为底泥预培养 15d。

1.2 实验底质

为了模拟不同营养盐负荷的底质,采用营养盐负荷较低的长江河沙(A组),中富营养化水库的底泥(B组),重富营养化鱼塘的底泥(C组),分别模拟营养盐负荷较低、中等及较高的 3 种类型底质,底质营养盐状况如表 1。

3 种底质采集后经过筛选,去除其中的植物残体、石块等杂质,并经高压蒸汽灭菌锅灭菌(压力 0.22—0.25MPa,温度 109—135℃)后备用。

1.3 实验设计

实验系统构建:将处理好的底质平铺入实验桶底部,底质厚度为 10cm,实验桶底径 45cm,口径 55cm,高 70cm。每种底质设 3 个平行。底质铺好后,沿桶壁向实验桶内缓慢注入自来水 100L,待稳定 5d 后,移栽植物。

轮叶黑藻移栽:从实验室预培养的轮叶黑藻中,选择性状均一长度为 30cm 的顶枝移栽至实验桶。每桶均匀栽植轮叶黑藻顶枝 37 枝,三枝一丛,每桶轮叶黑藻总生物量为 30g。

实验在玻璃温室内进行,实验期间温度平均为 $(25.1 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,光照平均为 $(860 \pm 192) \times 10^2 \text{ lx}$ 。实验时间为 45d,分别在实验进行到第 10,20,30,45 天时测定轮叶黑藻的株高和茎宽,通过模型计算生物量,同步测定轮叶黑藻的荧光参数、实验桶内的主要水质指标。

1.4 叶片光合荧光参数的测定

每组随机选择植株用水下叶绿素荧光仪 DIVING-PAM 和数据采集软件 wincontrol 进行测定,测定叶片的叶绿素荧光参数,所得数值取平均值进行比较, F_o 、 F_m 的测定于 6:00—8:00 进行,连体叶片经暗适应 5min 后,打开叶夹,开启检测光($0.15 \mu\text{mol photon m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)得到 F_o ,再由 5 号饱和脉冲光($4000 \mu\text{mol photon m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 0.8s)测得 F_m ^[8-9]。

F_m' 、 F_t 的测量在自然光下打开饱和脉冲直接测量。

并按下式计算 qP 、 qN 、 ETR 、 F_v/F_m :

最大光量子产量 $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$

光化学淬灭系数 $qP = (F_m' - F_t)/(F_m' - F_o)$

非光化学淬灭系数 $qN = (F_m - F_m')/(F_m - F_o)$

相对光合电子传递速率 $ETR = \text{Yield} \times PAR \times 0.84 \times 0.5$

1.5 快速光响应曲线

测定于 6:00—8:00 进行,水面光照强度为 $(30 \pm 1) \mu\text{mol photon m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。光强度分别为 17、49、104、176、248、342、506、684 $\mu\text{mol photon m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的光化光,每个强度的光化光照射 10 s 后,得到 8 个 ETR 值,绘出各组 ETR 平均值的快速光响应曲线^[10]。

1.6 水质分析方法和数据处理

水质分析采用 SKALAR 水质流动分析仪(荷兰),数据采用 SPSS 16.0 软件和三维可视化软件 SURFER 8.0 分析。

表 1 底质营养盐负荷

Table 1 Nutrient concentration of sediment

组 Group	底质营养盐 sediment nutrients/(mg/kg)		
	总氮 TN	总磷 TP	总有机碳 TOC
A	293.32	356.42	1242.72
B	2711.04	829.85	27935.98
C	3832.51	1478.70	39577.84

