

水体泥沙对苦草生长发育和叶片光合生理特性的影响

李 强^{1,2}, 王国祥^{2,3,*}

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

摘要:用粒径小于100μm的泥沙分别配置浊度为30、60、90NTU和120NTU的浑浊水体,将苦草(*Vallisneria asiatica*)幼苗分别种植于上述水体中,水深约60cm,定期统计植株的叶长、叶宽、叶片数和株数,利用水下饱和脉冲荧光仪(DIVING-PAM)测定泥沙附着苦草叶片在光化光下的荧光参数,并测定其超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性。结果表明,随着水体中泥沙含量的增加苦草植株的叶宽、叶片数和植株数呈显著的降低趋势,在浊度30NTU的水体中,植株叶长增长速度显著大于对照;随着实验时间的延长,在泥沙含量较高的水体(浊度≥60NTU)中,植株逐渐死亡,而在浊度30NTU的水体中,幼苗能进行正常的生长发育。秋季植株开花时,叶片上的泥沙附着量逐渐增大,在30NTU水体中泥沙附着叶片的实际光化学效率、光化学荧光淬灭系数和电子传递速率均显著高于对照,而且附着叶片的超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性与对照的差异不显著。表明在低浓度泥沙水体中泥沙附着有利于苦草叶片PSⅡ免受秋季高光照的伤害,从而减缓苦草叶片光合功能的衰减。因此,在泥沙含量较低的浅水体(浊度≤30 NTU)中可以适当引种苦草幼苗(最好由冬芽和根状茎萌发得到),植株能正常生长发育和繁殖。

关键词:泥沙;苦草;幼苗;生长发育;光合生理特性

文章编号:1000-0933(2009)06-2852-09 中图分类号:Q142,Q945,Q948.8 文献标识码:A

Influence of silts on growth and development of *Vallisneria Asiatica* and its leaves' photosynthetic physiological characteristics in Turbid Water

LI Qaing^{1,2}, WANG Guo-Xiang^{2,3,*}

1. Department of Chemistry and Environment Science, 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

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2852~2860.

Abstract: Seedlings of *Vallisneria asiatica* (SVA) were planted in the waters with turbidity of 30NTU, 60NTU, 90NTU or 120NTU. The turbidity of the water was controlled by sand particles smaller than 100μm in diameter, and the effect of water turbidity on the growth of SVA was examined. The photosynthetic fluorescence characteristics of the leaves attached on silts was determined *in situ* by a developed, submersible, pulse-amplitude modulated (PAM) fluorometer, diving-PAM in actinic irradiance. The activities of superoxide and peroxide of the leaves were also determined. The experimental results indicated that the stains number and leaf numbers, and leaf width of SVA decreased significantly as the turbidity of water increased after exposing the seedlings in turbid water for 60 days. However, the leafs grew faster in the water with turbidity of 30NTU than that in the control water. With the extension of experimental time, the plants gradually died in turbid water with high silts content (turbidity ≥ 60 NTU). In contrast, seedlings can grow and develop normally in the turbid water with a turbidity of 30 NTU. The silts amount attached on leaves increased gradually with bloom of the plants in autumn. The effective quantum yield of photosystem II, photochemical quenching and electron transport rate of leaves attached on silts

基金项目:国家863专项资助项目(2003AA601100-2);国家教育部“211工程”和科技创新工程重大资助项目(705824-2);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)

收稿日期:2008-03-27; **修订日期:**2008-08-18

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

determined in the turbid water of 30NTU were higher than those measured in the control water. However, the activities of superoxide and peroxide of the leafs did not show a significant difference by comparison with the control system. It was shown that silt attachment could avoid damage from high irradiance in autumn to photosynthetic system II of the leaves at low turbidity of water, consequently maintain photosynthetic capacity of the leaves. Therefore, seedlings of *V. asiatica* might be adapted to low turbid shallow water of silts (turbidity ≤ 30 NTU), and normally grow and develop, and breed. It is also suggested that the best seedlings were germinated from winter buds or rhizome of *V. Asiatica*.

Key Words: silts; *Vallisneria asiatica*; seedlings; growth and development; photosynthetic physiological characteristics

水生高等植物是构建健康、稳定的水生生态系统的关键。但是,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^[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,其对沉水植物的影响已有较多研究^[2~4];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^[5~8]。苦草 (*Vallisneria asiatica*)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^[9]。研究表明,苦草植株对于光的需求较低^[10],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物种鉴定、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。本文将苦草幼苗种植于不同泥沙含量的水体中,统计植株的生长发育状况,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,研究水体泥沙悬浮和附着对苦草生长发育和叶片光合荧光特性的影响,为苦草在浑浊水体中的恢复、重建提供依据。

