

DOI: 10.5846/stxb201312182981

朱金方, 刘京涛, 陆兆华, 夏江宝, 柳海宁, 金悦. 盐胁迫对中国柽柳幼苗生理特性的影响. 生态学报, 2015, 35(15): 5140-5146.

Zhu J F, Liu J T, Lu Z H, Xia J B, Liu H N, Jin Y. Effects of salt stress on physiological characteristics of *Tamarix chinensis* Lour. seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5140-5146.

盐胁迫对中国柽柳幼苗生理特性的影响

朱金方^{1,2}, 刘京涛², 陆兆华^{1,2,*}, 夏江宝², 柳海宁¹, 金悦¹

1 中国矿业大学(北京)恢复生态研究所, 北京 100083

2 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603

摘要:以中国柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.)插穗为研究材料,在装有不同土壤盐分梯度(0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%、2.4%)的盆钵中进行扦插试验,测定柽柳扦插成活率、叶绿素含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性及丙二醛(MDA)含量等指标,研究分析柽柳扦插成活率及幼苗生理特性对盐分胁迫的响应特征。结果表明:(1)柽柳扦插成活率随盐胁迫增强逐渐降低,适合扦插繁殖的土壤含盐量低于0.8%;土壤含盐量超过0.8%后,扦插成活率太低,不适合柽柳进行扦插繁殖。(2)柽柳可通过提高叶绿素含量来适应盐胁迫,随着盐胁迫增强,柽柳扦插幼苗叶片中叶绿素含量先升高后降低,但过高的盐胁迫会破坏叶绿素的合成。(3)柽柳扦插幼苗叶片SOD和POD活性随盐胁迫增强先升高后降低,通过提高SOD和POD活性来清除细胞内多余的活性氧自由基,但活性氧自由基积累过多时,膜脂过氧化作用会破坏细胞膜的稳定性,导致抗氧化酶活性降低。(4)柽柳扦插幼苗叶片MDA含量随盐胁迫的增强先升高后降低。在土壤含盐量0.4%—1.2%范围内,MDA含量虽高于CK,但各盐分处理之间差异不显著。在含盐量为1.6%时,叶片细胞受到膜脂过氧化作用加强,MDA含量显著升高,但含盐量为2.0%时,MDA含量降低。

关键词:盐胁迫;中国柽柳;成活率;酶活性;丙二醛

Effects of salt stress on physiological characteristics of *Tamarix chinensis* Lour. seedlings

ZHU Jinfang^{1,2}, LIU Jingtao², LU Zhaohua^{1,2,*}, XIA Jiangbao², LIU Haining¹, JIN Yue¹

1 Institute of Restoration ecology, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

2 Binzhou University, Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou 256603, China

Abstract: Changyi National Marine Reserve lies on the south coast of Bohai Gulf, which was established to preserve the biggest *Tamarix chinensis* Lour. community in China. However, human over-exploitation of the underground brine caused sea-water intrusion, whereas the annual evaporation capacity gradually increased because of the global climate changes, thereby aggravating the soil salinization and degradation. The population of *T. chinensis* gradually degraded under the conditions of high soil osmotic pressure, poor aeration and moisture, low nutrient availability, and high soil salinity. Therefore, the effects of salt stress on the eco-physiological characteristics of *T. chinensis* cuttings became very important for the ecological restoration of the coastal wetlands. In this paper, we studied the effects of different salinity (0%, 0.4%, 0.8%, 1.2%, 1.6%, 2.0%, and 2.4% NaCl solutions) on the eco-physiological characteristics of *T. chinensis* in the greenhouse. The survival rate, chlorophyll content, activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD), and malondialdehyde (MDA) content were determined. The results showed that the survival rate of *T. chinensis* cuttings gradually decreased with increasing the salt stress. The survival rate was 100% in the control group. The difference of the

基金项目:国家十二五科技支撑计划项目(2011BAC02B01);国家自然科学基金项目(31370702, 41201023)