2 实验结果

2.1 不同营养盐负荷底质上覆水营养盐变化

不同类型的底质对上覆水氮磷含量的影响不同。在整个培养期间上覆水氮磷含量变化如图 1。整个培养期间上覆水氮的含量整体呈下降趋势,而磷的含量呈上升趋势。

在培养期间的第 20 天 TN 含量 C 组最高,而在第 30 天和第 45 天时 B 组 TN 的含量为 3 组中最高,C 组次之。TN 变化范围为 A 组 0.41—1.18mg/L, B 组 0.96—2.06 mg/L, C 组 0.65—2.85mg/L,不同的采样时间 TN 的含量在各组之间的差异较大,培养期间 TN 含量逐渐降低说明轮叶黑藻对氮素的吸收速度要大于底质向水体的释放速度。培养期间各组 TP 含量均呈逐渐上升趋势,其中 C 组上升最快,B 组次之。说明轮叶黑藻对水体磷素的吸收速度要小于底质向水体的释放速度。在整个培养期间 TP 的含量表现为 C 组 > B 组 > A 组,且 TP 变化范围为 A 组 0.022—0.042mg/L, B 组 0.031—0.054 mg/L, C 组 0.033—0.086mg/L,3 组变化呈现较稳定的趋势。水体氮磷比(TN/TP)变化呈明显的下降趋势,在培养第 10 天时 C 组 TN 含量为 3 组最高值,而随着培养时间的增加 3 组氮磷比表现为 B 组 > C 组 > A 组,且变化范围为 A 组 9.77—52.77, B 组 7.50—85.67, C 组 17.00—66.56。

2.2 不同营养盐负荷底质对轮叶黑藻生物量变化

统计实验采用的 70 株轮叶黑藻的长度、茎宽和重量,构建其生物量函数模型。

$$W = 0.01763L + 0.45516D + 0.1391 \quad (R^2 = 0.81)$$

式中, L 为轮叶黑藻植株的高度(cm), D 为轮叶黑藻的茎宽(cm), W 为生物量(g)。

在轮叶黑藻的生长过程中,统计轮叶黑藻的株高和茎宽来计算每个桶的生物量,以研究其生物量在各个生长时期的变化。各组平均生物量随时间变化如图 2 所示。

实验结果表明(图 2),轮叶黑藻在中等污染程度的底质上生长最好,生物量最高。在底质营养盐负荷较高和较低的两组轮叶黑藻的生长均较差,生物量偏低。在整个实验过程中轮叶黑藻总生物量 A 组 < C 组 < B 组。方差分析表明,A、B、C 3 组生物量在实验进行至第 10 天时差异性已经达到显著性水平($P < 0.05$),至第 20、30、45 天时差异性达到极显著水平($P < 0.01$)。

