

水体泥沙对黑藻幼苗生长发育的影响

李 强^{1,2,*}, 王国祥^{2,3}

(1. 重庆文理学院化学与环境工程学院, 重庆永川 402160; 2. 江苏省环境演变及生态建设重点实验室, 南京 210097;
3. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097)

摘要:用粒径小于 100 μm 的泥沙分别配置浊度为 30、60NTU 和 90NTU 的浑浊水体, 将黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 幼苗分别种植于上述水体中, 水深约 60cm, 定期统计植株的节间距、株高、分枝数、叶宽、叶长、鲜重和泥沙附着量, 利用水下饱和脉冲荧光仪 (DIVING-PAM) 测定叶片的 F_v/F_m , 并测定附着泥沙叶片和未附着叶片快速光响应曲线。结果表明, 前 40d 随着水体浊度的增加黑藻植株的节间距、株高呈显著的增加趋势, 而分枝数和生物量增长速率呈显著降低趋势。植株生长接近水面后接受的光照强度增加, 第 60 天时株高和叶宽增长受到显著抑制, 但植株上层的分枝受到促进, 生物量显著增加。同时, 随着水体浊度的增加植株上的泥沙附着显著增加, 第 100 天时 30、60NTU 和 90NTU 水体中植株的叶宽分别比对照宽 71.4%、57.1%、48.6%, 叶长分别为对照的 113.0%、85.5% 和 75.1%, 差异极显著 ($P < 0.01$); 在高浊度 (60NTU 和 90NTU) 水体中, 水体下部生物量显著降低, 冠层叶片的 F_v/F_m 分别仅降低了 5.5% ($P < 0.05$)、2.9% ($P > 0.05$), $rETR_{\text{max}}$ 分别降低了 2.0% ($P > 0.05$)、16.8% ($P < 0.01$)。表明在水深较浅的泥沙水体中可以适当引种黑藻幼苗, 植株可以正常生长发育。

关键词:泥沙; 黑藻; 幼苗; 生长发育

Influence of silts on growth and development of *Hydrilla verticillata*'s seedling in silt waters

LI Qiang^{1,2,*}, WANG Guoxiang^{2,3}

1 College of Chemistry and Environment engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, 402160, China

2 Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China

3 College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China

Abstract: Seedlings of *Hydrilla verticillata* (SHV) were planted in the waters with turbidity of 30NTU, 60NTU or 90NTU. The turbidity of the water was controlled by sand particles smaller than 100 μm , and the effect of water turbidity on the growth (such as internode length, stem height, branch number, leaf width, leaf length, fresh weight and sediment adhesion) of SHV was examined. The photosynthetic fluorescence characteristics of the leaves were determined *in situ* by a developed, submersible, pulse-amplitude modulated (PAM) fluorometer (diving-PAM). The rapid light responding curves of the leaves were also determined. The experimental results indicated that internode length and the stem height of SHV increased significantly, whereas branch number and growing rate of biomass decreased remarkably as the water turbidity increased after planted in turbid water for 40 days. When the plants grow to water surface, the light intensity is increasing. The plants development were restricted on the 60th day. But the growth of upper branch was promoted, and biomass of *H. verticillata* was enhanced remarkably. At the same time the silts amount attached on *H. verticillata* observably were added with water turbidity increasing. Compared with plants in the control water, the leaf width of *H. verticillata* leaves were wider 71.4% ($P < 0.01$), 57.1% ($P < 0.01$) and 48.6% ($P < 0.01$) with turbidity of 30 NTU, 60NTU or 90NTU respectively on 100th day, and their leaf length were 113.0% ($P < 0.01$), 85.5% ($P < 0.01$) and 75.1% ($P < 0.01$) of

基金项目:国家教育部科技创新工程重大资助项目(705824-2); 重庆市教育委员会科学技术研究资助项目(KJ081206); 江苏省环境演变及生态建设重点实验室开放课题资助项目(JSKLEC200801); 重庆文理学院科研重点资助项目(Z2007HH10)

收稿日期:2008-12-23; 修订日期:2009-03-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lq1973_2002@163.com

the control leaves, respectively. The plant biomass under the high silts turbid water decreased significantly. F_v/F_m of Canopy leaves in the turbid waters with turbidities of 60NTU and 90NTU only reduced 5.5% ($P < 0.05$) and 2.9% ($P > 0.05$), and their $rETR_{max}$ only reduced 2.0% ($P > 0.05$) and 16.8% ($P < 0.01$). It was shown that SHV can grow and develop normally when they are introduced into shallow silt water.