1 实验方法

1.1 实验材料

苦草 (*V. asiatica*) 冬芽的平均长度为 (2.9 ± 0.4) cm, 平均直径为 (0.75 ± 0.15) cm, 平均鲜重为 (0.95 ± 0.28) g。将苦草冬芽种植于小盆中, 盆高 8cm, 直径 15cm, 装满泥土, 土中 TN、TP(以 P₂O₅ 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 μg/g 和 2.808 μg/g。自然光照下培养 2 个月, 幼苗平均高度为 11~13cm, 每盆选择 6 株发育程度相近的植株作为实验植株, 去除其余的植株。

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^[11]: $Y = -0.0017X^2 + 1.8305X$ ($R^2 = 0.982$, $n = 18$)。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 ($0.5\text{m} \times 0.8\text{m} \times 0.5\text{m}$)、植物实验系统 ($\varnothing 0.52\text{m} \times 0.7\text{m}$) 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、60、90 NTU 和 120NTU, 以不含泥沙的水体为对照。每个植物系统底部放入 1 盆苦草幼苗, 每个浊度 3 组重复。

1.5 浑浊泥沙水体中苦草幼苗的生长发育

实验从 2006 年 6 月 2 日开始, 7 月 31 日结束。分别于第 0 天、15 天、30 天和第 60 天统计植株的叶长、叶

宽、叶片数和植株数,取其平均值,采用 SPSS 软件进行差异显著性分析。

1.6 泥沙附着对苦草叶片光合生理特性的影响

在 30NTU 泥沙水体中,苦草植株能正常生长,至 9 月 3 日时植株株高约为 $(65.1 \pm 5.7) \text{ cm}$;随机选择 9 株植株,每株选择最长的两张叶片为实验叶片,每天用软毛刷将其中一张叶片上附着的泥沙刷掉,作为对照叶片,而另一张叶片作为附着叶片。每隔 5d 随机选择 1 株植株用软毛刷将附着泥沙叶片上的泥沙轻轻刷下,烘干、称重;采用称重法测定泥沙重量,计算叶片上泥沙附着量($\text{mg 泥沙}/\text{cm}^2$) = (泥沙重量 \times 称量纸重量)/(称量纸面积 \times 与叶片大小相同的纸张重量),20d 后结束实验。实验开始前和结束时分别测定植株叶片的光化学荧光参数和抗氧化酶活性。

1.7 指标测定

叶片叶绿素荧光参数的测定: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 7:00 ~ 8:00 间进行测定;每一水体随机选择 5 株植株顶部伸展叶片,暗适应 15min 后,测定 F_o 和 F_m ,然后分别选用 1 号和 3 号光化光测定荧光参数值 F_t 、 F'_{m} ,计算得到 F_v/F_m 、 qN 、 qP 、 ETR 和 $\Delta F'_v/F'_{m}$ ^[6],取平均值作比较,并作差异显著度分析。

叶片过氧化酶活性测定:苦草叶片样品经研磨、提取、过滤和离心后,采用 Giannopolitis 和 Ries 的方法^[12]测定超氧化物歧化酶(SOD)的活性,以不加酶液的照光管为对照,以抑制前 50% 的 NBT 光化还原作为一个酶活性单位。采用 Kochba 等的方法^[13]测定过氧化物酶(POD)的活性,以每分钟吸光值增加 0.1 作为一个酶活性单位。

2 结果

2.1 浑浊泥沙水体中苦草幼苗的生长发育

苦草幼苗植株数的变化:由表 1 可知,水体浑浊对苦草幼苗新株的形成具有显著的抑制作用。实验第 15 天时,30、60、90NTU 和 120NTU 浊度组苦草幼苗均有新的植株生成,其新株数分别为对照的 45.0%、50.0%、71.7%、和 55.0%,差异显著($P < 0.01$)。

表 1 实验期间株数的变化

Table 1 varies of the stains number during the experiment

时间 Time(d)	对照 The control	各组平均植株数 The average stains number of each group			
		30NTU	60NTU	90NTU	120NTU
0	6	6	6	6	6
15	12.0 ± 1.0	8.7 ± 0.6	9.0 ± 0.0	10.3 ± 0.6	9.3 ± 0.6
30	12.0 ± 1.0	8.7 ± 0.6	9.0 ± 0.0	10.3 ± 0.6	9.3 ± 0.6
60	17.0 ± 1.0	14.0 ± 1.0	8.3 ± 0.6	9.7 ± 0.6	8.7 ± 0.6

第 30 天时,各浊度组均无新的植株形成;但到第 60 天时,在对照和 30NTU 水体中又有大量的新株生成,而在 $\geq 60 \text{ NTU}$ 水体中由于水体浊度对植株的胁迫,有少量的植株死亡。

苦草幼苗叶片数的变化:由表 2 可知,在开始的 15d 内,在高浊度($\geq 90 \text{ NTU}$)水体中植株总叶片数的增加受到显著的抑制。至第 30 天和第 60 天时,对照植株总叶片数分别比第 15 天时增加了 60.9%、98.2%,除 30NTU 外,其余各浊度组植株叶片数显著减少;且随着实验天数的增加,总叶片数显著降低。

