

水体浊度对菹草(*Potamogeton crispus*) 幼苗生长发育的影响

王文林, 王国祥*, 李 强, 潘国权, 马 婷

(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 210097)

摘要:用粒径小于 100 μm 的泥沙配置浊度为 30、60、90、120、150 NTU 和 180 NTU 的混浊水体, 将菹草(*Potamogeton crispus*) 幼苗分别移栽于上述水体中, 观测菹草幼苗在各浊度水体中的生长发育状况, 并用水下饱和脉冲叶绿素荧光仪(DIVING PAM)测定菹草幼苗光合作用 PSII 最大量子产量(F_v/F_m)、有效荧光产量(Yield)、光化学荧光淬灭系数(qP)、非光化学荧光淬灭系数(qN)等指标。结果表明, 菹草幼苗对混浊水体有较强的耐受能力, 在 30、60 NTU 和 90 NTU 的混浊水体中, 水体浊度对菹草幼苗的存活、生长发育及光合结构 PSII 影响不显著($p > 0.05$)。当水体浊度 120 NTU 时, 在短期($< 10\text{d}$)胁迫下, 水体浊度对于菹草幼苗的存活、生长发育无显著影响($p > 0.05$), 但是, 随着胁迫时间的延长($> 10\text{d}$), 菹草幼苗虽能成活但生长发育明显受到抑制, 幼苗叶片受光胁迫时, 能通过增加热耗散(qN)保护其光合结构 PSII 免受伤害; 而更长时间的胁迫(80d), 在高浊度(120、150 NTU 和 180 NTU)水体中的菹草幼苗开始大量死亡, 其 F_v/F_m 、Yield、 qP 值均显著低于对照($p < 0.05$), qN 值的急剧下降, 说明光合结构 PSII 开始受到破坏。

关键词:水体浊度; 菹草幼苗; 生长发育; 叶绿素荧光参数

文章编号: 1000-0933(2006)11-3586-08 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Influence of water turbidity on growth of the seedlings of *Potamogeton crispus*

WANG Wei-Lin, WANG Guo-Xiang*, LI Qiang, PAN Guo-Quan, MA Ting (Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3586 ~ 3593.

Abstract: Submerged macrophytes are known as key communities in shallow lake ecosystem. It plays important role in water environmental quality and aquatic ecosystem structure. However, several factors such as contamination, soil erosion cause water turbidity in many shallow lake, and underwater light become largely insufficient, finally result in the death of submerged macrophytes. Therefore, researches about influence of water turbidity on growth of submerged macrophytes can offer an academic method and measurement for ecological restoration of water environment. *Potamogeton crispus* is a perennial submerged macrophytes usually found in freshwater lakes, ponds and canals. In this study, the seedlings of *Potamogeton crispus* were transplanted into the waters with different turbidities of 30, 60, 90, 120, 150 NTU and 180 NTU (Nephelometric Turbidity Units) made by suspended substance with less than 100 microns in diameter. The growth of the seedlings of *Potamogeton crispus* in each treatment were investigated. Meanwhile, Photosystem (PS) photochemical efficiency (F_v/F_m ratio), quantum yield (Yield), photochemical quenching (qP), non-photochemical quenching (qN) were also measured by a submersible, pulse-amplitude modulated (PAM) fluorometer: Diving-PAM. The method of chlorophyll fluorometer analysis was shown as an approach with

基金项目: 国家 863 专项资助项目(2003AA601100-2); 教育部“211 工程”和科技创新工程重大项目培育基金资助项目(#705824-2)

收稿日期: 2006-04-16; **修订日期:** 2006-09-20

作者简介: 王文林(1981~), 男, 南京市人, 硕士生, 从事水环境生态修复研究. E-mail: wangwenlin_jjl@126.com

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

Foundation item: The project was financially supported by National 863 Program (No. 2003AA601100-2), 211 Program, Ministry of Education, China and Breeding Project Fund for Major Innovative Engineering in Science and Technology, Ministry of Education, China (No. 705824-2)

Received date: 2006-04-16; **Accepted date:** 2006-09-20

Biography: WANG Wei-Lin, Master, mainly engaged in ecological remediation of aquatic environment. E-mail: wangwenlin_jjl@126.com

