

# 黄菖蒲和美人蕉对水深梯度的响应差异\*

柏祥<sup>1,2</sup> 陈开宁<sup>1\*\*</sup> 黄蔚<sup>1</sup> 古小治<sup>1</sup> 陈效民<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; <sup>2</sup> 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

**摘要** 通过野外观测研究了黄菖蒲和美人蕉对水深梯度(10、30、50 和 70 cm)的适应性。结果表明:随着水深的增加(1)黄菖蒲和美人蕉的分蘖数显著减少( $P<0.05$ ),但对株高、叶长和叶宽的影响不大;(2)2 种植物叶片的叶绿素含量和根系活力均逐渐降低,叶片的丙二醛含量则逐渐升高,其中美人蕉的叶绿素含量、根系活力和叶片丙二醛含量的差异显著( $P<0.05$ ),而黄菖蒲仅根系活力的差异显著( $P<0.05$ );(3)叶绿素荧光参数中,PS II 的最大光能转换效率( $F_v/F_m$ )、表观电子传递速率( $ETR$ )和光化学淬灭( $qP$ )均呈显著下降的趋势( $P<0.05$ ),非光化学淬灭( $qN$ )则显著增加( $P<0.05$ );相对电子传递速率( $rETR$ )及潜在最大电子传递速率( $rETR_m$ )、对光能的利用效率( $\alpha$ )和对强光的耐受能力( $I_k$ )也都表现出明显的下降;美人蕉在 10 cm 水深条件下各指标均高于黄菖蒲,但在水深较大的条件下总体上低于黄菖蒲。可见,水深较大时对黄菖蒲和美人蕉的生长产生了抑制作用,且对后者的抑制程度要大于前者。因此,在选择黄菖蒲和美人蕉进行湿地植物修复时,应保持浅水条件以利于其生长,其中黄菖蒲适应的水深(30~70 cm)大于美人蕉(10 cm)。

**关键词** 水深梯度;形态生理差异;叶绿素荧光;黄菖蒲;美人蕉

**中图分类号** Q948.8 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)3-0464-07

**Differential response of *Iris pseudacorus* and *Canna indica* to water depth gradient.** BAI Xiang<sup>1,2</sup>, CHEN Kai-ning<sup>1\*\*</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, GU Xiao-zhi<sup>1</sup>, CHEN Xiao-min<sup>2</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; <sup>2</sup>College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(3): 464-470.

**Abstract:** Field investigation was conducted to study the adaptability of *Iris pseudacorus* and *Canna indica* to water depth gradient (10, 30, 50, and 70 cm). It was observed that with the increasing water depth, the tiller numbers of *I. pseudacorus* and *C. indica* decreased significantly ( $P<0.05$ ), but the plant height, leaf length, and leaf width were less affected. Both the chlorophyll content and the root vigor of *I. pseudacorus* and *C. indica* decreased with increasing water depth, while the leaf MDA concentration was in adverse. The chlorophyll content, root vigor, and leaf MDA concentration of *C. indica* differed significantly among different water depths ( $P<0.05$ ), but only the root vigor of *I. pseudacorus* had significant difference ( $P<0.05$ ). Among the chlorophyll fluorescence parameters, the maximal light converting efficiency ( $F_v/F_m$ ), apparent electron transfer rate ( $ETR$ ), and photochemical quenching ( $qP$ ) all decreased significantly with increasing water depth ( $P<0.05$ ), while the non-photochemical quenching ( $qN$ ) had a significant increase ( $P<0.05$ ). The relative electron transfer rate ( $rETR$ ), potential maximal  $rETR$  ( $rETR_m$ ), light use efficiency ( $\alpha$ ), and tolerance to intense light ( $I_k$ ) all decreased obviously with increasing water depth. At water depth 10 cm, the values of all test indices were higher for *C. indica* than for *I. pseudacorus*; but at deeper water depths, an opposite trend was

\* 江苏省科技计划社会发展项目(BE2008690, BE2009603)、国家水专项巢湖项目(2008ZX07103-005-4)和国家科技支撑项目(2006BAC10B03)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: knchen@niglas.ac.cn

收稿日期: 2010-09-27 接受日期: 2010-12-16

observed. It was found that deeper water depth had inhibitive effect on *I. pseudacorus* and *C. incida*, and the effect was greater on *C. incida*. Therefore, it should be kept in shallow water depth when using these two plants for wetland plant remediation in favor of the two plants' growth. The appropriate water depth for *I. pseudacorus* and *C. incida* would be 30–70 cm and 10 cm, respectively.

