

石菖蒲叶绿素荧光特性对淹水胁迫的响应*

朱启红 夏红霞 谢海航 李强 丁武泉

(重庆文理学院水环境修复重点实验室 重庆 402168)

提要 通过淹水胁迫实验, 定期测定石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)植株叶片叶绿素、丙二醛含量, 并利用水下饱和脉冲荧光仪测定石菖蒲叶片叶绿素荧光参数, 研究淹水胁迫对石菖蒲叶绿素荧光特性的影响。实验结果显示: 与对照相比, 半淹处理组植株叶绿素、初始荧光(F_0)、最大光能转换效率(F_v/F_m)、光化学淬灭系数(qP)、相对光合电子传递速率(rETR)均高于对照, 分别为对照的 108.1%、102.4%、110.2%、103.4%、103.5%; 全淹处理组植株丙二醛含量显著增加, 而其叶绿素、 F_0 、 F_v/F_m 、qP、rETR 均低于对照, 且叶绿素、 F_v/F_m 和 qP 显著降低, 分别为对照的 92.2%、85.4%、87.4%。所以, 石菖蒲具有一定的抗淹能力, 半淹利于石菖蒲的光合作用, 但全淹显著抑制其光合作用。

关键词 叶绿素荧光; 淹水; 胁迫; 石菖蒲

中图分类号 Q178.51

人工构造湿地作为一种生态化污水处理技术, 具有出水水质稳定、基建和运行费用低、技术含量低、维护管理方便、耐冲击负荷强和具有美学价值等优点, 在世界范围内得到了迅速发展(付融冰等, 2005)。植物是湿地结构和功能完整性的核心物质, 在湿地系统中起关键作用(祝宇慧等, 2009)。作为湿地生态系统的初级生产者, 湿地植物提供了系统中次级生产者和消费者所需的物质和能量, 是系统内物质循环和能量流动的重要生物要素, 维持着生态系统的正常运转(柏祥等, 2011)。湿地水位波动是控制湿地特征的关键因子, 是影响湿地系统植物群落生存和发展的主导因子(陈芳清等, 2008)。在淹水条件下, 过多的水分阻碍了植物与大气环境间的气体交换, 降低了水和土壤中氧气的溶解度, 造成植物受淹组织缺氧(刘鹏等, 2008; 胡秋香等, 2010), 影响湿地系统的组成与结构, 进而影响湿地系统净化能力。因此, 研究水位波动对湿地植物的影响对于湿地植被恢复以及湿地生态系统的构建具有重要意义。

植物叶绿素荧光分析技术是近年发展起来的用于光合作用机理研究和光合生理状况检测的一种新

技术。与一些“表现性”的气体交换指标相比, 叶绿素荧光参数更具有反映“内在性”的特点, 而且具有快速、灵敏、无损伤等优点, 因而被视为研究植物光合作用与环境关系的内在探针(吴甘霖等, 2010), 现已成为植物生理学家和生态生理学家用来监测环境胁迫对植物光合作用影响的新技术之一(袁琳等, 2010)。

石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)是天南星科菖蒲属的多年生挺水植物, 具有湿地植物所必须的耐污力强、去污率高、根系发达、抗病虫害能力强、适应能力强、具备美观和经济价值等优点, 因而被广泛用于构建湿地系统(胡秋香等, 2010)。祝宇慧等(2009)研究发现石菖蒲对废水中铵氮($\text{NH}_4\text{-N}$)和总磷(TP)的去除率分别达到 90.52%和 92.89%, 地上地下生物量比(A/U)可达到 3.23(柏祥等, 2011), 由此可见, 石菖蒲对富营养化水体具有较好的净化效果, 是较理想的湿地植物。但有关水位波动对石菖蒲生长影响方面的研究较少, 特别是石菖蒲叶片叶绿素荧光参数对不同水深的适应性研究还鲜有报道。为此, 本文以石菖蒲为对象, 研究了石菖蒲叶片叶绿素含量、丙二醛(MDA)含量、叶绿素荧光参数等 3 种水深梯度的响应差异, 以期为

*重庆市自然科学基金资助项目, CSTC2011JJA1236 号; 重庆市教委资助项目, KJ121215 号。朱启红, E-mail: zhuqh05@163.com