收稿日期:2013-12-18; **网络出版日期:**2014-09-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lu-zhh@263.net

survival rate between the control and the treatment with 0.4% NaCl was not significant, and the survival rate was about 80% in the treatment with 0.8% NaCl. The survival rate decreased significantly when the salinity increased to more than 0.8%. With the increased salt stress, the chlorophyll content initially increased and then decreased. We conclude that the seedlings were able to adapt to lower salt stress conditions by increasing the chlorophyll content, which was used to enhance the photosynthesis. However, the chlorophyll content decreased under higher salt stress conditions because the concentration of salt stress exceeded the threshold of the plant adaptation. The activities of SOD and POD increased and then decreased with the increasing salt stress conditions. The seedlings were able to eliminate the reactive oxygen species accumulated through the increasing activities of SOD and POD under lower salt stress conditions. With the salt stress increasing, the activities of SOD and POD decreased because the membrane lipid peroxidation damaged the stability of the cell membrane. MDA is an important indicator of injured cell membrane, and its content increased with increased salt stress conditions. The absence of significant difference between treatments with salt concentration less than 1.2% and significant increase in the content of MDA in the treatment with 1.6% NaCl solutions indicates that the seedlings were less influenced by the membrane lipid peroxidation when the salt stress was less than 1.2%. This phenomenon may be explained by the regulation of the antioxidant enzymes.

Key Words: salt stress; *Tamarix chinensis* Lour.; survival rate; enzymatic activity; MDA

土壤盐渍化对全球农业可持续发展和环境质量产生重要影响。据估计,全世界由于盐渍化造成灌溉区作物的损失高达 110 亿美元,并在不断增加^[1]。土壤盐渍化是由自然或人类活动引起的一种主要环境风险,目前,全世界有 10 亿多 hm^2 的土地处于盐渍化状态,占陆地总面积的 30%^[2]。根据农业部组织的第二次全国普查资料统计,中国盐渍土总面积约 3600 万 hm^2 ,占全国可利用土地面积的 4.88%,耕地中盐渍化面积达到 920.9 万 hm^2 ,占全国耕地面积 6.62%^[3]。盐渍土分布面积广,主要分布在西北、华北、东北和沿海地区。土壤盐渍化会造成土壤溶液的渗透压增大,土体通气性、透水性变差,养分有效性降低,植物不能正常生长,使得地表植被群落退化^[4]。因此,土壤盐渍化成为许多生态学家研究的一个热点问题^[5-8]。

在渤海南岸的昌邑国家海洋生态特别保护区,主要以保护中国柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.)为主的滨海湿地生态系统,是中国唯一以柽柳为主要保护对象的国家海洋生态保护区。近年来,由于全球气候变化气温升高,该地区蒸发量增大,另外人类对地下卤水资源的过度开采使得海水倒灌,造成保护区内土壤盐渍化加重,柽柳林生态系统稳定性降低^[9]。目前,国内对于柽柳的研究比较多,主要包括柽柳的形态学和分类学研究^[10]、耐盐旱机制研究^[11-12]、生态学特性研究^[13]以及细胞遗传研究^[14]等方面。而国外对柽柳的研究常常把柽柳作为一种外来入侵种,研究其对生态系统的作用过程^[15-16]。对于刚毛柽柳^[17]、甘蒙柽柳^[18]以及多枝柽柳^[12]等物种在盐胁迫下生理特性已有研究,而对于中国柽柳在盐胁迫条件下生理特性变化的研究较少。本研究在扦插实验基础上对中国柽柳的叶绿素含量(Chl)、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性以及丙二醛(MDA)含量等生理指标进行测定,研究中国柽柳对盐分胁迫的适应机制,为莱州湾地区滨海柽柳林生态系统的保护和修复提供一定的理论基础。

