

## 微透析法研究盐胁迫下杨树嫩茎内源激素和叶片叶绿素荧光参数的变化

马金龙<sup>1,3</sup>, 姜国斌<sup>2,\*</sup>, 姚善泾<sup>1,\*</sup>, 孙若峥<sup>2</sup>, 邓绍立<sup>4</sup>

<sup>1</sup>浙江大学化学工程与生物工程学系, 杭州310027; <sup>2</sup>大连民族学院<sup>2</sup>环境与资源学院, <sup>3</sup>生命科学学院, 辽宁大连116600; <sup>4</sup>北方民族大学生物科学与工程学院, 银川750021

**摘要:** 采用微透析技术获得杨树质外体透析液, 高效液相色谱测定盐胁迫下吴屯杨和欧美杨内源激素的动态变化, 并结合叶绿素荧光参数的变化, 分析对比吴屯杨和欧美杨两种杨树的耐盐性。结果表明, 高盐度胁迫下吴屯杨体内脱落酸(ABA)的积累量为对照的1.3倍, 而欧美杨体内ABA的积累量为对照的1.8倍; 欧美杨的PSII原初光能转换效率( $F_v/F_m$ )及电子传递效率(ETR)值显著低于吴屯杨, 光系统破坏程度较大; 欧美杨的抗盐平衡系数明显大于吴屯杨的抗盐平衡系数, 说明盐胁迫下欧美杨各种激素之间的协调作用下降, 生长受胁迫的抑制程度大于吴屯杨, 表明吴屯杨耐盐性强于欧美杨。此方法为研究杨树质外体内的耐盐性机制和选育耐盐杨树新品种提供理论依据。

**关键词:** 杨树; 微透析; 质外体; 盐胁迫; 叶绿素荧光参数

## Changes of Endogenous Hormones in the Tender Stems and Chlorophyll Fluorescence in the Leaves of Poplar Trees under Salt Stress by Microdialysis

MA Jin-Long<sup>1,3</sup>, JIANG Guo-Bin<sup>2,\*</sup>, YAO Shan-Jing<sup>1,\*</sup>, SUN Ruo-Zheng<sup>2</sup>, DENG Shao-Li<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; <sup>2</sup>College of Environment and Resources, <sup>3</sup>College of Life Sciences, Dalian Nationalities University, Dalian, Liaoning 116600, China; <sup>4</sup>College of Biological Science and Engineering, Beifang University of Nationalities, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** The apoplast dialysates from poplar trees were obtained using the microdialysis technique. To compare the salt tolerance of *Populus × wutunensis* and *Populus × euramericana*, the dynamics of their endogenous hormones were determined by high performance liquid chromatography and the difference in chlorophyll photosynthetic fluorescence parameters was analyzed under salt stress. The results showed that ABA level in *P. × wutunensis* under the high-concentration salt stress for fifteenth days was 1.3 times higher than that under the normal condition, while it was 1.8 times higher in *P. × euramericana* under salt stress. The  $F_v/F_m$  and ETR values in *P. × euramericana* were significantly lower than those in *P. × wutunensis*, indicating that the photosynthetic system of *P. × euramericana* was more severely affected. Furthermore, the salt balance coefficient of *P. × euramericana* is obviously bigger than that of *P. × wutunensis*, suggesting that under high-concentration salt stress the coordinative capacity of hormones in *P. × euramericana* was decreased and its growth was more severely inhibited by stress than that in *P. × wutunensis*. Together, our results suggest that *P. × wutunensis* has higher salt tolerance than *P. × euramericana*. Our approaches used in this study may be useful for studying the physiological mechanisms of salt tolerance in poplar apoplast and for selection and breeding salt tolerant varieties of *Populus*.

