

文章编号: 1001-1498(2010)04-0537-07

## 盐胁迫下 3 个楸树无性系光合特征研究

王 臣<sup>1</sup>, 虞木奎<sup>1\*</sup>, 张 翠<sup>1</sup>, 吴统贵<sup>1</sup>, 袁健军<sup>1</sup>, 周成云<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2. 浙江省富阳市林业局, 浙江 富阳 311400)

**摘要:** 以 3 个楸树无性系为材料进行盐胁迫试验, 分析了叶片叶绿素含量、净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 等指标的变化规律。结果表明: 随盐浓度增加, 所有无性系的叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量呈下降趋势; 方差分析表明: 处理间及无性系间差异显著 ( $P < 0.05$ )。叶绿素 a/叶绿素 b 值呈上升趋势, YQ<sub>1</sub> 无性系各盐处理与 CK 差异不显著, 02-2-5 和 07-1 无性系各盐处理与 CK 存在一定差异。从光合日变化看, 3 个无性系的  $P_n$  随盐浓度的升高明显降低, 降幅为 07-1 > YQ<sub>1</sub> > 02-2-5, 净光合速率最大值 ( $P_{max}$ ) 都出现在 8:00 时, 无性系间差异显著, 且 02-2-5 > YQ<sub>1</sub> > 07-1。回归分析和通径分析表明: 02-2-5 和 YQ<sub>1</sub> 无性系主要受胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ )、叶温 ( $T_l$ )、光合有效辐射 ( $PAR$ ) 的影响, 07-1 无性系主要受  $G_s$  和  $C_i$  的影响。初步认为 3 个无性系的耐盐能力为 02-2-5 > YQ<sub>1</sub> > 07-1。

**关键词:** 楸树; 无性系; 盐胁迫; 叶绿素含量; 净光合速率; 回归分析; 通径分析

中图分类号: S723.1

文献标识码: A

## Studies on Photosynthetic Characteristics of Three Clones of *Catalpa bungei* under Various Salt Stress

WANG Chen<sup>1</sup>, YU Mu-kui<sup>1</sup>, ZHANG Cui<sup>1</sup>, WU Tong-gui<sup>1</sup>, YUAN Jian-jun<sup>1</sup>, ZHOU Cheng-yun<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China;

2. Forestry Bureau of Fuyang City, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

**Abstract:** The leaf chlorophyll contents, the daily dynamic of net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) and major affecting factors were determined of three clones of *Catalpa bungei* under salt stress. The results showed that Chla, Chlb and Chlt contents decreased under salt stress and significant differences were found of Chla, Chlb and Chlt among 3 clones of *C. bungei*. The ratios of Chla/Chlb increased with the increasing of salt concentration, and significant differences were found in different treatments of 02-2-5 and 07-1. The maximum of  $P_n$  ( $P_{max}$ ) appeared at 8:00 in all treatments of 3 clones, with the sequence of 02-2-5 > YQ<sub>1</sub> > 07-1, and significant differences were found in 3 clones.  $P_n$  was also decreased with the increasing of salt concentration, and the sequence of decrement was 07-1 > YQ<sub>1</sub> > 02-2-5. Stepwise multiple-regression and path coefficient analysis indicated that the major affecting factor of  $P_n$  were  $C_i$ , leaf temperature ( $T_l$ ) and photosynthetic active radiation ( $PAR$ ) in clones of 02-2-5 and YQ<sub>1</sub>, but  $G_s$  and  $C_i$  in 07-1. Based on the variations of leaf chlorophyll contents and  $P_n$  among 3 clones under salt stress, 02-2-5 had the highest salt tolerance, followed by YQ<sub>1</sub>, and 07-1.

**Key words:** *Catalpa bungei*; clone; salt stress; chlorophyll content; net photosynthetic rate; stepwise multiple-regression analysis; path coefficient analysis.

收稿日期: 2009-12-17

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD24B08)、(2006BAD03A1603)

作者简介: 王臣(1983—),男,山东威海人,硕士研究生,主要从事植物生理生态研究。

\* 通讯作者. E-mail: yumukui@sina.com

当今世界各地土壤盐渍化面积不断加大,盐渍化程度不断加重,已成为影响农林业生产以及生态环境的全球性问题<sup>[1]</sup>。盐胁迫破坏了植物叶片叶绿体结构,降低叶绿体含量,从而引起光合能力的减弱<sup>[2]</sup>,严重制约盐渍化地区绿化造林的质量和数量。因此,进行耐盐树种、品种的选择,为盐渍化地区提供适宜的树种,增加树种多样性,提高生态稳定性具有重要意义。

楸树(*Catalpa bungei* C. A. Mey.)是我国生态幅度较大的优良乡土树种,集用材和观赏于一身<sup>[3-4]</sup>。目前对楸树的主要生物学特性、种质资源现状、良种选育、繁殖技术、造林技术等方面开展了较为系统的研究,取得了初步成果<sup>[5]</sup>。很多学者对楸树的光合作用也进行了研究<sup>[6-7]</sup>,水分胁迫<sup>[8]</sup>和干旱胁迫<sup>[9]</sup>对楸树光合特征的影响已有报道,但盐胁迫对楸树无性系光合特征的影响至今未见报道。本研究以当年生楸树3个无性系扦插苗为试验材料,系统研究了不同浓度盐胁迫下叶片叶绿素含量、光合特征的变化,旨在了解其光合生理生态特征及其对盐胁迫的响应差异,为楸树在盐碱立地条件下的栽培提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料及处理