通讯作者: 夏红霞, E-mail: 287670325@qq.com

收稿日期: 2012-08-17, 收修改稿日期: 2012-11-05

石菖蒲植被修复提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

石菖蒲属菖蒲科,为禾草状的多年生草本植物,根茎横卧,芳香,具多数须根,根茎上部分枝甚密,因而植株成丛生状。叶全缘,排成二列,佛焰苞叶状。根茎常作药用。

将采集到的石菖蒲种植于花盆中(20cm×15cm×12cm),每盆6株。自然光照条件下生长3周,淹水试验开始时植株叶长(42.0±7.6)cm。

1.2 试验体系构建

淹水试验体系由可控水箱(2.0m×0.6m×0.7m)、植物实验系统和管道构成,实验用水为自来水。试验时每一水箱放置3盆石菖蒲植株,利用水箱开关调节水箱水深。试验设计半淹(淹过株高一半)(处理1)和全淹(淹没整个植株)处理(处理2),以不淹水(表面水淹0cm)为对照(CK)。自淹水之日起,每7天测一次植株叶片叶绿素含量、丙二醛以及叶片快速光响应曲线。为避免自然降水的影响,整个试验处理过程中在降水天气用透明塑料薄膜遮挡。每一处理均重复三次,取其平均值用于统计分析。石菖蒲于2012年3月1日种植于花盆,3月22日开始进水调节水位,4月12日结束。

1.3 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9:00—10:00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15min后,打开叶夹,开启检测光(0.5μmol/(m²·s))得到 F_0 ,再由饱和脉冲光(4000 μmol/(m²·s),0.8s)测得 F_m ,然后开启光化光测定荧光参数值 F_t 、 F_m' (Ralph *et al.*, 1998)。 $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$,光化学淬灭系数(qP) = $(F_m' - F_t)/(F_m' - F_0)$,相对光合电子传递速率(rETR) = $\Delta F_v'/F_m' \times PAR \times 0.84 \times 0.5$ (Schreiber *et al.*, 1997)。

叶绿素采用丙酮浸提法测定;丙二醛含量测定参照硫代巴比妥酸法(张志良,2000)。

1.4 数据分析

采用SPSS软件对实验数据进行统计分析,并用LSD法进行差异显著性分析,显著性检验水平均设置为0.05。

2 实验结果与分析

2.1 石菖蒲生理特性的差异

试验研究表明,试验期间对照组的植株叶绿素、丙二醛、初始荧光(F_0)、最大光能转换效率(F_v/F_m)、光化学淬灭系数(qP)、相对光合电子传递速率(rETR)等均相对稳定,而淹水处理植株叶片叶绿素、丙二醛、 F_0 、 F_v/F_m 、qP、rETR发生明显变化。与对照处理相比,半淹处理植株中初始荧光(F_0)、光合电子传递速率(ETR)差异显著($P < 0.05$),丙二醛、叶绿素、最大光化学效率(F_v/F_m)、光化学淬灭系数(qP)差异不显著($P > 0.05$),半淹处理植株 F_0 、 F_v/F_m 、qP、rETR均高于对照处理。全淹处理植株与对照相比,丙二醛、叶绿素、最大光化学效率(F_v/F_m)、光化学淬灭系数(qP)差异均达到显著水平($P < 0.05$), F_0 与rETR差异不显著;全淹处理与半淹处理间各指标均达到显著水平($P < 0.05$)。由此可见,淹水环境对石菖蒲叶绿素、丙二醛、叶绿素荧光特性等生理指标均产生影响。

2.2 淹水胁迫下对叶绿素含量的影响

光合作用是植物生长的原动力,任何影响植物生长的因素必然影响光合过程。叶绿素是植物进行光合作用的色素,叶绿素含量高低在一定程度上反映了光合作用水平。叶绿素含量低,光合作用弱,会导致植物鲜重降低,使植物不能正常新陈代谢(刘建武等,2002)。由图1可以看出,不同程度的淹水胁迫对菖蒲叶片叶绿素含量影响显著。在半淹胁迫下,植株叶绿素含量明显高于对照处理和全淹处理,并有随胁迫时间延长叶绿素含量逐渐上升的趋势;但在全淹胁迫下的菖蒲叶片叶绿素含量下降明显,并随胁

表1 不同水深条件下石菖蒲生理参数差异

Tab.1 Difference in physiological parameters of *Acorus tatarinowii* in different water depths

	丙二醛 (μmol/g)	叶绿素 (mg/g FW)	初始荧光 (F_0)	最大光化学效率 (F_v/F_m)	光化学淬灭系数 (qP)	光合电子传递速率 (rETR)
对照组	0.095±0.0054 ^a	61.35±1.10 ^a	214.15±2.49 ^a	0.81±0.013 ^a	0.66±0.017 ^a	34.49±0.24 ^a
半淹组	0.115±0.021 ^a	66.32±4.43 ^a	219.22±2.35 ^b	0.89±0.067 ^a	0.68±0.037 ^a	35.68±0.82 ^b
全淹组	0.150±0.057 ^b	56.6±3.06 ^b	200.52±14.79 ^a	0.69±0.062 ^b	0.575±0.039 ^b	33.09±1.45 ^a