simple, convenient, sensitive, real-time, undestroyed and undisturbed advantages, allowing us to diagnose photosynthesis of submerged macrophytes, and analyze responsive mechanism of submerged macrophytes instantaneously. The results showed that the seedlings of *Potamogeton crispus* had a big tolerance to turbid water. When the seedlings grew in the waters with 30, 60 NTU and 90 NTU, and their survival, growth and photosynthesis structure of PSII were not influenced markedly ($p > 0.05$), indicating that the seedlings of *Potamogeton crispus* could adapted themselves to low turbidity stress. When water turbidity exceeded 120NTU, survival and growth of the seedlings of *Potamogeton crispus* were not significantly influenced at short-term (10 days) stress. However, along prolongation of experimental days (> 10days), the seedlings of *Potamogeton crispus* could survive but growth was markedly inhibited. When the leaves of seedlings exposed to light stress suddenly, high nonphotochemical quenching (qN) value detected in the study demonstrated that they could protect PSII by increasing heat dissipating. Under longterm(80days) stress, the seedlings of *Potamogeton crispus* in high turbidity (120, 150 NTU and 180 NTU) began to die in a large scale, Fv/Fm , Yield, qP were shown to be much less than those of the control treatment ($p < 0.05$), and rapid decrease of qN indicated that photosynthesis structure of PSII began to be destroyed.

Key words: water turbidity; seedling of *Potamogeton crispus*; growth; chlorophyll fluorescent parameters

水生植物是水生生态系统中重要的组成部分^[1],在这一生态类群中,沉水植物与水的关系最为密切,占据着湖泊、河流生态系统的界面^[2],因此维持水生生态系统的生态平衡关键在于如何合理利用和保护沉水植被资源。目前我国水生植被特别是沉水植被的衰退和消失普遍发生,水生植被特别是沉水植被的恢复重现已经成为重建健康水生生态系统的核心。

沉水植物的生存、生长、繁殖与水体环境因素有着密切的关系,其中水下有效光强被认为是沉水植物生长最为重要的限制因子之一,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,从而影响沉水植物的生长繁殖与分布^[3]。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;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。

饱和脉冲调制(PAM)叶绿素荧光动力学技术是利用快速、无损伤探针研究植物光合作用的技术^[4,5],将探头直接置于植物叶片表面可以测定一系列光合荧光参数^[4]。在陆生植物光合作用的研究中得到了广泛的应用^[6,7,8]。近年来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。菹草(*Potamogeton crispus*)是一种多年生的沉水植物,广泛生长于静水池塘、沟渠及河流水体^[9]。本文用粒径小于 100 μm 的悬浮泥沙,模拟不同混浊度的水体,将菹草幼苗栽种于其中,利用水下饱和脉冲叶绿素荧光仪测定植株叶片的叶绿素荧光参数,同时测定菹草幼苗生长发育指标,研究水体浊度对菹草幼苗生长发育和叶片光合系统(PSII)荧光特性的影响,为在由悬浮泥沙引起的混浊水体中的恢复菹草种群、重建健康生态系统提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 植物材料

菹草(*Potamogeton crispus*):多年生沉水草本植物,广泛生于沟渠、池塘、湖泊等水体中。在长江下游地区,植株初夏开始衰亡,同时形成繁殖鳞茎,俗称石芽或者冬芽,其坚硬边缘具有锯齿,形如松果,待水温适宜即开始萌发生长^[9]。

选择来源及个体大小一致的菹草石芽,平铺于塑料花盆内(盆口直径 20cm);花盆内覆土 8cm 厚,土壤为较贫瘠黄壤,全氮含量 0.019%,全磷含量 0.052%。每盆种 20 枚石芽,并将种好石芽的花盆置于室外水体中,待石芽自然萌发。萌发苗培育时间 2005 年 10 月 19 日~11 月 3 日,平均水温 17.1 $^{\circ}\text{C}$ 。在萌发苗株高达 5cm 左右、叶片达 7~8 枚时,移入试验水体中。

1.2 试验设计

试验容器为高 70cm、容积 150L 的塑料水桶,选择菹草幼苗发育一致的培育花盆移入试验水桶内,每桶放

置3盆。共设7组试验水桶,其中1组为对照(CK),其余6组分别添加不同量的泥沙混浊液,使6组水体混浊度分别达到30、60、90、120、150、180NTU个浊度单位(NTU:Nephelometric Turbidity Units)。

调节试验水体浊度的泥沙取自长江镇江段,先将泥沙溶于自来水中,然后将混浊的泥沙溶液用100 μm 孔径筛网过滤,滤液静止2h后取上层悬浊液作为调节浊度的悬浮泥沙溶液。粒径分析结果表明,该悬浊液主要由粒径为1~1.5、2.5~5、25~50和50~100 μm 的泥沙组成,其含量分别占40%、13.4%、12.4%和25%,即试验水体的浊度主要由粒径较小的细颗粒泥沙引起。

试验从2005年11月3日开始,2006年2月17日结束,试验水体未出现冰冻现象。

1.3 主要水体指标测定

水体TN、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、TP等指标采用Skalar湿化学流动分析仪(荷兰)测定;高锰酸盐指数(COD_{Mn})的测定采用高锰酸钾氧化法;以上指标每10~20d测定1次。水体浊度使用美国HACH公司2100P浊度仪测定;水下光强使用水下饱和脉冲荧光仪DIVING PAM的光量子探头测定。