试验材料系本项目课题组2008年春提供的120个楸树种质材料,2008年11月截干、沙藏,2009年3—4月待楸树幼芽出沙5~6 cm时,进行幼芽扦插,扦插基质为黄土:泥炭=6:1。5月底,幼芽和根长达10 cm左右时,对其中出苗量大、生长基本一致的84个无性系,进行抗盐预实验,选取0.1% NaCl水培处理4 d,测定脯氨酸含量和相对电导率。聚类分析将其分成4类,选取第1类型的14-6、02、07-1无性系,第2类型的02-2-2、02-2-5无性系,第3类型的YQ<sub>1</sub>、1-3-36无性系,以及第4类型的9-1、2-2-3无性系生长较一致的扦插苗进行盆栽试验。

试验在中国林科院亚林所三桥种苗基地苗木大棚里进行(大棚盖有一层遮阴纱,透光度为65%)。试验苗装入直径18 cm、高18 cm的硬质塑料盆中,每盆装干土3 kg(黄土:河沙:泥炭=10:3:1),每盆1株,每个无性系54株,设6个处理,每处理3次重复,每重复3株,随机区组排列。缓苗1个月后,进行盐(NaCl)胁迫,将盐分3次浇完,每3 d浇1次,盆下垫有托盘,渗出的水重新倒回盆里,土壤中

NaCl最终含量分别为0(对照,CK)、0.1%、0.2%、0.25%、0.3%和0.4%(按土壤干质量计),2 d浇1次水,保持基质含水量为田间持水量的70%左右。盐胁迫20 d后,选择抗盐能力较好的02-2-5、抗盐能力一般的YQ<sub>1</sub>和抗盐能力较差的07-1无性系为研究对象,系统分析各无性系的光合作用日变化和影响因素的差异。

### 1.2 测定方法

处理45 d后测定楸树各无性系叶片的光合特征。2009年8月,选择3个晴朗天气,采用便携式光合测定仪Li-6400(美国产)于6:00至18:00时测定植株叶片净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )等指标,各处理每重复分别选取1株,取中上部枝条的第3~4片叶子,进行定株定叶测定,每2 h测定1次。气孔限制值( $L_s$ )计算公式<sup>[10]</sup>: $L_s = 1 - C_i/C_a$ ,其中 $C_a$ 为大气CO<sub>2</sub>浓度。

同时各处理每重复内混合取样3次,带回实验室,采用乙醇丙酮法测定叶片叶绿素含量<sup>[11]</sup>。

### 1.3 数据分析

采用Excel和SPSS软件进行数据处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要气象因子的日变化

试验中主要气象因子的日变化规律如图1所示。光合有效辐射是瞬时变化较大的气象因子,日出后逐渐增大,在12:00时达到最大值,之后又快速减小,日变化幅度为52.33~522.31  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。大气CO<sub>2</sub>浓度变化与之基本相反,但变幅较小,早晨最高,10:00时最低。大气温度呈单峰变化趋势,日出后随太阳辐射的增强而增加,12:00时达到最高值,为44.31℃,之后逐渐降低。大气相对湿度在早晨最高,之后随太阳辐射的增强和大气温度的升高而逐渐下降,在14:00时降至最低,而后由于太阳辐射和气温的下降,又有所上升。

### 2.2 盐胁迫对楸树无性系叶片叶绿素含量的影响

对不同浓度盐胁迫下楸树无性系叶片叶绿素含量的测定分析表明(图2):02-2-5、YQ<sub>1</sub>、07-1无性系CK的叶绿素a含量分别为2.42、1.97、2.13  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,并随盐浓度的升高都呈下降趋势,07-1无性系降幅最大,YQ<sub>1</sub>无性系次之,02-2-5无性系最小。叶绿素b和总叶绿素含量与叶绿素a含量呈大致相同的变化趋势。叶绿素a/叶绿素b值随盐浓度升高则

呈上升趋势, YQ<sub>1</sub> 无性系各处理间差异不显著; 02-2-5 无性系除 0.1% 处理外, 其它处理与 CK 间差异均达到显著水平; 07-1 无性系 0.1% 和 0.2% 处理与

