

南林‘895’杂交杨组培苗对 NaCl 胁迫的生理响应

李 翀¹, 王 杰², 贾赵辉¹, 程雪飞¹, 彭孝楠¹, 陈 颖³, 张金池^{1*}

(1. 南方现代林业协同创新中心, 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京林业大学林学院, 南京 210037;

2. 南京林业大学风景园林学院, 南京 210037; 3. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

摘 要: 以南林‘895’杂交杨(*Populus delotides* × *P. euramericana* cv. ‘Nanlin895’)组培苗为试验材料, 采用 CK、25、50、75 和 100 mmol·L⁻¹ 5 种盐处理, 研究盐胁迫对于‘895’杨叶片生理特性的影响。结果表明: (1) 25 mmol·L⁻¹ 盐处理可以促进‘895’杨的生长, 100 mmol·L⁻¹ 盐处理抑制了‘895’杨的生长。(2) 盐处理增加了过氧化氢(H₂O₂)与丙二醛(MDA)含量, 在 100 mmol·L⁻¹ 时处理 20 d 时最为显著。(3) 随着盐浓度的升高, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物(APX)呈先增加后下降的趋势, APX 的峰值出现在 25 mmol·L⁻¹ 盐处理时, SOD、POD 及 CAT 的峰值出现在 50 mmol·L⁻¹ 盐处理时。在 100 mmol·L⁻¹ 盐处理时, SOD、POD、CAT 和 APX 活性显著低于对照。(4) 随着盐浓度的升高, 谷胱甘肽还原酶(GR)活性、还原型抗坏血酸(AsA)含量呈增加的趋势, 100 mmol·L⁻¹ 盐处理时, GR 活性、AsA 含量显著高于对照。谷胱甘肽(GSH)含量在 1 d 与 10 d 处理时随着盐浓度的上升而增加, 20 d 处理时, GSH 含量在 100 mmol·L⁻¹ 盐处理较 75 mmol·L⁻¹ 盐处理微微下降。(5) 根长、茎长和 MDA、H₂O₂、GSH 和 AsA 呈负相关关系; MDA、H₂O₂ 与 SOD、CAT、APX 呈负相关关系, 与 POD、GR 呈正相关关系; SOD、CAT、APX 3 种酶互为正相关关系, POD 与 GR、SOD、CAT 呈正相关关系。由此可见, 低盐浓度(25 mmol·L⁻¹)处理刺激了‘895’杨的生长, 其通过提升抗氧化酶活性与抗氧化物质含量来维持活性氧平衡, 避免受到毒害; 高盐浓度(100 mmol·L⁻¹)处理抑制了抗氧化酶与非酶抗氧化物质的作用, ‘895’杂交杨受到了伤害; APX 是‘895’杂交杨叶片内抵御膜脂过氧化最为关键的酶。

关键词: 盐胁迫; 南林‘895’杨; 组培苗; 生理特性

中图分类号: S792.11; Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2019)06-0961-07

Physiological response of *Populus delotides* × *P. euramericana* cv. ‘Nanlin895’ tissue culture seedlings to NaCl stress

LI Chong¹, WANG Jie², JIA Zhaohui¹, CHENG Xuefei¹, PEN Xiaonan¹, CHEN Ying³, ZHANG Jinchi¹

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Co-innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037; 2. College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037; 3. College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037)

Abstract: The antioxidant of *Populus* ‘Nanlin895’ seedlings were studied under salt stress of 0, 25, 50, 75 and 100 mmol·L⁻¹, respectively. The results were as follows: (1) Salt treatment at the concentration of 25 mmol·L⁻¹ promoted the growth of ‘Nanlin895’ poplar, while which inhibited its growth at 100 mmol·L⁻¹. (2) The contents of H₂O₂ and MDA increased under the salt treatment, which were most significant when treated with 100 mmol·L⁻¹ salt for 20 days. (3) With the increase of salt concentration, the peak value of APX appeared under 25 mmol·L⁻¹ salt treatment, while the peak values of SOD, POD and CAT appeared under 50 mmol·L⁻¹ salt treatment. The activities of these enzymes with 100 mmol·L⁻¹ salt treatment were significantly lower than those in the control. (4) With the increase of salt concentration, the activity of GR and the content of AsA increased, which were significantly higher under 100 mmol·L⁻¹ salt treatment than those in the control. The content of GSH increased with the increase of salt concentra-

收稿日期: 2019-04-05

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201504406), 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(17)1004), 江苏省高校自然科学基金研究重大项目(15KJA220004), 林业科学技术推广项目[2015]17 号和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)共同资助。

作者简介: 李 翀, 硕士研究生。E-mail: cli5104@163.com

* 通信作者: 张金池, 教授, 博士生导师。E-mail: zhang8811@njfu.edu.cn

tion on the 1st and 10th day of the treatment, and it decreased slightly on the 20th day under $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ salt treatment compared with $75 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ salt treatment. (5) The root length, stem length and MDA, H_2O_2 , GSH, AsA were negatively correlated; MDA and H_2O_2 were negatively correlated with SOD, CAT and APX; SOD, CAT and APX were positively correlated with each other. It was concluded that salt treatment at low concentration ($25 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) stimulated the growth of poplar 'Nanlin895'; APX was the key enzyme to defense membrane lipid peroxidation in leaves of 'Nanlin895'; salt treatment at high concentration ($100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) inhibited the effects of antioxidant enzymes, antioxidant substances and damaged the cells.