1.4 菹草生物形态学指标测定

每10~20d分别计数、测定每个处理组菹草幼苗的株数、株高、单株叶片数、单株叶片宽度,计算每个处理幼苗的平均株数、平均株高(主茎抽条高度)、平均单株叶片数及平均单株叶片(植株顶部伸展叶片)宽度,并计算其死亡率。

1.5 菹草叶片叶绿素光化荧光参数的测定

菹草叶片叶绿素光化荧光参数的测定每隔10~20d进行1次,测定时,从7:00开始使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进行。每一处理随机选择5株植株顶部伸展叶片测定叶绿素荧光参数值,取平均值作比较。连体叶片使用叶夹遮光处理(暗适应)5min后,打开叶夹,开启测量光得到 F_0 ,再开启饱和脉冲光(饱和脉冲光强度4000 $\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$,持续时间0.8s)测得到 F_m ,得到光化学最大量子产量(F_v/F_m)然后开启光强度为30 $\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的光化光,照射叶片10s后,再开启饱和脉冲光测得 F_m 与 F_t ,按下式计算:

$$\begin{aligned} \text{光化学最大量子产量}^{[10]} & F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m \\ \text{有效荧光产量 Yield}^{[10]} & (F_v/F_m) = (F_m - F_t)/F_m \\ \text{光化学淬灭系数}^{[11]} & qP = (F_m - F_t)/(F_m - F_0) \\ \text{非光化学淬灭系数}^{[11]} & qN = (F_m - F_m)/(F_m - F_0) \end{aligned}$$

1.6 数据分析

对各处理组各指标分别进行单因子方差分析,以检验水体浊度处理影响的显著性,程序为STASTICA软件中的ANOVA程序。

2 结果

2.1 水体浊度对菹草幼苗存活及生长发育的影响

由表1可见,对照组和浊度较低各试验组(30、60、90NTU)在整个试验期间菹草幼苗均未见死亡现象。高浊度组(180NTU)到第21天时,死亡率就达到30%,而且,随着胁迫时间延长,死亡率呈现上升趋势,到第106天,高浊度组菹草幼苗死亡率达到80%。120NTU和150NTU组在第80天同样出现较高的死亡率。

由图1(A)可见,短时间的浊度胁迫压力对菹草幼苗生长无显著影响,而随着胁迫时间延长、浊度越高,对菹草生长影响越大。在试验的最初10d中,各处理组菹草幼苗长势相近,株高平均增长12~15cm。随着实验时间的延长,各处理组菹草幼苗生长分化明

表1 不同浊度水体中菹草幼苗的死亡率(%)

Table 1 Mortality of Potamogeton crispus seedlings in different turbid waters

浊度 Turbid waters(NTU)	胁迫时间 Duration under turbid stress				
	10d	21d	36d	51d	80d 106d
CK,30,60,90NTU	0	0	0	0	0
120NTU	0	0	0	40	50
150NTU	0	0	0	30	40
180NTU	0	20	30	30	70 80

显,30NTU 组植株生长最为迅速,60NTU 和 90NTU 组长势则与对照组相当;到试验结束第 106 天时,与对照组相比,低浊度组(浊度 90 NTU)水体浊度对菹草幼苗生长影响较小。高浊度(120~180NTU)组植株生长受到抑制,生长速度明显低于对照组,第 36 天时,高浊度组的幼苗株高达到最大值,分别仅为同期对照组的 48.6%、63.7%和 50.9%,第 36 天后,植株株高增长基本停滞,甚至因为植株死亡而出现下降。

由图 1(B)可见,在最初的 10d 内,各组菹草幼苗叶宽增加均较快,此后低浊度组(浊度 90 NTU)叶片生长速率明显减慢,但高浊度组(120~180NTU)幼苗叶片宽度出现减小趋势,第 106 天,120、150NTU 和 180NTU 组植株叶宽分别为对照组的 65.4%、60.9%和 48.1%。结果表明,低浊度对菹草幼苗的叶生长无显著影响,但高浊度对叶片生长影响较明显,浊度越大影响越强。

各组菹草幼苗叶片数量变化(图 1(C))与叶片宽度变化较为一致,在试验的初期(最初 21d 内)各组的菹草幼苗叶片数量均呈现增加趋势,此后,低浊度组叶片数量增加减缓,而高浊度组出现叶片衰亡、叶片数量减少的趋势。与对照组相比,30NTU 组的平均叶片数无显著差异($p > 0.05$),而其余各浊度组均显著低于对照组($p < 0.05$)。

