

# 淹水胁迫对紫丁香幼苗叶片 PS II 光化学活性的影响

李冬梅<sup>1</sup>, 葛云花<sup>2</sup> (1. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 中国农业科学院特产研究所, 吉林长春 132109)

**摘要** [目的] 为深入研究紫丁香的不耐淹水特性提供理论数据。[方法] 在盆栽条件下, 研究了紫丁香幼苗叶片 PS II 光化学活性对淹水胁迫的响应。[结果] 淹水前 6 d 对紫丁香幼苗叶片 PS II 光化学活性的影响较小, 而淹水 6 d 后紫丁香幼苗叶片  $F_v/F_m$  和  $PIABS$  明显降低。快相叶绿素荧光动力学参数的研究表明, PS II 光化学活性降低, 而电子由 Pheo 向 QA 的传递在淹水胁迫下未受明显的抑制。淹水胁迫下紫丁香幼苗叶片单位反应中心吸收光能  $ABS/RC$  增加。[结论] PS II 光化学活性对淹水胁迫较敏感。长期的淹水胁迫导致紫丁香幼苗叶片 PS II 发生明显的光抑制。淹水胁迫导致紫丁香幼苗叶片 PS II 电子受体侧由 QA 向 QB 的传递受阻, 从而导致 QA 被过度还原,  $QA^-$  大量积累。淹水胁迫导致紫丁香幼苗有活性 PS II 反应中心数量降低, 通过以剩余有活性反应中心的功能增强的方式来维持淹水胁迫下 PS II 的光能供应。

**关键词** 淹水胁迫; 紫丁香; 叶绿素荧光动力学曲线; PS II

**中图分类号** S 685.26; Q 945.79 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)13-03787-04

## Effects of Flooding Stress on PS II Photochemistry Activity in Leaves of *Syringa oblata* Seedlings

LI Dong-mei et al (School of Forestry, Northeast Forest University, Harbin, Heilongjiang 150040)

**Abstract** [Objective] The research aimed to provide the theoretical data for the no-resistance to the flood features. [Method] The flooding stress response of PS II photochemical activity in leaves of *Syringa oblata* seedlings was investigated under the potted conditions. [Result] Flooding had little effect on PS II photochemical activity in leaves of *Syringa oblata* seedlings during the first six days, and  $F_v/F_m$  and  $PIABS$  in leaves of *Syringa oblata* seedling decreased obviously after six days. By using fast chlorophyll a fluorescence transients, PS II photochemical activity decreased, but electron transfer from Pheo to QA wasn't significantly inhibited.  $ABS/RC$  under flooding stress was increased. [Conclusion] PS II photochemical activity to flooding stress was more sensitive, and long-term flooding stress led to obvious photoinhibition in PS II of *Syringa oblata* leaves. Flooding stress resulted in PS II of *Syringa oblata* leaves electron acceptor side from QA to QB blocked, which led to excessive reduction of QA and the substantial accumulation of  $QA^-$ . PS II light energy supply was maintained under flooding stress by enhancing the function of remaining active reaction center under the decreasing number of active PS II reaction center of flooded *Syringa oblata* seedling.