1 材料和方法

1.1 材料和处理方法

扦插枝条取自昌邑国家海洋生态特别保护区天然柽柳林,在 2 月中旬左右(柽柳萌动之前),剪取直径为 1cm 左右的 1 年生枝条,每 15cm 为一截,基部斜削,顶部平齐。用浓度为 100mg/L 的生根粉(ABT1 号)浸泡基部(2—3cm)24h,然后扦插到不同盐梯度土壤的盆钵中,每盆 10 株,每个处理 3 个重复,共 21 盆,210 株。用 NaCl 溶液模拟不同盐分浓度,盐分梯度设置为 0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%、2.4% NaCl 溶液,以含盐量为 0.02% 的土壤作为空白对照,用相应浓度的 NaCl 溶液多次透灌,土壤达到相应的含盐量为止。盆钵底部设

有托盘,深度为 8cm,渗漏水倒回盆钵并清洗托盘,清洗水也倒入盆钵,防止盐分流失。扦插实验期间每天喷洒 2 次,保持土壤含水量在 15%—20%。实验进行 60d 后进行实验室测定。

1.2 测定指标及方法

每盆随机取 3 株分别取每株柽柳相同部位正常生长的成熟叶片进行生理生化指标的测定,每个处理每次取 3 盆。光合色素含量测定以鲜重为单位,采用乙醇、丙酮浸泡法^[19];SOD 活性用氮蓝四唑光化还原法测定^[20];POD 活性用愈创木酚比色法测定^[21];MDA 的测定采用 TBA 比色法^[22]。各项指标测定时,每个处理设 3 次重复,取平均值。

1.3 数据处理

通过 Excel 对实验数据进行计算和处理,采用 SPSS17.0 统计软件利用单因素方差分析 (ANOVA) 对实验数据差异性进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对中国柽柳扦插穗成活率的影响

从图 1 可以看出,盐胁迫对柽柳扦插穗成活率的影响显著。在对照组 (CK) 中柽柳扦插成活率为 100%;在含盐量 0.4% 的土壤中,柽柳扦插穗成活率降低,但与 CK 差异不显著 ($P>0.05$)。在含盐量 0.8% 的土壤中,柽柳扦插穗成活率为 76.7%,与 CK 相比显著降低 ($P<0.05$)。随土壤含盐量的升高,柽柳扦插穗成活率显著降低,在含盐量为 1.2% 的土壤中,柽柳扦插穗成活率降为 30%;而在含盐量为 1.6% 和 2.0% 的土壤中,扦插穗成活率均不足 10%。当土壤含盐量为 2.4% 时,柽柳扦插穗成活率为 0,已无法成功进行扦插繁殖。在低含盐量条件下,中国柽柳扦插成活率与 CK 之间没有显著差异,具有较高的成活率,表明中国柽柳具有一定的耐盐性。而随着盐胁迫增强,中国柽柳扦插穗成活率较低甚至无法成活,表明中国柽柳扦插穗受到盐胁迫伤害越来越大,严重影响根系的正常生长。

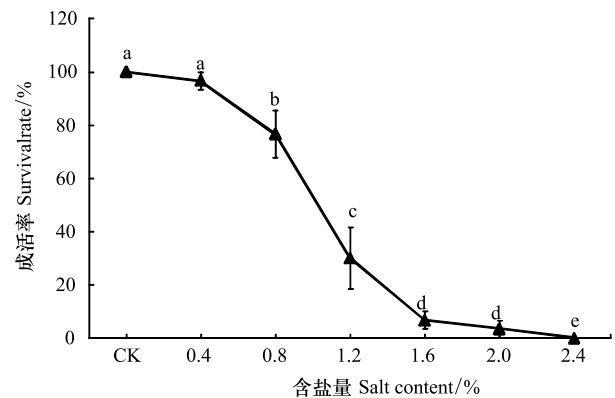


图 1 盐胁迫对柽柳扦插成活率的影响

Fig.1 Effects of salt stress on the survival rate of *T. chinensis*

不同字母表示不同处理间的显著差异 ($P<0.05$)