CK 间差异不显著, 其它处理与 CK 间存在显著差异。说明随盐浓度升高叶绿素 b 降幅比叶绿素 a 降幅更为明显。

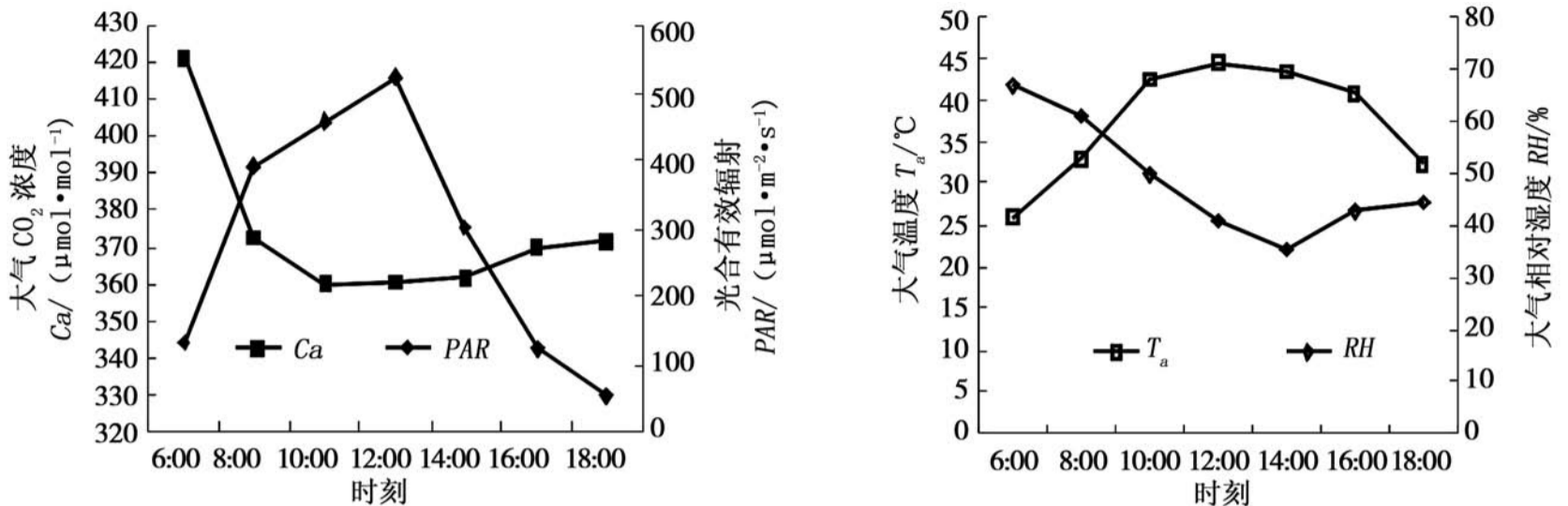
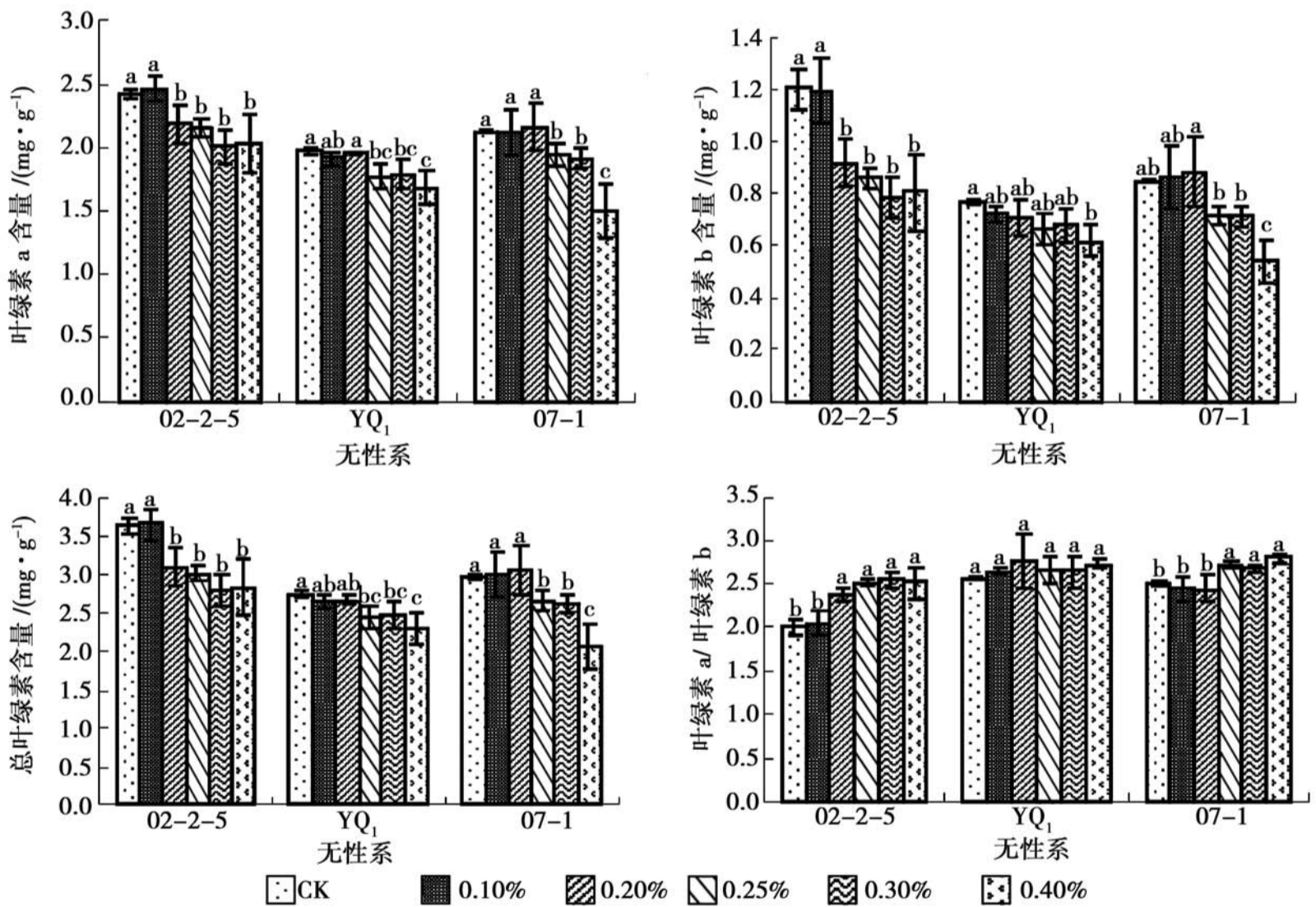


图 1 大气 CO<sub>2</sub> 浓度 (C<sub>a</sub>)、光合有效辐射 (PAR)、温度 (T<sub>a</sub>) 和相对湿度 (RH) 日变化