**Key words** Flooding stress; *Syringa oblata*; Chlorophyll a fluorescence transient; PS II

紫丁香 (*Syringa oblata*) 为木犀科 (Oleaceae) 丁香属 (*Syringa* spp.) 观花灌木, 为哈尔滨市的市花。紫丁香不但冠型好、花期长、花香浓郁、花色鲜艳<sup>[1]</sup>, 而且具有极强的耐旱、耐寒、耐盐碱以及耐贫瘠等特点<sup>[2-3]</sup>, 是我国北方园林绿化中重要的植物<sup>[4-5]</sup>。丁香虽有较宽的生态幅, 但有研究发现紫丁香具有不耐水淹的特性<sup>[6]</sup>, 特别是与暴马丁香 (*S. amurensis*) 和小叶丁香 (*S. microphylla*) 等品种相比, 紫丁香的耐水淹性更差, 淹水胁迫 7 d 左右紫丁香生长受到抑制, 甚至死亡<sup>[7-8]</sup>, 但由于我国北方降水不规律、园林绿化地排水系统不良等, 紫丁香的生长环境常受到淹水的危害, 因此有必要深入研究淹水胁迫下紫丁香生理特性的响应。淹水胁迫对植物生长的抑制作用除了由根系低氧环境造成根系活力降低而引起其呼吸速率减慢 (甚至造成无氧呼吸) 以及矿质元素等吸收受到抑制外<sup>[9]</sup>, 还与淹水胁迫造成植物叶片叶绿素含量降低、气孔关闭、光合能力降低等因素有关<sup>[10]</sup>。植物淹水后叶片细胞的超微结构受到损伤, 光合酶活性和 PS II 反应中心活性降低<sup>[11-12]</sup>。有研究认为, 不耐淹水植物 PS II 光化学活性的降低是重要的反应现象, 也是内在机理之一。但是, 目前有关紫丁香淹水后 PS II 光化学活性的响应特别是有关其电子传递以及能量分配方面的研究尚不够深入。为此, 笔者研究了紫丁香叶片 PS II 光化学活性对淹水胁迫的响应, 为

深入研究紫丁香的不耐淹水特性提供理论数据, 为紫丁香的抗涝栽培以及合理的绿化配置提供一些基础数据。

## 1 材料与方 法

**1.1 试验材料** 供试材料为 1 年生紫丁香幼苗, 株高约 0.3 m, 无分枝。

**1.2 试验处理** 在 2013 年 5 月将幼苗移植于塑料花盆中, 花盆高 30 cm, 直径 30 cm, 以体积比 2:1 的草炭土与蛭石为培养基质, 移栽 5 盆, 即 5 次重复, 每盆定植 5 株, 共计 25 株, 室外正常光温环境下生长, 移栽后正常浇水和除草管理。在 2013 年 7 月, 待幼苗进入旺盛生长期进行淹水处理。淹水采用“双套盆法”, 即在原花盆上套一塑料袋, 然后下方套一相同规格的花盆, 浇水后保持水层没过土层表面 2~3 cm, 并且在处理期间随时补水。分别于淹水后第 0、2、4、6、8、10 和 12 天进行叶片快速叶绿素荧光动力学曲线 (OJIP) 的测定。

**1.3 测定项目和方法** 分别于处理的第 0、2、4、6、8、10 和 12 天上午 9:00 利用暗适应夹将紫丁香幼苗倒数第 3 片完全展开叶片进行 0.5 h 暗适应, 然后利用 Mini 调制式掌上叶绿素荧光仪 (FluorPen FP 100 max, 捷克) 测定各暗适应后叶片的 OJIP 曲线, 5 次重复。OJIP 曲线由 3 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  脉冲红光诱导, 相对荧光强度的记录从 10  $\mu\text{s}$  (以 0 ms 计算) 开始至 1 s 结束, 共记录 10<sup>5</sup> 个数据, OJIP 曲线上 O、J、I 和 P 点分别为 0、2、30 和 1 000 ms 对应的时刻。利用 5 次重复的平均值绘制 OJIP 曲线, 并且将曲线按照 Zhang 等<sup>[13]</sup> 方法进行 O-P 点标准化 ( $V_{O-P}$ ), 即  $V_{O-P} = (F_t - F_o) / (F_m - F_o)$ , 式中  $F_t$  表示各时间点的相对荧光强度, 并且计算不同淹水天数与

**基金项目** 国家科技支撑项目 (2011BAD08B02-3)。

**作者简介** 李冬梅 (1974-), 女, 山东乳山人, 博士研究生, 研究方向: 林学。

**收稿日期** 2014-04-17

淹水第0 d的 $V_{o-p}$ 差值,以 $\Delta V_{o-p}$ 表示。

对OJIP曲线按照Strasser等<sup>[14]</sup>方法进行JIP-test分析,得到PSII最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、以吸收光能为基础的光合性能指数( $PI_{ABS}$ )、OJIP曲线上2 ms时相对可变荧光强度( $V_j$ )、荧光上升的初始斜率( $M_o$ )、 $Q_A$ 被氧化还原次数( $N$ )、2 ms时有活性反应中心的开放程度( $\Psi_o$ )等。