Key Words: silt; *Hydrilla verticillata*; seedlings; growth

大型水生植物对生态系统物质循环起着重要的调节作用,是建立良好的湖泊生态的基础^[1],是湖泊生态系统的必要组成部分,对湖泊生态修复起着重要作用^[2]。在水生植被的修复中,沉水植物的重建和修复较挺水和浮水植物难^[3]。水体中的各种悬浮颗粒物直接影响光照在水体中的垂直分布,并附着于沉水植物叶片后增加了其细胞外扩散层厚度而降低溶解无机碳的供应^[4],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,其对沉水植物的影响已有较多研究^[5-7];后者出现在一些通江湖泊及河流中,其对沉水植物的影响研究较少^[8-11]。黑藻(*Hydrilla verticillata*)是一种多年生的沉水植物,是水生生态系统恢复、重建过程中首选的几种植物之一。其生长发育和繁殖过程中受到光照、温度、pH、营养盐、基质、鱼类放养、着生藻类等环境因子的多重作用,对其研究主要集中在群落调查和富营养藻型水体中的恢复研究,而对于其在浑浊泥沙水体中的恢复研究很少。本文将黑藻幼苗种植于不同泥沙含量的水体中,统计植株的生长状况,并使用水下饱和脉冲调制荧光仪原位测定植株叶片的荧光参数,研究水体泥沙悬浮对黑藻生长和叶片光合荧光特性的影响,为黑藻在浑浊水体中的恢复、重建提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

黑藻(*Hydrilla verticillata*)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]。本文选择发育程度相似的黑藻冬芽 10 枚种植于小盆中,盆高 8cm,直径 15cm,装满泥土,土中 TN、TP(以 P_2O_5 表示)分别为 0.194、0.514 mg/g, Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 分别为 22.062、55.917、12.034、34.892 $\mu\text{g/g}$ 和 2.808 $\mu\text{g/g}$ 。自然光照下培养,实验开始时黑藻幼苗高为 (10.4 ± 3.6) cm。

1.2 浑浊泥沙水体的制备

实验泥沙采自长江镇江段(119.4513E, 32.2324 N),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,选上层悬浮液作为实验用的浑浊泥沙水体。

1.3 悬浮泥沙含量的测定

浊度计测量水体泥沙浓度是一种行之有效的方法,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-悬浮泥沙线性回归关系^[12]: $Y = -0.0017X^2 + 1.8305X$ ($R^2 = 0.982, n = 18$)。根据定时监测的水体浊度计算悬浮泥沙含量,也依据浊度调配悬浮泥沙的浓度。

1.4 实验体系的构建

实验体系由浑水发生池(0.5m × 0.8m × 0.5m)、植物实验系统(Ø0.52m × 0.7m)和管道组成,浑水发生池的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、60NTU 和 90NTU,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。

1.5 实验设计

浑浊泥沙水体中黑藻幼苗的生长发育:实验从 5 月 31 日开始,前 40d 植株无明显的泥沙附着,每隔 20d (前 60d)分别统计株高、叶宽和分枝数,各浊度组分别选择 3 个分枝,标记,统计茎节数和节间距,并且各盆随机选择 1 株植株称其鲜重,取平均值,采用 SPSS 软件进行差异显著性分析。

泥沙附着对黑藻叶片发育和光合荧光特性的影响:于 7 月 5 日发现泥沙开始明显附着于植株。黑藻植株

叶片轮生,各浊度水体随机选择 3 株植株,在近水面处选择邻近的两轮叶片为实验叶片,每天用软毛刷将其中一轮叶片上附着的泥沙刷掉,作为对照叶片,而另一轮叶片作为附着叶片。分别于第 15 天、第 40 天和第 100 天时测定叶片的 F_v/F_m 值,并于实验结束时测定叶片的快速光响应曲线,以及统计各浊度水体植株的叶宽、叶长、植株鲜重、茎重和叶重。

1.6 植株泥沙附着量的测定

实验第 60 天和第 100 天时各浊度组水体分别选择 3 株植株用软毛刷将泥沙轻轻刷下,烘干、称重;采用称重法测定泥沙重量和植株鲜重,计算泥沙附着量(mg 泥沙/g 植株鲜重) = 泥沙重量/植株鲜重。