2.2 盐胁迫对中国柽柳扦插幼苗叶绿素含量的影响

随土壤含盐量的增加,柽柳幼苗叶片中叶绿素 a (Chla)、叶绿素 b (Chlb)、总叶绿素 (ChlT) 含量均呈先降低后升高再降低趋势 (图 2)。在含盐量为 0.4% 土壤中,柽柳幼苗叶片中 Chla、Chlb、ChlT 含量分别相对 CK 降低 13.8%、13.0%、13.6%,降低水平显著 ($P<0.05$)。含盐量为 0.8% 时,叶片中 Chla、Chlb、ChlT 含量与含盐量为 0.4% 时的含量相比,均显著升高,与 CK 相比差异不显著 ($P>0.05$),Chlb 含量在该含盐量下达到最高值。在含盐量为 1.2% 时,柽柳扦插幼苗叶片中 Chla、ChlT 含量仍保持升高趋势并达到最大值,相对 CK 分别升高 3.8%、3.4%,但与 CK 差异不显著 ($P>0.05$),Chlb 含量在该含盐量下开始降低。在含盐量为 1.6% 时,与含盐量 1.2% 相比,柽柳幼苗叶片中 Chla、Chlb、ChlT 含量均显著降低,但与 CK 差异均不显著。随着土壤含盐量的继续升高,Chla 含量呈下降趋势,Chlb、ChlT 含量略有升高,但三者的变化幅度均较小 (图 2)。

2.3 盐胁迫对中国柽柳扦插幼苗超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的影响

随着土壤含盐量的升高,柽柳幼苗叶片内 SOD 活性呈先升高后降低趋势 (图 3)。在土壤含盐量为 0.4% 下,柽柳幼苗叶片内 SOD 活性相比 CK 增加 86.0%,但差异不显著 ($P>0.05$)。在土壤含盐量 0.8% 下,叶片内 SOD 活性大幅度升高,相对 CK 增加了 215.4%,显著高于含盐量 0.4% 和 CK ($P<0.05$)。在土壤含盐量 1.2% 下,柽柳扦插幼苗叶片内 SOD 活性显著低于含盐量 0.8%,但显著高于 CK ($P<0.05$)。在土壤含盐量 1.6% 下,

