应用生态学报 2009年10月 第20卷 第10期
Chinese Journal of Applied Ecology, Oct. 2009, 20(10): 2499-2505

水体悬浮泥沙对黑藻生长和叶绿素荧光特性的影响*

李 强[1,2**] 王国祥[2,3]
([1] 江苏省环境演变及生态建设重点试验室, 南京 210097; [2] 重庆文理学院化学与环境工程学院, 重庆永川 402160; [3] 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097)

摘 要 利用粒径小于100 μm的泥沙调制水体浊度分别维持在30、60和90 NTU,将黑藻幼苗种植于上述水体中,定期测定植株的分枝长、分枝数和鲜质量,利用水下饱和脉冲荧光仪(DIVING-PAM)测定叶片在光化光下的荧光参数. 结果表明:随着泥沙含量的增加,植株分枝数受到明显抑制,生物量逐渐降低,而分枝长则呈显著增加趋势;随着试验时间的延长,浑浊水体中光化学最大量子产量(F_v/F_m)值呈明显降低趋势,但显著高于对照. 在17 μmol·m^{-2}·s^{-1}光化光照射下,与第30天相比,第60天时30、60和90 NTU组植株叶片的有效荧光产量($\triangle F_v'/F_m'$)分别增加了48.9%、36.8%和17.2%($P<0.01$),相对光合电子传递速率(*rETR*)分别增加了56.7%、42.2%和21.4%($P<0.01$);而在104 μmol·m^{-2}·s^{-1}光化光照射下,第60天时植株的$\triangle F_v'/F_m'$、光化学淬灭系数(q_P)和*rETR*显著降低,且热耗散能力(q_N)也显著降低,表明黑藻植株适应低光环境,且在高光强条件下黑藻叶片易受到光伤害. 可引种黑藻幼苗于混浊的浅水水体中.

关键词 悬浮泥沙 黑藻 叶绿素荧光特性
文章编号 1001-9332(2009)10-2499-07 **中图分类号** Q948.8 **文献标识码** A

Effects of suspended silts in waters on the growth and chlorophyll fluorescence characteristics of *Hydrilla verticillata*. LI Qiang[1,2], WANG Guo-xiang[2,3] ([1] *Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Nanjing* 210097, *China*; [2] *College of Chemistry and Environment Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Yongchuan* 402160, *Chongqing, China*; [3] *College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing* 210097, *China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2009, **20**(10): 2499-2505.

Abstract: Silt particles smaller than 100 μm in diameter were used to make the waters with a turbidity of 30 NTU, 60 NTU, and 90 NTU. *Hydrilla verticillata* seedlings were planted in the turbid waters, and their branch length, branch number, and fresh mass were measured at definite periods of time. In the meanwhile, the leaf chlorophyll fluorescence parameters were determined *in situ* by a submersible pulse-amplitude modulated (PAM) fluorometer (Walz GmbH, Effeltrich, Germany). With the increase of water turbidity, the branch number of the seedlings decreased remarkably, biomass also decreased, but branch length increased significantly. In turbid waters, the F_v/F_m value decreased with time, but was still higher than that in the control waters. Under the actinic light of 17 μmol·m^{-2}·s^{-1} PPFD, the effective quantum yield ($\triangle F_v'/F_m'$) of seedling leaves on the 60th day in the waters with turbidity of 30 NTU, 60 NTU, and 90 NTU increased by 48.9%, 36.8%, and 17.2% ($P<0.01$), and the relative electron transport rate (*rETR*) increased by 56.7%, 42.2%, and 21.4% ($P<0.01$), respectively, compared with those on the 30th day. However, under the actinic light of 104 μmol·m^{-2}·s^{-1} PPFD, the $\triangle F_v'/F_m'$, q_P, and *rETR* on the 60th day decreased significantly, and the heat dissipation capability (q_N) also re-

* 国家自然科学基金项目(40873057)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ081206)、江苏省环境演变及生态建设重点实验室开放项目(JSKLEC200801)、重庆文理学院科研重点项目(Z2007HH10)和重庆文理学院引进人才科研启动项目资助.
** 通讯作者. E-mail: lq1973_2002@163.com
2009-02-19 收稿, 2009-07-20 接受.

duced evidently. All the results suggested that the *H. verticillata* seedlings in turbid waters could adapt to low light environment, but their leaves were easy to be damaged under high light intensity. Therefore, it would be possible to introduce *H. verticillata* seedlings in shallow turbid waters.

Key words: suspended silt; *Hydrilla verticillata*; chlorophyll fluorescence characteristics.