**Key words:** poplar tree; microdialysis; apoplast; salt stress; chlorophyll fluorescence parameter

盐渍化是影响农业生产和植物分布的重要因素(Turkan和Demiral 2009), 世界上有超过8亿公顷盐渍化土地, 我国约有2.5亿公顷的各种盐渍化土壤, 由于不正确的灌溉和全球变暖的影响, 还有逐年上升的趋势。随着世界人口的增加, 开发和利用盐渍土地显得尤为重要, 其中, 提高经济作物的耐盐性已成为关键措施之一。杨树是种植较为广泛的木材经济作物和环保植物, 在农业防护林、

植被修复、能源生产等方面发挥着重要作用。最近几年, 由于杨树生长快速、基因型多样等特点,

收稿 2013-06-09 修定 2013-07-25

资助 国家自然科学基金(No30872004)、中央高校基本科研业务费专项资金(DC12010305)和中央高校基本科研业务费专项资金(DC12010204)。

\* 共同通讯作者(E-mail: jgb@dlnu.edu.cn, Tel: 0411-8765-6278; E-mail: yaosj@dlnu.edu.cn, Tel: 0571-87951982)。

被广泛用于抗逆性研究中(Chen和Polle 2010; Luo和Polle 2009)。

植物内源激素与植物耐盐性的关系一直是植物抗盐机理研究的主要内容,盐胁迫时,植物内源激素作为痕量信号分子其含量发生变化,从而调控植物盐胁迫后的一系列生理生化反应。植物激素的作用专一性不甚明显,往往一种激素具有多种生理效应,而不同的激素又可引起同一种生理效应。而且,植物激素之间可通过相互协作或相互拮抗的途径对植物的生长发育起调控作用,杨树在盐胁迫时,激素变化较为明显,可作为耐盐性评价的一个重要指标。

叶绿体是植物光合作用的场所,也是对盐胁迫最敏感的细胞器,植物光合性能的好坏最终可影响其生长和产量。20世纪80年代以后,人们在逐渐弄清植物体内叶绿素荧光动力学与光合作用关系的基础上,发现它对各种胁迫因子十分敏感,因而越来越多地将其作为鉴定植物抗逆性的理想指标和技术(赵会杰等2000)。目前,叶绿素荧光分析技术应用于光合作用机理、植物抗逆生理和作物增产潜力预测等方面的研究已取得一定进展,并且愈来愈多的研究表明植物体内发出的叶绿素荧光信号包含了十分丰富的光合作用信息,其特性又极易随外界环境条件的变化而变化,可以快速、灵敏和无损伤地研究和探测完整植株在胁迫条件下光合作用的真实行为,经常被用于评价环境胁迫对光合作用功能的影响(冯建灿等2002)。

以往研究激素的方法局限于有机溶剂层析或萃取的方法,分离激素过程较为繁琐复杂,费时费力,不能实时、活体测量和无损伤,对于盐胁迫下杨树内源激素和荧光参数的变化的研究是相对分离的。本实验采用微透析技术来提取杨树质外体中的激素,结合高效液相色谱测定不同浓度盐胁迫下两个树种内源激素的动态变化,同时采用传统检测方法研究荧光参数的变化,综合分析不同杨树树种的耐盐性,探讨杨树耐盐的生理机制,为选育耐盐杨树新品种提供理论依据。

## 材料与方 法

### 1 试验材料与盐胁迫处理

以盆栽吴屯杨(*Populus × wutunensis*)和欧美杨(*Populus × euramericana*)品种‘中荷64’为材料,在4

月上旬进行插条,每隔5~7 d浇1次0.5 L Hoagland营养液,注意防雨及植株病虫害防治。待其生长一个月后,分别选择生长良好的吴屯杨和欧美杨苗木各3株进行NaCl胁迫处理,NaCl浓度分别为0 (CK)、200、300 mmol·L<sup>-1</sup> (用Hoagland营养液配制),每隔5 d浇1次含有不同浓度NaCl的营养液。分别在盐处理后0、5、10、15 d从不同浓度处理的杨树嫩茎上部进行微透析取样,平行重复3次。

### 2 色谱条件及标准溶液的配制

岛津Inertsil ODS-SP (250 mm×4.6 mm, 5 μm)色谱柱,流动相为甲醇(德国Merck公司):Millipore-Q超纯水(其中含有0.2%的分析纯磷酸,上海生工)=60:40 (V/V),柱温30 °C,流速0.6 mL·min<sup>-1</sup>,检测波长210 nm,进样量20 μL,岛津LC-20AB高效液相色谱仪。收集到的透析液在该色谱条件下直接进样。