**Key words:** water depth gradient; morphological and physiological difference; chlorophyll fluorescence; *Iris pseudacorus*; *Canna incida*.

湿地植物作为湿地生态系统的初级生产者,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,是湿地结构和功能的核心(何池全,2003;韩志国,2006)。湿地植物可以吸收湿地中的营养物质,并吸附大量的悬浮物质,同时其根系可以为微生物的生长提供营养适合的生存环境,因此利用湿地植物净化水质已在富营养水体修复中得到了广泛应用(方云英等,2008)。水位波动是控制湿地特征的关键因子,是湿地的扰动特征之一,它直接影响到湿地生态系统中植物群落的分布、生产量、稳定性、演替和物种多样性等(王海洋等,1999;徐治国等,2006),进而形成与相应水位相适应的植被类型,而这种影响则主要是通过植物对水深梯度和水位波动的响应造成的。不同的湿地植物对水深的响应差别很大(Blanch *et al.*, 1999),其生长繁殖、生物量分配以及空间分布等对水位梯度的反应都具有一定的差异(徐治国等,2006)。水深梯度和水位波动作为湿地生态系统中重要的水文特征影响着湿地植被的组成与结构,进而对湿地生态系统产生影响,因此,研究水深梯度对湿地植物的影响对于湿地植被的恢复以及湿地生态系统的构建具有重要的意义。

黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)和美人蕉(*Canna incida*)分别隶属于鸢尾科鸢尾属和美人蕉科美人蕉属,均为多年生(宿根)草本花卉,由于生长过程中能有效地吸收同化水体中营养物质的特性和其较高的美学价值而在人工湿地的建设过程中得到了广泛应用(蒋跃平等,2004;Zhang *et al.*, 2008)。有关学者(韩玉林等,2006;李睿华等,2007)分别从形态和酶活性等生理方面对黄菖蒲以及从形态方面对美人蕉在不同水深条件下各自的生长状况进行了比较研究,结果表明,黄菖蒲和美人蕉对水深的耐受性不强,适宜在浅水的环境中生长,同时这2种植物对自然的旱生和湿生环境条件也具有较强的适应性。但是,作为湿地恢复过程中2种常用的植物物种,有关

不同水深条件下黄菖蒲和美人蕉二者在形态和生理,特别是叶绿素荧光特性方面的差异及2种植物对不同水深条件适应差异的研究还鲜有报道。为此,本文以黄菖蒲和美人蕉为对象,研究了2种植物在形态、生理及叶绿素荧光等方面对10~70 cm共4种水深梯度的响应差异,以期为湖泊、河流等水体的岸带生态修复中的植物空间配置提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验在南四湖下级湖新薛河入湖口东侧滩地上的人工修复湿地中进行,湿地水位由位于河中的橡胶坝控制,湿地中建有大型试验池,池内设置有不同高度的种植平台,相邻2个平台间的高度差为20 cm。试验植物黄菖蒲和美人蕉于6月初种植,每个平台上种植2行,每行10株,共20株,株距30 cm,行距30 cm。受降水及河流上游来水的影响,6月26日湿地进水(期间每隔2 d浇水1次),试验池内形成分别为10 cm(D10)、30 cm(D30)、50 cm(D50)和70 cm(D70)的不同水深条件,此时2种植物生长良好。在8月14日橡胶坝落闸放水、湿地水位下降之前对黄菖蒲和美人蕉的形态学参数和叶绿素荧光特性等指标进行了测定。其中每周对其水体水质进行取样测定,pH为 $8.34 \pm 0.23$ ,总氮、总磷、氨氮和高锰酸盐指数分别为 $(2.603 \pm 0.412) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.038 \pm 0.022) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.607 \pm 0.055) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(5.81 \pm 2.37) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,底质中的总氮、总磷分别为 $(0.563 \pm 0.091) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $(0.184 \pm 0.015) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,烧失重为 $4.24\% \pm 0.64\%$ 。

### 1.2 研究方法

随机选取每种处理下的试验植物10丛观察并计算其分蘖数,然后选取每丛中的最高株及水上部分完整叶片10片,采用直接测量法进行植株形态学参数(株高、叶长、叶宽)的测定。然后再随机选取5株,取其水上叶片和根系进行叶绿素含量、丙二醛含量和根系活力的测定。叶绿素含量的测定采用无水