在浑浊水体中,沉水植物的恢复是一个难题. 水体中的各种悬浮颗粒物直接影响光在水体中的垂直分布,并附着于沉水植物叶片,增加了其细胞外扩散层厚度,降低了溶解无机碳的供应[1],从而影响沉水植物的生长、繁殖与分布. 水体悬浮颗粒物主要包括藻类等微型生物残体、泥沙等无机颗粒物,前者主要出现在藻型富营养化湖泊中[2-3],后者出现在一些通江湖泊及河流中[4-5]. 黑藻(*Hydrilla verticillata*)是一种多年生的沉水植物,广泛生长于湖泊、池塘、沟渠及河流水体[6]. 研究表明,黑藻植株对光的需求较低[7],是水生生态系统恢复、重建过程中首选的几种植物之一[8]. 但其在浑浊泥沙水体中的恢复研究很少[9]. 近年来,随着水下饱和脉冲叶绿素荧光仪(DIVING-PAM)的出现,使原位、无损伤测定沉水植物的光合作用成为可能[10-11]. 本文利用水下饱和脉冲叶绿素荧光仪原位测定不同泥沙含量水体中黑藻幼苗叶片的荧光参数,研究水体泥沙悬浮对黑藻植株生长和叶片光合荧光特性的影响,旨在为黑藻在浑浊水体中的恢复和重建提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 供试材料

黑藻具有直立和匍匐两种茎,直立茎上形成的冬芽和夏芽是其主要的繁殖方式[12]. 本试验选择芽长约 2 cm 的黑藻冬芽 10 枚种植于盆高 8 cm、直径 15 cm 的小盆中,盆内土壤的全氮、全磷(P_2O_5)含量分别为 0.194 和 0.514 mg·g^{-1}. 自然光照下培养,试验开始时,黑藻幼苗高(10.4 ± 3.6) cm.

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 试验装置由浑水发生池(0.5 m × 0.8 m × 0.5 m)、植物试验系统(直径 0.52 m,高 0.7 m)和管道组成,浑水发生池搅拌后的悬浮泥沙溶液经管道虹吸流入各植物系统,分别调节各管道的水流速度,使各植物系统的水体浊度分别约为 30、60 和 90 NTU,以不含泥沙的水体为对照. 每个植物系统底部放入 1 盆黑藻幼苗,每个浊度 3 组重复. 试验泥沙采自长江镇江段(32° 14′ 23.24″ N, 109°28′45.13″ E),用孔径 100 μm 筛网水洗过滤掉 100 μm 以上的泥沙,滤液静止 2 h 后,选上层悬浮液作为试验用的浑浊泥沙水体. 悬浮泥沙主要为粒径 1.0 ~ 1.5 μm 的泥沙,约占 40%;其次为 50 ~ 100 μm、2.5 ~ 5.0 μm 和 25 ~ 50 μm 粒径的泥沙,分别占 25%、13.4% 和 12.4%.

1.2.2 悬浮泥沙含量的测定 采用浊度计测量水体泥沙浓度,配不同浊度的悬浮泥沙,采用烘干法测定悬浮泥沙含量,绘制成浊度(X)-悬浮泥沙(Y)线性回归关系[13]:$Y = -0.0017X^2 + 1.8305X$ ($R^2 = 0.982$, $n = 18$). 根据定时监测的水体浊度计算悬浮泥沙含量,并调配悬浮泥沙的浓度.

试验期间,于晴朗无云天正午时测定对以及 30、60 和 90 NTU 水体的水下光照强度,计算不同水深处的光衰减系数[各水深处的光照强度(I)和水面光照强度(I_o)的比值].

1.2.3 浑浊泥沙水体中黑藻幼苗的生长发育 试验从 2005 年 5 月 31 日开始,7 月 30 日结束. 分别于第 0、20、40 和 60 天统计植株的分枝数和分枝长,并随机选择 3 株植株称其鲜质量. 于第 20、40 和 60 天测定植株顶部伸展叶片的光化学最大量子产量(F_v/F_m),并分别于第 30 天和 60 天测定光化光下的荧光参数.