在开始的 15d 内,在浑浊泥沙水体中老植株新叶片的形成受到了促进;30NTU、60NTU、90NTU 和 120NTU 浊度组植株的新叶片数均多于对照。随后,老植株新叶片的形成受到了显著的抑制,除 30NTU 浊度组老植株的叶片数有所增加外,其余各浊度组均显著减少;第 60 天时,第 60 天时浊度 $\geq 60 \text{ NTU}$ 的各组叶片均出现了叶色变淡、腐烂现象,60NTU、90NTU 和 120NTU 浊度组老植株新叶片数分别比第 15 天时减少了 75.8%、89.7% 和 100.0%,与对照差异显著($P < 0.01$)。

在开始的 15d 内,高浊度组新株叶片的形成就受到了显著的抑制;30、60、90NTU 和 120NTU 浊度组植株

的叶片数分别为对照的 81.8%、96.8%、55.9% 和 40.9%。随着实验天数的增加,除 30NTU 浊度组外,其余各浊度组新株的叶片数呈显著的减少趋势,与对照的差异显著($P < 0.01$)。

表 2 实验期间植株叶片数的变化

Table 2 varies of leaf number of the stain during the experiment

实验时间 Experimental time (d)	叶片数 Leaf number	对照 Control	30NTU	60NTU	90NTU	120NTU
0	各组叶片平均总数 Average leaf number of each group	29.0 ± 1.0	36.0 ± 2.0	31.7 ± 1.2	26.7 ± 1.5	30.0 ± 1.7
15	各组平均总叶数 Average of total leaf number of each group	71.3 ± 2.9	76.7 ± 1.5	80.7 ± 2.9	61.3 ± 1.5	66.0 ± 1.7
	老株新叶平均总数 Average of total new leaf number of old stains	20.3 ± 0.6	22.7 ± 0.6	27.7 ± 1.2	22.3 ± 2.1	27.0 ± 2.6
	新株平均总叶数 Average of total leaf number of new stains	22.0 ± 1.7	18.0 ± 1.7	21.3 ± 1.5	12.3 ± 1.5	9.0 ± 1.0
30	各组平均总叶数 Average total leaf number of each group	114.7 ± 2.1	77.3 ± 2.5	61.7 ± 3.2	43.3 ± 3.5	38.3 ± 4.0
	老株新叶平均总数 Average of total new leaf number of old stains	51.3 ± 2.5	27.3 ± 1.5	17.0 ± 2.0	7.3 ± 1.2	1.0 ± 0.0
	新株平均总叶数 Average of total leaf number of new stains	34.3 ± 2.1	14.0 ± 2.0	13.0 ± 2.0	9.3 ± 2.1	7.3 ± 1.2
60	各组平均总叶数 Average total leaf number of each group	141.3 ± 3.2	96.3 ± 2.3	41.7 ± 2.1	28.7 ± 3.8	26.0 ± 1.7
	老株新叶平均总数 Average of total new leaf number of old stains	62.7 ± 2.5	34.3 ± 3.8	6.7 ± 1.5	2.3 ± 0.6	0
	新株平均总叶数 Average of total leaf number of new stains	50.7 ± 2.3	26.0 ± 2.0	5.0 ± 1.0	3.7 ± 0.6*	3.3 ± 0.6

苦草幼苗叶片长度的变化:由表 3 可知,水体浊度为 30NTU 时有利于老植株老叶片长度的增加,而水体浊度 ≥ 60 NTU 时老植株老叶片的生长显著受到抑制;第 15 天时,30NTU、60NTU、90NTU 和 120NTU 浊度组植株叶长的增长值分别为对照的 129.8%、63.2%、56.1% 和 59.6%,差异显著($P < 0.01$)。随着时间的增加,在浊度较高的水体中植株叶片上部叶色变淡、腐烂,叶长变短。除对照和 30NTU 组植株叶长呈显著的增加趋势外,其余各浊度组植株叶长呈显著的降低趋势;实验天数越长,叶长降低越显著($P < 0.01$)。

由表 3 还可知,短时间内老植株新叶的生长受到了促进;第 15 天时,30、60、90NTU 和 120NTU 浊度组老植株新叶片的长度分别为对照的 148.5%、119.1%、111.8% 和 108.8%,差异显著($P < 0.01$)。但随着天数的增加,除 30NTU 浊度组外老植株新叶的生长受到显著的抑制,叶长呈显著的降低趋势,与对照差异显著($P < 0.01$)。

第 15 天时,除 30NTU 浊度组植株外,其余各浊度组植株新株叶片的生长略快于对照;随浊度增加,各浊度组新株叶片长度分别为对照的 82.1%、103.0%、101.5% 和 104.5%。但至第 30 天时,30NTU 浊度组新株叶片生长加快,其增加值为对照的 205.2%;而浊度 ≥ 60 NTU 的各组新株叶片生长受到显著抑制,呈现显著的降低趋势,天数越长降低越显著。

苦草幼苗叶宽的变化:由表 4 可知,在开始的 15d 内老植株老叶片叶宽增加不显著。随着天数的增加,各浊度组老植株叶宽显著受到抑制,除 30NTU 组叶宽受到的抑制作用较小外,其余各浊度组叶宽均在 30d 后完全被抑制,与对照的差异显著($P < 0.01$)。