**1.4 数据处理方法** 运用Excel(2003)和SPSS(7.05)软件进行数据统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD),比较不同数据组间的差异。

## 2 结果与分析

**2.1 淹水胁迫对紫丁香幼苗叶片OJIP曲线的影响** 由图1可知,淹水胁迫下紫丁香幼苗叶片的OJIP曲线形态发生了改变,随着淹水天数的增加,紫丁香幼苗叶片OJIP曲线变得相对平缓。不同淹水天数处理下OJIP曲线上O点相对荧光强度的变化幅度较小,而随着淹水天数的增加,OJIP曲线上J点、I点和P点的相对荧光强度均呈明显的降低趋势,并且随着淹水时间的增长,各点相对荧光强度的降低趋势越明显,即表现为明显的时间效应。

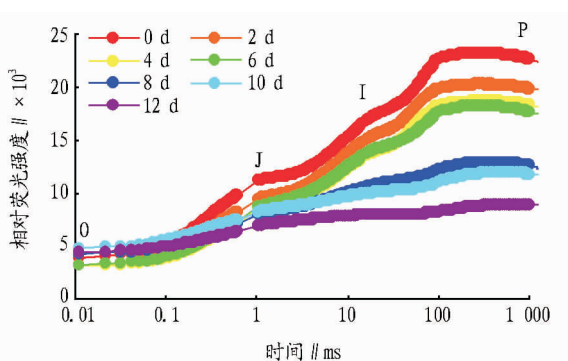


图1 淹水胁迫对紫丁香幼苗叶片OJIP曲线的影响

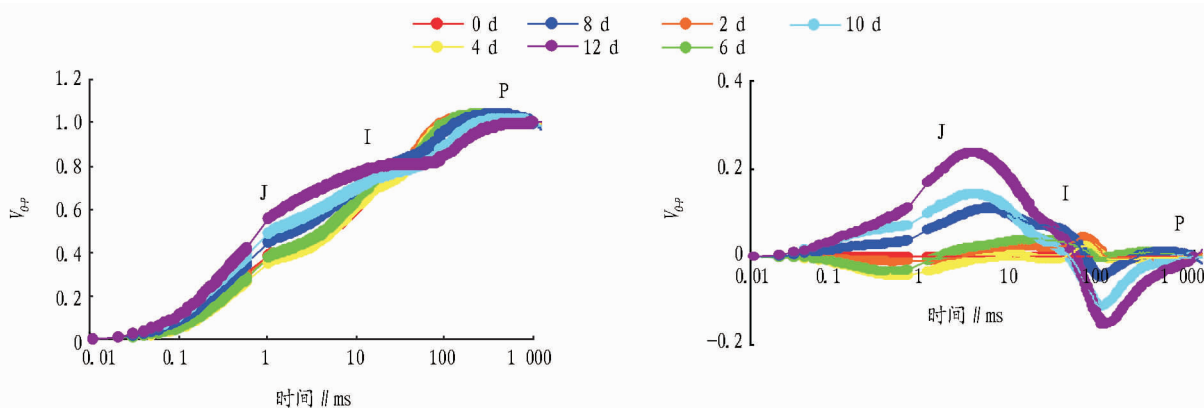


图2 淹水胁迫对紫丁香幼苗叶片 $V_{o-p}$ 和 $\Delta V_{o-p}$ 的影响

均发生显著的变化,其中,淹水第8天紫丁香幼苗叶片的 $V_j$ 、 $M_o$ 和 $N$ 较第6天时分别增加了33.25% ( $P < 0.05$ )、34.41% ( $P < 0.01$ )和101.37% ( $P < 0.01$ ), $\Psi_o$ 降低了12.48% ( $P < 0.05$ ),而淹水第12天 $V_j$ 、 $M_o$ 和 $N$ 分别为第0天的1.71、1.53和6.89倍, $\Psi_o$ 约为第0天的50%。