用水下饱和脉冲荧光仪(DIVING-PAM,德国 WALZ 公司)和数据采集软件 Wincontrol 于 7:00—8:00 间测定原位叶绿素荧光参数;每一水体随机选择 3 株植株顶部伸展叶片,连体叶片经暗适应 15 min后,打开叶夹,开启检测光(0.15 μmol·m^{-2}·s^{-1})得到 F_o,再由饱和脉冲光(4000 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 0.8 s)测得 F_m,然后分别选用 1 号(光强为 17 μmol·m^{-2}·s^{-1})和 3 号(光强为 104 μmol·m^{-2}·s^{-1})光化光测定荧光参数值 F_t、F_m'[14].

$$F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$$

有效荧光产量($\triangle F_v'/F_m'$) = $(F_m' - F_t)/F_m'$

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

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

相对光合电子传递速率($rETR$) = $\triangle F_v'/F_m' \times PAR \times 0.84 \times 0.5$[15]

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 软件对试验数据进

行统计分析和作图. 采用单因素方差(one-way ANOVA)分析水体浊度对黑藻生长发育的影响. 用最小显著差异法(LSD)判断各浊度组植株生长发育的差异显著性.

2　结果与分析

2.1　悬浮泥沙水体光衰减系数的变化

由图 1 可以看出,在悬浮泥沙的溶液中,悬浮泥沙颗粒阻碍了光在水中的垂直分布,溶液透明度低,水下光照弱,特别是 90 NTU 水体水下光衰减系数的降低最显著,在水下 50 cm 处光衰减系数约 0.01.

2.2　悬浮泥沙水体中黑藻的生长发育

2.2.1 分枝数　由表 1 可以看出,试验前 40 天,各试验组植株的分枝数增长较缓,且随着水体浊度的增加,植株的分枝数呈显著的降低趋势. 第 60 天时各试验组分枝数显著增加,差异达极显著水平($P<0.01$).

2.2.2 分枝长　在对照水体中,黑藻的生长受到显著抑制;而各浊度组植株分枝长增长较快,且随水体浊度的增加,植株分枝长呈显著增长趋势(表 2). 30 NTU 组与60 NTU 组、90 NTU 组植株分枝长的差异显著($P<0.01$);而 60 NTU 组与 90 NTU 组植株间的差异较小,前 40 d 二者的差异显著($P<0.05$),但第 60 天时二者的分枝长无显著差异($P>0.05$).

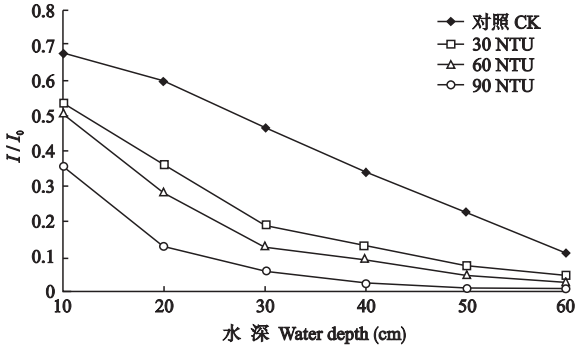

图 1　试验水体 I/I_0 的变化

Fig. 1　Changes in I/I_0 of experimental waters($n=5$).

表 1　试验组黑藻的分枝数变化

Tab. 1　Changes in *Hydrilla verticillata* 's branch number of tested groups (mean ± SD)

处理 Treatment	试验天数 Experimental days (d)		
	20	40	60
对照 Control	41 ± 2B	54 ± 2B	134 ± 3A
30 NTU	46 ± 1A	60 ± 2A	116 ± 4B
60 NTU	37 ± 2C	41 ± 3C	69 ± 6C
90 NTU	30 ± 1D	35 ± 2D	82 ± 2D

同列不同大写字母表示 LSD 检验差异达极显著水平($P<0.01$) Different capital letters in the same row meant significant difference at 0.01 level, according to LSD test. 下同 The same below.

表 2　试验组黑藻的分枝长变化

Tab. 2　Changes in *Hydrilla verticillataa* 's branch length of tested groups (mean ± SD)

处理 Treatment	试验天数 Experimental days (d)		
	20	40	60
对照 Control	17.9 ± 6.2A	16.2 ± 7.2A	12.5 ± 7.3A
30 NTU	19.8 ± 8.8B	30.1 ± 9.6B	26.3 ± 15.2B
60 NTU	25.7 ± 12.4C	38.1 ± 12.8C	34.2 ± 16.4C
90 NTU	31.7 ± 15.2C	44.7 ± 16.4C	29.9 ± 20.1C

2.2.3 生物量　由表 3 可知,各浊度组黑藻生物量的增幅显著大于对照组. 第 40 天时,随着水体浊度的增加,植株生物量呈显著下降趋势,且第 60 天时 30 和 60 NTU 组植株生物量大于 90 NTU 组,差异达极显著水平($P<0.01$).