Key words: salinity stress; 'Nanlin895' poplar; tissue culture seedling; physiological characteristics

目前,世界上大约有20%的灌溉土壤受到盐度的影响,且呈不断恶化的趋势^[1]。近几年来,受气候变化、人口增长、农药化肥过量施用、淡水资源急剧减少以及环境污染等多种因素的影响,土壤盐碱化程度日趋严重。土壤盐碱化是指土壤含盐量太高,而盐分是影响植物生长发育一个重要环境因子^[2-3]。改良和利用大面积的盐渍化土壤、提高盐碱地被覆盖率及改善生态环境已迫在眉睫,但是这也是一项难度大、复杂程度高、时间跨度长的工作。以往人们通过淡水压碱、挖沟排碱、施用土壤改良剂等措施改良盐碱地,不仅费时费力,而且还容易引起土壤板结。研究发现,盐碱地上种植耐盐植物可以起到脱盐的作用,是一种廉价有效的改良盐碱土方法^[4]。因此,探究植物对盐胁迫的反应机制和机理,对培育抗盐性强的植物意义重大。

杨树(*Populus spp.*)在碱性土壤区域的生态保护和恢复中发挥着重要作用^[5]。南林'895'杂交杨(*Populus delotides* × *P. euramericana* cv. 'Nanlin895')是南京林业大学培育的速生丰产林新品种,具有速生、优质、高产、抗逆性强、适应性广等优点^[6-7]。目前关于'895'杨的研究主要集中在基因方面^[8-11],对于'895'杨在盐胁迫下各生理生化指标的变化研究较少^[12]。本研究从盐胁迫对于'895'杨生长变化、抗氧化酶活性、非酶抗氧化物质含量等指标的影响出发,通过分析各指标之间的相关性,将这些指标结合起来,探讨'895'杨对于盐胁迫的反应,为后续杨树耐盐性研究奠定基础,为培育转基因耐盐杨树提供理论依据,同时为沿海地区引进耐盐能力强的杨树品种,提高盐碱化地区的植被覆盖率提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

由南林'895'杨无性系苗的茎段通过组培快繁手段所得的南林'895'杨组培苗,以1 cm芽茎锥为外植体,接种在 $\text{MS}+0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 6-BA + $\text{NAA}+0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ TDZ^[13]分化培养基上培养形成丛生芽,培养

30~40 d后丛生芽长至2 cm,在无菌操作台上取出单芽,继续接种在1/2 MS培养基上进行生根培养。在组培苗长至6 cm左右,进行盐胁迫处理。

1.2 方法

1.2.1 方法来源 基于植物生理学实验室的经验,在水土保持实验室重新设计并完成了该试验。

1.2.2 模拟盐胁迫处理 以不加NaCl的培养基为对照,在培养基中添加25(低盐)、50、75和 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (高盐)浓度NaCl进行不同程度盐胁迫实验。培养基添加3%蔗糖、0.65%琼脂,培养温度为 $(26\pm 1)^\circ\text{C}$,光照强度为 $55 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,光照时间为 $14 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 。分别培养1、10和20 d后,取出'895'杨组培苗,取叶,每个浓度的各取0.2 g鲜重,5次重复,用密封袋密封好,放入冰箱, -70°C 下备用。每个浓度实验进行3次重复。

1.2.3 生理生化指标测定 丙二醛(MDA)含量测定参考Heath^[14]方法;过氧化氢(H_2O_2)含量测定参考刘俊等^[15]方法;超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)比色法^[16];过氧化物酶(POD)活性测定采用赵世杰^[17]方法;过氧化氢酶(CAT)活性测定采用李合生^[18]的方法;抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性测定采用Parida等^[19]的方法;谷胱甘肽还原酶(GR)还原型抗坏血酸(AsA)含量测定采用Arakawa等^[20]方法;谷胱甘肽(GSH)含量测定采用Griffith^[21]方法。

1.3 数据处理

采用Excel 2010软件进行数据统计,采用SPSS 21.0程序对3次试验所得数据求得平均值和标准误差进行方差分析,采用Origin8与RStudio进行作图。