乙醇：丙酮=1：1 的混合溶液浸提分光光度比色法(刘萍和李明军,2007),丙二醛含量和根系活力的测定采用硫代巴比妥酸法(TBA 法)和氯化三苯基四氮唑法(TTC 法)(常福辰等,2007)。

叶绿素荧光特性的测定采用水下调制荧光仪 DIVING-PAM(WALZ,德国)进行。测量时,用暗适应叶夹夹住叶片(均为水上部分叶片),10 min 后打开测量光( $1\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )然后再打开饱和脉冲( $3000\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),测定本底荧光  $F_0$  和最大荧光  $F_m$ ,然后照射  $80\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  的光化光 10 s 后打开饱和脉冲,测定实时荧光  $F$  和光照状态下的最大荧光  $F_m'$ ,按下式对各叶绿素荧光参数进行计算(张守仁,1999;马婷等,2007):PS II 的最大量子产量  $F_v/F_m=(F_m-F_0)/F_m$ ,电子传递速率  $ETR=Y\times PAR\times 0.84\times 0.5$ ,其中  $Y$ (PS II 的实际量子产量)  $= (F_m'-F)/F_m'$ ,光化学淬灭  $qP=(F_m'-F)/(F_m'-F_0)$ ,非光化学淬灭  $qN=(F_m-F_m')/(F_m-F_0)$ 。其中  $ETR$  的计算中 0.84 是植物的经验性吸光系数,0.5 是假设植物吸收的光能被 2 个光系统均分。

快速光响应曲线(rapid light curves,RLCs)的测定:开启光强分别为 80、155、244、353、466、681、903 和 1319  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,根据每一光强下的实时荧光  $F$  和最大荧光  $F_m'$  计算对应的相对电子传递速率( $rETR$ ),RLCs 即每一光强下对应的  $rETR$  的曲线。叶绿素荧光参数和 RLCs 的测定各重复 5 次。

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 进行数据分析和制图。多重比较采用 Duncan 法在  $\alpha=0.05$  显著水平下对不同数据间的差异进行检验比较,快速光响应曲线利用 Platt 等(1982)提出的拟合方程  $P=rETR_m\cdot(1-e^{-\alpha\cdot PAR/rETR_m})\cdot e^{-\beta\cdot PAR/rETR_m}$  通过 Origin 7.5 进行拟

合,得出其参数  $rETR_m$ 、 $\alpha$  和  $\beta$ ,其中, $rETR_m$  为潜在最大电子传递速率, $\alpha$  为光合曲线的初始斜率, $\beta$  为光抑制参数(辅助参数), $rETR_m$  与  $\alpha$  的比值  $I_k$  为半饱和光强。

2 结果与分析

2.1 黄菖蒲和美人蕉形态及生理特性的差异

研究发现,黄菖蒲和美人蕉的分蘖数随着水深的增加而显著减少,D70 条件下二者的分蘖数分别为 D10 下的 50.91% 和 37.33%(表 1)。随着水深的增加,2 种植物的叶长、叶宽、叶绿素含量、根系活力和丙二醛含量表现出相同的趋势,即丙二醛含量逐渐升高,而其他指标则逐渐下降。株高的变化二者呈相反的趋势,即黄菖蒲逐渐下降而美人蕉则逐渐升高。研究表明,2 种植物株高、叶长和叶宽间的差异均未达到显著水平,黄菖蒲除根系活力外其他参数的差异均不显著,根系活力的差异中,D10 与 D50 和 D70 间以及 D50 与 D70 间的差异均达到了显著水平( $P<0.05$ );美人蕉生理参数间的差异均达到了显著水平( $P<0.05$ ),其中根系活力和丙二醛含量的差异相同,即 D10 和 D70 与其他水深梯度间均表现出显著差异,叶片的叶绿素含量中 D10 与 D50 和 D70 间呈现出显著差异( $P<0.05$ )。可见,水深较大条件下 2 种植物的形态及生理方面均受到影响,其中对美人蕉的影响程度要大于黄菖蒲。