表中 a, b 的不同表示同一品种不同处理在 0.05 水平差异显著

胁迫时间延长, 叶绿素含量逐渐下降; 而对照植株叶绿素含量基本不变。试验结果显示, 半淹下植株叶绿素比对照组增加 8.1%; 而全淹下比对照组下降 7.7%, 差异显著($P < 0.05$)。

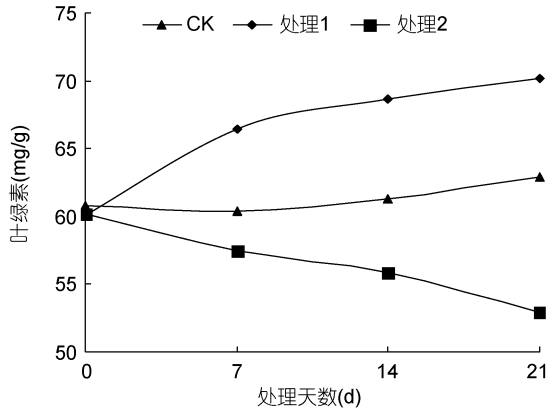


图 1 石菖蒲在淹水胁迫下叶绿素的变化

Fig.1 Changes of chlorophyll content under flooding stress

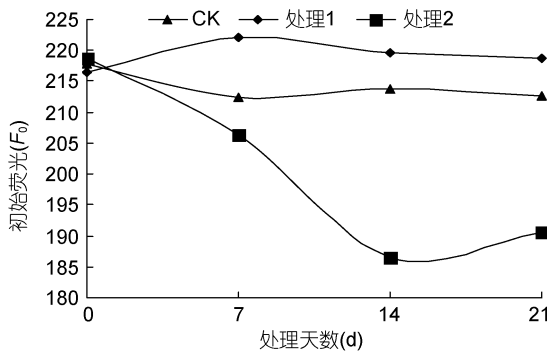


图 2 石菖蒲在淹水胁迫下 F_0 的变化

Fig.2 Changes of F_0 under flooding stress

2.3 淹水胁迫下对叶绿素荧光参数的影响

初始荧光(F_0)是 PSII 反应中心全部开放即原初电子受体 Q_A 全部氧化时的荧光水平, PSII 天线色素的热耗散常导致 F_0 降低, 而反应中心的破坏或可逆失活则可引起 F_0 增加(Demmig *et al*, 1987; 宋莉英等, 2009)。实验结果显示, 随着淹水胁迫时间延长, 半淹和全淹下菖蒲的初始荧光(F_0)值均有明显变化。全淹处理植株 F_0 呈现出先下降后上升的变化趋势, 在淹水胁迫处理 14d 时 F_0 最低, 此后略有增加, 但整个处理过程均低于对照处理和半淹处理。半淹处理植株 F_0 随处理时间先升高后降低, 在整个处理过程中均高于对照处理。

F_v/F_m 可反映 PSII 反应中心捕获激发能的效率与利用能力, 是植物 PSII 受伤害程度的重要指标。在非

胁迫条件下, 植物叶片的 F_v/F_m 比较恒定, 不受物种和生长条件的影响(钱永强等, 2011)。由图 3 可知, 随着水分胁迫时间的延长, 对照组 F_v/F_m 基本不变, 即在非环境胁迫条件下该参数极少变化。淹水胁迫处理植株 F_v/F_m 则发生明显变化, 全淹处理植株呈现出随胁迫时间延长 F_v/F_m 下降趋势, 并低于对照植株; 而半淹胁迫植株 F_v/F_m 逐渐增加, 并高于对照处理植株。

光化学淬灭系数(qP)表示 PSII 天线色素吸收的光能用于光化学电子转递的份额, PSII 反应中心所处状态决定着光化学淬灭系数, 同时光化学淬灭又在一定程度上反映了 PSII 反应中心的开放程度, 其值越大, 说明 PSII 具有越高的电子传递活性(赵丽英等, 2007)。由图 4 可知, 在半淹胁迫植株 qP 随胁迫时间延长先上升后下降, 在胁迫 7d 时最高, 此后略有下降, 但在整个胁迫期间均高于对照处理; 而全淹胁迫植株 qP 则持续降低, 并低于对照处理和半淹处理。这表明在不同水胁迫下的 PSII 反应中心电子传递活性受到了不同程度的影响, 全淹处理已影响石菖蒲叶片的光合作用, 制约植株生长。