第 60 天时,各浊度组植株茎和叶的生物量均显著大于对照组,且随着水体浊度增加,植株茎和叶的生物量呈降低趋势,30 和 60 NTU 组植株茎、叶的生物量显著大于 90 NTU 组,差异达极显著水平($P<0.01$). 进一步分析植株叶与茎生物量的比值,对照组和 90 NTU 组的叶/茎值无显著差异,但显著低于 30 和 60 NTU 组,差异达极显著水平($P<0.01$).

2.3　黑藻叶片 F_v/F_m 的变化

F_v/F_m 反映了当所有的 PSⅡ反应中心均处于开放态时的量子产量,可以直接作为原初光化学效率的指标[16]. 由图 2 可知,试验期间对照组植株叶片的 F_v/F_m 值显著低于各浊度组植株. 试验期间各浊度组植株的F_v/F_m值间无显著差异,表明在浑浊

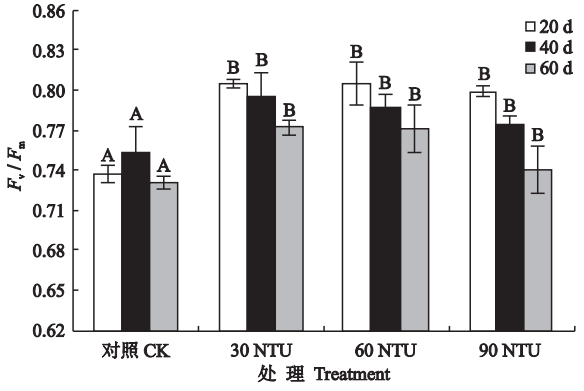

图 2　不同处理黑藻叶片 F_v/F_m 值的变化

Fig. 2　Changes in F_v/F_m of *Hydrilla verticillata* leaves in different treatments(mean ± SD, $n=3$).

同时期不同大写字母表示 LSD 检验差异达极显著水平($P<0.01$) Different capital letters in the same period meant significant difference at 0.05 level according to LSD test. 下同 The same below.

表 3 试验组黑藻鲜质量的变化

Tab. 3 Changes in *Hydrilla verticillata* 's fresh mass of tested groups (mean ± SD)

项 目 Item	试验天数 Experimental days (d)	对 照 Control	30 NTU	60 NTU	90 NTU
单株鲜质量 Fresh mass per plant (g)	20	1.51 ± 0.06A	2.31 ± 0.07B	2.39 ± 0.06C	2.48 ± 0.05C
	40	1.75 ± 0.05A	4.58 ± 0.12B	4.33 ± 0.14B	4.10 ± 0.13C
	60	3.22 ± 0.80A	7.72 ± 0.23B	7.53 ± 0.29B	6.40 ± 0.19C
单株茎鲜质量 Fresh mass of stem per plant (g)	60	1.27 ± 0.05A	2.76 ± 0.08B	2.70 ± 0.08B	2.49 ± 0.08C
单株叶鲜质量 Fresh mass of leaf per plant (g)	60	1.95 ± 0.05A	4.96 ± 0.16B	4.83 ± 0.21B	3.92 ± 0.12C
叶质量/茎质量 Fresh mass of leaf / fresh mass of stem	60	1.54 ± 0.07A	1.79 ± 0.01B	1.80 ± 0.03B	1.58 ± 0.03A

同行不同大写字母表示 LSD 检验差异达极显著水平($P < 0.01$) Different capital letters in the same line meant significant difference at 0.01 level, according to LSD test.