不同小写字母表示在同组柱内彼此在 5% 水平上差异显著

图 2 不同盐浓度处理下各楸树无性系叶绿素含量

### 2.3 盐胁迫下楸树无性系光合特征日变化

图 3 表明: 02-2-5 无性系各处理的净光合速率均呈现单峰曲线; YQ<sub>1</sub> 无性系在 CK 和 0.1% 处理下, 呈双峰曲线, 并在 12:00 时出现谷值, 14:00 时有所升高, 随后又降低, 而其它处理则和无性系 02-2-5 相同; 07-1 无性系各处理均为双峰曲线。随盐浓度的增加, 各无性系的净光合速率明显降低, 02-2-5 无

性系平均降幅为 37.2%, YQ<sub>1</sub> 无性系为 41.9%, 07-1 无性系为 55.5%, 即盐胁迫抑制了各无性系体内干物质的积累, 抑制其生长。

3 个无性系各处理净光合速率最大值都出现在 8:00 时, CK 和 0.1% 处理的大小顺序为 YQ<sub>1</sub> > 02-2-5 > 07-1, 其它处理均为 02-2-5 > YQ<sub>1</sub> > 07-1, 无性系间差异显著 (P < 0.05)。多重比较发现, 02-2-5 无性系

各处理与 CK 间差异显著,0.4% 处理与其它处理间存在显著差异;YQ<sub>1</sub> 无性系 0.1% 处理与 CK 差异显著,0.2%、0.25% 和 0.3% 处理与 CK 和 0.1% 处理间存在显著差异,0.4% 处理与其它处理间差异达到显著水平;07-1 无性系 0.1%、0.2% 和 0.25% 处理与 CK 间差异显著,0.3% 和 0.4% 处理与其它处理间存在显著差异。说明 0.1% 盐胁迫即可以显著降低 3 个无性系的净光合速率最大值,且盐浓度越大降低越明显。

总体来看,3 个无性系气孔导度的日变化规律与净光合速率大致相同;胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的变化规律与净光合速率则基本相反。6:00 时,光照弱,温度低,气孔尚未充分开启,气孔限制值较大,随光照强度和温度的升高,气孔限制值逐渐减小,02-2-5 无性系在 12:00 时、07-1 无性系在 10:00 时有所增大,随后又降低;YQ<sub>1</sub> 无性系在 12:00 时达到最小值,随后又小幅度增大。