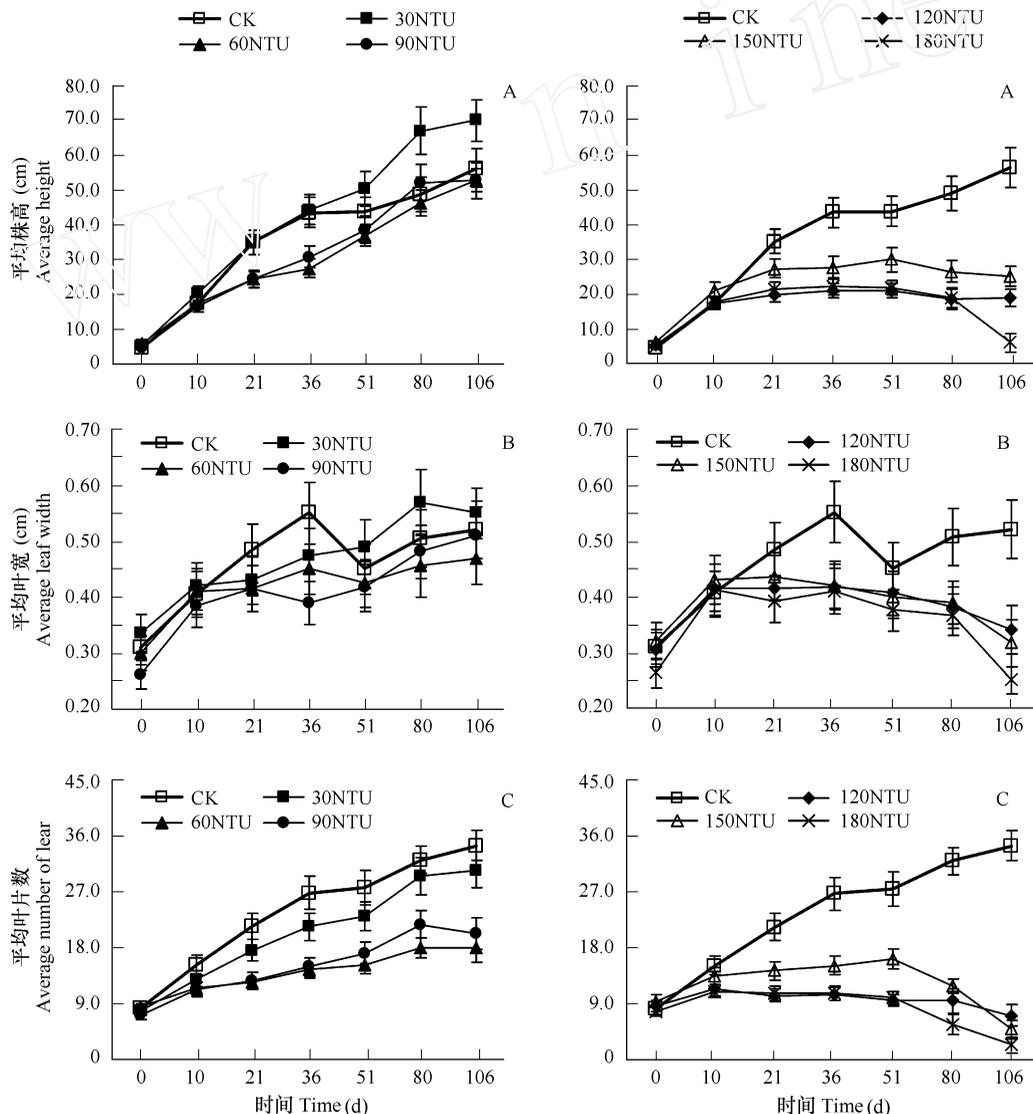


图 1 菹草幼苗的死亡率、株高、叶宽和叶片数变化

Fig. 1 Changes of mortality, height, leaf width and leaf number of *Potamogeton crispus* seedlings

综上所述,菹草幼苗对混浊水体有较强的耐受能力,在低浊度(浊度 90 NTU)的混浊水体中,菹草幼苗的存活及生长发育受到水体浊度的影响不显著($p > 0.05$),未见死亡现象;而当水体浊度 120NTU 时,在短时间内(10d 左右)水体浊度对于菹草幼苗的存活、生长发育无显著影响($p > 0.05$),随着实验天数的延长,植株的生长发育明显受到抑制,但植株能在相当长时间内保持存活,到第 80 天开始幼苗死亡率明显升高。