准确称取标准品赤霉素(GA<sub>3</sub>)、细胞分裂素(CTK)、吲哚乙酸(IAA)、脱落酸(ABA)各5 mg (上海生工,纯度>99%),置于50 mL容量瓶内,用流动相定容至50 mL,配制成100 mg·L<sup>-1</sup>的标准溶液。再分别将上述4种溶液配制成系列浓度梯度的混合标准溶液。

### 3 透析液的获取与回收率的测定

本试验选用购自美国BASi公司的微透析仪和微透析探针,微透析探针截留量为30 kDa。探针与嫩茎呈30°~45°的角度插入嫩茎,为防止灌流液损失及探针脱落,采用牙托水(取少许自凝粉,吸取适量义齿基托树脂液剂搅拌至黏糊状)将探针插入部位密封好;灌流速度为1 μL·min<sup>-1</sup>,灌流液为Millipore-Q超纯水。在探针插入100 min达到稳定状态后,收集透析液。

体外回收率的测定:在微透析取样前后分别把微透析探针插入配置的标准溶液中,稳定后收集透析液,用高效液相色谱仪分析其含量。最后利用HPLC测定取样前后透析液中各激素质量浓度与标准液中各激素质量浓度之比,即该探针的体外回收率,试验中测得探针回收率均值为7.5%。

### 4 叶绿素荧光参数的测定

用LI-6400便携式光合仪的荧光叶室在杨树盐处理后0、5、10、15 d进行测定,试验期间,日最高光照强度为920 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,白天气温20~26 °C,夜间气温13~17 °C。苗木暗适应一个晚上,在凌晨

测定初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )和PSII原初光能转换效率( $F_v/F_m$ ),把暗适应的苗木拿到自然光下活化,测定其电子传递效率ETR。测定时选取植株最近完全展开的成熟叶片(从顶部数第4~5片),每株5片,每处理重复3株。

## 5 数据统计分析

采用SPSS软件和Excel软件分析处理数据。

## 实验结果

### 1 盐胁迫对杨树植株表现的影响

盐胁迫5 d后,两个杨树品种都开始出现轻微的叶子卷曲现象,在重度盐胁迫下最先出现这种现象。胁迫10 d后,两种浓度处理的植株都出现轻微的萎蔫,且植株在 $300 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐胁迫下较 $200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐胁迫下萎蔫程度更严重,欧美杨的萎蔫程度较重,吴屯杨较轻。胁迫15 d后,欧美杨在 $300 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐胁迫下叶子开始有变黄凋落现象, $200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫下叶片也逐渐开始枯黄,吴屯杨也有部分变黄,但没发生凋落现象。

### 2 盐胁迫对吴屯杨和欧美杨内源激素含量的影响

由图1~4可见,吴屯杨和欧美杨受到盐胁迫后内源激素含量发生了变化,并呈现一定的规律性,总的趋势为在盐胁迫下,ABA含量升高,其他3种激素含量降低。从图1可以看出,ABA在盐胁迫后迅速积累,在盐胁迫的一定时间内显著高于对照,  $300 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐胁迫下ABA的积累要高于 $200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐胁迫下的积累量,吴屯杨在 $300 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐胁迫后的15 d ABA积累量为对照的1.3倍,而相比之下欧美杨在 $300 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐胁迫后的

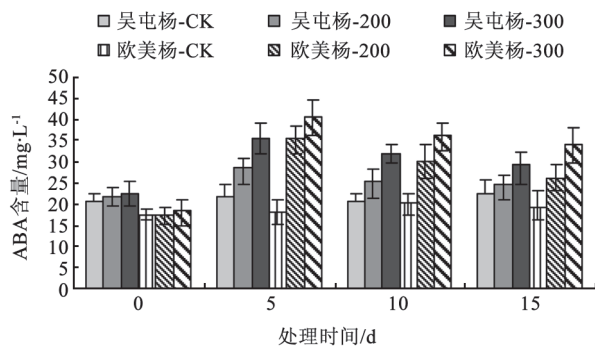


图1 盐胁迫对两种杨树ABA含量的影响  
Fig.1 Effect of salt stress on content of ABA of two species of poplar