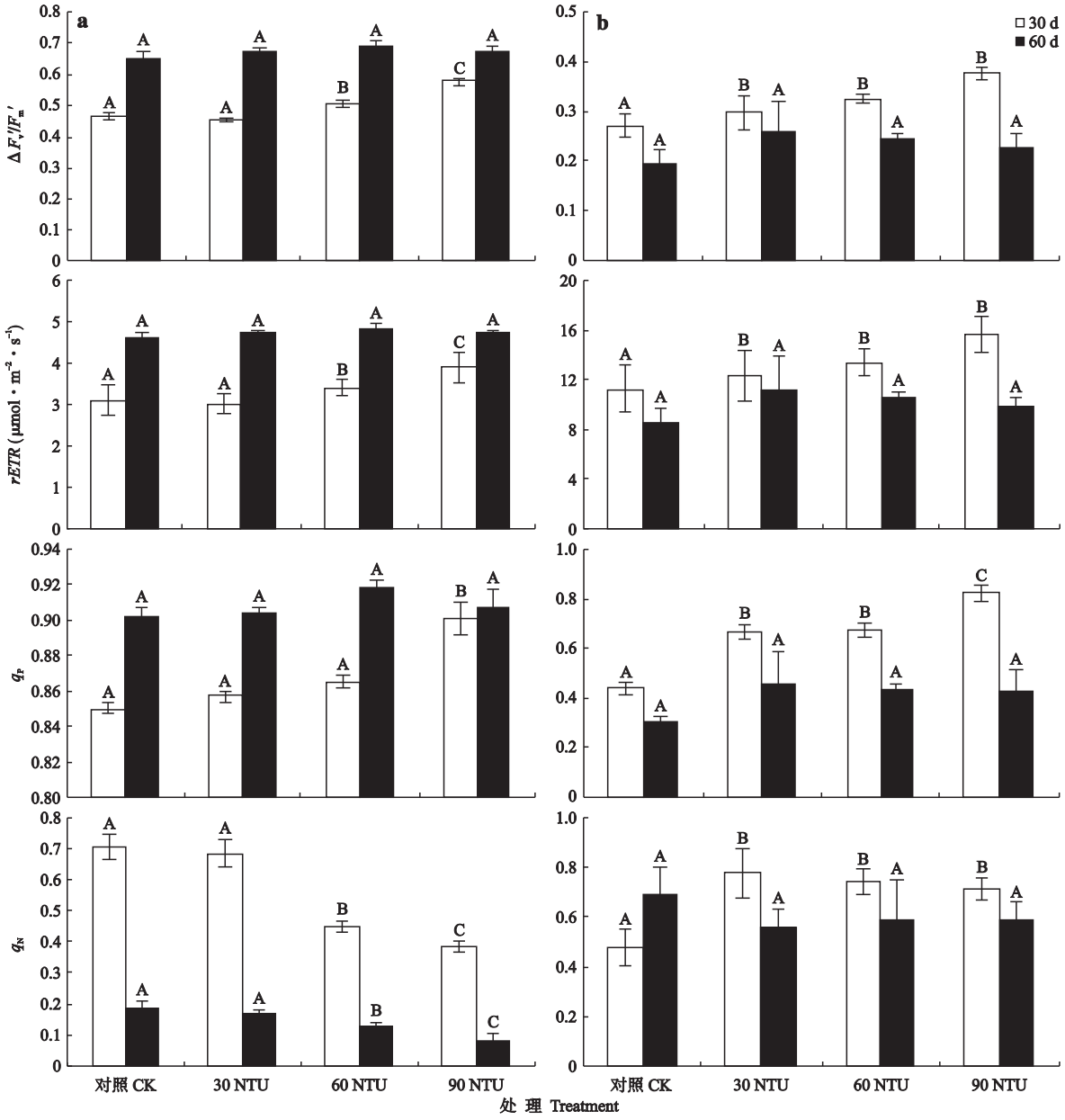

图 3 第 30 天和第 60 天时不同光化光下黑藻叶片的 $\Delta F_v'/F_m'$、rETR、q_P 和 q_N 值

Fig. 3 $\Delta F_v'/F_m'$, rETR, q_P and q_N values of *Hydrilla verticillata* leaves in different actinic irradiance on the 30th day and the 60th day (mean ± SD, $n = 3$).

a) 17 μmol · m^{-2} · s^{-1} PPED; b) 104 μmol · m^{-2} · s^{-1} PPED.

水体中浊度对黑藻叶片的原初光化学效率无显著影响.

2.4　黑藻叶片光化学荧光参数的变化

2.4.1 叶片 $\triangle F_v'/F_m'$　$\triangle F_v'/F_m'$ 表示在照光下 PSⅡ的实际光化学效率，反映吸收的光子供给 PSⅡ反应中心的效率[17]. 由图 3 可知，在 17 μmol·m^{-2}·s^{-1}光化光照射下，随着水体浊度的增加，$\triangle F_v'/F_m'$ 呈显著增大趋势；第 60 天时各试验组植株叶片的 $\triangle F_v'/F_m'$ 显著增大，且各浊度组植株叶片的 $\triangle F_v'/F_m'$ 与对照组的差异不显著. 在 104 μmol·m^{-2}·s^{-1}光化光照射下，随着水体浊度的增加，第 30 天植株的 $\triangle F_v'/F_m'$ 呈显著增大趋势；但第 60 天时各试验组的 $\triangle F_v'/F_m'$ 均显著降低，而各试验组间的 $\triangle F_v'/F_m'$ 无显著差异. 表明随着试验时间的增加，在较强光照射下植株吸收光子供给 PSⅡ反应中心的效率显著降低.