2.3 不同底质营养盐负荷对轮叶黑藻光合荧光参数变化

F_o 和 F_m 分别为暗适应后的最小和最大荧光参数,当 PS II 所有反应中心均处于开放状态时得到 F_o ,均

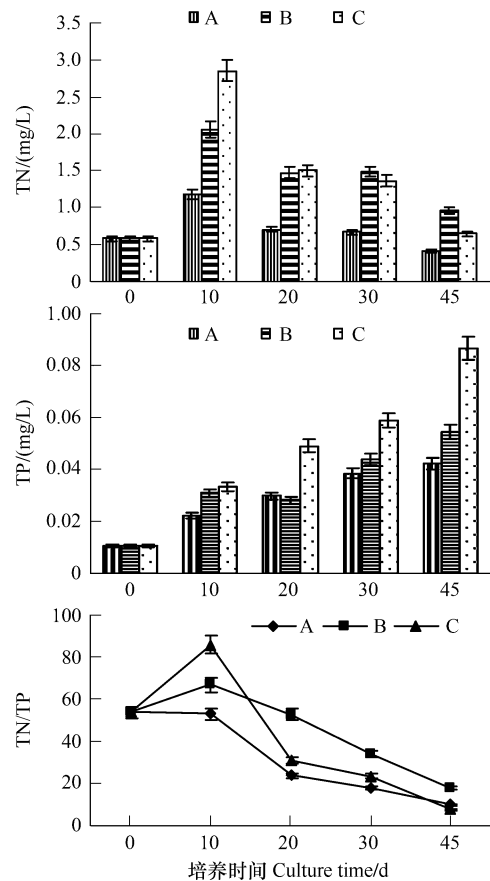


图 1 不同底质上覆水氮磷含量

Fig. 1 Phosphorus in overlaying water of different sediments

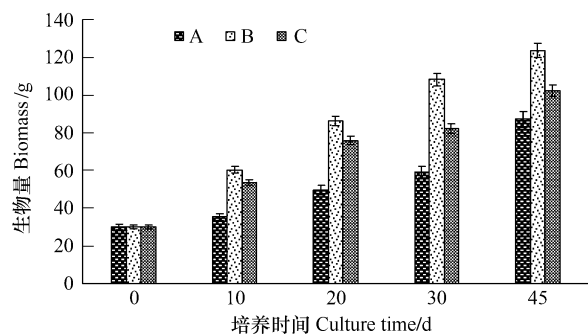


图 2 各组生物量随时间变化

Fig. 2 Biomass changes of every group

处于关闭状态时得到 F_m 。 F_v/F_m 反映了(在最适合条件下经过暗适应后的)PS II 的最大量子产量。当植物受到环境胁迫时 F_v/F_m 的值会明显的降低。光化学淬灭系数(qP)反映的是 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,在一定程度上反映了 PS II 反应中心的开放程度。它反映了 PS II 原初电子受体 Q_A 的还原状态,它由 Q_A^- 重新氧化形成。光化学淬灭系数 qP 的大小反映了 Q_A^- 重新氧化形成 Q_A 的量的大小,即 PS II 的电子传递活性的强弱。非光化学淬灭系数(qN)反映的是 PS II 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分。

叶绿素光合荧光参数的变化如图 3 所示。整个培养期间轮叶黑藻 F_v/F_m 和 qP 的值呈现 A 组 < C 组 < B 组,且随着培养时间的增加呈逐渐升高趋势,而 qN 值的变化趋势正好相反。 F_v/F_m 的变化范围在 0.67—0.89, qP 的变化范围在 0.94—0.97, qN 的变化范围在 0.22—0.36。在低营养底质(A 组)和高营养底质(C 组)培育下轮叶黑藻的 F_v/F_m 和 qP 值较中营养底质(B 组)偏低, qN 值则相反。

快速光响应曲线是 PSII 的相对光合电子传递速率(ETR),反映实际光强下的光化学效率。快速光响应曲线的变化如图 4。各实验组在整个实验过程中的 ETR_{max} 的大小顺序表现为 A 组 < C 组 < B 组,3 组 ETR_{max} 随着培养时间的增加都呈明显的增加趋势;在培养时间至第 10,20,30 天和第 45 天时轮叶黑藻的饱和光强分别为 49,104,156,176 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$,随着培养时间的增加饱和光强呈明显增大趋势。

3 讨论

3.1 不同 TN/TP 对轮叶黑藻生物量影响

关于沉水植物对水体富营养化的反应机理在学术界一直存在分歧,Chamber 等^[11]认为沉水植物对富营养化的敏感性主要是受水体透明度的下降而引起的光衰减的影响,但也有研究表明水体中较高的氮、磷浓度对沉水植物产生类似于盐胁迫一样的逆境胁迫,影响沉水植物正常的生理活动,抑制植物的生长^[12-13]。

氮、磷是植物生长所需的重要营养物质,轮叶黑藻主要是通过茎叶吸收水体中的氮、磷来满足自身的生长需求^[14-15],而水体中不同的氮磷比(TN/TP)对轮叶黑藻的生长具有直接的影响^[16]。在本实验条件下,水体中 TN/TP 对轮叶黑藻的生物量影响较大,生物量(g)随培养时间和 TN/TP 的变化如图 5,在各培养时间内生物量在 TN/TP 为 20—50 时值最大,超出此范围生物量均明显降低。B 组 TN/TP 在此范围内的培养天数明显最多,故 B 组生物量比其它两组偏高。A 组水体较低的氮、磷含量导致的轮叶黑藻对养分的需求不足也是该组生物量较低的原因之一。

3.2 不同 TN/TP 对轮叶黑藻光合荧光参数影响

荧光参数随培养时间和 TN/TP 的变化如图 6,在培养期间,TN/TP 为 20—50 时 F_v/F_m 和 qP 值最大(B 组), qN 值最小(A 组,C 组),当 TN/TP 大于或小于 20—50 时 F_v/F_m 明显下降,表明轮叶黑藻受到胁迫作用; qP 值的变化表明,水体环境对轮叶黑藻的 PS II 氧化侧向 PS II 反应中心的电子流动有较大影响,并使得其 PS II 的电子传递活性降低,TN/TP 为 20—50 时 PS II 的电子传递活性最高。