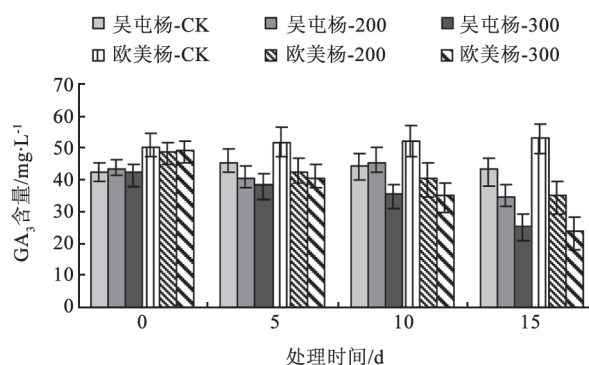


图2 盐胁迫对两种杨树GA<sub>3</sub>含量的影响  
Fig.2 Effect of salt stress on content of GA<sub>3</sub> of two species of poplar

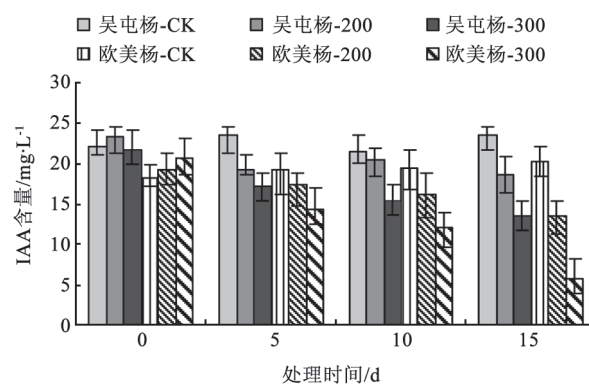


图3 盐胁迫对两种杨树IAA含量的影响  
Fig.3 Effect of salt stress on content of IAA of two species of poplar

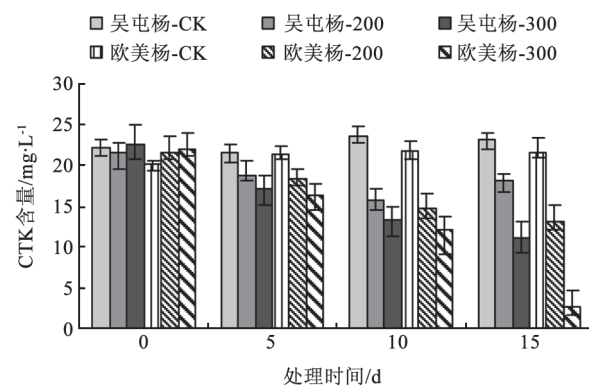


图4 盐胁迫对两种杨树CTK含量的影响  
Fig.4 Effect of salt stress on content of CTK of two species of poplar

15 d ABA的积累量为对照的1.8倍,在同等盐胁迫条件下,一定时间内欧美杨中ABA的积累量明显

高于吴屯杨。说明在盐胁迫一定时间内欧美杨需要积累更多的ABA来适应外界盐分的胁迫。张敏等(2008)在研究盐胁迫环境下不同抗盐性小麦品种幼苗长势和内源激素的变化中发现,盐胁迫下抗盐性强的小麦‘德抗961’中ABA含量增幅低于抗盐性弱的‘泰山9818’,刘桂丰等(1998)研究盐逆境条件下3个树种的內源激素变化发现,在同等盐浓度条件下,抗盐性强的植物ABA含量较稳定。因此,盐胁迫条件下ABA的变化趋势可以作为林木抗性选择的指标。

图2表明,GA<sub>3</sub>含量在盐胁迫下下降,吴屯杨和欧美杨在300 mmol·L<sup>-1</sup>盐处理后15 d显著低于对照( $P<0.05$ ),欧美杨下降的幅度要大于吴屯杨,在200 mmol·L<sup>-1</sup>盐胁迫下,吴屯杨体内的GA<sub>3</sub>有一定的调节,而欧美杨体内的GA<sub>3</sub>含量随着盐胁迫时间的延长和盐浓度的增加,呈现出不断下降的趋势。由图3、4可见,IAA和CTK含量在盐胁迫下随着胁迫时间的延长呈逐渐下降的趋势,在盐胁迫开始5 d内下降并不明显,在盐胁迫后10到15 d之间,下降趋势明显,在盐胁迫后15 d,吴屯杨和欧美杨体内的IAA和CTK含量显著低于对照( $P<0.05$ )。