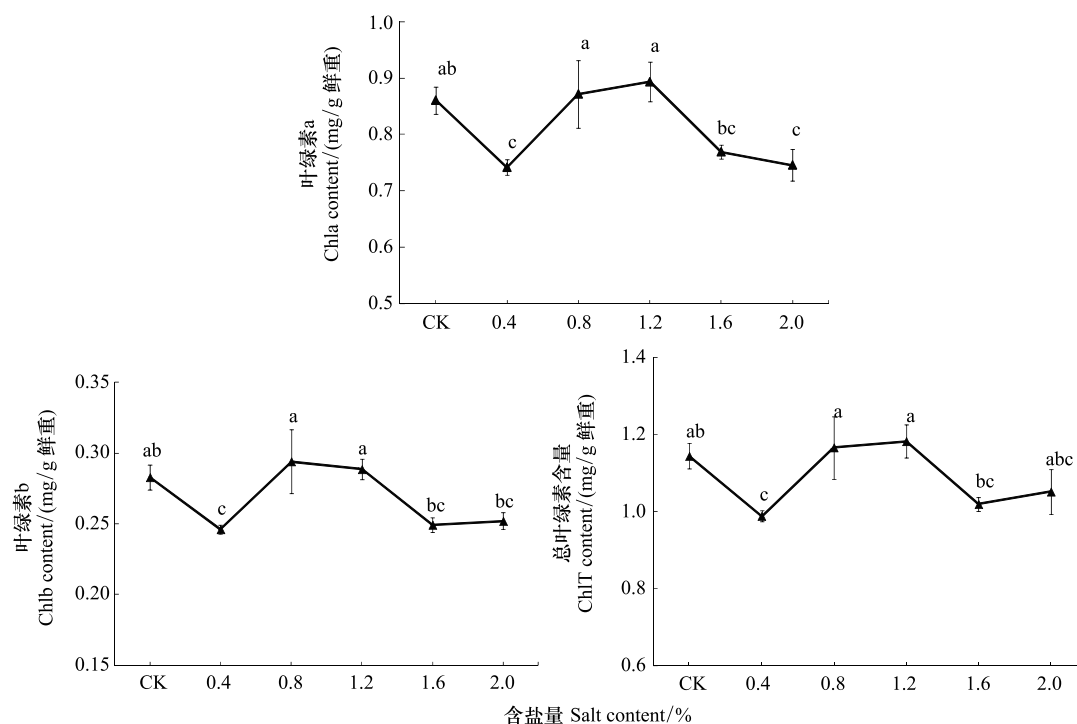


图2 盐分胁迫对柽柳叶片叶绿素含量的影响

Fig.2 Effects of salt stress on chlorophyll content of *T. chinensis*

SOD 活性又显著升高 ($P < 0.05$), 达最大值, 与 CK 相比增加了 319.5%。随盐胁迫逐渐增强, 在含盐量为 2.0% 时柽柳叶片内的 SOD 活性显著降低, 但仍显著高于 CK ($P < 0.05$) (图 3)。

2.4 盐分胁迫对中国柽柳扦插幼苗过氧化物酶(POD)活性的影响

随土壤含盐量的升高, 柽柳幼苗叶片内的 POD 活性呈先升高后降低趋势 (图 4)。在土壤含盐量 0.4% 下, 柽柳幼苗叶片内 POD 活性与 CK 相比增加幅度较小, 差异不显著 ($P > 0.05$)。在土壤含盐量 0.8% 下, 柽柳幼苗叶片内 POD 活性显著升高, 与 CK 相比增加了 69.3%。当土壤含盐量升高到 1.2% 时, 柽柳叶片内 POD 活性显著升高, 达最高值, 与 CK 相比增加了 114.9%。随土壤含盐量的升高, 在土壤含盐量为 1.6% 时, 柽柳幼苗叶片 POD 活性开始降低, 显著低于土壤含盐量 1.2% 时 ($P < 0.05$), 显著高于 CK ($P < 0.05$)。当土壤含盐量升高到 2.0% 时, 柽柳幼苗叶片内 POD 活性显著低于含盐量 1.6% 时, 与 CK 相比差异不显著 (图 4)。

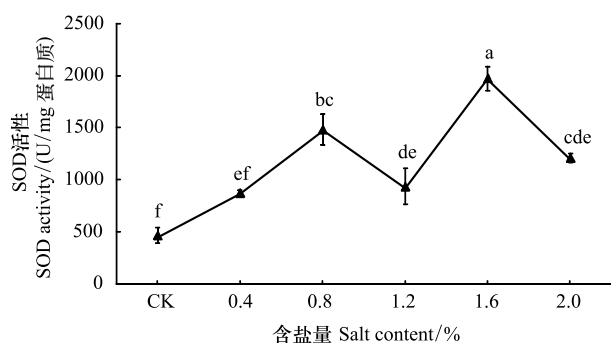


图3 盐分胁迫对柽柳叶片 SOD 活性的影响

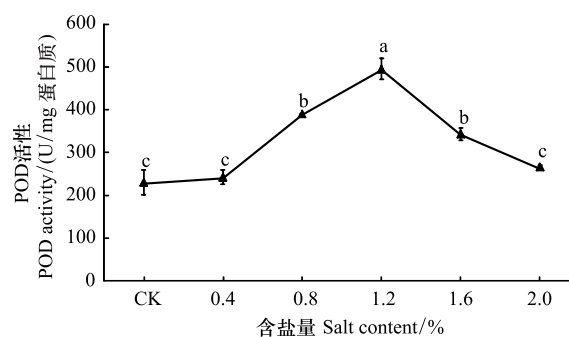
Fig.3 Effects of salt stress on superoxide dismutase activity of *T. chinensis*