2.2 水体浊度对菹草幼苗叶绿素荧光参数的影响

菹草幼苗的最大光化学量子产量(用 F_v/F_m 来表示)反映了当所有的光合系统 (PSII) 反应中心均处于开放态时的量子产量。由图 2(A) 可见,在整个试验期间,低浊度组(浊度 90NTU)与对照组相比幼苗 F_v/F_m 值差异不显著($p > 0.05$)。高浊度组(120~180NTU)在从试验开始到第 51 天,与对照组相比,各浊度组幼苗叶片 F_v/F_m 值差异不显著($p > 0.05$);此后 F_v/F_m 值呈现明显的下降趋势,至第 106 天,120、150NTU 和 180NTU 组较对照组的幼苗 F_v/F_m 值分别下降了 14.9%、13.6%和 53.2%。

有效荧光产量(Yield)表示在光照下 PSII 的实际光化学效率,反映植物吸收的光子供给 PSII 反应中心的效率。由图 2(B) 可见,低浊度组(浊度 90NTU)在最初的一个月内除 30NTU 组外,60NTU 和 90NTU 组均较对照组的有显著下降($p < 0.05$),而此后,各低浊度组幼苗的 Yield 与对照组相比较无显著差异($p > 0.05$),表明经过一段时间适应后,菹草幼苗能够适应低浊度的胁迫保持正常生长。高浊度各组的幼苗 Yield 呈持续的下降趋势,至第 106 天,与对照组相比较 120、150NTU 和 180NTU 组的 Yield 值分别下降了 27.2%、25.7%和 58.7%,差异显著($p < 0.05$)。

光化学淬灭系数(qP)是 PSII 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,较低的 qP 反映 PSII 中开放的反应中心比例和参与 CO_2 固定的电子减少。由图 2(C) 可见,低浊度组(浊度 90NTU)在最初的 21d 内除 30NTU 组外,60NTU 和 90NTU 组的 qP 均较对照组的有显著下降($p < 0.05$),而此后,各低浊度组幼苗的 qP 与对照相比较无显著差异($p > 0.05$),表明经过一段时间适应后,菹草幼苗能够适应低浊度的胁迫保持正常生长。高浊度各组的幼苗 qP 呈持续的下降趋势,至第 106 天,与对照组相比较 120、150NTU 和 180NTU 组的 qP 值分别下降了 16.5%、20.9%和 46.0%,差异显著($p < 0.05$)。

非光化学淬灭系数(qN)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部分光能,热耗散是植物保护 PSII 的重要机制。由图 2(D) 可见,在试验的初期,各浊度组菹草幼苗 qN 值均较对照组的 qN 值有明显的升高趋势($p < 0.01$),第 21 天,30、60、90、120、150NTU 和 180NTU 组 qN 值分别是对照组的 4.6、11.5、10.4、15.0、14.6、13.6 倍。低浊度组(浊度 90NTU)的 qN 值自第 36 天开始下降,与对照的差异逐步减小;而高浊度组的 qN 值依然保持在较高水平,直到第 80 天才开始明显下降,到第 107 天,分别较第 68 天下降了 57.6%、79.0%、87.6%。

3 讨论

本试验期间,各组水体除了浊度指标有明显差异外,其他水环境质量主要指标如 TN、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、TP 和 COD_{Mn} 等的含量差异不显著($p > 0.05$, $N = 7$) (表 2)。

在浊度较高的水体中,水体泥沙等悬浮颗粒阻碍光在水体中的穿透,水体透明度低,水下光照弱^[12]。不少调查和试验研究已经证实水体浊度越大、透明度越小,光照在水体中的衰减也越大。本试验各组水体光照的垂直分布测定结果(图 3)表明,随着水体浊度的增加,水下光照的衰减增加。浊度 30、180NTU 水体的水下 10cm 处光照分别为水面光照的 53.4%、19.1%,可见水体浊度对水下光照的影响很大。

菹草幼苗能够忍耐短期(10d 左右)的高浊度胁迫,这可能与菹草幼苗前期生长主要利用石芽中储存的营养物质生长有关,而随着胁迫时间延长、浊度增加,

表 2 试验期间各组水体主要水质指标的均值(mg/L)

Table 2 Average value of main water quality parameters of different turbid waters during the experimental period (mg/L)

浊度 Turbidity (NTU)	NH_4^+-N	NO_2^--N	NO_3^--N	TN	TP	COD_{Mn}
CK	0.016	0.020	0.109	0.602	0.083	5.43
30	0.014	0.020	0.115	0.634	0.077	5.36
60	0.015	0.022	0.102	0.623	0.077	5.37
90	0.016	0.022	0.103	0.619	0.072	5.31
120	0.017	0.021	0.109	0.611	0.079	5.45
150	0.016	0.025	0.124	0.643	0.076	5.39
180	0.018	0.023	0.119	0.639	0.081	5.47