在植物生长发育过程中,并非是单一激素在起作用,而是各种激素相互作用的综合表现。因而这些内源激素在植物体内的含量水平及相互平衡状况,对植物生长发育的各个阶段和各个方面都有重要的调节作用(吴颂如等1988;吴国胜等1993;陈永密1980;赵丽英等2007;杨广东等2002)。在盐胁迫下,IAA和GA均促进多胺的产生,ABA抑制多胺的合成,多胺与乙烯的合成又存在竞争关系等。乙烯反应可能是由生长素介导,能够促进生长素的合成,生长素也能促进乙烯的合成。生长素和脱落酸之间存在信号通讯,生长素整合各种激素信号的加工和转导。林木在盐胁迫条件下是通过改变其体内的各种激素含量来维持正常生长。通常随着盐浓度的增加,ABA含量升高,而CTK、IAA、GA的含量降低,并非是ABA含量越高CTK、IAA、GA含量越低越好,而是应保持各自合适的含量水平及相互平衡状况。刘桂丰等(1998)提出了用激素抗盐平衡系数这个指标来衡量林木在盐胁迫条件下内源激素总体调控能力。

根据刘桂丰等(1998)提出的激素抗盐平衡系数

的算法,分别计算吴屯杨和欧美杨在200和300 mmol·L<sup>-1</sup>盐浓度胁迫下的激素抗盐平衡系数,吴屯杨的数值分别为0.1054和0.2775,欧美杨的数值分别为0.2746和0.5038,通过抗盐平衡系数研究,在300 mmol·L<sup>-1</sup>盐胁迫下,吴屯杨和欧美杨的抗盐系数大于200 mmol·L<sup>-1</sup>盐胁迫下的抗盐系数,说明在高浓度的盐分胁迫下,树木体内的激素综合调节能力下降。无论是200 mmol·L<sup>-1</sup>还是300 mmol·L<sup>-1</sup>的盐分胁迫,吴屯杨的激素抗盐平衡系数都小于欧美杨的,说明在盐分胁迫下,吴屯杨体内的各种激素综合调节能力要强于欧美杨,具有较强的抗盐能力。

### 3 盐胁迫对两种杨树叶绿素荧光参数的影响

初始荧光 $F_0$ 是PSII反应中心全部开放时的荧光,其大小主要与PSII天线色素内的最初激发子密度、天线色素到PSII反应中心的激发能传递速率的结构状态及叶绿素含量有关,而与光合作用光化学反应无关。最大荧光 $F_m$ 是PSII反应中心完全关闭时的荧光产量。由图5、6可见,吴屯杨和欧美杨在盐胁迫下,随着胁迫时间的延长, $F_0$ 逐渐升