2 结果与分析

2.1 盐处理对南林'895'杂交杨生长指标的影响

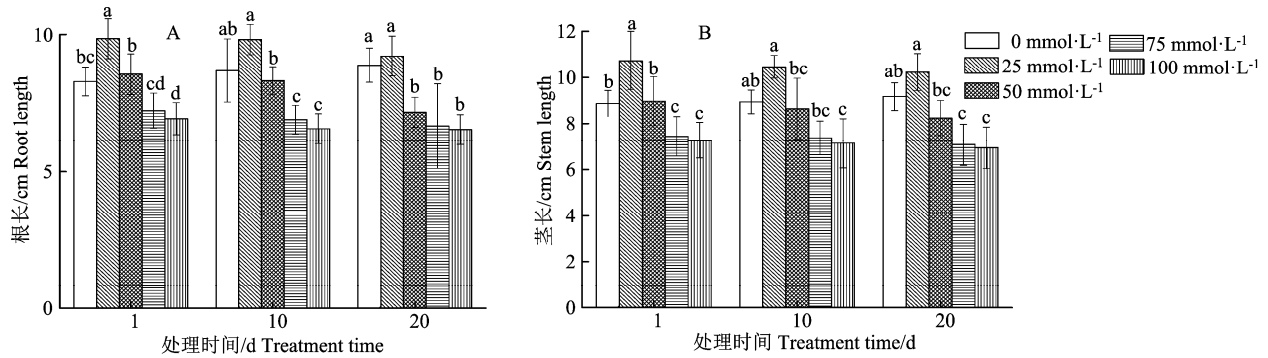
盐处理对于'895'杂交杨生长有一定的影响。盐处理后,根长与茎长增减趋势一致,都是随着盐浓度的升高呈现先增加后下降的趋势。 $25 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度处理1 d时,根长较对照显著增加了18.9% ($P<0.05$) (图1A),茎长较对照显著增加了21.1% ($P<0.05$) (图1B)。与对照相比,75与 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐

浓度处理时, 根长与茎长较对照显著降低($P<0.05$)。其中 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度处理 20 d 时, 根长与茎长分别较对照下降了 26.6% 与 24.3%。

2.2 盐处理对南林‘895’杂交杨 MDA 和 H_2O_2 含量的影响

盐处理后, MDA 含量随着盐浓度的上升而增加(图 2A)。75 与 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度处理时, MDA 含量在各天数处理都较对照显著增加

($P<0.05$), 其中 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度处理 20 d 时, MDA 含量是对照的 2.21 倍。盐处理 1 d 与 10 d 时, H_2O_2 含量较对照增加明显, 尤其在 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度处理时, H_2O_2 含量较对照分别显著增加了 58.6% 与 53.5% ($P<0.05$) (图 2B)。盐处理 20 d 时, 除了 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度处理较对照显著增加了 65.8% 外($P<0.05$), 其余盐浓度处理较对照增加的并不明显。



小写字母不同者为差异显著($P<0.05$), 相同字母者差异不显著($P>0.05$)。下同

Different letter superscripts mean significant differences ($P<0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant ($P>0.05$). The same below

图 1 不同浓度盐处理对南林‘895’杂交杨生长指标的影响

Figure 1 Effects of different salt concentrations on the plant growth of ‘Nanlin895’ hybrid poplar plantlet

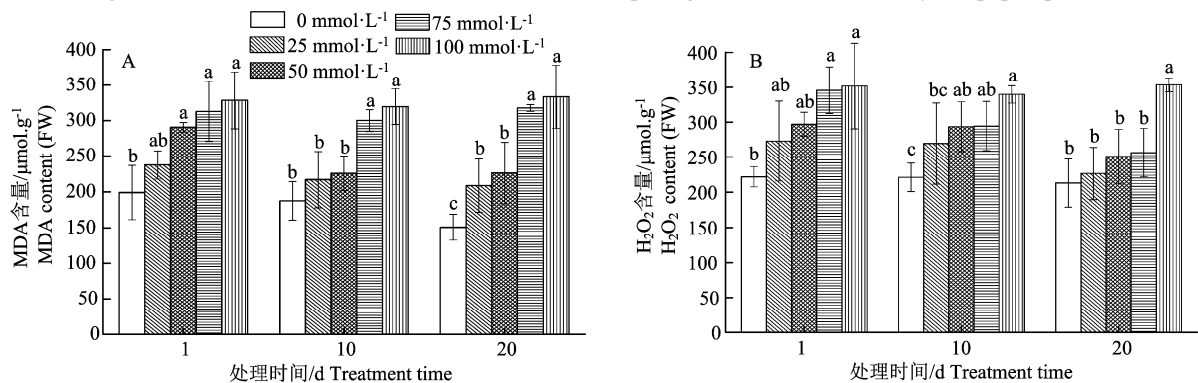


图 2 不同浓度盐处理对南林‘895’杂交杨 MDA 和 H_2O_2 含量的影响

Figure 2 Effects of different salt concentrations on MDA and H_2O_2 contents in ‘Nanlin895’ hybrid poplar plantlet