## 3 结论与讨论

研究表明,紫丁香幼苗叶片PSII光化学活性对淹水较敏

**2.2 淹水胁迫对紫丁香幼苗叶片标准化OJIP曲线的影响** 将OJIP曲线进行标准化( $V_{o-p}$ )。由图2可知,不同淹水天数处理下OJIP曲线上I点的 $V_{o-p}$ 均没有发生明显的变化,但J点的 $V_{o-p}$ 之间出现分异,其中淹水第2、4和第6天处理下J点的 $V_{o-p}$ 与第0天之间无明显差异,但淹水第6天后紫丁香幼苗叶片J点的 $V_{o-p}$ 呈明显的增加趋势,并且随着淹水天数的增加,J点的 $V_{o-p}$ 增加趋势更明显。

将不同淹水天数下标准化OJIP曲线与第0天之间作差值( $\Delta V_{o-p}$ )。由图2可知,不同淹水天数处理下紫丁香OJIP曲线上J点的 $\Delta V_{o-p}$ 之间的差异最明显,但淹水第2、4、6天紫丁香幼苗叶片的 $\Delta V_{o-p}$ 与第0天之间无明显差异,而淹水第8、10、12天处理下J点的 $\Delta V_{o-p}$ 呈明显的增加趋势,并且随着淹水时间的延长,增加趋势越明显。不同淹水天数处理下紫丁香幼苗叶片I点的 $\Delta V_{o-p}$ 也没有明显差异,但在100 ms处理随着淹水天数的增加,紫丁香幼苗叶片的 $\Delta V_{o-p}$ 呈现降低趋势,同样表现为明显的时间效应。

**2.3 淹水胁迫对紫丁香幼苗叶片PSII光化学效率的影响**  $F_v/F_m$ 和 $PI_{ABS}$ 均反映PSII光化学效率的重要指标。由图3可知,淹水前6 d,紫丁香幼苗叶片的 $F_v/F_m$ 和 $PI_{ABS}$ 均没有发生显著变化( $P > 0.05$ ),但淹水6 d后,随着淹水时间的延长,紫丁香幼苗叶片的 $F_v/F_m$ 和 $PI_{ABS}$ 均呈显著降低趋势( $P < 0.05$ ),并且 $PI_{ABS}$ 的变化幅度大于 $F_v/F_m$ ,淹水第12天时 $F_v/F_m$ 和 $PI_{ABS}$ 分别比第0天降低了46.84% ( $P < 0.01$ )和94.15% ( $P < 0.01$ )。

**2.4 淹水胁迫对紫丁香幼苗叶片PSII受体侧电子传递能力的影响** 由图4可知,随着淹水时间的延长,紫丁香幼苗叶片的 $V_j$ 、 $M_o$ 和 $N$ 均呈增加趋势,而 $\Psi_o$ 则呈降低趋势。淹水0~6 d紫丁香幼苗叶片的 $V_j$ 、 $M_o$ 、 $N$ 和 $\Psi_o$ 均无显著差异( $P > 0.05$ ),但淹水第6天后,随着淹水时间的增加,各参数

感,淹水6 d后PSII反应中心活性开始急剧下降,电子传递受阻,特别是PSII受体侧电子由 $Q_A$ 向 $Q_B$ 的传递过程是易受损伤环节,而电子由去镁叶绿素(Pheo)向 $Q_A$ 的传递在淹水胁迫下未受到明显的影响。

淹水胁迫下由于气孔和非气孔因素的共同作用,植物对光和 $CO_2$ 适应的生态幅变窄,碳同化能力降低,特别是淹水后期非气孔因素起决定性的作用<sup>[15]</sup>。非气孔因素中,PSII光