1.7 叶片 F_v/F_m 和快速光响应曲线的测定

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 07:00—08:00 间进行测定。叶片暗适应 15min 后,测定 F_o 和 F_m ,然后选用起始光化光为 1,分别测定附着泥沙叶片和未附着叶片的快速光响应曲线^[13],取平均值作比较,并作差异显著度分析。

$$\text{最大光化学量子产量} \quad (F_v/F_m) = (F_m - F_o) / F_m$$

2 结果

2.1 浑浊泥沙水体中黑藻幼苗的生长发育

(1) 黑藻幼苗株高的变化

由表 1 可知,在对照水体中由于水下光照强度大,黑藻的株高在第 20 天后即受到显著的抑制;而在 30、60NTU 和 90NTU 水体中植株株高增长较快,随水体浊度的增加植株株高呈显著的增长趋势。但是,当植株生长接近水面时,在高浊度水体中植株株高的生长受到显著抑制;与第 40 天时相较,在 30、60NTU 和 90NTU 水体中第 60 天时植株株高分别增长了 24.2% ($P < 0.01$)、15.3% ($P < 0.01$) 和 5.9% ($P < 0.05$)。

(2) 黑藻幼苗分枝数的变化

由表 1 可知,随着水体浊度的增加植株的分枝数呈显著的降低趋势。在第 20 天和 40d 时 30、60NTU 和 90NTU 水体中的分枝数分别比起始时增加了 119.1%、37.0%、20.0% 和 185.7%、51.9%、40.0%,差异达极显著水平($P < 0.01$)。而当植株逐渐到达水面,光照强度和水温的增加促进了植株分枝数迅速增加;第 60 天时 30、60NTU 和 90NTU 水体中的分枝数比 40d 时分别增加了 93.3% ($P < 0.01$)、68.3% ($P < 0.01$) 和 134.3% ($P < 0.01$)。

(3) 黑藻幼苗茎节数和节间距的变化

由图 1 左图可知,随着水体浊度的增加植株的茎节数呈降低趋势;与对照相较,在 30、60NTU 和 90NTU 水体中茎节数分别减少了 3.7% ($P > 0.05$)、14.8% ($P < 0.01$) 和 11.1% ($P < 0.01$)。由图 1 右图可知,第 40 天时各水体的茎节数无显著增加,表明植株茎节数的增加主要发生在实验前 20d。

由图 1 还可知,在混浊水体中植株节间距显著大于对照水体,且随着水体浊度增加节间距呈显著的增加趋势。实验前 20d,在高浊度(60NTU 和 90NTU)水体中茎中部和下部节间距显著大于对照和 30NTU 水体,茎第 2 节至第 20 节的节间距之和分别为对照的 2.06 倍和 2.38 倍,最大节间距分别为对照的 1.81 倍和 2.22 倍,差异极显著($P < 0.01$)。第 40 天时,各浊度水体植株的节间距均发生了显著的变化,随着水体浊度的增加节间距增大的部位呈上升趋势;在 30NTU 水体中植株各节间距均呈增大趋势,在 60NTU 水体中节间距主要增加的部位是中部以上(包括中部),而在 90NTU 水体中节间距的增加部位为中上部。

(4) 黑藻幼苗叶宽的变化

由表 1 可知,在对照水体中黑藻叶宽受到显著的抑制;而在 30、60NTU 和 90NTU 水体中前 40d 植株叶宽增长显著快于对照。随后,叶宽的增长速率显著降低,低于对照;与 40d 时相较,在对照、30NTU、60NTU 和 90NTU 水体中 60d 时的叶宽分别增加了 36.4% ($P < 0.01$)、16.7% ($P < 0.01$)、16.7% ($P < 0.01$) 和 6.1% ($P < 0.05$)。