在开始的 15d 内 30 ~ 90NTU 浊度组老植株新叶的叶宽随水体浊度的增加呈增加趋势,而 120NTU 浊度组的叶宽显著降低,为对照的 80.0% ($P < 0.01$)。随着实验天数的增加,各浊度组老植株的新叶宽均受到了抑制;特别是在 60 ~ 120NTU 水体中 30d 后新叶叶宽完全被抑制。

表3 实验期间植株叶长的变化
Table 3 varies of the leaf length during the experiment

时间 Time(d)	叶长 Leaf length	对照 Control	30NTU	60NTU	90NTU	120NTU
0	平均叶长 Average of leaf length	13.2 ± 0.4	13.8 ± 0.3	11.7 ± 0.5	11.6 ± 0.4	12.2 ± 0.2
15	老株老叶平均叶长 Average leaf length of old leaves of old stains	18.9 ± 0.5	21.2 ± 0.4	15.3 ± 0.4	14.8 ± 0.3	15.6 ± 0.3
	老株新叶平均叶长 Average leaf length of new leaves of old stains	6.8 ± 0.5	10.1 ± 0.5	8.1 ± 0.7	7.6 ± 0.6	7.4 ± 0.8
	新株平均叶长 Average leaf length of new stains	6.7 ± 0.6	5.5 ± 0.5	6.9 ± 0.7	6.8 ± 0.5	7.0 ± 0.5
30	老株老叶平均叶长 Average leaf length of old leaves of old stains	23.6 ± 1.2	31.6 ± 2.1	14.2 ± 1.5	11.3 ± 1.1	11.9 ± 1.7
	老株新叶平均叶长 Average leaf length of new leaves of old stains	10.3 ± 1.1	13.0 ± 0.8	6.6 ± 0.6	4.5 ± 0.7	3.6 ± 0.8
	新株平均叶长 Average leaf length of new stains	12.5 ± 0.9	17.4 ± 1.3	7.2 ± 0.8	3.9 ± 0.6	3.6 ± 0.7
60	老株老叶平均叶长 Average leaf length of old leaves of old stains	25.2 ± 1.8	32.1 ± 2.0	12.3 ± 1.6	9.8 ± 0.9	9.5 ± 1.3
	老株新叶平均叶长 Average leaf length of new leaves of old stains	12.7 ± 1.2	15.5 ± 1.0	4.1 ± 0.7	3.1 ± 0.8	0
	新株平均叶长 Average leaf length of new stains	12.7 ± 0.9	17.5 ± 1.2	3.9 ± 0.6	3.6 ± 0.7	3.1 ± 0.6

由表4可知,在开始的15d内,除30NTU浊度组外其余各浊度组新株叶宽发育显著被抑制,至30d时完全被抑制。

表4 实验期间植株叶宽的变化
Table 4 varies of the leaf width during the experiment

时间 Time(d)	叶宽 Leaf width	对照 Control	30NTU	60NTU	90NTU	120NTU
0	平均叶宽 Average of leaf width	0.39 ± 0.03	0.42 ± 0.04	0.36 ± 0.02	0.4 ± 0.03	0.39 ± 0.03
15	老株老叶平均叶宽 Average leaf width of old leaves of old stains	0.42 ± 0.03	0.42 ± 0.03	0.38 ± 0.02	0.41 ± 0.03	0.4 ± 0.03
	老株新叶平均叶宽 Average leaf width of new leaves of old stains	0.35 ± 0.05	0.36 ± 0.06	0.37 ± 0.06	0.39 ± 0.05	0.28 ± 0.04
	新株平均叶宽 Average leaf width of new stains	0.3 ± 0.03	0.33 ± 0.03	0.28 ± 0.02	0.21 ± 0.02	0.19 ± 0.03
30	老株老叶平均叶宽 Average leaf width of old leaves of old stains	0.52 ± 0.04	0.46 ± 0.04	0.41 ± 0.03	0.43 ± 0.04	0.4 ± 0.03
	老株新叶平均叶宽 Average leaf width of new leaves of old stains	0.38 ± 0.04	0.38 ± 0.05	0.4 ± 0.05	0.4 ± 0.05	0.28 ± 0.04
	新株平均叶宽 Average leaf width of new stains	0.4 ± 0.04	0.36 ± 0.03	0.28 ± 0.02	0.21 ± 0.03	0.19 ± 0.03
60	老株老叶平均叶宽 Average leaf width of old leaves of old stains	0.7 ± 0.06	0.66 ± 0.07	0.41 ± 0.03	0.43 ± 0.04	0.4 ± 0.04
	老株新叶平均叶宽 Average leaf width of new leaves of old stains	0.46 ± 0.04	0.43 ± 0.05	0.4 ± 0.05	0.4 ± 0.06	0
	新株平均叶宽 Average leaf width of new stains	0.47 ± 0.05	0.41 ± 0.03	0.28 ± 0.03	0.21 ± 0.03	0.19 ± 0.05