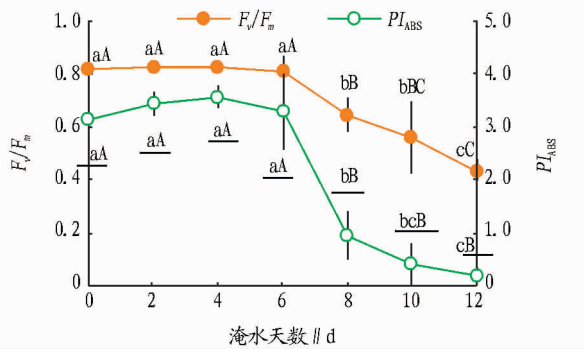


图3 淹水胁迫对紫丁香幼苗叶片  $F_v/F_m$  和  $PI_{ABS}$  的影响

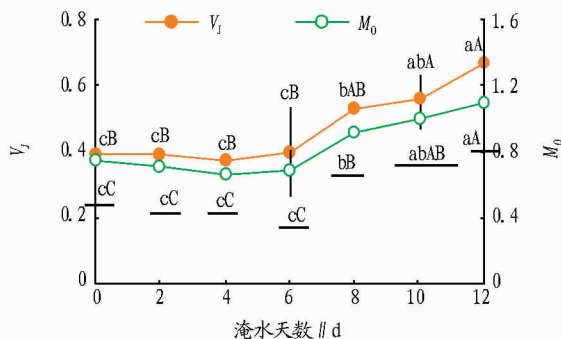
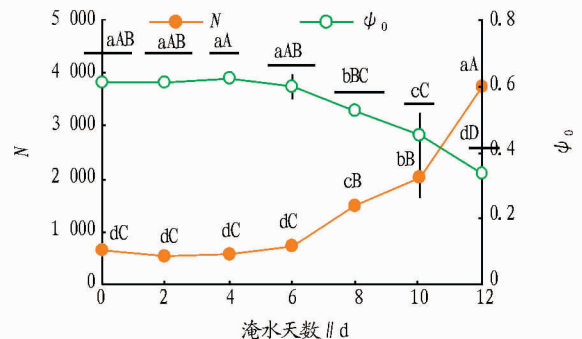


图4 淹水胁迫对紫丁香幼苗叶片 PSII 受体侧电子传递能力的影响

线中蕴含中丰富的 PSII 原初光化学反应信息,可以直接分析出逆境下光合作用的损伤位点<sup>[18]</sup>。PSII 受体侧电子传递受阻是逆境下光合电子传递链上过剩电子累积的主要部位,其原因主要是由于电子经由 Pheo 传给  $Q_A$  生成  $Q_A^-$  时间极短,仅为 250 ~ 300 ps,而电子由  $Q_A^-$  传递到  $Q_B$  的时间却需要 100 ~ 200  $\mu$ s,因此逆境条件下  $Q_A$  向  $Q_B$  电子传递容易受阻,即易造成  $Q_A^-$  的积累,而 OJIP 曲线上 J 点即 2 ms 时相对荧光强度变化恰好反映  $Q_A^-$  的积累量,即可以间接反映 PSII 反应中心受体侧电子由  $Q_A$  向  $Q_B$  的传递能力<sup>[19-20]</sup>。试验中,原始 OJIP 曲线上 J 点的相对荧光强度随着淹水时间的延长呈降低趋势,但由于原始 OJIP 曲线变异性受外界因素的影响较大<sup>[21]</sup>,常通过数学方法把 OJIP 曲线进行标准化,即将所有 OJIP 曲线的 O 点相对荧光强度定义为 0,而将 P 点相对荧光强度定义为 1,使得所有的 OJIP 曲线具有相同的 O 点和 P 点。该研究将不同淹水天数处理下紫丁香幼苗叶片的 OJIP 曲线标准化后,发现淹水后 6 d,紫丁香幼苗叶片 J 点的  $V_{0-P}$  呈明显的增加趋势,并且随着淹水天数的增加,J 点的  $V_{0-P}$  增加幅度变大。通过将不同淹水天数下标准化 OJIP 曲线与第 0 天之间作差值 ( $\Delta V_{0-P}$ ) 也可以看出,不同淹水天数处理下紫丁香 OJIP 曲线上 J 点的  $\Delta V_{0-P}$  之间的差异最明显,但淹水前 6 d 紫丁香幼苗叶片各时间点的  $\Delta V_{0-P}$  变化幅度较小,随着淹水时间的延长,淹水 6 d 紫丁香幼苗叶片 J 点的  $\Delta V_{0-P}$  呈明显的增加趋势。