(5) 黑藻幼苗生物量的变化

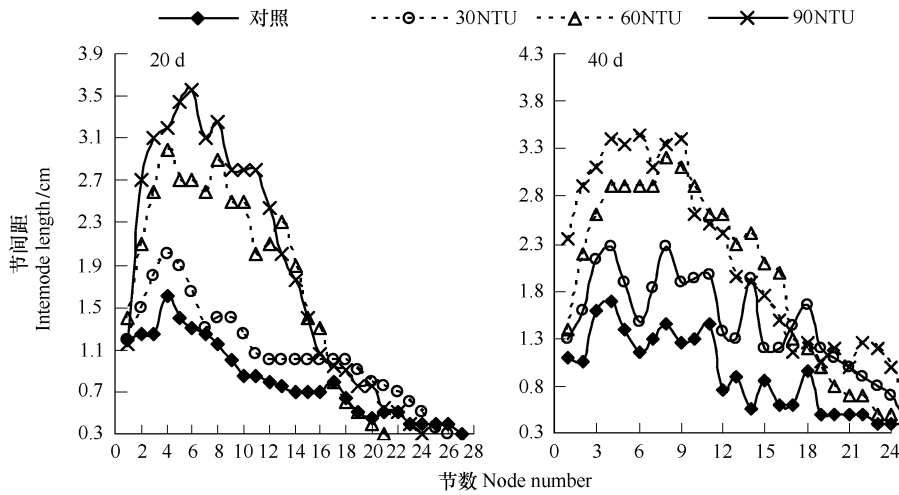


图1 第20天和第40天时不同水体中黑藻的节间距和节数

Fig. 1 Internode length and node number of *H. verticillata* in different waters on the 20th day and 40th day

由表1还可知,在浑浊泥沙水体中黑藻生物量的增加速率快于对照。前20d植株的生物量增加迅速,在对照、30、60NTU和90NTU水体中植株生物量分别增加了1.0、2.9、3.2倍和2.3倍;到第40天时增加率分别下降到了15.9%、98.6%、81.3%和64.8%,差异达极显著水平($P < 0.01$);而到60d时,对照的生物量显著增加,增加率达到84.4% ($P < 0.01$),在30、60NTU和90NTU水体中生物量的增加率虽呈降低趋势,但仍较大,分别为68.7% ($P < 0.01$)、73.8% ($P < 0.01$)和56.4% ($P < 0.01$),30NTU和60NTU水体中植物生物量的增加率显著大于90NTU水体中的植株。

表1 不同水体中黑藻的生物统计

Table 1 Biological statistics of *H. verticillata* in different waters

项目 Item	实验时间 experimental time/d	对照 Control	30NTU	60NTU	90NTU
株高 Stem height/cm	0	12.7 ± 4.7	11.1 ± 4.9	10.7 ± 3.1	11.5 ± 4.0
	20	22.7 ± 5.9	27.8 ± 5.3	31.4 ± 6.4	36.6 ± 13.2
	40	23.2 ± 6.3	40.4 ± 5.8	46.2 ± 7.3	52.0 ± 12.5
	60	26.2 ± 5.5	50.2 ± 7.5	53.2 ± 6.6	55.1 ± 13.9
分枝数 Branch number/cm	0	31 ± 1	21 ± 2	27 ± 1	25 ± 3
	20	41 ± 2	46 ± 1	37 ± 2	30 ± 1
	40	54 ± 2	60 ± 2	41 ± 3	35 ± 2
	60	134 ± 3	116 ± 4	69 ± 6	82 ± 2
叶宽 Leaf width/cm	0	0.20 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.20 ± 0.01	0.21 ± 0.02
	40	0.22 ± 0.03	0.30 ± 0.00	0.30 ± 0.00	0.33 ± 0.06
	60	0.30 ± 0.06	0.35 ± 0.06	0.35 ± 0.05	0.35 ± 0.07
	100	0.35 ± 0.03	0.6 ± 0.04	0.55 ± 0.03	0.52 ± 0.05
叶长 Lef lenth/cm	100	1.93 ± 0.31	2.18 ± 0.25	1.65 ± 0.30	1.45 ± 0.30
鲜重(g/盆) Fresh weight (g/ pot)	0	7.4 ± 0.3	5.9 ± 0.2	5.7 ± 0.3	7.5 ± 0.4
	20	15.1 ± 0.6	23.1 ± 0.7	23.9 ± 0.6	24.8 ± 0.5
	40	17.5 ± 0.5	45.8 ± 1.2	43.3 ± 1.5	41.0 ± 1.3
	60	32.3 ± 0.8	77.2 ± 2.2	75.2 ± 2.8	64.0 ± 1.9
鲜重(g/盆) Fresh weight (g/ pot)		36.7 ± 1.2	87.1 ± 2.4	48.4 ± 2.1	42.2 ± 1.8
茎鲜重(g/盆) fresh weight of stem (g/ pot)	100	14.4 ± 0.7	31.2 ± 1.7	17.3 ± 0.8	16.4 ± 0.6
叶鲜重(g/盆) fresh weight of leaf (g/ pot)		22.3 ± 1.3	55.9 ± 2.3	31.1 ± 1.4	25.8 ± 1.3