2.3 盐处理对南林‘895’杂交杨抗氧化酶活性影响

盐处理后, 不同抗氧化酶活性对于盐胁迫有着不同的反应。随着盐浓度的上升, SOD 活性呈先增加后减少的趋势(图 3A)。50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度处理 1、10 和 20 d 时, SOD 活性较对照显著增加($P<0.05$), 分别增加了 10.6%、15.5% 和 17.0%。100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度处理 1、10 及 20 d 时, SOD 活性分别较对照显著减少了 11.2%、20.5% 及 24.8% ($P<0.05$)。POD 活性随着盐浓度的上升呈先增加后下降的趋势, 且在各浓度均显著高于对照($P<0.05$) (图 3B)。盐处理 1 d 时, 各浓度 POD 活性分别是对照的 4.56、7.39、5.59 与 4.45 倍。盐处理 10 与 20 d 时, POD 活性变

化趋势与盐处理 1 d 时 POD 活性变化趋势一致。其中 50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度处理 10 d 时, POD 活性增加的最为显著, 是对照的 9.46 倍。随着盐浓度的升高, CAT 活性呈先增加后减少的趋势 (图 3C)。盐处理 1 d 时, 25 与 50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理较对照显著增加 ($P<0.05$), 分别增加了 48.4% 和 44.3%, 100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理较对照显著减少了 27.3% ($P<0.05$)。盐处理 10 d 时, 25 与 50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理较对照显著增加 ($P<0.05$), 75 与 100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理较对照减少的并不明显。盐处理 20 d 时, 50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理较对照显著增加了 23.5% ($P<0.05$), 75 与 100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理较对照显著减少 ($P<0.05$), 分别减少了 21.6% 与 39.6%。随着盐

浓度的上升, APX 活性的变化趋势与 SOD、POD、CAT 活性的变化趋势一致, 都是呈先增加后下降的趋势(图 3D), 在 25 mmol·L⁻¹ 盐处理时, APX 活性在不同天数分别较对照显著增加了 13.9%、20.4% 和 37.3% ($P < 0.05$)。盐处理 20 d 时, 50 mmol·L⁻¹ 盐处

理较对照显著增加了 28.2% ($P < 0.05$), 100 mmol·L⁻¹ 盐处理较对照显著减少 ($P < 0.05$)。GR 活性随着盐浓度的上升而增加且所有浓度处理均高于对照(图 3E), 其中 100 mmol·L⁻¹ 盐处理在不同天数较对照分别显著上升了 107.1%、95.6% 和 112.2% ($P < 0.05$)。

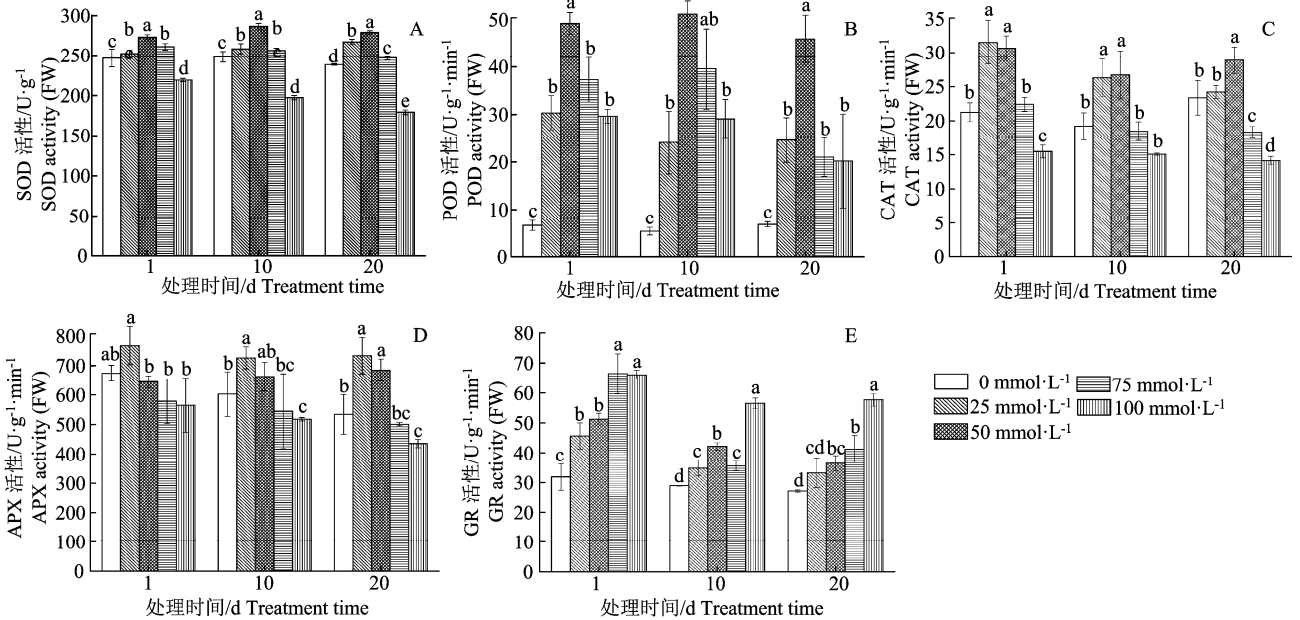


图 3 不同浓度盐处理对南林‘895’杂交杨抗氧化酶活性的影响

Figure 3 Effects of different salt concentrations on the activities of five protective enzymes of ‘Nanlin895’ hybrid poplar plantlet