另外,淹水 6 d 后,紫丁香幼苗叶片 OJIP 曲线上 2 ms 时的  $V_j$ 、 $M_0$  和  $Q_A$  被氧化还原次数 ( $N$ ) 均呈明显的增加趋势,而 2 ms 时  $\psi_0$  显著降低,说明淹水 6 d 后明显抑制了紫丁香

化学活性的降低以及 PSII 光化学活性降低后间接引起的活性氧代谢紊乱等被认为是主要的限制因素之一<sup>[16]</sup>。淹水 6 d 后紫丁香幼苗叶片  $F_v/F_m$  和  $PI_{ABS}$  均呈明显的降低趋势,由于  $F_v/F_m$  只能反映 PSII 反应中心的光能捕获情况,而  $PI_{ABS}$  不仅可以反映 PSII 反应中心对光能的捕获情况,而且可以反映 PSII 反应中心下游的电子传递情况<sup>[17]</sup>,因此  $PI_{ABS}$  在反映植物光化学活性方面较  $F_v/F_m$  更具说服力。试验中,淹水胁迫下  $PI_{ABS}$  降低幅度明显大于  $F_v/F_m$ ,说明淹水导致紫丁香幼苗叶片的 PSII 光化学活性的降低,甚至导致叶片发生光抑制现象。叶绿素荧光技术作为研究逆境下植物 PSII 功能已被广泛应用到植物逆境生理学研究的各个领域,特别是 OJIP 曲



幼苗叶片 PSII 受体侧电子由  $Q_A$  向  $Q_B$  的传递,使得  $Q_A$  被过度还原, $Q_A^-$  大量积累,说明电子受体库  $Q_B$  接受电子的能力降低。有研究认为,电子传递体  $Q_B$  主要与叶绿体内的 D1 蛋白结合,当逆境下 D1 蛋白合成受到抑制或降解加速时,常导致  $Q_B$  与 D1 蛋白的分离,使得  $Q_B$  失去接受电子的能力<sup>[22]</sup>。因此,淹水胁迫导致紫丁香幼苗叶片 PSII 受体侧  $Q_A$  向  $Q_B$  电子传递速率降低的原因可能与淹水导致叶绿体内 D1 蛋白的合成受到抑制或降解速度加快有关。但是,这方面的原因有待进一步的试验结果验证。

#### 参考文献

- [1] 张会慧,张秀丽,王娟,等. 利用快相叶绿素荧光参数综合评价 3 种丁香的耐盐性[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2013,37(5):13-19.
- [2] 安玉艳,梁宗锁,韩蕊蕊. 黄土高原 3 种乡土灌木的水分利用与抗旱适应性[J]. 林业科学,2011,47(10):8-15.
- [3] 郭二果,王成,彭镇华,等. 半干旱地区城市单位附属绿地绿化树种的选择——以神东矿区为例[J]. 林业科学,2007,43(7):35-43.
- [4] 李海梅,何兴元,陈玮. 沈阳城市森林主要绿化树种——丁香的光合特性研究[J]. 应用生态学报,2004,15(12):2245-2249.
- [5] 严俊鑫,刘晓东,张晓娇,等. 6 种丁香的的光合特性[J]. 东北林业大学学报,2008,36(7):23-24.
- [6] 许小妍,李娟娟,张会慧,等. 盐和淹水双重胁迫对 3 种丁香幼苗叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 东北林业大学学报,2012,40(11):48-52.
- [7] 李娟娟,许晓妍,朱文旭,等. 淹水胁迫对丁香叶绿素含量及荧光特性的影响[J]. 经济林研究,2012,30(2):43-47.
- [8] 李娟娟,许晓妍,朱文旭,等. 淹水胁迫对 3 种丁香生理指标的影响[J]. 林业科技,2012,37(2):8-10.
- [9] HANK W, WILLIAM A, TIMOTHY C. Conditions leading to high  $CO_2$  (>5 kPa) in waterlogged flooded soils and possible effects on root growth and metabolism[J]. Annals of Botany,2006,98:9-32.
- [10] 梁哲军,陶洪斌,王璞. 淹水解除后玉米幼苗形态及光合生理特征恢复[J]. 生态学报,2009,29(7):3977-3986.
- [11] 魏和平,利容干,王建波. 淹水对玉米叶片细胞超微结构的影响[J]. 植物学报,2000,42(8):811-817.
- [12] 杜克兵,许林,涂炳坤,等. 淹水胁迫对 2 种杨树 1 年生苗叶片超微结