2.4.2 叶片 *rETR*　*rETR* 是反映实际光强下的表观电子传递效率[16]，可用于度量光化学反应导致碳固定的电子传递情况[18]. 由图 3 可知，电子传递速率与 $\triangle F_v'/F_m'$ 的变化趋势一致，随着试验时间的延长，在低光照射下植株叶片的 *rETR* 显著增加，而在较高光照射下 *rETR* 却显著降低.

2.4.3 叶片 q_P　q_P 是 PSⅡ天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额[19]. 由图 3 可知，在 17 μmol·m^{-2}·s^{-1}光化光照射下，随着水体浊度的增加，第 30 天植株的 q_P 值呈增大趋势，第 60 天时各浊度组的 q_P 值显著增大. 在 104 μmol·m^{-2}·s^{-1}光化光照射下，随着水体浊度的增加，第 30 天时 q_P 值呈增加趋势，但第 60 天时各试验组的 q_P 值极显著降低（$P<0.01$）. 表明随着试验时间的增加，在较强光照射下植株吸收的能量参与电子传递的份额显著降低.

2.4.4 叶片 q_N　q_N 反映的是天线色素吸收的光能不能用于电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分，而热耗散是植物保护 PSⅡ的重要机制[20]. 由图 3 可知，在 17 μmol·m^{-2}·s^{-1}光化光照射下，随着水体浊度的增加，q_N 值呈显著降低趋势；且第 60 天时各试验组的 q_N 值极显著低于 30 d 时的 q_N 值（$P<0.01$）. 表明叶片将吸收的能量更多地用于光化学反应，热耗散量减小. 在 104 μmol·m^{-2}·s^{-1}光化光照射下，随着水体浊度的增加，第 30 天时 q_N 呈降低趋势；在第 60 天时，q_N 显著降低，因为此时 q_P 也显著降低，表明随着黑藻植株在悬浮泥沙水体中生长时间的延长，叶片在较高光强下的耗热能力显著降低.

3　讨　　论

3.1　水体悬浮泥沙对黑藻幼苗生长发育的影响

悬浮泥沙水体透明度低、水下光照弱，不利于沉水植被的生长[21]. 在浑浊的泥沙水体中，黑藻幼苗的生长发育主要受到低光影响. 黑藻具有较低的光补偿点、光饱和点[22]和 CO_2 补偿点[21]，在较低的光强下，其可获得 $rETR_{max}$[23]. 本研究表明，第 30 天时高浊度（90 NTU）组黑藻叶片的光合作用能力显著大于其余各组；与 30 NTU 组和 60 NTU 组植株相比，在 17 和 104 μmol·m^{-2}·s^{-1}光化光照射下，90 NTU组叶片能将吸收的光子更有效地供给 PSⅡ反应中心，以热形式耗散掉的能量较少，能量更多地用于光化学反应，光化学效率较大，且电子传递速率也显著增大. 表明在低光条件下，90 NTU 组植株的光合能力较大，为植株分枝长和分枝数的增加提供了所需的物质和能量，有利于植株逃避不利的低光环境.

黑藻具有耐高温、低光照和喜钙等特性[24]. 在低光逆境下，黑藻幼苗主要通过分枝长和分枝数的增加来获得有利光照和扩大生境. 在高浊度、低光照的逆境条件下，黑藻植株分枝长和分枝数在 40 d 内的变化体现出其对这种环境的适应策略. 低光逆境促进了植株分枝的显著增长，特别是植株最长分枝优先得到了增长（表 2），有利于植株迅速获得有利的光照环境；其次，低光逆境抑制了植株新的分枝形成，有利于植株将光合作用合成的物质主要用于原有植株分枝长度的增加；而且植株新形成的分枝多为匍匐茎上形成的克隆新枝，有利于植株逃避不利环境对其生长的影响.

3.2　悬浮泥沙水体中水面光照对黑藻生长发育的影响

光能被天线色素捕获后，主要有 3 种相互竞争的出路：光化学电子传递、叶绿素荧光发射和热耗散. 由于叶绿素荧光发射只消耗捕获光能的很少一部分，能量主要通过光化学电子传递和热耗散途径消耗掉[25]. 植株生长接近水面时，叶片接收的光照强度增大，进而导致植株接收的光子数量迅速增大，如果叶片吸收的光能过多，不能完全被光化学电子传递和热耗散掉，过剩的能量会导致叶片光合结构受到伤害[26]. 在高光（104 μmol·m^{-2}·s^{-1}）照射下，第 60 天时各浊度组植株的 $\triangle F_v'/F_m'$、q_P、*rETR* 和 q_N 比第 30 天时显著降低，光化学电子传递和热

耗散能力均显著降低,表明植株受到了一定程度的光伤害. 因而,夏季水面较高的光照条件对于黑藻植株是一种逆境.