2.2 泥沙附着对黑藻叶片发育和光合荧光特性的影响

(1) 泥沙附着量的变化

实验期间黑藻植株上的泥沙附着量变化如表 2 所示。随着实验天数的增加,泥沙含量呈增加趋势;且随着水体浊度的增加,植株泥沙附着量呈显著的增加趋势。

表 2 实验期间植株附着泥沙的干重

Table 2 Dry weight of attached silts of plants during the experiment

项目 Item	实验时间/d experimental time	30NTU	60NTU	90NTU
泥沙附着量(鲜重)/(mg/g)	60d	77.2 ± 5.8	161.6 ± 11.2	186.0 ± 14.5
Weight of attached silts(fresh weight)/(mg/g)	100d	97.1 ± 9.9	626.5 ± 22.3	1402.8 ± 31.3

(2) 泥沙附着对黑藻叶片叶宽、叶长的影响

由表 1 可知,泥沙明显附着 60d 后,即第 100 天时在水体中植株的叶宽均显著高于对照,且随着水体浊度的增加叶宽呈降低趋势;第 100 天时 30、60NTU 和 90NTU 水体中植株叶片的叶宽分别比对照宽 71.4%、57.1% 和 48.6%,差异极显著($P < 0.01$)。

除 30NTU 组外,其余浊度组的叶长均显著低于对照,且随着水体浊度的增加植株叶长呈显著的降低趋势。第 100 天时 30、60NTU 和 90NTU 水体中植株叶片的叶长分别为对照的 113.0%、85.5% 和 75.1%,差异极显著($P < 0.01$)。

(3) 泥沙附着对黑藻生物量、叶重、茎重的影响

由表 1 可知,除 30NTU 水体外,第 100 天时 60NTU 和 90NTU 浊度组植株的生物量呈显著降低趋势,分别比第 60 天时低 35.6% 和 34.1%,差异极显著($P < 0.01$),主要是由于水体下部分枝枯萎。在 30、60NTU 和 90NTU 水体中 100d 时茎/叶比分别为 55.8%、55.6% 和 63.6%,差异极显著($P < 0.01$),表明在各实验水体中叶重约为地上部分生物量的 2/3,叶片是植株地上的主要部分。

(4) 泥沙附着对黑藻叶片 F_v/F_m 的影响

由图 2 可知,实验第 15 天时对照植株叶片的 F_v/F_m 值显著低于浑浊水体中的植株,表明对照水体中较高的光强不利于黑藻幼苗叶片光合结构的发育。在泥沙型浑浊水体中随着植株株高的增加,叶片接收光强增大,第 40 天时 F_v/F_m 值呈降低趋势;在 30、60NTU 和 90NTU 水体中,第 40 天时叶片的 F_v/F_m 值分别比第 15 天时降低了 1.3% ($P > 0.05$)、2.3% ($P > 0.05$) 和 7.1% ($P < 0.05$)。与第 40 天时相较,在 30、60NTU 和 90NTU 水体中,第 100 天时叶片的 F_v/F_m 值分别比第 40 天降低了 2.0% ($P > 0.05$)、5.5% ($P < 0.05$) 和 2.9% ($P > 0.05$),表明泥沙附着对黑藻叶片光合结构无显著影响。

(5) 泥沙附着对黑藻叶片光响应曲线的影响

由图 3 可知,黑藻植株的饱和光强很低,仅为 $49 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在低光照条件下即可具有较高的最大相对电子传递速率($rETR_{\text{max}}$),光合作用较大。第 100 天时,在 30、60NTU 和 90NTU 水体中泥沙附着叶片的 $rETR_{\text{max}}$ 分别为未附着叶片的 127.0% ($P < 0.01$)、98.0% ($P > 0.05$)、83.2% ($P < 0.01$);且在 30NTU 水体中未附着叶片的饱和光强显著增加,达 $104 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。表明在低浊度(30NTU)水体中泥沙的少量附着有利于减少水面高光对叶片光合结构的伤害;但在高浊度(90NTU)水体中泥沙大量附着会导致叶片的光合能力