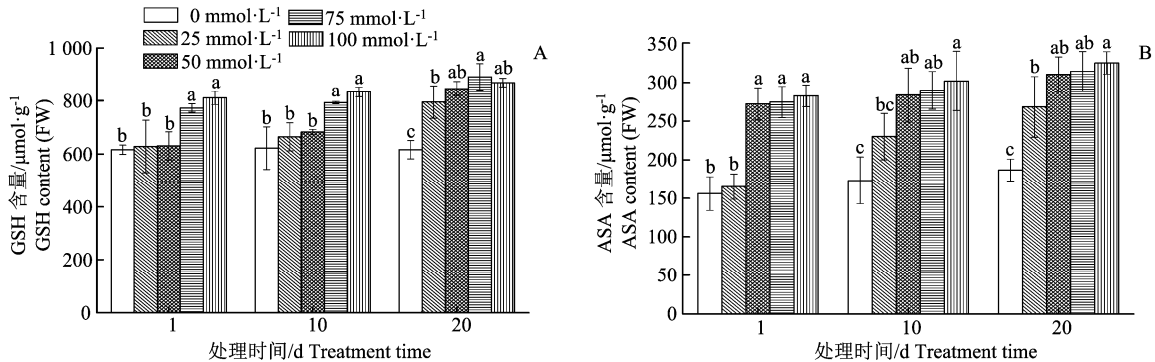


图 4 不同浓度盐处理对南林‘895’杂交杨 GSH 和 AsA 含量的影响

Figure 4 Effects of different salt concentrations on GSH and AsA contents in ‘Nanlin895’ hybrid poplar plantlet

2.4 盐处理对南林‘895’杂交杨 GSH 和 AsA 含量的影响

盐处理 1 与 10 d 时, GSH 含量随着盐浓度上升呈增加的趋势, 75 与 100 mmol·L⁻¹ 盐处理较对照显著增加 ($P < 0.05$), 其中 100 mmol·L⁻¹ 盐处理较对照分别增加了 31.6% 与 34.0%。盐处理 20 d 时, 4 种浓度处理均显著高于对照 ($P < 0.05$), 75 mmol·L⁻¹ 处理较 25 和 50 mmol·L⁻¹ 处理增加明显, 100 mmol·L⁻¹ 处理较 75 mmol·L⁻¹ 处理微微减少(图 4A)。随着盐浓度的上升, AsA 含量呈上升趋势(图 4B)。盐处理

1 d 时, 25 mmol·L⁻¹ 处理较对照微微增长, 其余盐浓度处理较对照显著增加 ($P < 0.05$)。盐处理 10 与 20 d 时, 所有浓度处理均显著高于对照 ($P < 0.05$), 尤其是 100 mmol·L⁻¹ 处理, 其较对照分别增加了 74.3% 与 74.2%。

2.5 南林‘895’杂交杨各指标之间的相关性分析

相关性分析结果(图 5)表明: 根长、茎长除了与 POD 无明显相关性外, 和其余指标都呈现出极强的相关性。根长、茎长和 MDA、GR、GSH、AsA、H₂O₂ 呈一定的负相关关系, 和 CAT、APX、SOD