2.2 泥沙附着对苦草叶片光合生理特性的影响

叶片上泥沙附着量的变化:实验期间苦草叶片上的泥沙附着量变化如表5所示。随着实验天数的增加,叶片上的泥沙含量呈增加趋势,至第15天时,叶片上的泥沙附着量趋于稳定。

表5 实验期间叶片上附着泥沙的干重

Table 5 dry weight of attached silts of leaves during the experiment

时间 Time(d)	0	5	10	15	20
泥沙附着量 Tilts amount attached on leaves(g/cm ²)	0.2523 ± 0.0543	0.5287 ± 0.0760	1.0121 ± 0.0869	1.5385 ± 0.2389	1.5473 ± 0.2823

泥沙附着对苦草叶片 F_v/F_m 的影响:由图 1 可知,20d 后对照和泥沙附着叶片的 F_v/F_m 值均略有降低。附着叶片和对照叶片的 F_v/F_m 值分别降低了 5.6% ($P < 0.05$) 和 11.4% ($P < 0.01$),附着叶片的 F_v/F_m 值比对照的降低程度小,表明泥沙附着有利于减缓苦草叶片最大光量子产量的降低。

泥沙附着对苦草叶片荧光参数的影响:泥沙附着导致苦草叶片在照光条件下实际光化学效率显著高于对照。如图 2 所示,泥沙附着 20d 后,在高、低光化光条件下叶片的 $\Delta F'_v/F'_m$ 分别比对照高 9.7% ($P < 0.05$) 和 36.1% ($P < 0.01$)。

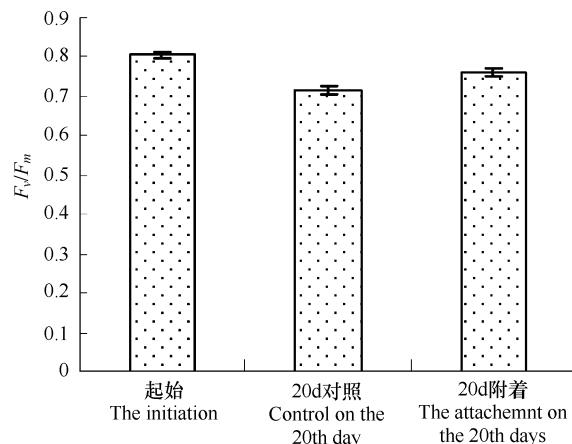
泥沙附着使植株叶片的电子传递速率显著高于对照。在高、低光化光条件下附着叶片的 ETR 分别比对照高 10.4% ($P < 0.01$) 和 35.5% ($P < 0.01$)。泥沙附着也使叶片的 qP 值显著高于对照。在低光化光和高光条件下附着叶片的 qP 值分别比对照高 35.3% ($P < 0.01$) 和 15.4% ($P < 0.01$),表明附着叶片 PS II 中开放的反应中心比例和参与 CO₂ 固定的电子显著高于对照。

由图 2 还可知,在低光化光条件下附着叶片以热的形式耗散掉的能量显著低于对照,qN 比对照低 34.3% ($P < 0.01$),吸收的光能更多地参与了光化学反应,合成更多的光合产物;而在高光化光条件下附着叶片耗散掉的热量多于对照,qN 比对照高 9.3% ($P < 0.05$),可以避免过剩能量对光合结构 PS II 的伤害。

泥沙附着对苦草抗氧化酶活性的影响:泥沙附着导致叶片的抗氧化酶活性有所升高,但与对照的差异不显著。由图 3 可知,20d 后对照和附着叶片的 POD 和 SOD 酶活性均有所增加,POD 酶活性分别增加了 1.6% 和 3.5%,而 SOD 酶活性分别增加了 2.3% 和 5.1%;但附着叶片的 POD 和 SOD 活性分别比对照仅高 0.7% 和 1.6%,差异不显著。表明泥沙附着对苦草叶片抗氧化酶活性的影响不显著。

3 讨论

苦草幼苗对低光逆境的适应:在生长发育过程中,苦草植株通过叶宽、叶长和叶片数的增加,以及形成新的克隆植株来实现增大光合面积、获得有利光照和扩大生境的目的。在高浊度、低光照的逆境条件下,苦草植株叶长、叶宽、叶片数在 15d 内的变化和新植株的生成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,虽然老植株的叶长增长受到一定程度的抑制,但相对于叶宽来说,植株的叶长优先实现了增长,以利于其迅速获得更有利的光照条件进行光合作用。第 15 天时,在浊度 ≥ 60 NTU) 的水体中新株叶片和老株新叶的生长均略快于对照,表明在低光照条件下略有利于苦草叶片的伸长,但差异并不显著,这与陈开宁等^[14]的研究结果相似。其次,相对于克隆新株的生成,优先增加了老植株的叶片数目,促进了叶长的增长,以迅速增加植株的光合作用面积;并且新株叶片的形成虽然受到一定程度的抑制,其叶片的生长却受到了促进,以利于其获得有利的光照条件。第三,苦草克隆新株的形成虽然受到显著的抑制,但其生成也是植株逃避逆境伤害的一种手段。陈开宁等^[14]研究发现,苦草分配于有性繁殖部分的生物量较无性的大,但每年种群主要来自地下块茎和匍匐茎。本文研究发现苦草植株处于高浊度低光逆境时,植株仍将部分物质用于新株和匍匐茎的形