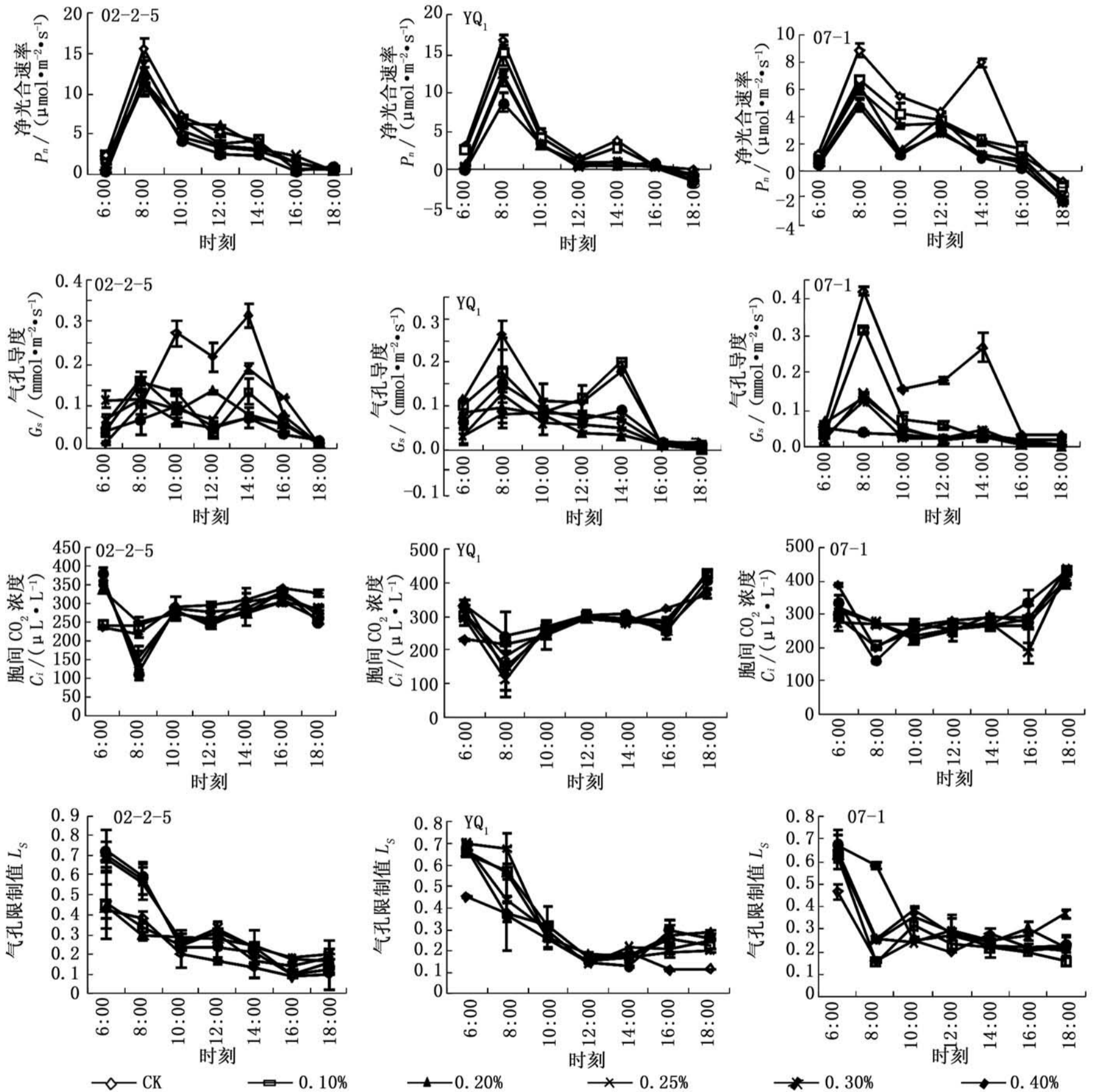


图3 各楸树无性系净光合速率( $P_n$ )等指标日变化动态

## 2.4 净光合速率( $P_n$ )与其它生理生态因子的回归分析和通径分析

采用多元逐步回归分析,建立 3 个楸树无性系

不同浓度盐处理下净光合速率与胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、气孔导度、蒸腾速率、大气水汽压亏缺、叶温、光合有效辐射的回归方程(表 1)。由表 1 可以看出:02-2-5

无性系 CK 处理下影响其净光合速率的主要因子是胞间  $\text{CO}_2$  浓度、叶温、光合有效辐射, 除上述因子, 0.1% 处理还受气孔导度大气水汽压亏缺的影响, 0.2% 处理受气孔导度和蒸腾速率影响, 0.25% 处理受蒸腾速率影响, 0.3% 处理还受气孔导度和大气水汽压亏缺影响, 0.4% 处理则不同, 影响其净光合速率的主要因子是气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度和蒸腾速率。YQ<sub>1</sub> 无性系 CK 处理主要受胞间  $\text{CO}_2$  浓度、大气水

汽压亏缺、光合有效辐射的影响, 0.1% 处理除蒸腾速率外还受所有因子的影响, 0.2% 同时受 6 个因子的影响, 0.25% 处理除叶温外还受所有因子的影响, 0.3% 处理的影响因子与 02-2-5 无性系的 0.4% 处理相同, 0.4% 处理则主要受蒸腾速率、叶温和光合有效辐射 (PAR) 的影响; 07-1 无性系主要受气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度的影响。

表 1 净光合速率 ( $P_n$ ) 与相关生理生态因子的回归分析

| 无性系             | 处理    | 方程  | $R^2$ | F        | P     |
|-----------------|-------|---|-------|----------|-------|
| 02-2-5          | CK    | $y = 55.460 - 0.049x_2 - 0.991x_5 + 0.014x_6$                                     | 0.958 | 83.962   | 0.000 |
|                 | 0.1%  | $y = 34.811 + 21.666x_1 + 1.551x_4 - 1.070x_5 + 0.014x_6$                         | 0.983 | 144.666  | 0.000 |
|                 | 0.2%  | $y = 66.484 - 51.591x_1 - 0.026x_2 + 1.918x_3 - 1.469x_5 + 0.011x_6$              | 0.999 | 1479.959 | 0.000 |
|                 | 0.25% | $y = 45.115 - 0.023x_2 + 0.265x_3 - 0.952x_5 + 0.009x_6$                          | 0.996 | 607.148  | 0.000 |
|                 | 0.3%  | $y = 58.781 + 48.729x_1 - 0.012x_2 + 3.100x_4 - 1.729x_5 + 0.007x_6$              | 0.990 | 169.726  | 0.000 |
|                 | 0.4%  | $y = 14.294 + 56.122x_1 - 0.045x_2 - 0.829x_3$                                    | 0.967 | 138.850  | 0.000 |
| YQ <sub>1</sub> | CK    | $y = 29.130 - 0.023x_2 - 4.312x_4 + 0.012x_6$                                     | 0.981 | 192.471  | 0.000 |
|                 | 0.1%  | $y = 121.531 + 61.438x_1 - 0.050x_2 + 8.446x_4 - 3.532x_5 - 0.005x_6$             | 0.999 | 841.042  | 0.000 |
|                 | 0.2%  | $y = 217.054 - 82.748x_1 - 0.006x_2 + 3.912x_3 + 12.734x_4 - 6.612x_5 - 0.007x_6$ | 0.998 | 607.372  | 0.000 |
|                 | 0.25% | $y = 8.564 + 132.112x_1 - 0.049x_2 - 2.415x_3 + 1.177x_4 + 0.002x_6$              | 0.999 | 4434.429 | 0.000 |
|                 | 0.3%  | $y = 12.131 + 79.620x_1 - 0.043x_2 - 0.914x_3$                                    | 0.999 | 6464.483 | 0.000 |
|                 | 0.4%  | $y = 32.996 + 0.585x_3 - 0.807x_5 + 0.005x_6$                                     | 0.986 | 254.211  | 0.000 |
| 07-1            | CK    | $y = 79.647 - 0.118x_2 + 0.849x_3 - 1.123x_5$                                     | 0.998 | 1953.294 | 0.000 |
|                 | 0.1%  | $y = 1.569 + 0.527x_3$  | 0.894 | 110.135  | 0.000 |
|                 | 0.2%  | $y = 12.627 + 0.0251x_2 - 0.335x_5$   | 0.972 | 206.910  | 0.000 |
|                 | 0.25% | $y = 18.186 + 41.814x_1 - 0.067x_2$   | 0.777 | 20.912   | 0.000 |
|                 | 0.3%  | $y = 0.651 + 35.095x_1$   | 0.805 | 53.673   | 0.000 |
|                 | 0.4%  | $y = 14.252 - 91.477x_1 - 0.037x_2$   | 0.896 | 51.530   | 0.000 |