2.2 黄菖蒲和美人蕉的叶绿素荧光特性差异

2.2.1 叶绿素荧光参数的差异 从图 1 可见,不同水深条件下黄菖蒲和美人蕉的  $F_v/F_m$  分别介于 0.734~0.787 和 0.749~0.809 之间。随着水深的增加, $F_v/F_m$ 、 $ETR$  和  $qP$  均呈下降趋势,而  $qN$  则逐渐上升。前 3 个叶绿素荧光参数中黄菖蒲的分别下

表 1 不同水深条件下黄菖蒲和美人蕉的形态和生理参数差异  
Table 1 Varieties of morphological and physiological parameters of *Iris pseudacorus* and *Canna incida* in different water depth

水深梯度	分蘖数 (株)	株高 (cm)	叶长 (cm)	叶宽 (cm)	叶绿素含量 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	根系活力 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )	丙二醛含量 ( $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ )
黄 D <sub>10</sub>	5.5±0.8 a	83.74±5.38	74.83±6.29	1.75±0.30	0.55±0.02	1.64±0.42 a	13.52±2.71
菖 D <sub>30</sub>	4.8±0.9 ab	81.32±4.87	70.94±5.70	1.61±0.31	0.54±0.02	1.21±0.38 ab	14.87±2.43
蒲 D <sub>50</sub>	4.0±0.6 b	76.94±7.45	67.91±8.04	1.56±0.29	0.51±0.07	1.00±0.18 b	17.60±2.42
D <sub>70</sub>	2.8±0.9 b	72.32±5.46	62.85±4.85	1.48±0.24	0.50±0.08	0.36±0.20 c	18.54±3.32
美 D <sub>10</sub>	7.5±1.0 a	104.63±57.02	38.00±6.96	15.24±3.23	0.40±0.17 a	1.36±0.06 a	28.42±1.38 a
人 D <sub>30</sub>	6.0±1.4 ab	106.67±40.74	36.80±4.76	14.76±4.78	0.25±0.04 ab	1.26±0.04 b	39.48±1.84 b
蕉 D <sub>50</sub>	4.7±1.2 b	116.00±46.72	36.60±11.28	13.28±6.68	0.10±0.00 b	1.17±0.03 b	39.20±1.43 b
D <sub>70</sub>	2.8±0.9 b	121.33±25.15	35.40±15.53	11.30±1.35	0.07±0.01 b	0.83±0.05 c	47.14±2.91 c

无字母的表示差异不显著,有字母且不同时表示差异在  $\alpha=0.05$  水平下达到显著, $n$ (分蘖数、株高、叶长、叶宽)=10, $n$ (叶绿素含量、根系活力、丙二醛含量)=5。

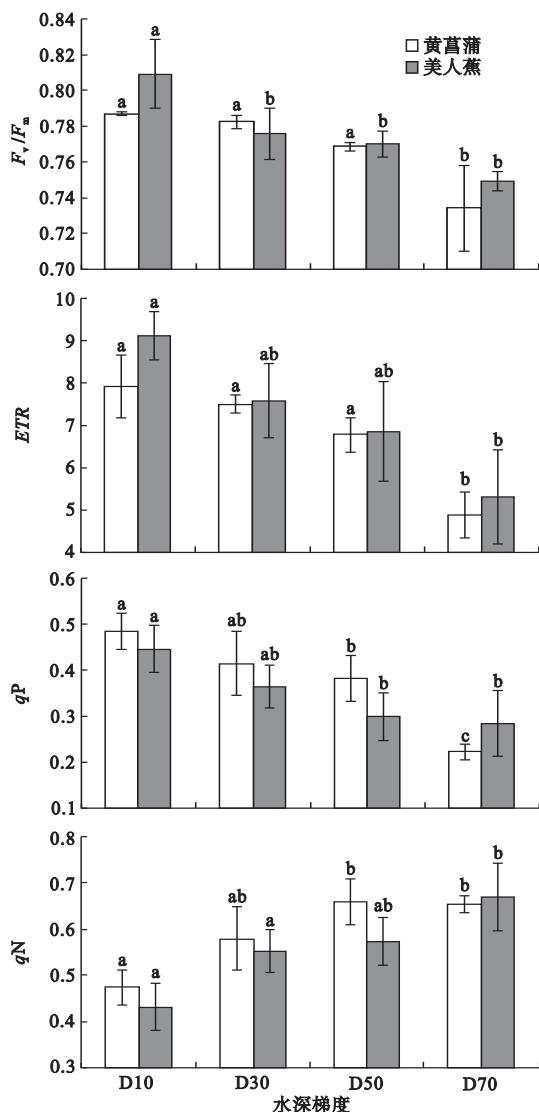


图1 不同水深条件下黄菖蒲和美人蕉  $F_v/F_m$ 、ETR、 $q_p$  和  $q_N$  的差异 ( $n=5$ )