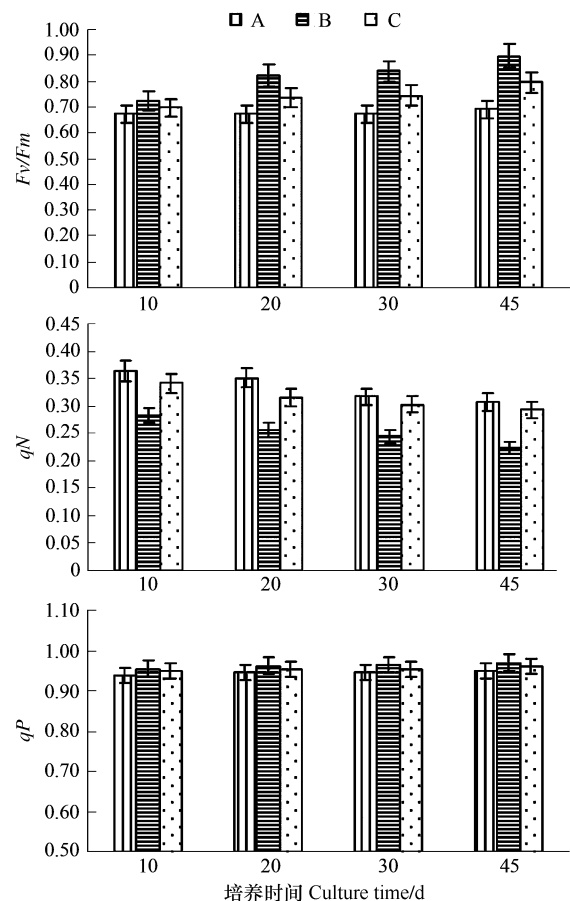


图 3 不同底质下光合参数的变化

Fig. 3 Changes of photosynthesis fluorescence parameter of different sediments

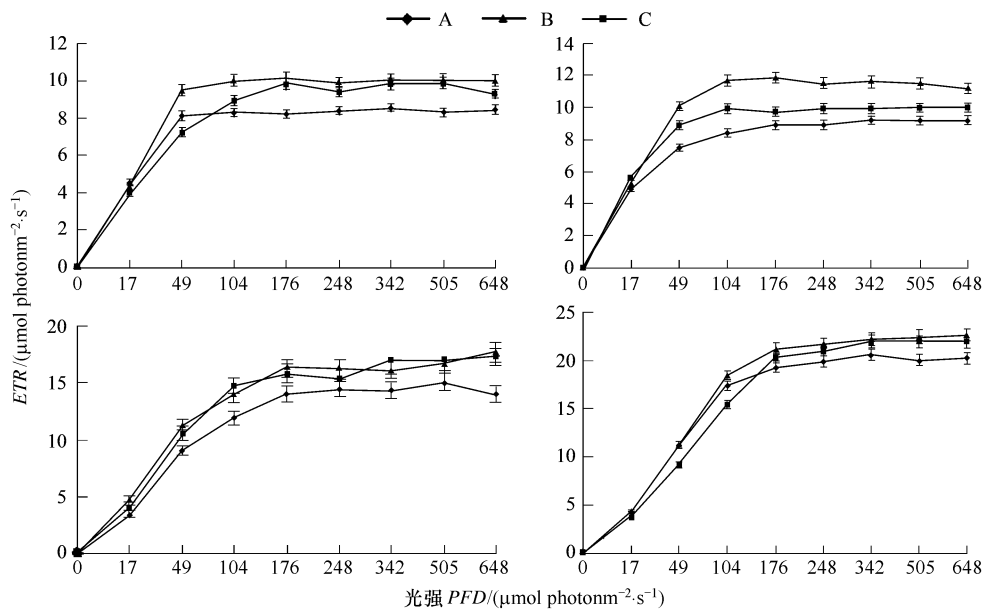


图4 不同底质轮叶黑藻的快速光响应曲线

Fig. 4 Rapid light curves of *Hydrilla verticillata* (L. f) Royle in different sediment

qN 的变化表明,在 TN/TP 大于或小于 20—50 时,轮叶黑藻将 PS II 天线色素吸收的不能用于光合电子传递的光能以热的形式耗散掉,以保护自己的组织免受过剩光的损害。体现了植物在胁迫环境下的一种自我保护机制。