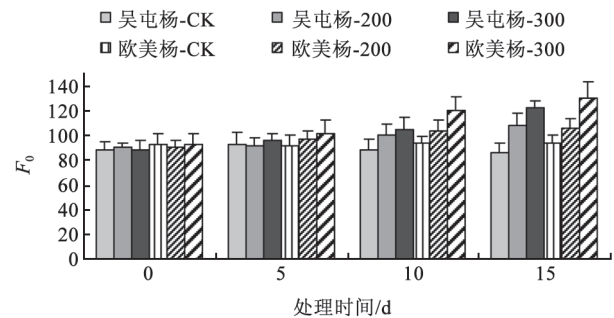


图5 盐胁迫对两种杨树叶片 $F_0$ 的影响

Fig.5 Effect of salt stress on  $F_0$  of two species of poplar

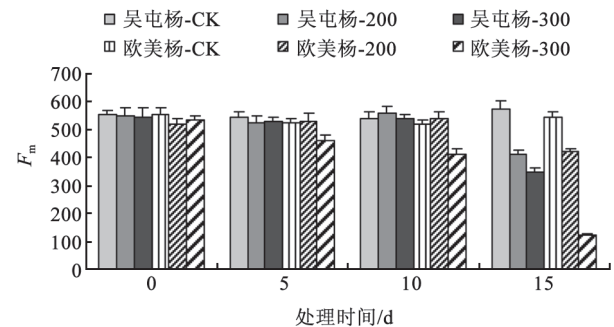


图6 盐胁迫对两种杨树叶片 $F_m$ 的影响

Fig.6 Effect of salt stress on  $F_m$  of two species of poplar

高,  $F_m$  逐渐降低, 在  $200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的盐分胁迫下, 两种杨树  $F_o$  升高和  $F_m$  降低的趋势及程度比较接近, 差异不显著 ( $P>0.05$ ), 但在  $300 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的盐分胁迫后 15 d, 欧美杨  $F_o$  升高程度和  $F_m$  降低程度显著高于吴屯杨 ( $P<0.05$ ), 说明欧美杨在高浓度盐分胁迫下 PSII 反应中心的破坏程度强于吴屯杨。

PSII 原初光能转换效率越高, 越有利于把捕获的光能有效地转化为生物化学能, 植物在进行光合作用过程中, 其转能效率的高低, 直接影响到植物对光能的利用效率。非胁迫条件下,  $F_v/F_m$  变化极小, 不受物种和生长条件的限制, 胁迫条件下, 该参数会下降。由图 7 可见, 在  $200$  和  $300 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的盐分胁迫下, 两种杨树 PSII 原初光能转换效率  $F_v/F_m$  都在不断下降, 在  $200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的盐分胁迫下, 吴屯杨和欧美杨的  $F_v/F_m$  值降低趋势相近, 说明在中度盐胁迫下, 盐分胁迫对两种杨树原初光能转换效率的影响程度相近, 但在  $300 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  高浓度的盐分胁迫下, 欧美杨在盐胁迫后 10~15 d 之间急剧下降, 在胁迫后 15 d 时, 欧美杨的  $F_v/F_m$  值显著低于吴屯杨 ( $P<0.05$ )。由图 8 可见, 盐胁迫使两种杨

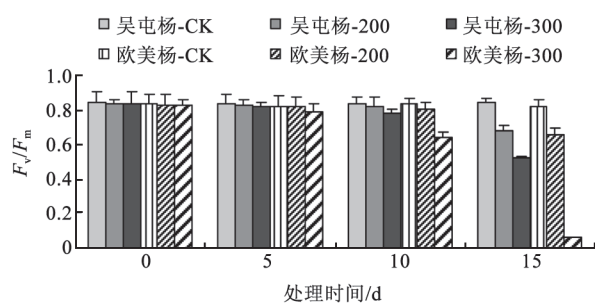


图 7 盐胁迫对两种杨树叶片  $F_v/F_m$  的影响

Fig. 7 Effect of salt stress on  $F_v/F_m$  of two species of poplar

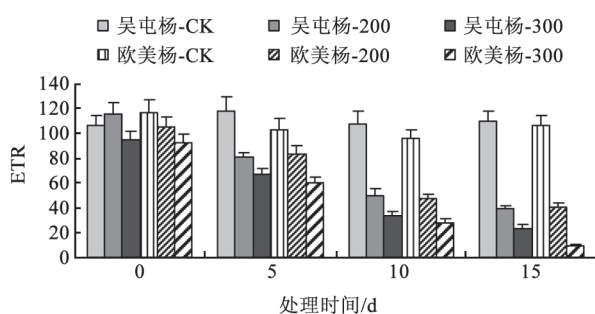


图 8 盐胁迫对两种杨树叶片 ETR 的影响

Fig. 8 Effect of salt stress on ETR of two species of poplar

树叶电子传递效率 ETR 降低, 在盐胁迫后 15 d 时,  $200$  和  $300 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的盐胁迫下两种杨树的电子转换效率显著低于各自的对照 ( $P<0.05$ ), 说明盐胁迫严重影响光系统 II 的电子传递效率。