Fig. 1 Varieties of  $F_v/F_m$ , ETR,  $q_p$  and  $q_N$  of *Iris pseudacorus* and *Canna incida* in different water depth

横坐标 D10、D30、D50 和 D70 分别代表 10cm、30cm、50cm 和 70cm 的水深条件;图中字母相同时表示差异不显著,不同时表示差异在  $\alpha = 0.05$  水平下达到显著。

降 6.73%、38.56% 和 54.19%, 而  $q_N$  上升达 38.28%, 美人蕉则分别下降 7.45%、41.79%、36.46% 和上升 55.54%。多重比较的结果显示,不同水深条件下的叶绿素荧光参数均表现出一定的显著差异,总体看来,4 个叶绿素荧光参数中 D10 和 D70 间均达到了显著差异 ( $P < 0.05$ ), D10 和 D50 间也存在一定的显著差异,其中  $F_v/F_m$  中黄菖蒲的差异不显著,而美人蕉在 D10 与 D30 和 D50 间却达到了显著水平的差异 ( $P < 0.05$ )。美人蕉的  $F_v/F_m$  和 ETR 在不同水深条件下总体上均高于黄菖蒲,且在

浅水条件下 (D10) 这种差异更加明显,而黄菖蒲的  $q_p$  和  $q_N$  在不同的水深梯度间则略高于美人蕉。

**2.2.2 快速光响应曲线的差异** 在典型的 RLCs 变化中,随着光强的升高,  $rETR$  逐渐升高,当光强达到饱和点后,  $rETR$  达到最大值,此后  $rETR$  逐渐下降。在本研究中,试验设置的最大光强为  $1319 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,各水深条件下的叶片均未出现明显的下降 (图 2),但在最大光强下黄菖蒲和美人蕉的  $rETR$  随着水深的增加均出现明显的下降,黄菖蒲在 D30、D50 和 D70 下的  $rETR$  分别为 D10 下的 63.67%、55.89% 和 26.67%, 而美人蕉则分别为 65.96%、51.66% 和 15.96%, 并且这种差异从低光照强度下就表现出来。二者的最大  $rETR$  也随水深的增加而降低, D30、D50 和 D70 下黄菖蒲的最大  $rETR$  分别为 D10 下的 67.44%、58.00% 和 29.00%, 而美人蕉则分别为 66.44%、52.62% 和 27.16%, 且随着水深的增加叶片达到最大  $rETR$  时的光强有减小的趋势。可见,水深的增加限制了光合作用过程中电子的相对传递速率,从而影响了植物光合作用的正常进行。对 RLCs 进行拟合可以得出 PS II 的潜在最大相对电子传递速率  $rETR_m$ 、光合曲线的初始斜率  $\alpha$  和半饱和光强  $I_k$  等参数,它们分别代表了 PS II 的潜在最大光合速率、叶片的捕光能力和对强光的耐受能力 (韩志国, 2006)。从拟合的结果看 (图 3), 黄菖蒲和美人蕉的 3 个参数均随着

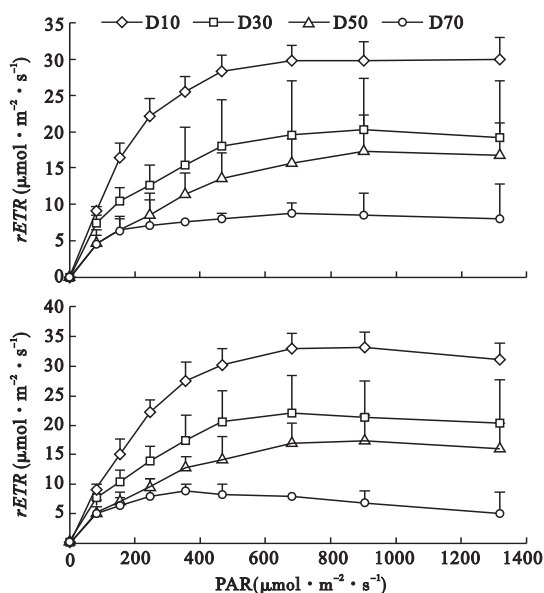


图2 不同水深条件下黄菖蒲 (上) 和美人蕉 (下) 的 RLCs 差异 ( $n=5$ )