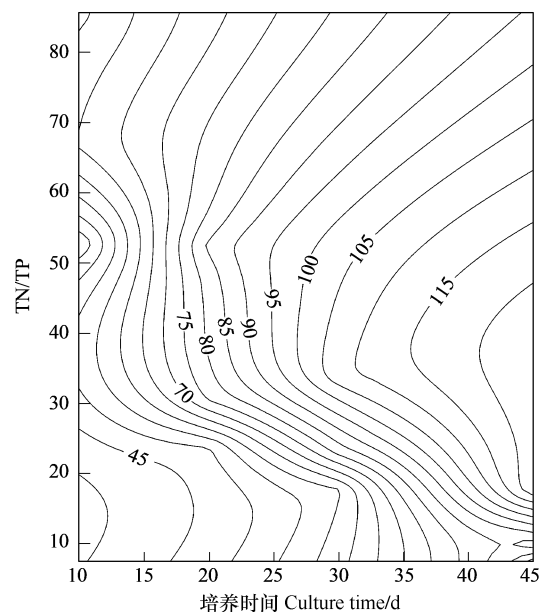
光强(PFD)- ETR 图显示了典型的 P-E 曲线,线型的升高被稳定阶段所限制,光合途径受限,各组 ETR 值随光照强度的增加呈逐渐增加趋势, ETR_{max} 也随着培养时间的增加也呈明显的增加趋势;在 TN/TP 大于或小于 20—50 时 ETR 随光照强度增加的趋势变得缓慢;轮叶黑藻的光抑制能力均显著的下降。

因此,在 TN/TP 为 20—60 时,水体环境能有效的促进轮叶黑藻的生长,而在此范围以外,水体环境对轮叶黑藻的生长将产生不利影响。

由图 6 知不论在何种 TN/TP 条件下,随着培养时间的增加 A、B、C 三组 Fv/Fm , ETR_{max} 和 qP 值均呈上升趋势, qN 呈下降趋势,说明轮叶黑藻能在各种复杂的环境中通过光合荧光参数的改变来实现自身的生存需求,反映了轮叶黑藻在非最佳生长条件下对环境的适应性。

3.3 不同 TP 对轮叶黑藻光合荧光参数影响

在培养期间轮叶黑藻对水体中 TN 的吸收速度大于底质的释放速度,因此可推断对轮叶黑藻生长的胁迫和促进作用主要来自于水体磷浓度的高低。而水体中磷的含量又几乎全部来自于底质的释放,因此底质中磷含量的高低以及其向上覆水释放的速度乃成为对轮叶黑藻产生胁迫重要因素,因此本文仅讨论磷对轮叶黑藻的影响。