注:  $y$  - 净光合速率 ( $P_n$ );  $x_1$  - 气孔导度 ( $G_s$ );  $x_2$  - 胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ );  $x_3$  - 蒸腾速率 ( $T_r$ );  $x_4$  - 大气水汽压亏缺 ( $VPD$ );  $x_5$  - 叶温 ( $T_l$ );  $x_6$  - 光合有效辐射 (PAR), 下同。

多元回归分析选择最有影响的因子进入方程, 为进一步了解各因子作用大小, 对净光合速率与各个因子进行通径分析, 结果(表 2)表明: 不同无性系间影响净光合速率的因子及因子的影响程度存在一定的差异。02-2-5 无性系主要受胞间  $\text{CO}_2$  浓度、叶温和光合有效辐射的直接影响, 且胞间  $\text{CO}_2$  浓度具有较大的间接通径系数; YQ<sub>1</sub> 无性系 CK、0.3%、0.4% 处理分别受大气水汽压亏缺、胞间  $\text{CO}_2$  浓度、叶温的直接影响, 且间接通径系数较小, 其它各处理几乎同时受 6 个因子的影响, 具有较大的直接通径系数和间接通径系数; 07-1 无性系 CK 主要受胞间  $\text{CO}_2$  浓度、蒸腾速率、叶温的直接影响, 0.1% 处理只受蒸腾速率的影响, 0.2% 受胞间  $\text{CO}_2$  浓度和叶温的直接影响, 0.25%、0.3% 处理主要受气孔导度的直接影响, 0.4% 处理主要受气孔导度的间接影响和胞

间  $\text{CO}_2$  浓度的直接影响。

### 3 结论与讨论

研究表明, 逆境胁迫下, 植物体内叶绿素含量会不同程度的降低, 进而降低其光合作用<sup>[12-14]</sup>。本研究表明, 随着盐浓度的升高, 楸树各无性系叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量呈下降趋势, 盐浓度越大降幅越明显, 这可能是因为盐胁迫影响了类囊体膜的稳定性, 加速了楸树无性系叶绿素的分解<sup>[15]</sup>。叶绿素 a/叶绿素 b 值的变化能反映叶片光合活性的强弱<sup>[16]</sup>, 本试验中, 随盐浓度的增加, 叶绿素 a/叶绿素 b 呈上升趋势, 与谷艳芬等<sup>[17]</sup>对冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 幼苗及张超强等<sup>[18]</sup>对补血草 (*Limonium* spp.) 在盐胁迫下的研究结果一致, 表明随盐浓度升高叶绿素 b 降幅比叶绿素 a 降幅更为明显。

表 2 净光合速率与各相关生理生态因子的通径分析

| 无性系    | 盐浓度 / % | 通径系数 | $x_1$      | $x_2$      | $x_3$      | $x_4$      | $x_5$      | $x_6$      |            |
|--------|---------|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 02-2-5 | CK      | A    | -          | - 0.408 11 | -          | -          | - 0.601 81 | 0.447 16   |            |
|        |         | B    | -          | - 0.527 46 | -          | -          | - 0.091 13 | - 0.090 21 |            |
|        | 0.10    | A    | 0.356 73   | -          | -          | 0.589 30   | - 1.269 64 | 0.589 83   |            |
|        |         | B    | 0.325 87   | -          | -          | - 1.238 32 | 0.551 77   | 0.448 36   |            |
|        | 0.20    | A    | - 0.619 83 | - 0.151 56 | 0.917 94   | -          | - 1.632 08 | 0.483 49   |            |
|        |         | B    | 0.008 67   | - 0.652 32 | - 0.815 54 | -          | 0.388 06   | - 0.082 57 |            |
|        | 0.25    | A    | -          | - 0.310 29 | 0.109 16   | -          | - 0.832 13 | 0.363 95   |            |
|        |         | B    | -          | - 0.594 99 | - 0.416 16 | -          | - 0.018 64 | - 0.268 3  |            |
|        | 0.30    | A    | 0.222 42   | - 0.218 42 | -          | 0.990 88   | - 1.699 87 | 0.339 86   |            |
|        |         | B    | 0.030 42   | - 0.722 64 | -          | - 1.719 30 | 0.891 85   | - 0.050 90 |            |
|        | 0.40    | A    | 0.354 55   | - 0.828 09 | - 0.194 02 | -          | -          | -          |            |
|        |         | B    | - 0.000 58 | - 0.134 65 | - 0.065 19 | -          | -          | -          |            |
|        | YQ1     | CK   | A          | -          | - 0.255 49 | -          | - 0.922 38 | 0.325 44   | -          |
|        |         |      | B          | -          | - 0.400 99 | -          | 0.092 92   | - 0.174 49 | -          |
|        |         | 0.10 | A          | 0.854 63   | - 0.497 45 | -          | 1.914 96   | 2.229 60   | - 0.138 42 |
|        |         |      | B          | - 0.402 44 | - 0.296 71 | -          | - 5.721 94 | 4.126 18   | 1.918 59   |
| 0.20   |         | A    | - 0.502 67 | - 0.090 51 | 1.181 99   | 4.389 74   | - 5.747 29 | - 0.272 02 |            |
|        |         | B    | 1.013 13   | - 0.800 57 | - 1.262 69 | - 5.212 01 | 4.883 46   | 0.537 45   |            |
| 0.25   |         | A    | 1.122 76   | - 0.478 11 | - 0.698 22 | 0.433 54   | -          | 0.080 84   |            |
|        |         | B    | - 0.243 10 | - 0.471 49 | 0.790 97   | - 1.261 03 | -          | - 0.319 92 |            |
| 0.30   |         | A    | 0.495 65   | - 0.701 82 | - 0.387 72 | -          | -          | -          |            |
|        |         | B    | - 0.100 80 | - 0.288 72 | 0.106 87   | -          | -          | -          |            |
| 0.40   |         | A    | -          | -          | 0.353 02   | -          | - 1.083 65 | 0.275 05   |            |
|        |         | B    | -          | -          | - 0.467 83 | -          | 0.221 11   | 0.058 31   |            |
| 07-1   |         | CK   | A          | -          | - 0.731 53 | 0.961 07   | -          | - 0.702 41 | -          |
|        |         |      | B          | -          | 0.242 96   | - 0.093 85 | -          | 0.979 98   | -          |
|        |         | 0.10 | A          | -          | -          | 0.946 08   | -          | -          | -          |
|        |         |      | B          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
|        | 0.20    | A    | -          | 1.063 47   | -          | -          | - 0.516 97 | -          |            |
|        |         | B    | -          | - 0.200 59 | -          | -          | 0.412 63   | -          |            |
|        | 0.25    | A    | 0.935 00   | - 0.312 01 | -          | -          | -          | -          |            |
|        |         | B    | - 0.104 21 | 0.312 29   | -          | -          | -          | -          |            |
|        | 0.30    | A    | 0.897 34   | -          | -          | -          | -          | -          |            |
|        |         | B    | -          | -          | -          | -          | -          | -          |            |
|        | 0.40    | A    | - 0.440 03 | - 1.280 93 | -          | -          | -          | -          |            |
|        |         | B    | 1.069 57   | 0.367 43   | -          | -          | -          | -          |            |