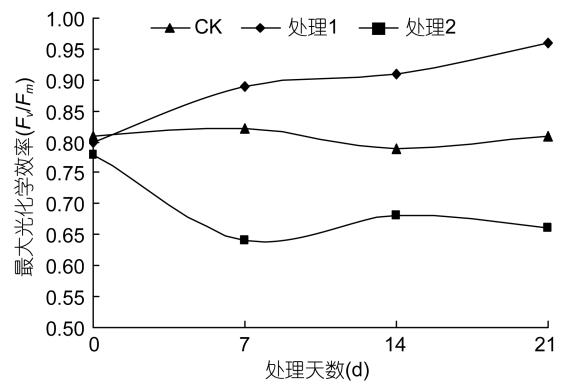


图 3 石菖蒲在淹水胁迫下 F_v/F_m 的变化

Fig.3 Changes of F_v/F_m under flooding stress

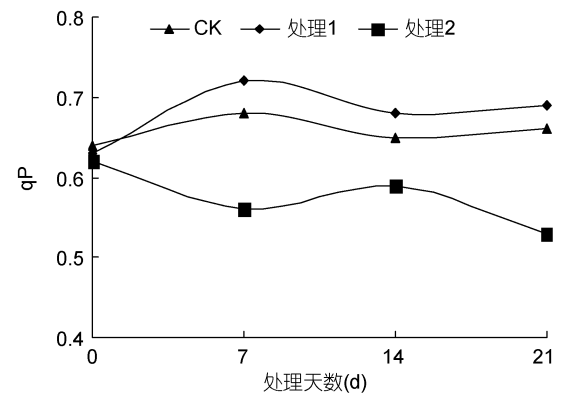


图 4 石菖蒲在淹水胁迫下 qP 的变化

Fig.4 Changes of qP under flooding stress

rETR 表示相对光合电子传递速率,代表光合电子传递的能力,这种能力依赖于生理状况和环境因素,同时也能更好地反映在不同环境下生理状况的变化(舒明玉等,2007¹⁾)。另外,rETR 也反映了 PSII 的活性与植物的光合速率有很强的线性关系(刘建武等,2002)。由图 5 可知,菖蒲在半淹水胁迫下 rETR 均高于对照组和全淹处理,在胁迫后期 rETR 趋于稳定;全淹下菖蒲在胁迫期间 rETR 有明显的下降,对照组植株 rETR 相对稳定,这表明在水分胁迫下抑制了菖蒲光合电子传递,不同胁迫程度影响石菖蒲光合电子的传递速度。

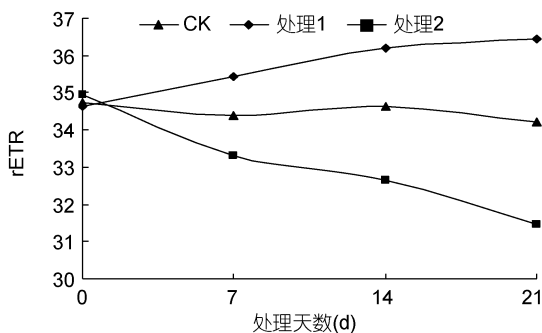


图 5 石菖蒲在淹水胁迫下 rETR 的变化
Fig.5 Changes of rETR under flooding stress

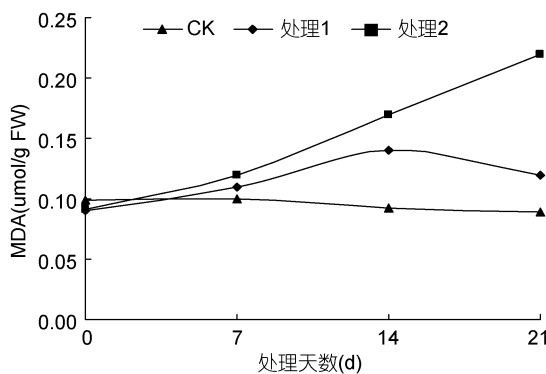


图 6 石菖蒲在淹水胁迫下 MDA 的变化
Fig.6 Changes of MDA under flooding stress

2.4 淹水胁迫对 MDA 合成的影响

MDA 是膜植物细胞脂过氧化产物之一,其含量的高低可以反映逆境胁迫下植物伤害程度的大小,是膜脂过氧化程度的重要标志(李玉琴等,2011)。由图 6 可见,在淹水胁迫 7d 时,半淹、全淹条件下菖蒲叶片 MDA 含量均缓慢增加;菖蒲在淹水胁迫 14d 时,

MDA 含量明显高于对照处理。但在试验 21d 时,半淹处理石菖蒲叶片中 MDA 含量下降;而全淹条件下 MDA 含量仍然呈上升趋势,全淹条件下 MDA 含量比对照组提高了 73.9%,差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 淹水胁迫对石菖蒲光合色素合成的影响