## 讨 论

在对激素调控作用的研究中, 研究较多的是 ABA 与基因的表达的关系, 因为 ABA 与植物逆境生理有重要的关系。越来越多的研究表明: ABA 在生物体内最主要的功能是其作为胁迫激素参与了植物对外界胁迫条件的适应, 在胁迫条件下, ABA 调控了气孔关闭和基因表达, ABA 信号途径的激活对高盐环境下植物的生长抑制有重要意义 (梁建生 1991)。植物体内存在 GA 信号的传递网络。受体感知 GA 信号后, 激活信号传递通道中的各基因表达, 从而影响植株的形态建成和发育。当编码这些信号因子的基因及其它们所识别的顺式作用位点发生突变时, 下游基因的表达和相关蛋白间的相互作用发生相应的变化, 导致植物对 GA 反应的改变 (黄先忠等 2006)。生长素可刺激植物细胞增大和茎干生长、刺激形成层细胞分裂、刺激木质部和韧皮部等维管组织和根的分化等, 在植物的生长和发育过程中发挥重要作用, 盐胁迫通过调控生长素浓度梯度和再分配影响植物的侧根数、侧根和初生根生长及根的生长方向 (刘进平 2007)。细胞分裂素是促进植物细胞分裂的激素, 在逆境胁迫下, 细胞分裂素降低, 减少从根到苗的供应, 可直接或间接地清除自由基, 影响其他激素的信号转导, 从而导致其他代谢的变化, 包括对逆境适应性的改变 (王三根 2000)。

刘桂丰等 (1998) 提出激素抗盐平衡系数这一概念, 即在盐胁迫条件下植物的 ABA 含量增加, 而 IAA、CTK、GA 含量降低。在同等级盐胁迫条件下 (不高于林木的致死盐浓度), 用抑制型激素 ABA 的增加倍数分别除以促进型激素 IAA、CTK、GA 的降低倍数所得的比值分别叫做 ABA 与 IAA、CTK、GA 的拮抗效应系数; 将每个激素的拮抗效应系数分别减去 3 个拮抗效应系数的平均值后再取绝对值, 分别把它们叫做 IAA、CTK、GA 对 ABA 的抗盐调节值; 将 3 种激素的抗盐调节值求和再除以拮抗效应系数的平均值, 所得的比值就叫

激素抗盐平衡系数,简称平衡系数。激素抗盐平衡系数是衡量林木抗盐能力的一个生理指标,平衡系数的大小反映了植物(包括林木)在盐胁迫下激素系统的总体调节能力。平衡系数越小,说明林木在盐胁迫的情况下,激素的协调能力越强,平衡系数越大,抗盐能力越弱(刘桂丰等1998;闫艳华等2011),植物各种激素在整个生长发育周期相互作用,保持动态平衡(刘颖慧等2005)。本文通过对两种杨树盐胁迫下抗盐平衡系数的计算,得出200 mmol·L<sup>-1</sup>盐胁迫下,两种杨树的抗盐平衡系数小于300 mmol·L<sup>-1</sup>盐胁迫下的抗盐平衡系数,说明中度盐胁迫下杨树体内的自我调节能力强于高浓度盐胁迫下的调节能力。300 mmol·L<sup>-1</sup>盐胁迫下,欧美杨的抗盐平衡系数明显大于吴屯杨的抗盐平衡系数,说明在高浓度的盐胁迫下,欧美杨各种激素之间的协调作用下降,生长受胁迫的抑制程度大于吴屯杨。

研究发现,在盐胁迫下,两种杨树体内ABA含量升高,其他激素含量降低。在300 mmol·L<sup>-1</sup>盐胁迫下,ABA的积累量大于200 mmol·L<sup>-1</sup>盐胁迫下ABA积累量,说明在高浓度的盐胁迫下,杨树体内需要积累更多的ABA以适应外界环境的变化。300 mmol·L<sup>-1</sup>盐胁迫后15 d,吴屯杨体内ABA的积累量为对照的1.3倍,而欧美杨体内ABA的积累量为对照的1.8倍,在同等胁迫条件下,欧美杨需要积累更多的ABA来抵御胁迫环境,ABA大量的积累造成其他激素含量的降低,严重抑制了生长。刘桂丰等(1998)在研究盐逆境条件下3个树种的内源激素变化发现,在同等盐浓度条件下,抗盐性强的植物ABA含量较稳定。因此,推测吴屯杨的抗盐性大于欧美杨。