黑藻植株分枝、叶/茎值的变化体现出其对高光逆境的适应策略. 首先,高光促进了植株新分枝的形成,其形成部位主要在植株上部,从而有效地降低了植株上部叶片接收到的光照强度,减轻了对叶片造成的光伤害. 其次,光合产物更多地用于叶片的形成和发育(特别是植株上部叶片),各浊度组植株的叶/茎值 > 1,叶质量占植株总质量的 60% 以上(表 3),一方面有利于增加植株上部冠层的郁闭度,降低强光对叶片的伤害;另一方面可以合成更多的光合产物,用于分枝和叶片的形成与生长发育. 从而在近水面处形成郁闭度较高的冠层.

Van 等[27]研究发现,黑藻能够把生物量的 95% 分配给光合作用组织,在近水面处形成茂密的冠层[28]. 冠层是进行光合作用的主要部位,其形成有利于黑藻光合作用的进行[28]. 本研究结果表明,在低光(1 号光)照射下,第 60 天时植株的 $\triangle F_v'/F_m'$、q_P 和 *rETR* 比第 30 天时显著增加,叶片吸收的光能更多地参与了光化学反应,合成了更多的光合产物. 同时,叶片光合作用的增大又有利于植株冠层的形成,为植株提供更多的物质和能量用于分枝、叶片的形成与发育.

3.3 悬浮泥沙水体中黑藻幼苗的引种

对苦草幼苗[29]和成株[30]的研究表明,不同发育阶段的沉水植物对悬浮泥沙水体的耐受能力是不一样的,与幼苗相比,成株能够生长于更深的浑浊水体中,这与其主要的光合器官——叶片能够获得更多的光照有关. 黑藻具细长、柔嫩的直立茎. 研究表明,在低光条件下其幼苗可通过分枝的快速生长获得有利的光照环境,因而在浑浊的泥沙水体中可引种黑藻幼苗. 黑藻植株生长接近水面时,易发生光抑制,植株分枝的增长被显著抑制. 因而,在黑藻生长期间,可以通过水深的适当调节,避免植株上部叶片发生光抑制,从而促进植株茎的发育,实现植株在较深水体中的生长、恢复. 当然,黑藻植株引种于泥沙水体后,要形成群落和实现自然演替尚存在许多问题需要解决,特别是泥沙附着对其营养繁殖体(冬芽和夏芽)形成、萌发的影响机制问题.

参考文献

[1] Korschgen CE, Green WL, Kenow KP. Effects of irradiance on growth and inter bud production by *Vallisneria americana* and consequences to its abundance and distribution. *Aquatic Botany*, 1997, **58**: 1-9

[2] Sabine K, Andreas N. Allelopathic growth inhibition of selected phytoplankton species by submerged macrophytes. *Journal of Phycology*, 2002, **38**: 862-871

[3] Morin JO, Kimball KD. Relationship of macrophyte-mediated changes in the water column to periphyton composition and abundance. *Freshwater Biology*, 1983, **13**: 403-414

[4] Squires MM, Lesack LFW. Spatial and temporal patterns of light attenuation among lakes of the Mackenzie Delta. *Freshwater Biology*, 2003, **48**: 1-20

[5] Li Q (李 强), Wang G-X (王国祥), Pan G-Q (潘国权), *et al*. Influence of water turbidity on germination of *Potamogeton crispus* and growth of germinated seedling. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26** (11): 3594-3601 (in Chinese)

[6] Han M-S (韩茂森). Freshwater Biology. Beijing: Higher Education Press, 1992 (in Chinese)

[7] Shao L (邵 留), Shen A-L (沈盎绿), Luo Y-P (罗亚平). Influence of several ecological factors on reproduction of *Hydrilla verticillata* branch. *Reservoir Fisheries* (水利渔业), 2003, **23**(6): 16-18 (in Chinese)

[8] Xu Q-J (许秋瑾), Jin X-C (金相灿), Wang X-M (王兴民), *et al*. Effects of different concentration ammonium-N on *Hydrilla verticillata* antioxidant enzymes under Cd stress. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(2): 420-424 (in Chinese)

[9] Cao Y (曹 昀), Wang G-X (王国祥). Removing suspended sediment with aquatic marcrophytes. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2007, **16**(3): 340-344 (in Chinese)

[10] Ralph PJ, Gademann R. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity. *Aquatic Botany*, 2005, **82**: 222-237