注: A: 直接通径系数; B: 间接通径系数。

净光合速率是反映植物对盐胁迫的响应以及鉴定植物抗盐能力的有效生理指标, 直接反映了单位叶面积的同化能力。盐胁迫对植物造成的危害主要是离子毒害、渗透胁迫和营养不平衡, 进而导致植物净光合速率下降<sup>[19-21]</sup>。研究表明, 3个楸树无性系各处理净光合速率最大值都出现在 8:00 时, CK 和 0.1% 处理的大小顺序为 YQ<sub>1</sub> > 02-2-5 > 07-1, 其它处理均为 02-2-5 > YQ<sub>1</sub> > 07-1。尽管此时光照强度远未达到最大值, 但此时大气温度、湿度适宜, 气孔充分开启, 影响植物光合作用的环境因子和生理因子达到最佳组合, 此时出现最大值<sup>[22]</sup>, 吴统贵等<sup>[23]</sup>对旱柳 7—9 月光合作用的研究也得出相同的结论。从光合日变化看, 随盐浓度的增加, 各楸树无性系的净光合速率随叶绿素含量的降低明显降低, 且 3 个无性系净光合速

率降幅的大小顺序为 07-1 > YQ<sub>1</sub> > 02-2-5。

目前, 一般认为导致净光合速率降低的因素包括气孔限制和非气孔限制, 根据 Farquhar 等<sup>[10]</sup>的观点, 气孔限制引起的净光合速率降低表现为胞间 CO<sub>2</sub> 浓度降低和气孔限制值升高; 而非气孔限制引起的净光合速率降低则伴随着胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的升高和气孔限制值的降低。有关这方面的研究很多, 有些研究结果以气孔限制为主<sup>[24-25]</sup>, 有些研究认为以非气孔限制为主<sup>[26-27]</sup>, 也有学者认为二者均起作用<sup>[28]</sup>。本研究表明, 3 个楸树无性系光合日变化中, 净光合速率下降时, 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度上升, 气孔限制值降低, 说明影响其光合速率的因素为非气孔限制。

光合作用是植物十分复杂的生理过程, 叶片光合效率与自身因素如叶绿素含量、叶片厚度、叶片成

熟程度密切相关, 又受叶片有效光辐射、气温、空气相对湿度、土壤含水量等外界因子的影响<sup>[29]</sup>, 孙焜等<sup>[6]</sup>对江淮地区引种的4个楸树品种的光合特征研究发现, 影响净光合速率的因子在品种间存在一定差异, 其主要影响因子为光合有效辐射、叶温和胞间CO<sub>2</sub>浓度。本研究也表明, 不同楸树无性系在不同浓度盐胁迫下, 影响净光合速率的因子不同, 且因子的影响程度存在较大的差异, 多元回归分析和通径分析表明, 02-2-5和YQ<sub>1</sub>无性系主要受胞间CO<sub>2</sub>浓度、叶温、光合有效辐射的影响; 07-1无性系主要受气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度的影响。

韩亚琦等<sup>[30]</sup>的研究表明: 随着盐浓度的升高北京槲栎 (*Quercus aliena* var. *pekingensis* Schott.) 叶片的净光合速率下降幅度低于锐齿槲栎 (*Q. aliena* var. *acuteserrata* Maxim.), 认为北京槲栎的耐盐能力相对较强。其它胁迫试验也常得出同样的结论, 不同抗性树种的净光合速率降低幅度不同, 抗性强的树种的净光合速率降幅比抗性弱的小<sup>[10]</sup>。通过对楸树各无性系不同盐浓度胁迫下叶绿素含量和净光合速率变化的研究, 初步认为3个无性系的耐盐能力为02-2-5 > YQ<sub>1</sub> > 07-1。