图5 生物量随时间和 TN/TP 的变化Fig. 5 Biomass changes with time and TN/TP

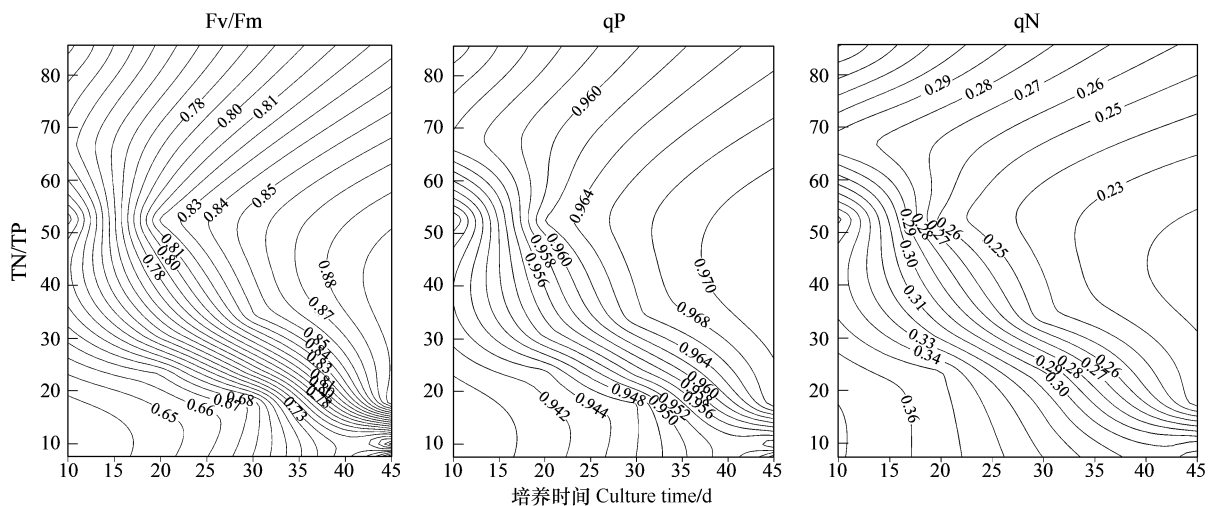


图6 叶绿素荧光参数随时间和 TN/TP 的变化

Fig. 6 Changes of photosynthesis fluorescence parameter with time and TN/TP

通过对叶绿素荧光参数随培养时间和水体 TP 浓度的变化分析(图 7)可知 TP 浓度变化 0.03—0.05mg/L 时 F_v/F_m 和 qP 值最大, qN 值最小。因此可以推断轮叶黑藻生长的最适 TP 浓度范围是 0.03—0.05mg/L, 在此范围以外其光合荧光参数 F_v/F_m 和 qP 值均降低, 表明轮叶黑藻受到抑制, 且其电子传递活性降低; qN 值的升高, 表明轮叶黑藻通过将过剩的光能以热的形式耗散掉, 以保护自身组织免受过剩光能的损害。

因为 B 组水体 TP 浓度的变化范围在整个培养期间大部分均为 0.03—0.05mg/L, 因此该组生物量最大, A、C 组 TP 的浓度范围较多的偏离了该浓度范围, 导致了两组植物的生长势较差, 生物量的偏低。