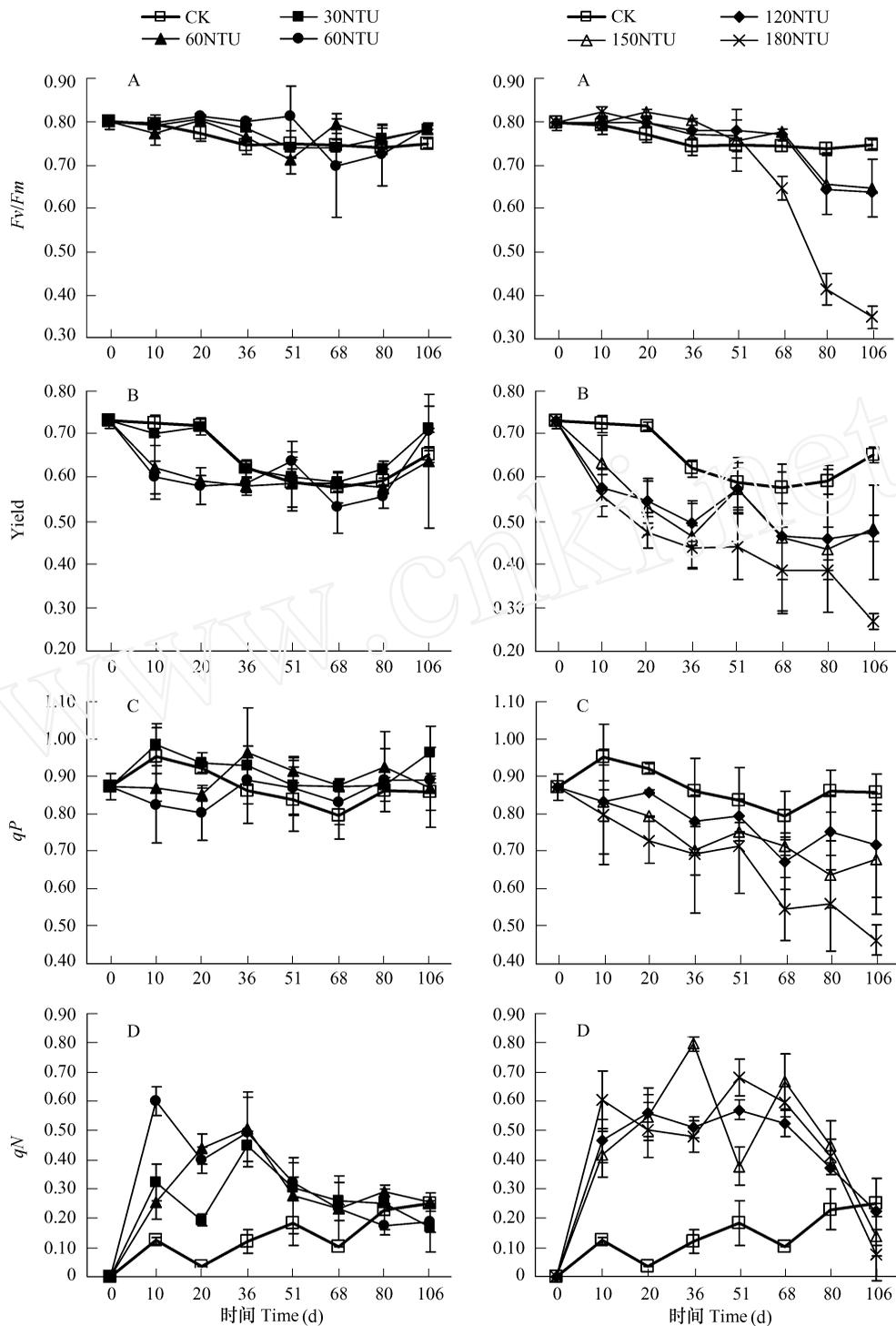


图2 实验期间菹草幼苗叶片的 F_v/F_m 、Yield、 q_P 、 q_N 变化

Fig. 2 Changes of F_v/F_m , Yield, q_P , q_N of the seedlings of *Potamogeton crispus* during the experimental period

水体对菹草幼苗生长的抑制作用也越强烈。菹草幼苗后期生长需通过叶片光合作用合成物质,而此时环境光强可能低于菹草幼苗生长所需的光补偿点,沉水植物的光补偿点常常占全光照的 1%~3%^[13]。如表 3、图 3, 120、150NTU 和 180NTU 组在第 36 天达到最大平均株高时与水表面的平均距离为 40.94、34.76cm 和 39.96 cm, 其对应的水下光强约为 2.03、2.38、1.73 $\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 分别占全光照的比率约只有 1.01%、1.17%、