#### 参考文献:

- [1] 樊怀福, 李娟, 郭世荣, 等. 外源NO对NaCl胁迫下黄瓜幼苗生长和根系谷胱甘肽抗氧化酶系统的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(8): 1611 - 1618
- [2] 柯玉琴, 潘廷国. NaCl胁迫对甘薯叶片叶绿体超微结构及一些酶活性的影响[J]. 植物生理学报, 1999, 25(3): 229 - 233
- [3] 郭从俭, 钱士金, 王连卿, 等. 楸树栽培[M]. 北京: 中国林业出版社, 1988
- [4] 张锦, 田菊芬. 优良乡土树种楸树种质资源及发展策略[J]. 安徽农业科学, 2003, 31(6): 1012 - 1013
- [5] 杨玉珍, 王顺财, 彭方仁. 我国楸树研究现状及开发利用策略[J]. 林业科技开发, 2006, 20(3): 4 - 7
- [6] 孙焜, 刘洪剑, 傅玉兰, 等. 江淮地区引种楸树光合生理特性的比较研究[J]. 林业科学研究, 2008, 21(5): 635 - 639
- [7] 吴春林, 郝明灼, 彭方仁, 等. 不同品种楸树幼树生长及生理特性比较[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(6): 123 - 127
- [8] 王改萍, 岑显超, 何力, 等. 水分胁迫对楸树苗木光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2007, 31(6): 57 - 60
- [9] 王良桂, 张春霞, 彭方仁, 等. 干旱胁迫对几种楸树苗木叶片荧光特性的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(6): 119 - 122
- [10] arquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317 - 345
- [11] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨出版社, 2002: 68 - 70
- [12] 王树凤, 陈益泰, 潘红伟, 等. 土壤盐胁迫下桉木8个无性系生理特征的变化[J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(1): 19 - 23
- [13] 杨立飞, 朱月林, 胡春梅. NaCl胁迫对嫁接黄瓜膜脂过氧化、渗透调节物质含量及光合特征的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(6): 1195 - 1200
- [14] 张晓平, 方炎明, 陈永江. 淹涝胁迫对鹅掌楸属植物叶片部分生理指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2006, 15(1): 41 - 44
- [15] Eva-marí A, Mccaffery S, Anderson J M. Photoinhibition and DI protein degradation in peas acclimated to different growth irradiances[J]. Plant Physiology, 1993, 103: 599 - 626
- [16] Sakaki T, Kondo N, Sugahara K. Breakdown of photosynthetic pigment and lipids in spinach leaves with ozone fumigation: Role of active oxygen[J]. Physiologia Plantarum, 1983, 59: 28 - 34
- [17] 谷艳芬, 丁圣彦, 李婷婷, 等. 盐胁迫对冬小麦幼苗干物质分配和生理生态特征的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 840 - 845
- [18] 张超强, 杨颖丽, 王莱, 等. 2种补血草属植物幼苗对NaCl胁迫的生理响应[J]. 西北植物学报, 2007, 27(11): 2245 - 2250
- [19] 冯立田, 赵可夫, 邓振旭. NaCl对菜豆叶片光合CO<sub>2</sub>和水分交换效应的研究[J]. 山东师范大学学报, 1999, 14(2): 180 - 183
- [20] 郭书奎, 赵可夫. NaCl胁迫抑制玉米光合作用的可能机理[J]. 植物生理学报, 2001, 27(6): 461 - 466
- [21] 刘会超, 孙振元, 彭镇华. NaCl胁迫对五叶地锦生长及某些生理特征的影响[J]. 林业科学, 2004, 40(6): 63 - 67
- [22] 张津林, 张志强, 查同刚, 等. 沙地杨树人工林生理生态特征[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1523 - 1532
- [23] 吴统贵, 周和锋, 吴明, 等. 旱柳光合作用动态及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2056 - 2061
- [24] Pascale S D, Barbieri G. Effect of soil salinity from long-term irrigation with saline-soda water on yield and quality of winter vegetable crops[J]. Scientia Horticulture, 1995, 64: 145 - 147
- [25] Ouerghi Z, Comic G, Rrodan I M. Effect of NaCl on photosynthesis of two wheat species (*Triticum durum* and *T. aestivum*) differing in their sensitivity to salt stress[J]. Plant Physiology, 2000, 156: 335 - 340
- [26] Bethke P C, Drew M C. Stomatal and non-stomatal components to inhibition of photosynthesis in leaves of *Capsicum annuum* during progressive exposure to NaCl salinity[J]. Plant Physiology, 1992, 99: 219 - 226
- [27] 江行玉, 窦君霞, 王正秋. NaCl对玉米和棉花光合作用和渗透调节能力的调控[J]. 植物生理学通讯, 2001, 37(4): 303 - 305
- [28] Downton W J S, Loveys B R, Grant W J R. Salinity effects on the stomatal behaviour of grapevine[J]. New Phytologist, 1990, 116: 499 - 503
- [29] Dur L Z, Goldstein G. Photosynthesis, photoinhibition, and nitrogen use efficiency in native and invasive tree ferns in Hawaii[J]. Oecologia, 2001, 126(3): 345 - 354
- [30] 韩亚琦, 唐宇丹, 张少英, 等. 盐胁迫抑制槲栎2变种光合作用的机理研究[J]. 西北植物学报, 2007, 27(3): 583 - 587