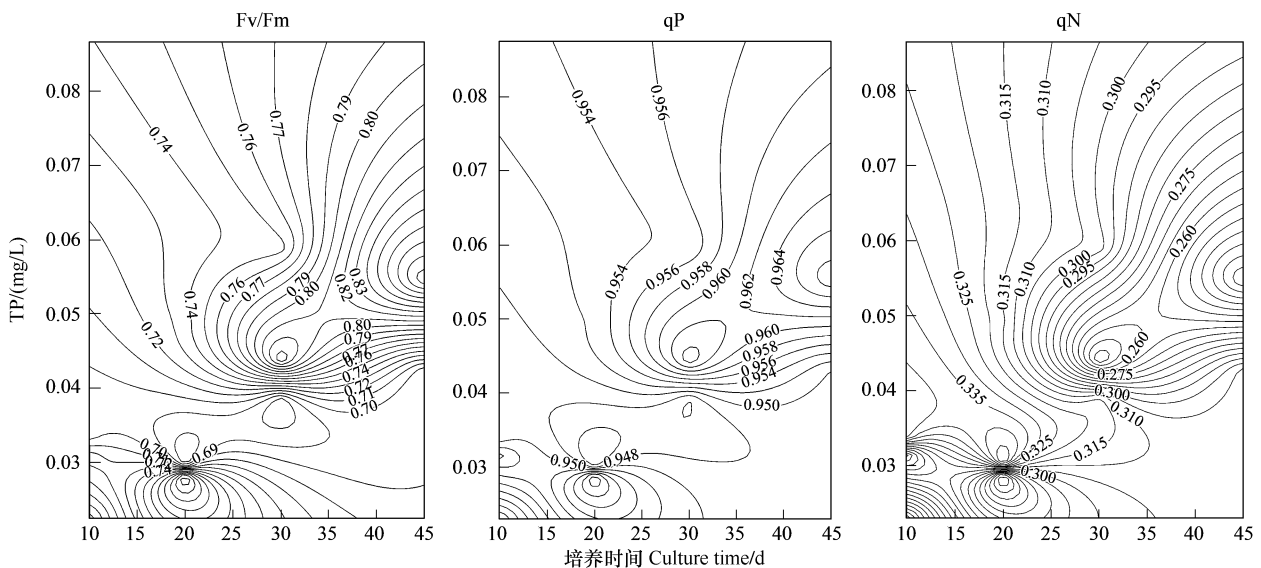


图7 叶绿素荧光参数随培养时间和 TP 浓度的变化

Fig. 7 Changes of photosynthesis fluorescence parameter with time and TP

3.4 底质磷素相对释放速度对轮叶黑藻生长影响

为了准确的描述轮叶黑藻在不同的生长时期对营养盐浓度的需求与底质营养盐含量之间的关系, 本研究为此采用底质相对释放速率来定量描述轮叶黑藻的最适生长营养盐范围。将轮叶黑藻和底质看做一个统一的整体, 来计算其向水体释放总磷的相对速率^[17]。计算公式如下:

$$R = [V(C_n - C_0) + \sum_{j=1}^n V_{j-1}(C_{j-1} - C_a) - \sum_{m=1}^n V_m C_m + C_z \sum_{m=1}^n V_m] / A \cdot t$$

式中, R 为释放速率($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), V 为实验桶中上覆水体积(L); C_n 为第 n 次采样时磷含量(mg/L); C_0 为初始值(mg/L); C_{j-1} 为第 $j-1$ 次采样时磷浓度(mg/L); V_{j-1} 为第 $j-1$ 次采样体积(L); C_a 为添加自来水磷含量(mg/L); V_m 为添加自来水体积(L); C_m 为添加自来水磷含量(mg/L); C_z 为蒸馏水磷浓度(mg/L); A 为水-沉积物界面接触面积(m^2); t 为释放时间(d)。

计算的 A、B、C 3 组向水体释放总磷的相对速率为 $R_A = 0.26 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; $R_B = 0.33 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; $R_C = 0.75 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。因此在本实验条件下, 由于 B 组环境条件最适合轮叶黑藻的生长, 因此, 采用 B 组的底质相对磷释放速率作为轮叶黑藻的最适生长环境参数, 即当底质向水体释放磷的相对速率为 $0.33 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时轮叶黑藻的生长处于最佳状态。

4 结论

底质营养盐 TN $2.79 \text{ g}/\text{kg}$, TP $0.62 \text{ g}/\text{kg}$, TOC $29.74 \text{ g}/\text{kg}$ 情况下培育的轮叶黑藻生长状况最好, 其培育期间上覆水 TN 变化范围 $0.96\text{—}2.06 \text{ mg}/\text{L}$, TP 变化范围 $0.031\text{—}0.054 \text{ mg}/\text{L}$ 。

在 TN/TP 为 $20\text{—}50$ 时轮叶黑藻光合荧光参数 Fv/Fm 和 qP 值最大, qN 值最小, 即轮叶黑藻最适合生长的 TN/TP 为 $20\text{—}50$, 低于和高于此范围均受到胁迫作用。环境底质磷相对释放速率为 $0.33 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 上覆水 TP 变化范围在 $0.03\text{—}0.05 \text{ mg}/\text{L}$ 时最适合轮叶黑藻的生长。

轮叶黑藻对环境有较强的适应性, 其光合荧光参数 Fv/Fm 、 qP 和 ETR_{max} 均随培养时间和 TP 浓度的升高而升高, 在非最佳生长条件下能通过自身改变光合荧光参数 qN 的大小, 将不能用于光合电子传递的光能以热的形式耗散掉, 以保护自己的组织免受过剩光能的损害。