Fig. 2 Variations of RLCs of *Iris pseudacorus* (above) and *Canna incida* (below) in different water depth

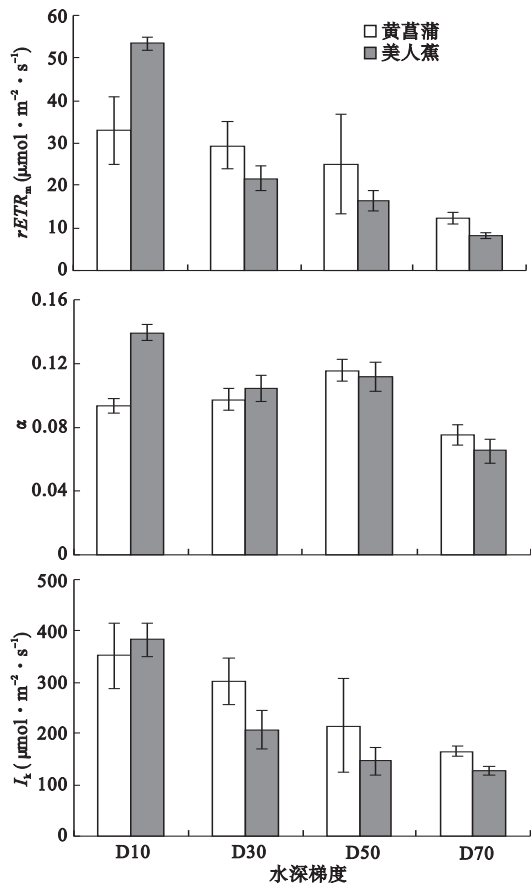


图 3 黄菖蒲和美人蕉快速光响应曲线拟合的参数差异  
Fig. 3 Variations of parameters of fitted RLCs of *Iris pseudacorus* and *Canna indica*  
横坐标 D10、D30、D50 和 D70 分别代表 10、30、50 和 70 cm 的水深条件 ( $n=5$ )。

水深的增加而呈现下降的趋势,黄菖蒲 D70 水深条件下的  $rETR_m$ 、 $\alpha$  和  $I_k$  分别为 D10 下的 37.56%、80.33% 和 46.75%,美人蕉则分别为 15.47%、46.72% 和 33.11%。另外,在水深较大时黄菖蒲 PS II 的潜在最大光合速率、叶片的捕光能力和对强光的耐受能力均大于美人蕉。

3 讨 论

黄菖蒲和美人蕉的无性繁殖主要是从根部萌发出新的植株,形成密丛型的生态小种群,这是对过湿土壤和氧气供给不足环境的一种适应方式(何池全,2003)。本研究表明,高水深条件下黄菖蒲和美人蕉的分蘖数显著减少,表明其无性繁殖受到了明显抑制,并且美人蕉受到的抑制程度要大于黄菖蒲。植物通过调整冠部、茎部或叶部的形态特征以适应水文条件的变化是植物适应不同水位梯度的主要特

征之一,形态特征的调整包括叶片数量和长度的增加、形状和生长方式的变化、茎部结构的改变使茎伸长以增加植株高度等等,其实质为通过植物部分组织器官的伸长达到植物与外界进行气体交换的目的(罗文泊等,2007)。随着水深的增加,黄菖蒲的株高减小,而美人蕉的株高增加,二者叶长和叶宽则有所下降,但这些变化的差异未达显著水平,说明尽管水深条件的变化对其叶片的生长和株高的形成有一定的影响,但影响较小。韩玉林等(2006)通过黄菖蒲在(自然的)旱生、湿生和水深为 10 ~ 150 cm 条件下的研究却表明,随着土壤含水量和水深的增加,其株高先增加后减小,30 cm 水深为株高变化的转折点。李睿华等(2007)对美人蕉在 10 ~ 30 cm 水深条件下的生长差异表明,随着水深的增加其株高逐渐减小。其原因可能与试验用苗有关,本研究中的试验植物均是经过了 20 多天的生长后才进行不同水深的处理。生理参数也表明,水深较大的情况下黄菖蒲和美人蕉的生长受到了限制,主要表现在叶片叶绿素含量的降低、根系活力的下降和叶片膜脂过氧化作用的增强(即叶片丙二醛含量的增加),并且这种下降趋势在美人蕉上表现得更加明显。韩玉林等(2006)的研究也表明,高水深条件下黄菖蒲受到的胁迫增加,表现在其体内的脯氨酸含量也随着土壤含水量和水深的增加而升高。