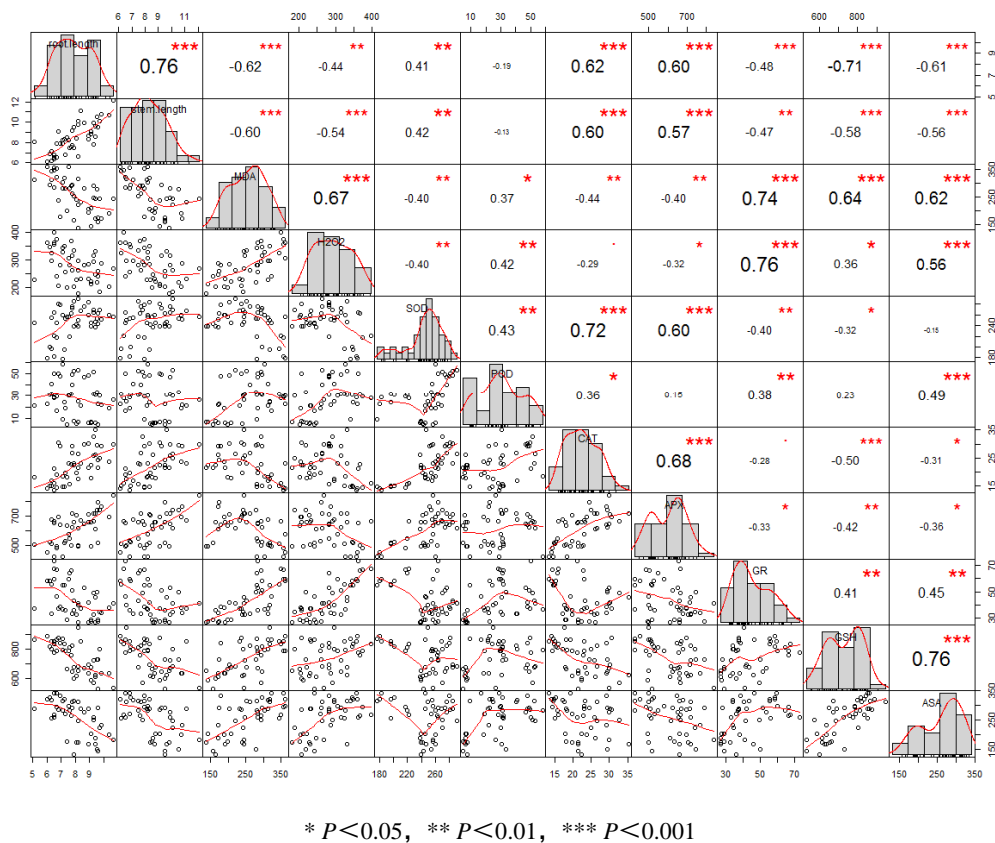


图 5 南林‘895’杨组培苗各指标之间的相关性分析

Figure 5 Correlation analysis between some indexes of ‘Nanlin895’ hybrid poplar plantlet

呈一定的正相关关系。MDA、 H_2O_2 和其余抗氧化酶与抗氧化物质有一定的相关性。MDA、 H_2O_2 和 GR、GSH、AsA、POD 呈一定的正相关关系，和 SOD、CAT、APX 呈一定的负相关关系。5 种抗氧化酶之间也有很强的相关性。SOD、CAT、APX 互为极显著正相关关系，POD 和 GR、SOD、CAT 呈一定的正相关关系，GR 和 CAT、APX、SOD 呈一定的负相关关系，和 GSH、ASA 呈显著正相关关系。GSH 和 AsA 呈极显著正相关关系。

3 讨论与结论

植物生长过程对盐胁迫比较敏感，而生长量作为植物代谢过程在形态上的综合体现，是植物耐盐性的直接指标^[22]。本研究中，根长与茎长在 $25 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐处理时都有不同程度的增加，表明了低盐浓度($25 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理对南林‘895’杨的生长有一定的促进作用，这与李伟强等^[23]的研究结论相似。而在 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐处理下，根长与茎长较对照都显著下降，表明了高盐浓度($100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理已经对‘895’杨产生了毒害作用，抑制了其生长，这跟王金平等^[24]的研究结论一致。

正常生长条件下，植物体活性氧的产生与消除始终处于动态平衡状态，盐胁迫扰乱这一平衡后，过量的活性氧（主要是超氧阴离子($O_2\cdot^-$)、羟自由基($HO\cdot$)、单线态氧(1O_2)和过氧化氢(H_2O_2)等物质)将攻击生物膜，造成膜脂过氧化^[25-26]，而膜脂过氧化作用的产物就是丙二醛(MDA)。本研究中，MDA 和 H_2O_2 含量都随着盐浓度的上升而增加，这与王金平^[27]、王舒甜^[28]等人的研究结论相似，除了 $25 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐处理 20 d 时，MDA 含量较对照显著增加外，其余无论盐处理 1、10 还是 20 d 时，MDA 和 H_2O_2 含量较对照都增长得不显著。在 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理时，MDA 和 H_2O_2 含量较对照显著上升且均高于其余处理。表明了低盐浓度($25 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理会造成‘895’杨膜脂过氧化，此时植物通过自身的耐盐能力来抵御盐胁迫造成的伤害，但是随着盐浓度的升高，高盐浓度($100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理加剧产生了 H_2O_2 ，活性氧的产生与消除的动态平衡被严重破坏，使得‘895’杨膜脂过氧化程度进一步的加重，植物受到了损伤。通过生长指标与 MDA、 H_2O_2 的相关性分析来看，根长、茎长和 MDA、 H_2O_2 呈极显著或显著负相关关系，表明了盐胁迫造成了 MDA、 H_2O_2 含量的增加，从而导致‘895’杨受到毒害。