图 1 苦草 F_v/F_m 值Fig. 1 F_v/F_m of *V. asiatica*

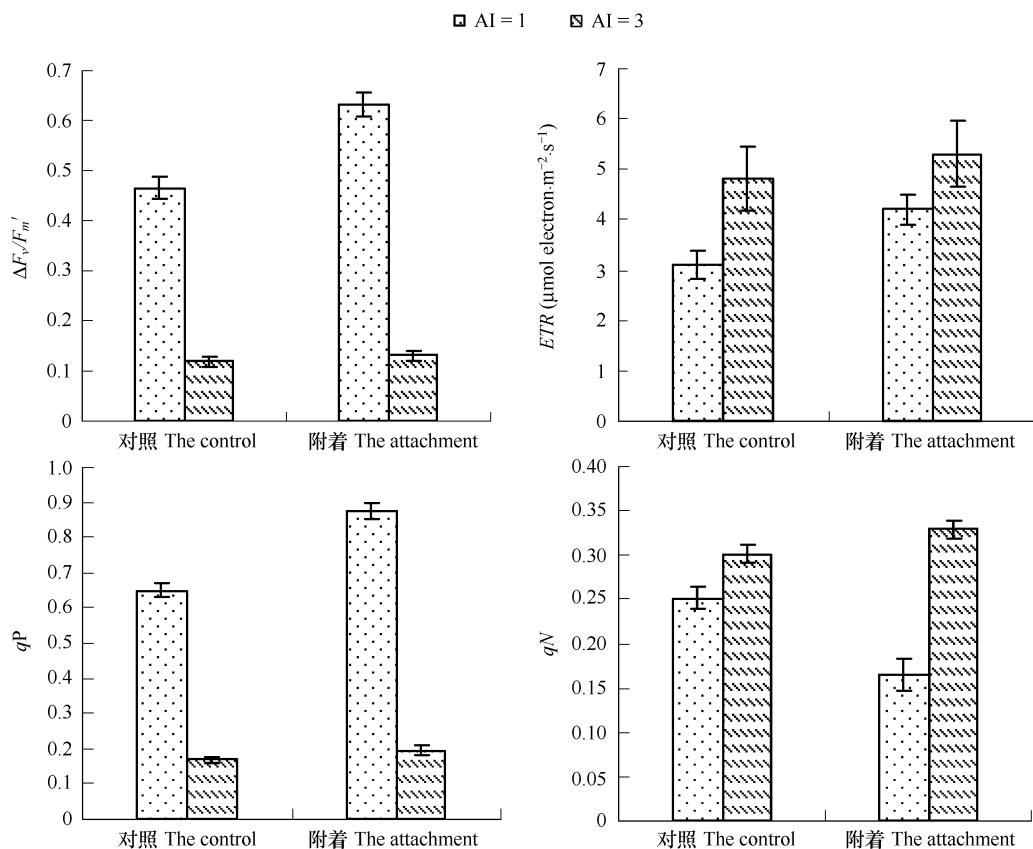
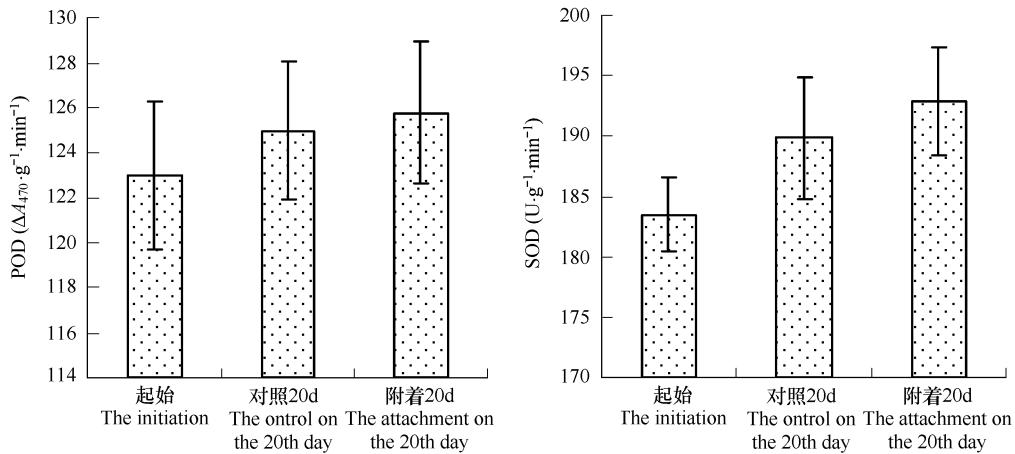
图2 第20天时苦草的 $\Delta F'_v/F'_m$ 、qN、qP 和 ETR 值Fig. 2 $\Delta F'_v/F'_m$ 、qN、qP and ETR of *V. asiatica* on the 20th day