0.86%, 远低于同期 CK 组、30NTU、60NTU、90NTU 组植株所处水位的比率的 59.5%、35.9%、11.1% 和 6.02%。

表3 实验期间各实验处理组菹草与水表面平均距离变化

Table 3 Changes of average distance between *Potamogeton crispus* and water surface during the experimental period (cm)

时间 Time (d)	CK	30NTU	60NTU	90NTU	120NTU	150NTU	180NTU
0	57.47	56.70	56.25	57.34	56.47	55.94	57.05
10	44.72	41.62	44.79	45.41	44.57	40.91	44.44
21	26.96	26.95	37.84	37.57	42.46	34.40	40.73
36	18.68	17.72	34.70	31.33	40.94	34.76	39.96
51	18.41	11.69	25.22	23.47	41.23	32.16	40.33
80	13.26	0.00	15.71	9.91	43.34	35.61	43.30
106	5.71	0.00	9.38	9.35	43.14	36.90	56.00

水体浊度对菹草生长发育的影响,也体现在其对光合作用的影响上。叶片叶绿素荧光与光合作用中各种反应过程密切相关,任何环境因子对光合作用的影响都可通过叶片叶绿素荧光动力学反映出来^[14]。PSII 的光化学效率是表明光化学反应状况的一个重要参数,在低光强下,实际光化学效率的高低直接决定叶片光合速率的高低^[15]。对混浊水体中菹草幼苗叶绿素荧光参数的研究发现,试验初期在 $30\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的低光化光的照射下,与 CK 相比各浊度组 Yield 值、 qP 值下降, qN 值明显上升,表明菹草幼苗叶片在此低光强下即表现为光抑制状态,但叶片通过增加热耗散 (qN) 以保护光合

结构 PSII 免受伤害,这可能与试验初期各浊度组植株所处水下光强很低有关。随着试验的进行(第 36 天),30NTU、60NTU、90NTU 组的 Yield 值、 qP 值与 CK 相比无显著差异 ($p > 0.05$),同时 qN 值开始下降,这是由于随着植株的生长越来越接近水面,所处水下光强不断变强,其抗光抑制能力开始变强,而 120NTU、150NTU 和 180NTU 组由于生长停滞,其 Yield 值、 qP 值继续下降,明显低于对照 ($p < 0.05$),且保持较高的 qN 值,表明其继续受到低光抑制,但依旧能通过保持较高的热耗散维持 PSII 保持正常;第 80 天,随着 120NTU、150NTU 和 180NTU 组的 Yield 值、 qP 值的显著下降, qN 值也明显降低,表明随着所处逆境时间的增加,这 3 组菹草幼苗叶片实际光化学效率下降,同时热耗散能力的下降,可能导致光合结构 PSII 受损,此时菹草幼苗正开始大范围死亡。这与彭长连等研究相似,彭长连等^[16]在研究高温对生长在加富 CO_2 条件下水稻离体叶片叶绿素荧光的影响时发现,随着温度的升高,4 个供试水稻品种的 qP 逐渐下降,50 时下降为 0,而 qN 则先上升后下降,50 时降至 0,表明 PSII 已经收到严重破坏,反应中心关闭,对热能的耗散能力也丧失殆尽。在本实验中 qP 和 qN 值没有出现降至 0 的情况,可能是实验时间和水体浊度还没有引起菹草幼苗 PSII 的严重破坏和反应中心的完全关闭。

F_v/F_m 是 PSII 最大光化学量子产量,反映 PSII 反应中心内禀光能转换效率或称最大 PSII 的光能转换效率。非胁迫条件下该参数的变化极小,胁迫条件下该参数明显下降^[17]。试验初期各浊度组 Yield 值、 qP 值下降, qN 值明显上升而 F_v/F_m 值较之 CK 并未下降,表明低光对叶片的光抑制只是使叶片 PSII 反应中心暂时部分关闭,光合结构 PSII 并未受损;而随着在菹草幼苗在高浊度水体中的时间的增加,第 80 天,120NTU、150NTU 和 180NTU 组的光化学最大量子产量 (F_v/F_m) 较之对照显著下降 ($p < 0.05$),此时在低光强下叶片 Yield 值、 qP 值的显著下降, qN 值也显著降低,说明此时菹草幼苗叶片的光合结构 PSII 已受到损坏,这也与各浊度组菹草幼苗的死亡情况相对应。