图4 盐分胁迫对柽柳叶片 POD 活性的影响

Fig.4 Effects of salt stress on peroxidase activity of *T. chinensis*

2.5 盐胁迫对中国柽柳扦插幼苗丙二醛(MDA)含量的影响

随土壤含盐量的升高,柽柳幼苗叶片内 MDA 含量呈先升高后降低趋势(图 5)。在土壤含盐量 0.4% 下,柽柳幼苗叶片内 MDA 含量显著升高($P<0.05$),与 CK 相比增加了 39.7%。在土壤含盐量 0.8% 下,MDA 含量略有升高,与 CK 相比较增加了 42.5%。当土壤含盐量为 1.2% 时,柽柳叶片内 MDA 含量稍有下降,与 CK 差异不显著($P>0.05$)。在含盐量为 1.6% 时,柽柳幼苗叶片 MDA 含量显著升高,达最大值,与 CK 相比增加 77.8% ($P<0.05$)。随着土壤含盐量的进一步增加,柽柳幼苗叶片 MDA 含量开始显著降低,与 CK 差异不显著($P>0.05$)(图 5)。

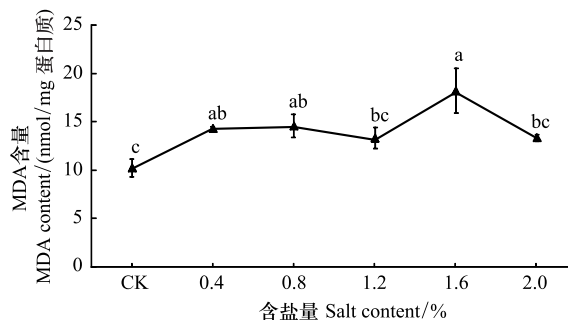


图 5 盐胁迫对柽柳叶片 MDA 含量的影响

Fig. 5 Effects of salt stress on malondialdehyde content of *T. chinensis*

3 讨论

柽柳的繁殖方式包括种子繁殖和扦插繁殖,而种子繁殖对温度和湿度的要求较高,且对于盐胁迫的耐受能力较低^[23]。因此,扦插繁殖技术成为柽柳繁殖的主要方式。董兴红等^[17]研究认为刚毛柽柳的适宜生长在含盐量不超过 1.0% 的土壤中,耐盐能力在 2.5% 左右。本研究表明中国柽柳扦插成活率受盐胁迫影响显著,在低盐条件下,中国柽柳扦插穗成活率较高,说明中国柽柳能够适应一定程度的盐胁迫,具有一定的耐盐能力。而在高盐条件下,中国柽柳扦插穗由于受到盐胁迫的抑制成活率较低。因此,中国柽柳适宜在不超过 0.8% 含盐量的土壤中进行扦插繁殖,而超过 0.8% 的含盐量时,柽柳扦插穗受到盐胁迫的影响,扦插成活率显著降低,其耐盐能力在 2.0% 左右。

叶绿素是植物进行光合作用的重要物质,叶绿素含量的多少对植物光合作用有着重要影响,其含量在一定程度上能反映植物同化物质的能力^[24]。在土壤盐胁迫下,植物叶片内的叶绿体会遭到破坏,抑制叶绿素的合成或者促进叶绿素的分解^[25]。刘会超等^[26]研究发现白三叶叶绿素含量随盐胁迫的增强先升高后降低,认为盐胁迫会破坏植物细胞色素系统,导致叶绿素含量降低。在本研究中,中国柽柳扦插幼苗叶片内 Chla、Chlb、ChlT 含量在土壤含盐量 0.4% 下出现显著降低,可能是由于低盐条件下有利于中国柽柳生长,没能激活中国柽柳对盐胁迫的抵抗机制。随着盐胁迫增强,叶绿素含量开始增加,说明中国柽柳开始受到盐胁迫的影响,通过提高叶绿素的合成,来增强叶片的光合作用以适应盐胁迫。而在高盐胁迫下,叶绿素含量降低,表明中国柽柳受到盐胁迫的负面影响增强,对叶绿素合成系统造成了一定破坏,同时盐胁迫促进了叶绿素酶对叶绿素的分解^[26],导致叶绿素含量降低。