盐胁迫扰乱了活性氧的动态平衡,造成了膜脂过氧化,此时植物体内的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物(APX)、谷胱甘肽还原酶(GR)等酶系统^[29]和谷胱甘肽(GSH)与抗坏血酸(AsA)等非酶抗氧化系统^[30]发挥作用共同抵御膜脂过氧化,清除过多的活性氧。本研究中,SOD活性的提高有助于氧自由基的清除,当高盐浓度(100 mmol·L⁻¹)处理时,SOD活性显著低于对照,表明了此时‘895’杨已经受到了盐胁迫的伤害,SOD活性受到了一定的抑制。POD活性也是随着盐浓度的上升呈先增加后减少的趋势,但是在高盐浓度(100 mmol·L⁻¹)处理时,POD活性还是显著高于对照,说明此时POD的作用也是很强的,可以缓解一部分高盐处理对于‘895’杨的伤害,这与徐彩平^[31]的结论类似。盐处理后,CAT活性的变化趋势与SOD活性的变化趋势一致,尤其是100 mmol·L⁻¹盐处理时显著低于对照。APX活性的变化趋势依然是先增加后下降且100 mmol·L⁻¹处理时显著低于对照,但是APX活性上升的顶峰在25 mmol·L⁻¹处理,而SOD、POD、CAT活性上升的峰值在50 mmol·L⁻¹处理,表明了低盐浓度(25 mmol·L⁻¹)处理时,‘895’杨体内的SOD、POD、CAT和APX 4种酶协同作用,共同抵御膜脂过氧化,此时APX活性已达到顶峰。50 mmol·L⁻¹处理时,APX活性开始减弱,SOD、POD及CAT活性达到顶峰,表明了此时SOD、POD和CAT 3种酶是清除活性氧中起主要作用的酶。在高盐浓度(100 mmol·L⁻¹)处理时,SOD、CAT及APX 3种酶活性均显著低于对照,而POD活性显著高于对照,表明了此时SOD、CAT和APX 3种酶活性受到了抑制,POD起主要作用。

在‘895’杨体内,GR是保证GSH含量的关键^[32]。AsA和GSH本身就是活性氧的清除剂^[33]。本研究中,GR活性与AsA含量都随着盐浓度的上升而一直增加,这与梁泰帅和赵肖琼^[34]及山溪等^[35]的结论相一致,而GSH含量在100 mmol·L⁻¹浓度处理20 d时,却有了轻微的下降,表明了盐处理可以增强GR的活性与AsA的再生能力来抵抗盐胁迫的危害,而高盐浓度(100 mmol·L⁻¹)处理对GSH清除活性氧的能力有一定的抑制作用。

根据相关性分析得知,MDA与GR、GSH、AsA呈极显著正相关关系,表明了MDA的含量对于GSH-AsA循环有着显著的影响,这与魏子涵等人的结论类似^[33]。MDA、H₂O₂与SOD、CAT、APX呈负相关关系,表明了3种酶随着胁迫程度的加强,

活性逐渐受到了抑制;MDA、H₂O₂与POD、GR呈正相关关系,表明了该胁迫环境对于这两种酶没有太大的影响,它们可以持续增加来抵御胁迫的危害。5种酶活性之间的相关性显示,SOD、CAT和APX 3种酶互为极显著正相关关系,POD与GR、SOD、CAT呈正相关关系,这说明了POD与SOD、CAT不仅随浓度变化趋势一致,同时又能协同GR持续抵御盐胁迫危害,验证了本研究中的POD活性随着盐浓度的上升呈先增加后下降的趋势且均显著高于对照的结论。而根长、茎长与GSH、AsA呈极显著负相关关系,表明了虽然‘895’杨通过不断增加GSH、AsA含量来抵御盐胁迫造成的毒害,但是由于其余酶活性已经受到了影响,所以‘895’杨的根长与茎长的生长受到了抑制。

本研究对‘895’杨进行盐胁迫处理结果显示,低盐浓度(25 mmol·L⁻¹)处理下,‘895’杨叶片中的H₂O₂迅速升高。为了消除H₂O₂,叶片内的抗氧化酶与抗氧化物质迅速增加来抵御盐胁迫造成的伤害,尽力维持活性氧平衡,而生长指标的增长反映了低盐浓度(25 mmol·L⁻¹)处理能促进‘895’杨的生长。50 mmol·L⁻¹盐浓度处理下,APX活性降低,SOD、POD、CAT及GR在清除活性氧中起主要作用,但是此时‘895’杨的生长已经受到了抑制,说明了APX是‘895’杨叶片内抵抗膜脂过氧化最为关键的酶。高盐浓度(100 mmol·L⁻¹)处理下,只有POD和GR活性依然很强,但因为其余抗氧化酶活性均降低,‘895’杨已经不能有效地抵御盐胁迫,受到了毒害。

参考文献:

- [1] ZHANG X X, SHI Z Q, TIAN Y J, et al. Salt stress increases content and size of glutenin macropolymers in wheat grain[J]. Food Chem, 2016, 197: 516-521.
- [2] 王善仙, 刘宛, 李培军, 等. 盐碱土植物改良研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24):1-7.
- [3] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):837-845.
- [4] 赵可夫, 张万钧, 范海, 等. 改良和开发利用盐渍化土壤的生物学措施[J]. 土壤通报, 2001, 32(S1): 115-119.
- [5] SUN Y F, OU Y B, GAO Y F, et al. Different tolerance mechanism to alkaline stresses between *Populus bolleana* and its desert relative *Populus euphratica* [J]. Plant Soil, 2018, 426(1/2): 349-363.
- [6] 朱嘉馨, 吴永波, 刘璇, 等. 高温干旱复合胁迫对杨树幼苗叶经济谱性状的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2018, 47(5): 554-560.
- [7] 肖兴翠, 吴立勋, 汤玉喜, 等. 18个杨树品系湖区对比试验初报[J]. 湖南林业科技, 2008, 35(3): 20-22.
- [8] 孙伟博, 杨立恒, 诸葛强, 等. 南林 895 杨离体培养及