叶绿素荧光动力学技术在研究叶片光合作用过程中,光系统对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面具有独特的作用,与“表现性”的气体交换指标相比较,叶绿素荧光参数更具有反映“内在性”的特点。 $F_0$ 的大小取决于PSII天线色素内的最初光子密度、天线色素之间以及天线色素到PSII反应中心的激发能传递有关的结构状态(赵丽英等2007)。PSII天线色素的热耗散常导致 $F_0$ 降低,而PSII反应中心的破坏或可逆失活则能引起 $F_0$ 的增

加,因此,可根据 $F_0$ 的变化推测反应中心的状况和可能的光保护机制(杨广东2002)。

本研究表明,盐胁迫造成杨树PSII原初光能转换效率 $F_v/F_m$ 及电子传递效率ETR的降低。200 mmol·L<sup>-1</sup>盐胁迫下,两种杨树PSII原初光能转换效率 $F_v/F_m$ 及电子传递效率ETR降低趋势差异不显著,300 mmol·L<sup>-1</sup>盐胁迫后15 d,欧美杨 $F_v/F_m$ 及ETR值显著低于吴屯杨,光系统破坏程度较大。对于植物体内调节机理,激素变化是如何影响荧光参数的变化等,还有待于进一步研究。

### 参考文献

- 陈永密(1980). 赤霉素对林木幼苗生长的影响. 植物生理学通讯, (4): 43~44
- 冯建灿, 胡秀丽, 毛训甲(2002). 叶绿素荧光动力学在研究植物逆境生理中的应用. 经济林研究, 20 (4): 14~18
- 黄先忠, 蒋才富, 廖立力, 傅向东(2006). 赤霉素作用机理的分子基础与调控模式研究进展. 植物学通报, 23 (5): 499~510
- 梁建生(1991). ABA对高等植物基因表达的调节作用. 植物生理学通讯, 27 (3): 230~233
- 刘桂丰, 杨传平, 温绍龙, 刘关君, 王玉霞(1998). 盐逆境条件下三个树种的內源激素变化. 东北林业大学学报, 26 (1): 1~3
- 刘进平(2007). 生长素受体与信号转导机制研究进展. 生物技术通报, (3): 22~30
- 刘颖慧, 袁进成, 抗艳红(2005). 激素调控植物顶端优势的分子生物学进展. 中国农学通报, 21 (3): 86~89
- 王三根(2000). 细胞分裂素在植物抗逆和延衰中的作用. 植物学通报, 17 (2): 121~126
- 吴国胜, 王学臣, 娄成后(1993). 豌豆中脱落酸含量、叶片导性与土壤含水量之间的关系. 植物生理学报, 19 (4): 391~394
- 吴颂如, 陈婉芬, 周燮(1988). 酶联免疫法(ELISA)测定内源植物激素. 植物生理学通讯, 23 (5): 53~57
- 闫艳华, 姜国斌, 侯和胜, 金华, 马金龙, 王颖(2011). 杨树内源激素对NaCl胁迫的响应. 西北农业学报, 20 (9): 160~164
- 杨广东, 朱祝军, 计玉妹(2002). 不同光强和缺铁胁迫对黄瓜叶片叶绿素荧光特性和活性氧产生的影响. 植物营养与肥料学报, 8 (1): 115~118
- 张敏, 蔡瑞国, 李慧芝, 李建敏, 戴忠民, 王振林, 尹燕桦(2008). 盐胁迫环境下不同抗盐性小麦品种幼苗长势和内源激素的变化. 生态学报, 28 (1): 311~320
- 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叶绿素荧光参数的变化研究. 中国生态农业学报, 15 (1): 63~66
- Chen S, Polle A (2010). Salinity tolerance of *Populus*. Plant Biol, 12: 317~333
- Luo ZB, Polle A (2009). Wood composition and energy content in a poplar short rotation plantation on fertilized agricultural land in a future CO<sub>2</sub> atmosphere. Global Change Biol, 15 (1): 38~47
- Turkan I, Demiral T (2009). Recent developments in understanding salinity tolerance. Environ Exp Bot, 67: 2~9