[11] Smith JE, Smith CM, Vroom PS, *et al*. Nutrient and growth dynamics of *Halimeda tuna* on Conch Reef, Florida Keys: Possible influence of internal tides on nutrient status and physiology. *Limnology and Oceanography*, 2004, **49**: 1923-1936

[12] Wen M (文 明), Sheng Z (盛 哲), Lin Q-Z (林亲众). Study of *Hydrilla verticillata* Royle as protein resource. Ⅰ. Analysis of the biological characters and nutrition elements of *Hydrilla verticillata* Royle. *Journal of Hunan Agricultural University* (湖南农业大学学报), 1994, **20**(5): 457-463 (in Chinese)

[13] Tang Z-M (唐兆民), He Z-G (何志刚), Han Y-M (韩玉梅). The measurement on suspended sediment concentration. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* (中山大学学报·自然科学版), 2003, **42** (suppl. 2): 244-247 (in Chinese)

[14] Ralph PJ, Gademann R, Dennison WC. *In situ* seagrass photosynthesis measured using a submersible, pulse-amplitude modulated fluorometer. *Marine Biology*, 1998, **132**: 367-373

[15] Schreiber U, Gademann R, Ralph PJ, *et al*. Assess-

ment of photosynthetic performance of *Prochloron* in *Lissoclinum patella* in hospite by chlorophyll fluorescence measurements. *Plant and Cell Physiology*, 1997, **38**: 945-951

[16] Zhang S-R (张守仁). A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), 1999, **16**(4): 444-448 (in Chinese)

[17] Bilger W, Björkman O. Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis*. *Photosynthesis Research*, 1990, **25**: 173-185

[18] Wen M (文　明), Sheng Z (盛　哲), Lin Q-Z (林亲众). A study on new protein plant-*Hydrilla verticillata* Royle. Ⅱ. Study on the quality of ecology and the experiment of introduction and cultivaction of this plant. *Journal of Hunan Agricultural University* (湖南农业大学学报), 1995, **21**(1): 10-16 (in Chinese)

[19] Genty B, Briantais JM, Baker NR. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochemica et Biophysica Acta*, 1989, **990**: 87-92

[21] Ögern E. Prediction of photoinhibition of photosynthesis from measurements of fluorescence quenching components. *Planta*, 1991, **184**: 538-544

[22] Schreiber U, Bilger W, Neubauer C. Chlorophyll fluorescence as a nonintrusive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis// Schulze ED, Caldwell MM, eds. Ecophysiology of Photosynthesis. Berlin: Springer Verlag, 1994: 49-70

[23] Song Y-Z (宋玉芝), Cai W (蔡　炜), Qin B-Q (秦伯强). Photosynthetic fluorescence characteristics of floating-leaved and submersed macrophytes commonly found in Taihu Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(3): 569-573 (in Chinese)

[24] Tan F (谈　锋), Diao Z-S (刁正俗). The photosynthetic characteristics and the effective factors in *Hydrilla verticilla* Casp. *Journal of Southwest China Normal University* (Natural Science) (西南师范大学学报·自然科学版), 1992, **17**(3): 101-104 (in Chinese)

[25] Van TK, Haller WT, Bowes G. Comparison of the photosynthetic characteristics of three submersed aquatic plants. *Plant Physiology*, 1976, **58**: 761-768

[26] Hanelt D, Huppertz K, Nultsch W. Daily course of photosynthesis and photoinhibition in marine macroalgae investigated in the laboratory and field. *Marine Ecology Progress Series*, 1993, **97**: 31-37

[27] Van TK, Wheeler GS, Center TD. Competition between *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria americana* as influenced by soil fertility. *Aquatic Botany*, 1999, **62**: 225-233

[28] Hofstra DE, Clayton J, Green JD, *et al*. Competitive performance of *Hydrilla verticillata* in New Zealand. *Aquatic Botany*, 1999, **63**: 305-324

[29] Wang W-L (王文林), Wang G-X (王国祥), Li Q (李　强), *et al*. Influence of suspended substance on growth of the seedlings of *Vallisneria asiatica* Miki L. *Hydrobiologica Sinica* (水生生物学报), 2007, **31**(4): 420-424 (in Chinese)

[30] Xu Y (徐　瑶), Wang G-X (王国祥), Li Q (李强). The influences of suspended sands on photosynthetic fluorescence characteristics of *Vallisneria natans* in turbidity waters. *Journal of wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), 2007, **25**(1): 70-74 (in Chinese)

作者简介　李　强，男，1973 年生，博士，副教授. 主要从事水环境生态修复研究，发表论文 12 篇. E-mail: lq1973_2002@163.com

责任编辑　李凤琴