图3 对照和附着叶片的 POD 和 SOD 活性变化

Fig. 3 Varies of superoxide and peroxide's activitie of the control and attached leaves

成,一方面可以通过扩大生存环境,以求逃离不利环境,另一方面也可能是为了以后的无性繁殖做准备,以避免种群的灭绝。

苦草是一种叶基生型的植物,其地上部分为叶,是植株的光合器官。低光照对叶片下部光合作用的影响必然会影响整个植株的生长发育,这种影响首先在植株的幼嫩部分体现出来。王文林等^[15]研究发现,第30天时亚洲苦草幼苗的生物量在高浊度水体中存在显著降低的现象。本文研究发现,第40天后叶片上部颜色

变淡、发黄,至第 60 天时在 60NTU~120NTU 水体中大部分叶片发生了腐烂。因而高浊度的水体不利于苦草幼苗的生长发育,时间过长会导致植株生长发育受到显著的抑制,甚至导致地上部分叶片完全腐烂(视为死亡);在浅(水深约 60cm)而浑浊的水体中,其适宜的生长发育浊度 <60NTU,≤30NTU 有利于植株的生长。

泥沙附着对苦草叶片光合作用的影响:在苦草生长阶段其叶片上泥沙附着量较小,但当其开花、衰老时叶片上的泥沙附着量会逐渐增加;开花 20d 后泥沙附着量显著增加。在实验用光化光条件下附着叶片的实际光化学效率、光化学荧光淬灭系数和电子传递速率均显著高于对照,叶片吸收的光能更多的参与了光化学反应,合成更多的光合产物。表明在低浓度泥沙水体中泥沙附着有利于苦草叶片 PS II 免受秋季高光照的伤害,从而减缓苦草叶片光合功能的衰减,有利于植株繁殖体的形成和发育。这与藻类的附着存在显著的差异,李强等^[4]在水网藻附着苦草叶片的实验中,发现水网藻附着苦草叶片后导致叶片 F_v/F_m 、有效荧光产量、光化学淬灭系数、相对光合电子传递速率和光响应能力显著下降。藻类附着和泥沙附着苦草叶片的差异可能与藻类对营养物质的竞争和他感物质的释放有关。

泥沙附着对苦草叶片抗氧化酶活性的影响:自由基伤害学说认为,当植物衰老特别是处于逆境的条件下,植物细胞内活性氧的产生和清除的平衡受到破坏,自由基增加,引发和加剧细胞膜脂过氧化。植物细胞内活性氧自由基清除的方式是多样的。SOD 是植物体内清除活性氧系统的第一道防线,在活性氧的清除系统中发挥着特别重要的作用,处于保护系统的核心位置,其主要功能是清除 O_2^- ,并产生 H_2O_2 ^[16];而 POD 则主要通过催化 H_2O_2 或其他过氧化物来氧化多种底物^[17]。泥沙附着苦草叶片后,SOD 酶和 POD 酶活性有所增加,以清除过多的 O_2^- ;但是,第 20 天时附着叶片的 SOD 酶和 POD 酶活性与对照的差异不显著,表明泥沙附着苦草叶片 20d 后,叶片 O_2^- 含量无显著增加,泥沙附着没有显著加速叶片的衰老。

浑浊水体中苦草植株的引种:不同发育阶段的沉水植物对浑浊水体的耐受能力是不一样的,相对于幼苗来说,成株能够生长于更深的浑浊泥沙水体中,这与其主要的光合器官——叶片能够获得更多的光照有关。叶基生的苦草成株,其叶片下部光合色素含量低,多为白色体,中上部才是其光合作用的主要部位,这种特征也有利于苦草植株生长于光照条件较差的环境。徐瑶等^[18]的研究发现,在≤90NTU 的浑浊泥沙水体(水深≤1.5m)中水下光照强度的降低有利于苦草避免受到夏季强光的抑制,光伤害减小。本文的研究表明,在泥沙含量较高的浑浊水体中,不适宜引种苦草的幼苗(冬芽萌发形成),但可酌情引种苦草的成株;当水体泥沙含量降低到一定程度时(浊度≤30NTU),在浅水中水体泥沙对苦草幼苗的生长发育无显著影响,可以引种。

此外,苦草不同繁殖体萌发形成的幼苗对逆境的耐受能力也有较大的差异。本文由冬芽萌发得到的幼苗对浑浊泥沙水体的耐受能力显著强于由种子萌发形成的幼苗^[15];且作者也发现引种苦草根状茎得到的幼苗,对浑浊泥沙水体逆境的耐受能力较强,这可能主要与根状茎、冬芽和种子中营养物质的储存量差异显著,幼苗强壮程度存在显著差异有关。

References:

- [1] 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: 19.
- [2] Sabine K, Andreas N. Allelopathic growth inhibition of selected phytoplankton species by submerged macrophytes. *Journal of Phycology*, 2002, 38: 862—871.
- [3] 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.
- [4] Li Q, Wang G X, Ma T, et al. Changes of photosynthetic characters of *Vallisneria asiatica* adhered by *Hydrodictyon reticulatum*. *J. Lake Sci.*, 2007, 19(3): 316—321.
- [5] 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.
- [6] Li Q, Wang G X, Pan G Q, et al. Influence of water turbidity on germination of *Potamogeton crispus* and growth of germinated seedling. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3594—6001.