光合作用中,叶绿素是截获光能的主要色素,是植物进行光合作用的最重要器官(张玉等,2009),叶绿素含量的多少直接影响植物的生长发育。淹水环境所带来的低氧和低光照条件易导致土壤中氧气和光照的不足,强化植物根系的厌氧呼吸(刘鹏等,2008),导致乙醇、乙醛等对植物有害物不断积累,从而在电子传递水平上干扰植物正常的呼吸作用,产生“糖饥饿现象”(李玉琴等,2011),降低植株叶绿素含量。李娟娟等(2012)研究表明,在淹水胁迫下丁香体内叶绿素均会受到不同程度的破坏,使其含量降低。李萍萍等(2006)研究发现,景观牧草耐淹涝能力越强,其叶绿素含量下降的幅度越小。肖强等(2005)研究发现,持续的淹涝胁迫可导致植物叶片中叶绿素含量明显降低。韩亮亮等(2011)研究发现,大豆淹水 10d 后植株叶片色素含量降低。袁连奇(2010)也研究发现,持续淹水明显影响了互花米草叶片中叶绿素的合成,致使高水位淹水胁迫下植株的叶绿素含量仅为同期对照组的 10%左右。本实验结果表明,半淹胁迫下石菖蒲叶绿素含量逐渐增加,明显高于对照处理植株。这说明半淹胁迫对石菖蒲叶片叶绿素的合成有一定的促进作用,这可能是由于石菖蒲在逆境胁迫下需要消耗更多的能量,因此通过提高叶片叶绿素含量促进光合作用产物的积累,以适应逆境的另一种生理反应。全淹胁迫导致叶绿素含量显著低于对照,这说明全淹处理抑制了植株叶绿素的合成,致使石菖蒲植株叶绿素含量显著降低。此时,植株外部形态将发生明显变化。李强等(2011)将菖蒲在含泥沙水体中淹水 8 个月,石菖蒲的外部形态和光合生理特征均发生了显著变化,植株对淹水逆境作出了适应策略。具体表现为淹水处理植株株数、总叶片数多于对照,植株分株更明显。李睿华等(2007)对美人蕉在 10—30cm 水深条件下的生长差异研究表明,随着水深增加其株高逐渐减小。韩玉林等(2006)研究也发现,黄菖蒲

1) 舒明玉,2007. 水分和播种方式对小扁豆生化特性、叶绿素荧光参数及光合作用的影响. 陕西杨凌:西北农林科技大学硕士论文

株高先增加后减小, 30cm 水深为株高变化的转折点。本实验中半淹胁迫处理植株分株并不显著, 植株叶片宽度等变化也不显著, 但半淹处理植株株高较对照植株高, 叶片颜色更鲜嫩; 而全淹处理每株已有 1—2 个分蘖, 植株叶片较半淹处理和对照处理短, 但总叶片数较多, 这与李强等(李强, 2011)的研究结果一致。实验结果表明, 在全淹条件下石菖蒲可通过分株, 增加植株株数和叶面积来增加光合作用面积, 从而避免全淹胁迫的伤害。半淹处理植株生长势头好于对照植株, 这可能与石菖蒲自身的挺水特性有关——一定程度的水淹条件更有利于石菖蒲生长。

3.2 淹水胁迫对石菖蒲光合作用的影响

叶片的叶绿素荧光与光合作用密切相关, 是快速、灵敏、无损伤地研究和探测逆境胁迫对植物光合作用影响的理想方法(赵会杰等, 2000), 在植物的光合作用、逆境生理和组织衰老等生理生态学研究方面具有重要作用。叶绿素荧光为研究光系统及其电子传递过程提供了丰富的信息(李强, 2011), 而且与气体交换指标相比, 叶绿素荧光参数更具有反映叶片光合内在性能的特点(朱英华等, 2008; 张雪芹等, 2011)。同时, 叶绿素荧光也经常被用于评价环境胁迫对植物生长的影响(Maxwell *et al.*, 2000; 李耕等, 2009)。当植物受到逆境胁迫时, 各种生理过程受到干扰, 造成水分失衡、膜系统结构破坏、有害代谢产物积累、蛋白质合成下降等后果, 这些均可能影响光合色素的合成(吴甘霖等, 2010), 导致植物光合作用降低。任何逆境对光合作用各过程产生的影响都可通过体内叶绿素荧光诱导动力学变化反映出来(Roháček, 2002)。初始荧光 F_0 是尚未被 PSII 反应中心捕获之前, 由天线叶绿素发射出的基础荧光产量。 F_v/F_m 是最大光化学效率, 反映了 PSII 最大光能转换效率或称最大 PSII 光能转换效率, 被认为是反映光抑制程度的可靠指标(Huynh *et al.*, 2005), 该参数与植物的生长状态呈现高度正相关(Farage *et al.*, 1991)。一般高等植物的 F_v/F_m 值在 0.70—0.85, 多数为 0.83, 低于此值说明植物受到了逆境胁迫(柏祥等, 2011)。袁琳等(2010)研究表明, F_v/F_m 不受物种的影响, 在非胁迫条件下该参数变化极小, 当植物受到环境等条件的胁迫时, F_v/F_m 会显著下降。柏祥等(2011)研究也表明黄菖蒲和美人蕉的 F_v/F_m 均随着水深的增加而降低, 这说明水深的增加加重了植物所受的胁迫程度。叶绿素荧光的光化学淬灭 qP 是 PSII 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 PSII