综上所述,菹草是一种对混浊水体耐受能力较强的一种沉水植物。在含以下有悬浮泥沙的水体中,菹草

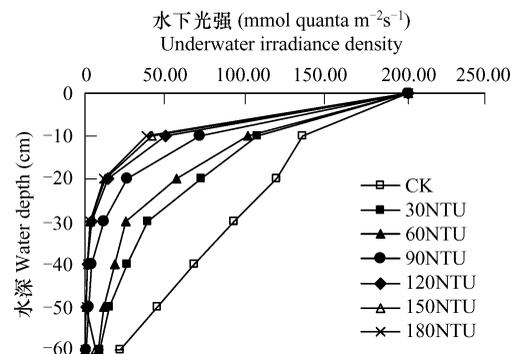


图3 各处理组水下光强变化

Fig. 3 Changes of underwater irradiance density in each treatment

幼苗的生长发育对光照的需求不高,在浅水水体中(水深 70cm),水体浊度不超过 90 NTU 时,其幼苗能较正常的生长发育,对幼苗叶片的光合结构 PSII 影响不大;而当水体浊度超过 120NTU 时,其也能生存较长时间,但超过一定时间(80d),叶片的 PSII 系统将会受到破坏,植株出现死亡,所以如果能及时采取控制水位或改善水下光照的措施,菹草植株的正常生长发育将得到保证。当菹草植株到达水面后光照将不再成为其上部叶片进行正常光合作用的限制因素,能耐受更大浊度、更深的悬浮泥沙水体。

References:

- [1] Sculthorpe C D. The Biology of Aquatic Vascular Plants Edward Arnold. London, 1967. 610 ~ 631.
- [2] Carpenter S R, Lodge D M. Effects of submerged macrophytes on ecosystem Processes. Aquatic Botany, 1986, 16: 341 ~ 370.
- [3] You W H, Song Y C. Seed germination ecology of three submerged macrophytes in Dianshan Lake. Chinese Journal of Applied Ecology, Apr., 1995, 6(2): 196 ~ 200.
- [4] Schreiber U, Bilger W, Neubauer C. Chlorophyll fluorescence as a noninvasive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis. Ecol Studies, 1994, 100: 49 ~ 70.
- [5] Franklin L A. The effects of temperature acclimation on the photoinhibitory responses of *Ulva rotundata* Blid. Planta, 1994, 192: 324 ~ 331.
- [6] Schreiber U, Schliwa U, Bilger W. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new modulation fluorometer. Photosynth Res., 1986, 10: 51 ~ 62.
- [7] Bolhar-Nordenkamp H R, Long S P, Baker N R. Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrumentation. Funct Ecol, 1989, 3: 497 ~ 514.
- [8] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. Ann Rev Plant Physiol, 1991, 42: 313 ~ 349.
- [9] Lu M D. Hydrophytic Biology of Freshwater. Suzhou: Suzhou University Press, 2002. 46.
- [10] 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*. Photosynth Res, 1990, 25: 173 ~ 185.
- [11] Schreiber U, Bilger W, Neubauer G. In: Ecophysiology of Photosynthesis. (eds Schulze, E-Dand Caldwell, MM). Berlin: Springer Verlag, 1994.
- [12] C E Korschgen W L, Green K P, Kenow. 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.
- [13] Li W, Zhong Y. Theory and Method of Aquatic Botany Research. Wuhan: Central China Normal University Press, 1992. 4.
- [14] Hui H X, Xu X, Li Q R. Exogenous betaine improves the photosynthesis of *Lycium barbarum* under salt stress. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin., 2003, 23(12): 2137 ~ 2422.
- [15] Yu S W, Tang Z C. Plant Physiology and Molecular Biology. Beijing: Science Press, 1998. 262 ~ 267.
- [16] Peng C L, Lin Z F, Lin G Z. Effect of High Temperatures on Chlorophyll Fluorescence of Detached Leaves of Rice Growing Under CO₂ Enrichment. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2000, 8(2): 91 ~ 96.
- [17] Zhang S R. A Discussion Chlorophyll Fluorescence Kinetics Parameters and Their Significance. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(4): 444 ~ 448.

参考文献:

- [3] 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.
- [9] 卢德敏. 淡水生物学. 苏州: 苏州大学出版社, 2002. 46.
- [13] 李伟, 钟扬. 水生植被研究的理论和方法. 武汉: 华中师范大学出版社, 1992. 4.
- [14] 惠红霞, 许兴, 李前荣. 外源甜菜碱对盐胁迫下枸杞光合功能的改善. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2137 ~ 2422.
- [15] 余叔文, 汤章成. 植物生理与分子生物学 第 2 版. 北京: 科学出版社, 1998. 262 ~ 267.
- [16] 彭长连, 林植芳, 林桂珠. 高温对生长在加副 CO₂ 条件下水稻离体叶片叶绿素荧光的影响. 热带亚热带植物学报, 2000, 8(2): 91 ~ 96.
- [17] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. 植物学通报, 1999, 16(4): 444 ~ 448.