- [7] Li Q, Wang G X, Wang W L, et al. The influence of suspended sands to *Myriophyllum spicatum* L.'s Photosynthetic fluorescence characteristics in turbid waters. *J. Lake Sci.*, 2007, 19(2) : 197 – 203.
- [8] Ma T, Li Q, Wang G X, et al. Influence of Suspended Sands on Rapid Light Curves of *Ceratophyllum demersum* in Turbid Solution. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2006, 24(6) : 531 – 535.
- [9] Han M S, Yao S C, Gu B Y, et al. Aquatic Vascular Plants. In: Shandong Aquatic school eds. *Freshwater Biology*. Beijing: Agriculture Press, 1979. 197.
- [10] Li W C, Lian G H. Light demand for brood-bud germination of submerged plant. *Journal of Lake Sciences*, 1996, 6(Suppl. 8) : 25 – 29.
- [11] Tang Z M, He Z G, Han Y M. The Measurement on Suspended Sediment Concentration. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2003, 42(Suppl. 2) : 244 – 247.
- [12] Giannopolitis S, Ries S K. Superoxide dismutase: Occurrence in higher plants. *Plant Physiol*, 1977, 59 : 309 – 314.
- [13] Kochba J, Lavee S, Spiege R P. Difference in peroxidase activity and isoenzymes in embryogenic and nonembryogenic 'Shamouti' orange ovular callus lines. *Plant Cell Physiology*, 1977, 18 : 463 – 467.
- [14] Chen K N, Lan C J, Shi Xin, et al. Reproductive ecology of *Vallisneria natans*. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(3) : 487 – 495.
- [15] Wang W L, Wang G X, Li Q, et al. Influence of suspended substance on growth of the seedlings of *Vallisneria Asiatica* Amiki L. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(4) : 460 – 466.
- [16] Wang A G, Fang Y Z, Chong J B, et al. Oxygen Free Radicals of Botany. In: Sun C P, Zhang J Z, Dun S J eds. *Free Radical Biology*. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999. 172 – 175.
- [17] Yuan Q S, Zhao J, Li W J, et al. Oxygen free radicals an Enzyme. In: Yuan Q S ed. *Modern enzymology*. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2001. 322 – 325.
- [18] Xu Y, Wang G X, Li Q. The Influences of Suspended Sands on Photosynthetic Fluorescence Characteristics of *Vallisneria natans* in Turbidity Waters. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2007, 25(1) : 70 – 74.

参考文献:

- [4] 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. *湖泊科学*, 2007, 19(3) : 315 ~ 320.
- [6] 李强, 王国祥, 潘国权, 等. 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.
- [7] 李强, 王国祥, 王文林, 等. 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.
- [8] 马婷, 李强, 王国祥, 等. 悬浮泥沙水体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.
- [9] 韩茂森, 姚善成, 顾宝瑛, 等. 水生维管束植物. 见: 山东省水产学校主编. *淡水生物学*, 北京: 农业出版社, 1979. 197.
- [10] 李文朝, 连光华. 几种沉水植物营养繁殖体萌发的光需求研究. *湖泊科学*, 1996, 6(增刊8) : 25 ~ 29.
- [11] 唐兆民, 何志刚, 韩玉梅. 悬浮泥沙浓度的测量. *中山大学学报(自然科学版)*, 2003, 42(增刊2) : 244 ~ 247.
- [14] 陈开宁, 兰策介, 史龙新, 等. 苦草繁殖生态学研究. *植物生态学报*, 2006, 30(3) : 487 ~ 495.
- [15] 王文林, 王国祥, 李强, 等. 悬浮泥沙对亚洲苦草幼苗生长发育的影响. *水生生物学报*, 2007, 31(4) : 460 ~ 466.
- [16] 王爱国, 方允中, 丛建波, 等. 植物学中的氧自由基. 见: 孙存普, 张建中, 段绍瑾主编. *自由基生物学*. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999. 172 ~ 175
- [17] 袁勤生, 赵建, 李文杰, 等. 氧自由基与酶. 见: 袁勤生主编. *现代酶学*. 上海: 华东理工大学出版社, 2001. 322 ~ 325.
- [18] 徐瑶, 王国祥, 李强. 水体浊度对苦草光合荧光特性的影响. *武汉植物学研究*, 2007, 25(1) : 70 ~ 74.