- 构和光合特性的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(6): 58-64.
- [13] ZHANG L T, GAO H Y, ZHANG Z S, et al. Multiple effects of inhibition of mitochondrial alternative oxidase pathway on photosynthetic apparatus in *Rumex K-1* leaves[J]. *Biologia Plantarum*, 2012, 56(2): 365-368.
- [14] STRASSER R J, SRIVASTAVA A, GOVINDJEE. Polyphasic chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1995, 61(1): 32-42.
- [15] 张斌斌, 许建兰, 蔡志翔, 等. 淹水胁迫下2个李砧木品种光合特性变化及其与环境因子的关系[J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(5): 39-44.
- [16] 袁琳, 张利权, 古志钦. 入侵植物互花米草(*Spartina alterniflora*)叶绿素荧光对淹水胁迫的响应[J]. 环境科学学报, 2010, 30(4): 882-889.
- [17] 孙山, 王少敏, 王家喜, 等. 黑暗中脱水对金太阳杏离体叶片PSI和PSII功能的影响[J]. 园艺学报, 2008, 35(1): 1-6.

- [18] LI P M, CHENG L L, GAO H Y, et al. Heterogeneous behavior of PSII in soybean (*Glycine max*) leaves with identical PSII photochemistry efficiency under different high temperature treatments[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2009, 166: 1607-1615.
- [19] STRASSER R J, SRIVASTAVA A, GOVINDJEE. Polyphasic chlorophyll a fluorescence transients[J]. *Photosynthesis Research*, 1997, 52(2): 147-155.
- [20] 李耕, 高辉远, 赵斌, 等. 灌浆期干旱胁迫对玉米叶片光系统活性的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(10): 1916-1922.
- [21] 邱念伟, 周峰, 顾祝军, 等. 5种松属树种光合功能及叶绿素快相荧光动力学特征比较[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1181-1187.
- [22] NADIA A A, DEWEZ D, DIDUR O, et al. Inhibition of photosystem II photochemistry by Cr is caused by the alteration of both D1 protein and oxygen evolving complex[J]. *Photosynthesis Research*, 2006, 89: 81-87.

(上接第3781页)