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;陈建明等,2006),在植物的光合作用、逆境生理和组织衰老等生理生态学方面的研究中具有重要作用。叶绿素荧光参数方面, $F_v/F_m$  是 PS II 最大光化学量子产量,反映了 PS II 最大光能转换效率或称最大 PS II 光能转换效率。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的变化极小,当植物受到环境等条件的胁迫时, $F_v/F_m$  会显著下降(韩博平等,2003)。一般高等植物的  $F_v/F_m$  值在 0.70 ~ 0.85,多数为 0.83(Demmig & Björkman,1987),低于此值说明植物受到了逆境胁迫。4 种水深梯度下黄菖蒲和美人蕉的  $F_v/F_m$  分别介于 0.734 ~ 0.787 和 0.749 ~ 0.809 之间,表明较大的水深还没有对 2 种植物造成严重的胁迫影响。黄菖蒲和美人蕉的  $F_v/F_m$  均随着水深的增加而降低,说明水深的增加

加重了植物所受的胁迫程度,同时从  $F_v/F_m$  的变化情况可以看出,黄菖蒲对水深胁迫的耐受程度要强于美人蕉。电子传递速率 ETR 反映了实际光强下的表观电子传递速率(马婷等,2007);光化学淬灭  $qP$  是 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,其值的大小反映了 PS II 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;非光化学淬灭  $qN$  则反映了天线色素吸收的光能无法用于电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分,是 PS II 的重要保护机制(曹昀等,2007)。本研究表明,浅水条件下黄菖蒲和美人蕉的表观电子传递速率较大,并且有较大的将 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额或称较多的电子参与  $CO_2$  的固定,同时其天线色素吸收的光能无法用于电子传递而以热的形式耗散掉的部分较其他水深梯度下要小。可见,较大水深条件下 2 种植物的光合作用受到了一定程度的抑制,同样美人蕉受到的抑制程度要大于黄菖蒲,即表现出美人蕉在较高水深条件下的耐受性要弱于黄菖蒲。光响应曲线是了解植物光合作用对光强响应的重要手段,一方面可以提供植物的最大电子传递速率和饱和光强参数(特征),另一方面能够判定出植物在某一光强下的光合能力,同时能够通过一系列光强的变化来判定植物的潜在光合活性(Waldhoff *et al.*, 2002; Ralph & Gademann, 2005)。本研究表明,随着水深的增加,黄菖蒲和美人蕉叶片的光合作用受到的影响逐渐增大,表现在其相对电子传递速率最大下降分别达到 72.84% 和 71.33%。对 RLCs 进行拟合所得的参数结果也表明,随着水深的增加,黄菖蒲和美人蕉 PS II 的潜在最大光合速率、叶片的捕光能力和对强光的耐受能力均呈现明显的下降,其中 PS II 的潜在最大光合速率与对强光的耐受能力趋势是相同的,这是因为耐受强光能力强的植物或叶片一般具有较高的最大光合速率(宋玉芝等,2007)。2 种植物相比较而言,浅水条件下美人蕉的光合能力要强于黄菖蒲,而在较大水深条件下黄菖蒲的  $qP$  和  $qN$  则总体上大于美人蕉,即再次表明美人蕉在较大水深条件下的耐受性弱于黄菖蒲。