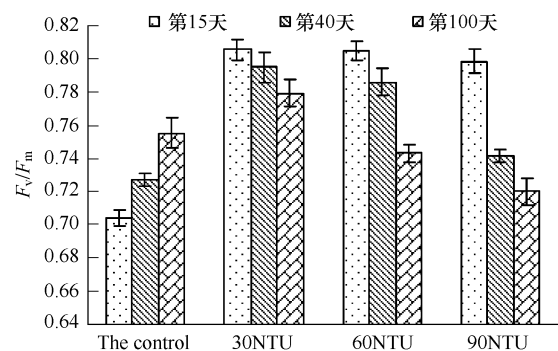


图 2 第 15 天、第 40 天、第 100 天时在不同水体中黑藻叶片的 F_v/F_m 值

Fig. 2 F_v/F_m of *H. verticillata* leaves in different waters on the 15th day, the 40th day and the 100th day

显著降低。

3 讨论

(1) 黑藻幼苗对低光逆境的适应

黑藻具有耐高温和低光照,喜钙等生态学特性^[14],具有较低的光补偿点、光饱和点^[15]和 CO_2 补偿点^[16]。本文研究表明,在生长发育过程中黑藻植株通过株高、节间距、叶宽和分枝数的增加,来实现获得有利光照、增大光合面积和扩大生境的目的。在高浊度、低光照的逆境条件下,黑藻植株株高、叶宽、分枝数在 40d 内的变化体现出其对这种环境的适应策略。首先,在浑浊的泥沙水体中,低光逆境促进了植株节间距增大,植株的株高优先得到了增长,有利于植株迅速获得有利的光照环境;随着实验时间的增加,在高浊度(60NTU 和 90NTU)水体中植株下部节间距的增长幅度减小,随水体浊度增大节间距主要增加的部位出现上移现象,表明植株下部的合成代谢显著降低,主要的光合作用部位上移。其次,在低光逆境条件下黑藻叶片的叶宽也显著受到促进,有利于增大其接受光照的面积。第三,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株高的增加;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的伤害。

(2) 黑藻幼苗对高光逆境的适应

黑藻最适生长温度范围为 28—37℃,在 32℃ 时其分枝生物量、分枝长度及分枝数目表现出显著的增长^[17]。实验第 60 天时,对照组植株的分枝数、生物量显著增加,与水温 and 光强增加对分枝形成的促进作用有关。Van 等研究发现黑藻能够分配约 95% 的生物量在光合作用组织,在近水面处形成茂密的冠层,在阳光的获取上具有较明显的优势^[18]。本文研究表明,当植株生长接近于水面时,植株株高、叶宽生长明显受到抑制,但分枝数显著被促进,形成郁闭的冠层以避免植株受到过量光照的伤害。在高光照的逆境条件下,黑藻植株株高、叶宽、分枝数在第 40 天至第 60 天内的变化体现出其对这种环境的适应策略。首先,植株优先增加了分枝数,特别是在浑浊水体中分枝主要在植株上部形成,这有利于有效的降低水面光照的强度,避免过强光照对植株主要光合部位(上部叶片)的伤害。其次,植株株高增长减缓,不仅有利于将光合作用合成的物质更多的用于形成新的分枝,而且也有效的降低了暴露于水面的植株面积,进一步降低过强光照对植株的光伤害。第三,植株上部叶片的叶宽增长幅度减小,有利于降低叶片接受光照的面积,从而降低高光对叶片光合结构的伤害。

泥沙附着对植株叶片的影响:在低浊度水体中黑藻植株的泥沙附着量少,有利于植株叶片的生长发育和光合能力。在 30NTU 水体中植株叶片的叶长、叶宽和生物量均呈显著增大趋势,且在各实验组中均为最大值;而且少量泥沙附着对叶片光合结构无显著影响, F_v/F_m 值无显著变化,其饱和光强、 $rETR_{\max}$ 均显著增大,光合能力显著大于未附着泥沙叶片。