中心的开放程度和原初电子受体氧化还原程度的度量(Wan *et al.*, 2010; 姜玉萍等, 2012), 其值的大小反映了 PSII 中开放的反应中心比例大小和参与 CO_2 固定的电子的多少。本实验结果显示, 全淹处理植株 F_0 、 F_v/F_m 、qP、rETR 均低于对照处理, 并呈现出随胁迫时间延长逐渐降低的趋势, 这说明全淹胁迫导致石菖蒲叶片光合电子传递速率下降, 从天线色素上捕获的光能用于光化学反应的份额减少, PSII 反应中心的光化学活性变弱, 光能转化效率和潜在活性降低, 进而影响植株的正常光合作用(Wan *et al.*, 2010)。全淹处理植株 F_v/F_m 在胁迫 7d 后有一定增加, 这仅能说明石菖蒲通过适应性调节, 光合电子链的传递速率得到一定程度的恢复(钱永强等, 2011), 但石菖蒲光合作用仍受到淹水抑制, 这与罗俊等人(2000)研究水分胁迫下蔗叶的变化相同。曹福亮等(2010)也研究表明, 淹水胁迫下乌桕种源苗高和地径生长及总生物量均受到明显的抑制, 植株叶片光合作用降低。张雪芹等(2011)研究也表明, 淹水降低了番木瓜叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和 PSII 有效光化学量子产量、光合电子传递速率和光化学荧光淬灭系数, 影响了植株叶绿素荧光诱导曲线。在淹水试验过程中, 半淹处理植株 F_0 、 F_v/F_m 、qP、rETR 均大于对照, 植株叶片 F_v/F_m 、rETR 并呈现出随淹水时间延长逐渐增加的趋势。这说明半淹处理利于石菖蒲光合电子链的传递, 石菖蒲可通过提高光化学转化与光能利用效率来适应淹水逆境, 通过积累叶绿素含量增强抗淹能力——这与半淹处理植株叶绿素含量变化情况一致。

3.3 淹水胁迫对石菖蒲过氧化耐受能力的影响

丙二醛(MDA)是膜脂过氧化最重要的产物之一, 能与膜结构上的蛋白质和酶结合、交联而使之失去活性(王瑞等, 2012), 影响植物生长。因此, MDA 含量可反映膜脂过氧化程度, 以了解膜系统受损程度以及植物的抗逆性。张永峰等(2009)研究也表明, 在逆境下植物叶片丙二醛含量增加, 其含量高低可表示细胞膜脂过氧化程度的大小和植物对逆境条件耐受的强弱(杨鹏等, 2012)。王瑞等(2012)研究也表明, 在逆境下植物叶片丙二醛含量增加, 增幅小的品种对逆境忍耐性强, 相反则忍耐性低。本试验结果表明, 全淹处理植株叶片 MDA 含量随处理时间延长而持续增加; 半淹处理植株 MDA 则先增加后降低。这说明石菖蒲能适应半淹环境, 植株生长过程中产生的超氧自由基等能够得到及时清除, 半淹胁迫对石菖蒲没

有产生伤害。而全淹胁迫下石菖蒲产生了大量的自由基,以至于保护酶系统不能够彻底清除,使得植株生长受到毒害作用。

4 结论

淹水胁迫将影响植物叶绿素荧光特性,而不同的植物则表现出不同的适应能力(Wan *et al.*, 2010; 姜玉萍等, 2012)。本实验选取已广泛用于湿地系统的石菖蒲作为研究材料, 研究结果证实石菖蒲对淹水胁迫表现出一定的适应策略。半淹处理可提高植株叶绿素、 F_0 、 F_v/F_m 、 qP 、 $rETR$ 的大小, 促进植株生长; 全淹处理则显著增加植株 MDA 含量($P < 0.05$), 导致植株叶绿素、 F_0 、 F_v/F_m 、 qP 、 $rETR$ 均低于对照处理。由此可见, 适宜的水位高度利于石菖蒲的光合作用, 可促进其生长, 这对于构建湿地植物系统具有重要意义。因此, 可根据湿地系统水位波动情况合理选择石菖蒲种植地点, 构建湿地挺水植物群, 但须避免水位超过植株株高 1/2 处, 进而影响石菖蒲生长。