可见,在 10 ~ 70 cm 的水深梯度下,随着水深的增加:淹水 48 d 后黄菖蒲和美人蕉的分蘖数显著减少,株高分别降低和增加,叶长和叶宽均逐渐减小,

但后三者的差异均不显著;叶片叶绿素含量和根系活力也随之降低,叶片的膜脂过氧化作用则有所增强,且美人蕉在不同水深梯度间其差异有的达到了显著水平,黄菖蒲仅根系活力间的差异达到了显著水平( $P < 0.05$ );叶绿素荧光参数方面,PS II 最大光能转换效率、实际光强下的表观电子传递速率以及参与  $CO_2$  固定的电子数量均随着水深的增加而有所下降,天线色素吸收的光能无法用于电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分则有所增加,且这些参数在不同水深梯度间也达到了显著差异( $P < 0.05$ )。快速光响应曲线的差异也表明高水深条件下美人蕉的光合作用受到了严重抑制。黄菖蒲与美人蕉相比,前者对高水深条件的耐受性要强于后者。因此,在利用黄菖蒲和美人蕉进行湖泊、河流等岸带浅水环境生态修复时应控制较浅的水位(10 cm 左右)以利于 2 种植物的生长。与美人蕉相比,黄菖蒲对 30 ~ 70 cm 的水深条件具有更强的适应性。

## 参考文献

- 曹 昀,王国祥,刘 玉. 2007. 淹水对菖蒲萌发及幼苗生长的影响. 湖泊科学, **19**(5): 577-584.
- 常福辰,陆长梅,沙 莎. 2007. 植物生物学实验. 南京: 南京师范大学出版社.
- 陈建明,俞晓平,程家安. 2006. 叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用. 浙江农业学报, **18**(1): 51-55.
- 方云英,杨肖娥,常会庆,等. 2008. 利用水生植物原位修复污染水体. 应用生态学报, **19**(2): 407-412.
- 韩博平,韩志国,付 翔. 2003. 藻类光合作用机理与模型. 北京: 科学出版社.
- 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.
- 韩志国. 2006. 20 种湿地植物的叶绿素荧光特性(博士学位论文). 广州: 暨南大学.
- 何池全. 2003. 湿地植物生态过程理论及其应用——三江平原典型湿地研究. 上海: 上海科学技术出版社.
- 蒋跃平,葛 滢,岳春雷,等. 2004. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献. 生态学报, **24**(8): 1720-1725.
- 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.
- 刘 萍,李明军. 2007. 植物生理学实验技术. 北京: 科学出版社.
- 罗文泊,谢永宏,宋凤斌. 2007. 洪水条件下湿地植物的生存策略. 生态学杂志, **26**(9): 1478-1485.

- 马 婷, 王国祥, 李 强, 等. 2007. 富营养化水体中菹草光合荧光特性研究. 生态环境, **16**(3):758-761.
- 宋玉芝, 蔡 炜, 秦伯强. 2009. 太湖常见浮叶植物和沉水植物的光合荧光特性比较. 应用生态学报, **20**(3):569-573.
- 王海洋, 陈家宽, 周 进. 1999. 水位梯度对湿地植物生长、繁殖和生物量分配的影响. 植物生态学报, **23**(3): 269-274.
- 徐治国, 何 岩, 闫百兴, 等. 2006. 营养物及水位变化对湿地植物的影响. 生态学杂志, **25**(1):87-92.
- 张守仁. 1999. 叶绿素荧光动力学参数意义及讨论. 植物学通报, **16**(4):444-448.
- 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.
- Blanch SJ, Ganf GG, Walker KF. 1999. Tolerance of riverine plants to flooding and exposure indicated by water regime. *Regulated Rivers: Research & Management*, **15**: 43-62.
- Demmig B, Björkman O. 1987. Comparison of effect of excessive light on chlorophyll fluorescence (77K) and photon yield of O<sub>2</sub> evolution leaves of plants. *Planta*, **171**: 171-184.
- Platt T, Harrison WG, Irwin B, *et al.* 1982. Photosynthesis and photoadaptation of marine phytoplankton in the Arctic. *Deep-Sea Research*, **29**: 1159-1170.
- Ralph PJ, Gademann R. 2005. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity. *Aquatic Botany*, **82**: 222-237.
- Waldhoff D, Furch B, Junk WJ. 2002. Fluorescence parameters, chlorophyll concentration, and anatomical features as indicators for flood adaptation of an abundant tree species in Central Amazonia: *Symmeria paniculata*. *Environmental and Experimental Botany*, **48**:225-235.
- Zhang ZH, Rengel Z, Meney K. 2008. Interactive effects of N and P on growth but not on resource allocation of *Canna indica* in wetland microcosms. *Aquatic Botany*, **89**:317-323.
- 
- 作者简介** 柏 祥,男,1984年生,博士研究生。主要从事水土资源利用与环境方面的研究,发表论文4篇。E-mail: baix04@163.com
- 责任编辑** 王 伟
-