但在高浊度水体中黑藻植株泥沙附着量大,导致叶宽和叶长的增长幅度减小。虽然植株的生物量显著降低,但是主要是由于位于水体下部的分枝接受的光照强度显著降低,分枝大量衰老、死亡。此外,大量的泥沙附着对植株上部(冠层)叶片的 F_v/F_m 值无显著影响。在 60NTU 水体中附着叶片的饱和光强和 $rETR_{\max}$ 与未附着泥沙叶片无显著差异;虽然在 90NTU 水体中附着叶片的 $rETR_{\max}$ 小于未附着叶片,但对植株叶片光合能力的影响并不大。因而,在高浊度水体中虽然泥沙附着对黑藻植株叶片的形态和光合能力造成了一定程度的影响,但并不影响其正常的生长发育。

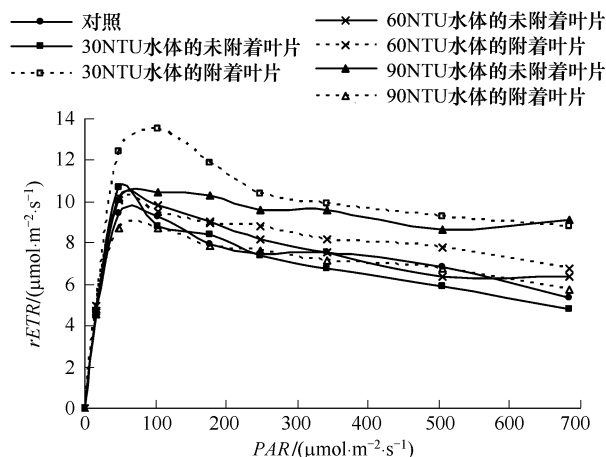


图3 在第 100 天时黑藻的快速光响应曲线

Fig. 3 Rapid light curves of *H. verticillata* leaves on the 100th day

浑浊水体中黑藻幼苗的引种:黑藻具细长、柔嫩的直立茎。研究表明,黑藻叶片的饱和光强很低,在低光条件下其幼苗能通过节间距的快速增长使植株迅速增高,以获得有利的光照环境;但是,在高浊度、低光的逆境中植株下部节间距迅速增加的情况主要发生在前 20d,随后其增幅迅速降低,导致植株株高增加的主要原因是其中部和/或上部节间距的增大。这意味着将黑藻幼苗引种于高浊度、低光的环境,应当保证在 20d 后能获得有利于其植株上部光合作用的光照条件。

自然条件下,黑藻植株一般位于水体的上层。这与黑藻顶端分枝形成的冠层有关,冠层是黑藻生物量最大的部分,也是进行光合作用的主要部位^[19-20],由于其郁蔽程度高,大部分叶片接收的光强低,在强光照条件下该部分叶片的光合作用能正常进行。研究表明,在低浊度的水体中泥沙的附着虽然导致上部冠层分枝数减少,但是更有利于叶片的生长发育和光合作用的进行。在高浊度的水体中泥沙长时间附着对上部冠层叶片的生长发育和光合作用有一定程度的抑制作用,但影响程度较小;泥沙附着对植株的影响主要体现在水体下层的叶片和分枝上,由于大量泥沙附着和上层冠层郁闭导致的光照逆境使得光合作用受阻,代谢功能紊乱,植物体逐渐枯萎,水体下部生物量迅速降低。但值得注意的是,在高浊度泥沙水体中黑藻植株开花后,逐渐进入衰老阶段,大量的泥沙附着会导致植株极易倒伏,加速植株的衰老,这是否会影响其营养繁殖体(冬芽)的形成和萌发,尚需要进一步的研究。当然,也可以通过间隔一定时间降低植株附着泥沙量的管理来避免这种提前倒伏的现象,不过相应的管理方法需得避免泥沙量减少后过强光照对植株光合结构的伤害。

References:

- [1] You W H, Song Y C. Seed germination ecology of three submerged macrophytes in Dianshan Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6 (2):196-200.
- [2] Spence D N H. The zonation of plants in freshwater lakes. *Advances in Ecological Research*, 1982, 12:37-125.
- [3] Barko J W, Adame M S, Clesceri N L. Environmental factors and their consideration in the management of submersed aquatic vegetation: A review. *J. Aquat. Plant Manage*, 1986, 24: 1-10.
- [4] Korschgen C E, Green W L, Kenow K P. Effects of irradiance on growth and winter bud production by *Vallisneria Americana* and consequences to its abundance and distribution. *Aquatic Botany*, 1997, 58: 1-9.
- [5] Sabine K, Andreas N. Allelopathic growth inhibition of selected phytoplankton species by submerged macrophytes. *Journal of Phycology*, 2002, 38: 862-871.
- [6] Joanne O'Neill Morin, Kenneth D. Kimball. Relationship of macrophyte mediated changes in the water column to periphyton composition and abundance. *Fresh-water Biology*, 1983, 13: 403-414.
- [7] Li Q, Wang G X, Ma T, Wang W L, Pan G Q. Changes of photosynthetic characters of *vallisneria asiatica* adhered by *hydrodictyon reticulatum*. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(3): 316-321.
- [8] Margaret M S, Lance F W L. Spatial and temporal patterns of light attenuation among lakes of the mackenzie delta. *Freshwater Biology*, 2003, 48: 1-20.
- [9] 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): 3594-6001.
- [10] Li Q, Wang G X, Wang W L, Ma T, Pan G Q. The influence of suspended sands to *Myriophyllum spicatum* L. 's photosynthetic fluorescence characteristics in turbid waters. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(2): 197-203.
- [11] 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.
- [12] Wen M, Sheng Z, Lin Q Z. Study of *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle as protein resource I. Analysis of the biological characters and nutrition elements of *Hydrilla verticillata* (L. f.) royle. *Journal of Hunan Agricultural College*, 1994, 20(5): 457-463.
- [13] Schreiber U, Gademann R, Ralph P J, Larkum A W D. Assessment of photosynthetic performance of prochloron in *Lissoclinum patella* in hospite by chlorophyll fluorescence measurements. *Plant Cell Physiol*, 1997, 38: 945-951.
- [14] Wen M, Sheng Z, Lin Q Z. A study on new proten plant-hydrilla verticillata (L. f.) royle II. Study o the quality of ecology and the experiment of introduction and cultivaction of this plant. *Journal of Hunan Agricultural College*, 1995, 21(1): 10-16.
- [15] Tan F, Diao Z S. The Photosynthetic characteristics and the effective factors in *Hydrilla verticilla* Casp. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 1992, 3: 101-104.

- [16] Van T K, Haller W T, Bowes G. Comparison of the photosynthetic characteristics of three submersed aquatic plants. *Plant Physiol*, 1976, 58: 761-768.
- [17] Barko J W, Smrt F M. Comparative influences of light and temperature on the growth and metabolism of selected submerged freshwater macrophytes. *Ecology Monograph*, 1981, 51: 219-235.
- [18] Van T K, Wheeler GS, Center T D. Competition between *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria spiralis* influenced by soil fertility. *Aquatic Botany*, 1999, 62, 225-233.
- [19] Hofstra D E, Clayton J, Green J D, Auger M. Competitive performance of *Hydrilla verticillata* in New Zealand. *Aquatic Botany*, 1999, 63, 305-324.
- [20] Su W H, Zhang G F, Zhang Y S, Xiao H, Xia F. The photosynthetic characteristics of five submerged Aquatic Plants. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(42): 391-395.

参考文献:

- [1] 由文辉, 宋永昌. 淀山湖 3 种沉水植物的种子萌发生态. *应用生态学报*, 1995, 6(2): 196-200.
- [7] 李强, 王国祥, 马婷, 王文林, 潘国权. 水网藻附着对亚洲苦草光合特性的影响. *湖泊科学*, 2007, 19(3): 316-321.
- [9] 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.
- [10] 李强, 王国祥, 王文林, 马婷, 潘国权. 悬浮泥沙水体对穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum* L.) 光合荧光特性的影响. *湖泊科学* 2007, 19(2): 197-203.
- [11] 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.
- [12] 文明, 盛哲, 林亲众. 蛋白质新资源黑藻的研究 I. 黑藻生物学特性及营养成分的分析. *湖南农学院学报*, 1994, 20(5): 457-463.
- [14] 文明, 盛哲, 林亲众. 蛋白质新资源植物——黑藻的研究 II. 生态学特性及引种栽培试验. *湖南农学院学报*, 1995, 21(1): 10-16.
- [15] 谈锋, 刁正俗. 黑藻的光合特性及其影响因素. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 1992, 3: 101-104.
- [20] 苏文华, 张光飞, 张云孙, 肖衡, 夏峰. 5 种沉水植物的光合特征. *水生生物学报*. 2004, 28(42): 391-395.