- 耐盐基因 GmNHX1 的转化[J]. 南方农业学报, 2013, 44(8): 1237-1242.
- [9] 尹吴, 孙伟博, 周燕, 等. 毛果杨 Rubisco 活化酶基因的克隆与功能分析[J]. 林业科学, 2017, 53(4): 83-95.
- [10] 马晓星, 孙伟博, 魏辉, 等. 转 *PeTLP* 基因‘南林 895’杨对土壤微生物的影响及外源基因分子检测[J]. 浙江林业科技, 2018, 38(4): 28-37.
- [11] 王浩然, 邵志龙, 朱燕宇, 等. ‘南林 895’杨 *PdNAC1* 基因克隆及蛋白的亚细胞定位[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 50-54.
- [12] 张燕红, 吴永波, 刘璇, 等. 高温和干旱胁迫对杨树幼苗光合性能和抗氧化酶系统的影响[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(11): 32-38.
- [13] 陈颖, 徐彩平, 汪南阳, 等. 盐胁迫下水杨酸对南林 895 杨组培苗抗氧化系统的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(6): 17-22.
- [14] HEATH R L, PACKER L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation[J]. Arch Biochem Biophys, 1968, 125(1): 189-198.
- [15] 刘俊, 吕波, 徐朗莱, 等. 植物叶片中过氧化氢含量测定方法的改进[J]. 生物化学与生物物理进展, 2000, 27(5): 548-551.
- [16] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases: I. occurrence in higher plants[J]. Plant Physiol, 1977, 59(2): 309-314.
- [17] 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 279-298.
- [19] PARIDA A K, DAS A B, MOHANTY P. Defense potentials to NaCl in a mangrove, *Bruguiera parviflora*: differential changes of isoforms of some antioxidative enzymes[J]. J Plant Physiol, 2004, 161(5): 531-542.
- [20] ARAKAWA N, TSUTSUMI K, SANCEDA N G, et al. A Rapid and sensitive method for the determination of ascorbic acid using 4, 7-Diphenyl-1, 10-phenanthroline[J]. Agr Biol Chem, 1981, 45(5): 1289-1290.
- [21] GRIFFITH O W. Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2-vinylpyridine[J]. Anal Biochem, 1980, 106(1): 207-212.
- [22] BOSCAIU M, ESTRELLES E, SORIANO P, et al. Effects of salt stress on the reproductive biology of the halophyte *Plantago crassifolia*[J]. Biol Plant, 2005, 49(1): 141-143.
- [23] 李伟强, 刘小京, 赵可夫, 等. NaCl 胁迫下 3 种盐生植物生长发育及离子在不同器官分布特性研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 49-52.
- [24] 王金平, 张金池, 岳健敏, 等. 氯化钠胁迫对香樟幼苗光合色素和叶绿素荧光参数的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(4): 617-622.
- [25] 孙德智, 韩晓日, 彭靖, 等. 外源 NO 和 SA 对盐胁迫下番茄幼苗叶片膜脂过氧化及 AsA-GSH 循环的影响[J]. 植物科学学报, 2018, 36(4): 612-622.
- [26] 班兆军, 关军锋, 李莉, 等. 非生物胁迫下植物体内活性氧产生和抗氧化机制的研究概述[J]. 中国果菜, 2012(5): 40-47.
- [27] 王金平, 王舒甜, 岳健敏, 等. 香樟幼苗对 NaCl 胁迫的生理响应[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(5): 82-89.
- [28] 王舒甜, 王金平, 张金池, 等. 油菜素内酯对盐胁迫下香樟幼苗叶片抗氧化酶活性的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(4): 476-482.
- [29] JAN N, QAZI H A, RAMZAN S, et al. Developing stress-tolerant plants through in vitro tissue culture: Family brassicaceae. Volume 1[M]. Cham: Springer International Publishing, 2018: 327-372.
- [30] SMIRNOFF N. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation[J]. New Phytol, 1993, 125(1): 27-58.
- [31] 徐彩平. 南林 895 杨组培苗耐盐性及耐盐机制的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- [32] 王子华, 金基石, 高俊平, 等. 谷胱甘肽提高月季切花失水胁迫耐性与 GR 活性的关系[J]. 园艺学报, 2006, 33(1): 89-94.
- [33] 魏子涵, 袁斌玲, 陈茜, 等. 聚乙二醇处理对‘717’杂交杨组培苗的影响[J]. 森林与环境学报, 2017, 37(4): 412-417.
- [34] 梁泰帅, 赵肖琼. 油菜素内酯对镉胁迫下蒙古黄芪幼苗 AsA-GSH 循环的影响[J]. 现代中药研究与实践, 2018, 32(6): 1-4.
- [35] 山溪, 秦文斌, 张振超, 等. 低温胁迫对不同品系甘蓝幼叶 AsA-GSH 循环代谢的影响[J]. 南方农业学报, 2018, 49(11): 2230-2235.