致谢: 李彦菊女士对论文写作和修订给予大力帮助, 在此表示衷心感谢。

References

- [1] Fan G L, Li W. Response of Nutrient Accumulation Characteristics and Nutrient Strategy of *Myriophyllum spicatum* L. under Different Eutrophication Conditions. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2005, 23(3): 267-271.
- [2] Xiao Y, Wang Y L, Gao S X, Sun C, Zhou Y Z. Chemical Composition of *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle in Taihu Lake. *Chinese Journal of Chemistry*, 2007, 25: 661-665.
- [3] Mony C, Koschnick T J, Haller W T, Muller S. Competition between two invasive Hydrocharitaceae (*Hydrilla verticillata* (L. f.) (Royle) and *Egeria densa* (Planch)) as influenced by sediment fertility and season. *Aquatic Botany*, 2007, 86: 236-242.
- [4] Judy F Shearer, Michael J Grodowitz, Dwilette G McFarland. Nutritional quality of *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle and its effects on a fungal pathogen *Mycocleptodiscus terrestris* (Gerd.) Ostazeski. *Biological Control*, 2007, 41: 175-183.
- [5] Fang Y Y, Babourina O, Rengel Z, Yang X E, Pu P M. Spatial distribution of ammonium and nitrate fluxes along roots of wetland plants. *Plant Science*, (2007), 173: 240-246.
- [6] Lee K S, Dunton K H. Inorganic nitrogen acquisition in the seagrass *Thalassia testudinum*: development of a whole-plant nitrogen budget. *Limnol Oceanogr*, 1999, 44: 1204-1215.
- [7] Li W, Liu G H, Xiong B H, Pu Y H. The Restoration of Aquatic Vegetation in Lakes of Poyang Lake Nature Reserve after Catastrophic Flooding in 1998. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, 22(4): 301-306.
- [8] Li Q, Wang G X, Pan G Q, Wang W L, Ma T. Influence of water turbidity on germination of *Potamogeton crispus* and growth of germinated seedling. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3594-3601.
- [9] Ma T, Li Q, Wang G X, Wang W L, Xu Y, Pan G Q. Influence of Suspended Sands on Rapid Light Curves of *Ceratophyllum demersum* in Turbid Solution. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2006, 24(6): 531-535.
- [10] Peter J R, Rolf G. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity. *Aquatic Botany*, 2005, 82: 222-237.
- [11] Chamber P A, Kalff J. Light and nutrients in the control of aquatic plant community structure I. in situ experiments. *Journal of Ecology*, 1987, 75: 611-619.
- [12] Wang B, Li W. Physiological reactions of *Potamogeton malaianus* to different N and P concentrations in the growth medium. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10): 1616-1621.

- [13] Wang J, Gu Y F, Zhu Z Y, Wu B, Yin D Q. Physiological responses of *Ceratophyllum demersum* under different nutritional conditions. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 337-340.
- [14] Barko J W, Smart R M. Mobilization of sediment phosphorus by submersed freshwater macrophytes. Freshw Boil, 1980, 10: 229-298.
- [15] Carignan R, Dalfé J. Phosphorus release by submerged macrophytes; Significance to epiphyton and phytoplankton. Limnol Oceanogr, 1982, 27: 419-427.
- [16] Wen M Z, Zheng Y F, Wu R J. Effects of TN:TP ratio in eutrophic water on the growth of *Vallisneria spiralis*. Chinese Journal of Ecology, 2006, 27(3): 414-417.
- [17] Fan C X, Zhang L, Yang L Y, Huang W Y, Xu P Z. Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in a lake. Oceanologica et Limnologia Sinica, 2002, 33(4): 371-377.

参考文献:

- [1] 范国兰, 李伟. 穗花狐尾藻在不同程度富营养化水体中的营养积累及营养分配对策. 武汉植物学研究, 2005, 23(3): 267-271.
- [7] 李伟, 刘贵华, 熊秉红, 浦云海. 1998 年特大洪水后鄱阳湖自然保护区主要湖泊水生植被的恢复. 武汉植物学研究, 2004, 22(4): 301-306.
- [8] 李强, 王国祥, 潘国权, 王文林, 马婷. 水体浊度对菹草萌发及萌发苗光合荧光特性的影响. 生态学报, 2006, 26(11): 3594-3601.
- [9] 马婷, 李强, 王国祥, 王文林, 徐尧, 潘国权. 悬浮泥沙溶液对金鱼藻快速光响应曲线的影响. 武汉植物学研究, 2006, 24(6): 531-535.
- [13] 王珺, 顾宇飞, 朱增银, 武斌, 尹大强. 不同营养状态下金鱼藻的生理响应. 应用生态学报, 2005, 16(2): 337-340.
- [16] 文明章, 郑有飞, 吴荣军. 富营养水体中总氮与总磷比对苦草生长的影响. 生态学杂志, 2006, 27(3): 414-417.
- [17] 范成新, 张路, 杨龙元, 黄文钰, 许朋柱. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模型. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 371-377.