参 考 文 献

- 王瑞, 梁坤伦, 周志宇等, 2012. 不同淹水梯度对紫穗槐的营养生长和生理响应. 草业学报, 21(1): 149—156
- 古志钦, 张利权, 2009. 互花米草对持续淹水胁迫的生理响应. 环境科学学报, 29(4): 876—881
- 付融冰, 杨海真, 顾国维等, 2005. 人工湿地基质微生物状况与净化效果相关分析. 环境科学研究, 18(6): 44—49
- 朱英华, 屠乃美, 肖汉乾等, 2008. 硫对烟草叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响. 生态学报, 28(3): 1000—1005
- 刘建武, 林逢凯, 王郁等, 2002. 多环芳烃(萘)污染对水生植物生理指标的影响. 华东理工大学学报, 5(20): 520—525
- 刘鹏, 俞慧娜, 张晓斌等, 2008. 几种水生观赏植物对城市污水的生理响应. 水土保持学报, 22(4): 163—168
- 李玉琴, 赵丹丹, 余永芳等, 2011. 磷胁迫对油菜幼苗 POD、CAT 活性的影响. 安徽农业科学, 39(16): 9548—9550
- 李耕, 高辉远, 赵斌等, 2009. 灌浆期干旱胁迫对玉米叶片光合系统活性的影响. 作物学报, 35(10): 1916—1922
- 李娟娟, 许晓妍, 朱文旭等, 2012. 淹水胁迫对丁香叶绿素含量及荧光特性的影响. 经济林研究, 30(2): 43—47
- 李萍萍, 蒋洁, 2006. 不同程度淹水对几种景观牧草光合作用的影响. 江苏农业科技, (4): 180—183
- 李强, 朱启红, 丁武泉等, 2011. 水体泥沙对菖蒲和石菖蒲生长发育的影响. 生态学报, 31(5): 1341—1348
- 李睿华, 管运涛, 何苗等, 2007. 河岸美人蕉和香根草的生长繁育及其腐烂规律. 生态学杂志, 26(3): 338—343
- 杨鹏, 胥晓, 2012. 淹水胁迫对青杨雌雄幼苗生理特性和生长的影响. 植物生态学报, 36(1): 81—87
- 肖强, 郑海雷, 叶文景等, 2005. 水淹对互花米草生长及生理的影响. 生态学杂志, 24(9): 1025—1028
- 吴甘霖, 段仁燕, 王志高等, 2010. 干旱和复水对草莓叶片叶绿素荧光特性的影响. 生态学报, 30(14): 3941—3946
- 宋莉英, 孙兰兰, 舒展等, 2009. 干旱和复水对入侵植物三裂叶蟛蜞菊叶片叶绿素荧光特性的影响. 生态学报, 29(7): 3713—3721
- 张玉, 芦建国, 廖勇, 2009. NaCl 胁迫对花菖蒲叶片生长及几种生理指标的影响. 安徽农业科学, 27(23): 10976—10978
- 张永峰, 殷波, 2009. 混合盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿抗氧化酶活性剂丙二醛含量的影响. 草业学报, 18(1): 46—50
- 张志良, 2000. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 340
- 张雪芹, 谢志南, 欧阳海波等, 2011. 淹水对番木瓜光合和叶绿素荧光特性的影响. 中国南方果树, 40(3): 29—32
- 陈芳清, 李永, 鄱光武等, 2008. 水蓼对水淹胁迫的耐受能力和形态学响应. 武汉植物学研究, 26(2): 142—146
- 罗俊, 林彦铨, 吕建林等, 2000. 水分胁迫对甘蔗叶片光合性能的影响. 中国农业科学, 33(4): 100—102
- 赵会杰, 邹琦, 于振文, 2000. 叶绿素荧光分析技术及其在植物光合机理研究中的应用. 河南农业大学学报, 34(3): 248—251
- 赵丽英, 邓西平, 山仑, 2007. 不同水分处理下冬小麦旗叶绿素荧光参数的变化研究. 中国生态农业学报, 15(1): 63—66
- 胡秋香, 赵永军, 任丽君等, 2010. 潜流型菖蒲人工湿地不同 C/N 对污染物的去除效率. 生态学杂志, 29(3): 473—478
- 柏祥, 陈开宁, 黄蔚等, 2011. 黄菖蒲和美人蕉对水深梯度的响应差异. 生态学杂, 30(3): 464—470
- 姜玉萍, 丁小涛, 张兆辉等, 2012. 淹水对不同葫芦科作物叶绿素荧光特性的影响. 中国瓜菜, 25(1): 16—19
- 祝宇慧, 赵国智, 李灵香玉等, 2009. 湿地植物对模拟污水的净化能力研究. 农业环境科学学报, 28(1): 166—172
- 袁连奇, 张利权, 2010. 调控淹水对互花米草生理影响的研究. 海洋与湖沼, 41(2): 175—179
- 袁琳, 张利权, 古志钦, 2010. 入侵植物互花米草叶绿素荧光对淹水胁迫的响应. 环境科学学报, 30(4): 886—888
- 钱永强, 周晓星, 韩蕾等, 2011. 3种柳树叶片 PSII 叶绿素荧光参数对 Cd^{2+} 胁迫的光响应. 北京林业大学学报, 33(6): 8—14
- 曹福亮, 蔡金峰, 汪贵斌等, 2010. 淹水胁迫对乌桕生长及光合作用的影响. 林业科学, 46(10): 57—61
- 韩玉林, 仇硕, 夏采意等, 2006. 黄菖蒲适生环境筛选. 植物资源与环境学报, 15(2): 38—41
- 韩亮亮, 周琴, 陈卫平等, 2011. 淹水对大豆生长和产量的影响. 大豆科学, 30(4): 589—596
- Demmig B, Winter K, Krüger A *et al.*, 1987. Photoinhibition and zeaxanthin formation in intact leaves: a possible role of the xanthophyll cycle in the dissipation of excess light energy. Plant Physiology, 84(2): 218—224
- Farage P K, Long S P, 1991. The occurrence of photoinhibition in an over-wintering crop of oil-seed rape (*Brassica napus* L.) and its correlation with changes in crop growth. Planta, 185(2): 279—286