作用。具体的深层次高浓度CO<sub>2</sub>与拟南芥叶绿体的作用机

制还有待研究。

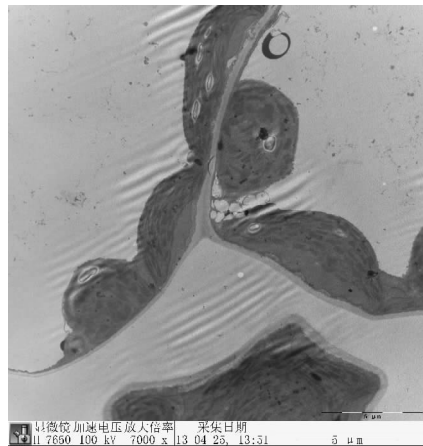


图7 电镜下处理7 d叶绿体的结构

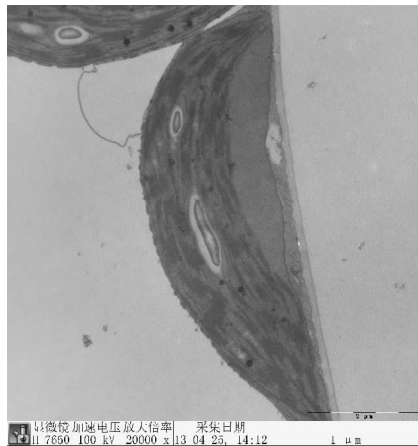


图8 电镜下处理7 d叶绿体的整体结构

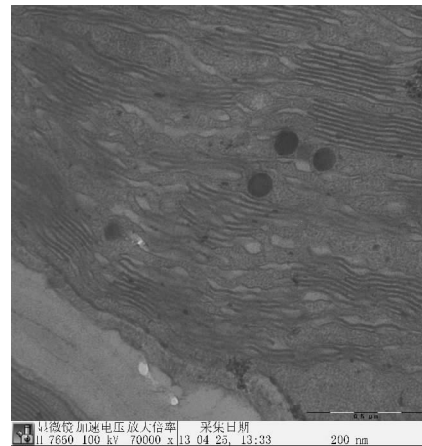


图9 电镜下处理7 d叶绿体的片层结构

研究还表明,高浓度CO<sub>2</sub>条件下试验组与对照组叶片的干重、鲜重和干鲜比均随处理时间的延长而呈现增加趋势,但增加幅度存在明显的差异,叶片相对含水量随处理时间的延长而呈现先增长再下降的趋势,叶绿素a含量、叶绿素b含量以及叶绿素总量在试验中呈现不同的变化趋势。CO<sub>2</sub>浓度的升高能增加植物光合色素含量,降低叶绿素a与叶绿素b的比值。但也有研究认为,CO<sub>2</sub>浓度的升高并不利于植物光合色素的合成。该试验的研究结果与庄明浩等<sup>[10]</sup>对毛竹叶片的研究结果类似。电镜图片表明,高浓度CO<sub>2</sub>处理拟南芥在短期内会出现叶绿体的形状变大、内含物增多、片层结构增长等一系列促进作用和基粒片层、类囊体结构、膜结构出现松散等现象。这与惠俊爱等<sup>[11]</sup>对丹尼斯凤梨叶片的研究结果相似。随着处理时间的延长,叶绿体出现脂质球增多,基粒片层和类囊体垛叠结构出现扭曲,松散几乎填满整个叶绿体,说明此时叶绿体整体的光合性能开始出现破坏。这与Thomas等<sup>[12]</sup>对玉米大豆的研究结果相似。

#### 参考文献

- [1] 陈璋. 拟南芥:植物分子生物学研究的模式物种[J]. 植物学通报, 1994,

- 11(1): 6-11.
- [2] 李俊华, 张艳春, 徐云远, 等. 拟南芥室内培养技术[J]. 植物学通报, 2004, 21(2): 201-204.
- [3] 安贤惠. 拟南芥及其研究进展[J]. 西北农业学报, 1998, 7(1): 92-94.
- [4] 黄娟, 李家洋. 拟南芥基因组研究进展[J]. 微生物学通报, 2001, 28(3): 99-101.
- [5] SEKI M, NARUSAKA M, ISHIDA J, et al. Monitoring the expression profiles of 7000 *Arabidopsis* genes under drought, cold and high-salinity stresses using a full-length cDNA microarray[J]. *The Plant Journal*, 2002, 31: 279-292.
- [6] 祝介东, 孟婷婷, 倪健, 等. 不同气候带间成熟林植物叶性状间异速生长关系随功能型的变异[J]. 植物生态学报, 2011, 35(7): 687-698.
- [7] 周白云, 梁宗锁, 李硕, 等. 干旱-复水对酸枣相对含水量、保护酶及光合特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 93-97.
- [8] 黄帆, 郭正元, 徐珍. 测定浮萍叶绿素含量的方法研究[J]. 实验技术与管理, 2007, 24(5): 29-31.
- [9] 李淑文, 李迎春, 彭玉信. 不同草坪草叶绿素含量变化及其与绿度的关系[J]. 草原与草坪, 2008(6): 54-56.
- [10] 庄明浩, 李迎春, 郭子武, 等. 大气CO<sub>2</sub>浓度升高对毛竹叶片膜脂过氧化和抗氧化系统的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1064-1069.
- [11] 惠俊爱, 叶庆生. CO<sub>2</sub>加富对丹尼斯凤梨叶片显微超微结构的影响[J]. 激光生物学报, 2007, 16(2): 186-194.
- [12] THOMAS J E, HARVEY C N. Leaf Anatomy of Four Species Grown Under Continuous CO<sub>2</sub> Enrichment[J]. *BOT GAZ*, 1983, 144: 303-309.