- Huynh L N, Vantoai T, Streeter J *et al*, 2005. Regulation of flooding tolerance of *SAG12: ipt Arabidopsis* plants by cytokinin. *Journal of Experimental Botany*, 56(415): 1397—1407
- Maxwell K, Johnson G N, 2000. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345): 659—668
- Ralph P J, Gademann R, Dennison W C, 1998. In situ seagrass photosynthesis measured using a submersible, pulse-amplitude modulated fluorometer. *Marine Biology*, 132(3): 367—373
- Roháček K, 2002. Chlorophyll fluorescence parameters: The definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships. *Photosynthetica*, 40(1): 13—29
- Schreiber U, Gademann R, Ralph P J, 1997. Assessment of photosynthetic performance of *Prochloron* in *Lissoclinum patella* in hospite by chlorophyll fluorescence measurements. *Plant Cell Physiology*, 38(8): 945—951
- Wan Y L, You Z Y, Han S J *et al*, 2010. Microbial distribution in constructed wetland of *Iris pseudacorus* L. *Agricultural Science & Technology*, 11(9): 26—28, 44

RESPONSE OF *ACORUS TATARINOWII* IN CHLOROPHYLL FLUORESCENCE TO FLOODING STRESS

ZHU Qi-Hong, XIA Hong-Xia, XIE Hai-Hang, LI Qiang, DING Wu-Quan

(Key Laboratory of Water Environment Restoration, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing, 402168)

Abstract We studied the effect of flooding stress on chlorophyll fluorescence responded by *Acorus tatarinowii* in flooding stress experiments, in which three groups were set: un-submerged (the control), half-submerged (water level at half height of the plant), and overall-submerged (the plant was submerged entirely). Chlorophyll and malondialdehyde (MDA) contents were determined regularly, and chlorophyll fluorescence parameters were *in situ* determined by a submersible pulse-amplitude modulated (PAM) fluorometer. Experimental results show that compared to the control, in the half-submerged group, MDA content increased obviously by 21%, and other parameters, i.e., chlorophyll, initial fluorescence (F_0), maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), photochemical quenching coefficient (qP), and relative electron transport rate (rETR) increased by 8.1%, 2.4%, 10.2%, 3.4%, and 3.5%, respectively, while in the overall-submerged group, MDA content increased remarkably by 57%, and others were decreased by 7.7%, 6.4%, 14.8%, 12.8%, and 4.1%, respectively. Therefore, *Acorus tatarinowii* has the tolerance against flooding stress, and half-submergence is good for its photosynthesis, but overall submergence would significantly inhibits the photosynthesis.

Key words chlorophyll fluorescence; flooding stress; *Acorus tatarinowii*.