抗氧化酶系统在清除或降低活性氧产生及缓解活性氧积累对植物造成伤害方面起重要作用。SOD 是植物盐胁迫下主要的抗氧化酶之一,在清除超氧离子、抵御膜脂的过氧化、减轻质膜受损等方面起着重要作用。在正常条件下,细胞内活性氧的产生和清除处于动态平衡状态,当植物受逆境胁迫时,这种平衡被打破,活性氧开始积累,植物通过提高 SOD 活性来清除多余的活性氧^[27]。彭立新等^[28]研究发现,植物细胞在盐胁迫下所能忍受的活性氧水平存在一个阈值,在阈值内,植物能够通过提高抗氧化酶活性来清除活性氧自由基,当超过这个阈值时,抗氧化酶活性便会受到抑制,活性氧过多积累,对植物组织造成伤害。在本研究中,随着盐胁迫的增强,柽柳幼苗叶片内 SOD 活性先升高后降低(图 3),表明土壤含盐量在低于 1.6% 的条件下,柽柳幼苗能够通过提高 SOD 活性来清除细胞内多余的活性氧自由基;而当含盐量超过 1.6% 以后,活性氧自由基的产生量超过了 SOD 的清除量,使得细胞受到损伤,SOD 活性受到抑制。这与宋福南^[27]等对柽柳 SOD 的研究结果相一致。

POD 也是植物细胞内主要的抗氧化酶,与 SOD 联合清除活性氧自由基,SOD 将氧化过程中产生的活性

氧自由基歧化反应形成 O_2 和 H_2O_2 , 然后由 POD 将产生的 H_2O_2 分解去除^[29]。Lucrezia 等^[30] 认为植物在盐胁迫下会通过提高 POD 活性来减少胁迫造成的伤害, 而导致 POD 活性的提高的原因不仅来自活性氧的产生, 还包括细胞膜的损伤以及 Ca^{2+} 浓度的变化。在本研究中, 在轻度盐胁迫下, POD 活性升高不明显, 柽柳幼苗受到盐胁迫影响不明显; 随着盐胁迫的不断增强, 含盐量在 0.8%—1.2% 之间时, POD 活性开始显著升高, 表明在该盐分范围内细胞产生的活性开始增加, 抗氧化酶系统通过提高 POD 活性来分解 SOD 歧化产生的 H_2O_2 ; 而在高盐胁迫下, 由于细胞内部产生过多的活性氧, 超过了 POD 的清除阈值, 使得多余的活性氧对酶系统造成一定破坏, 造成 POD 活性降低, 这与刘克东等^[18] 对甘蒙柽柳进行盐胁迫处理的结果相一致。

植物在逆境条件下, 由于膜脂过氧化作用产生 MDA, 它是植物细胞膜受损和自由基形成的主要指示物^[31]。对盐分耐受能力程度不同的植物, MDA 含量变化规律不同: 耐受能力弱的植物, 随着盐胁迫增强叶片中 MDA 含量不断升高^[32]; 而对盐分耐受能力较强的植物则随着盐胁迫的增强植物叶片内 MDA 含量先降低后升高^[33]。廖宝文等^[33] 等研究发现, 尖瓣海莲 MDA 含量在低盐胁迫下变化不显著, 而在高盐胁迫下含量显著升高。在本研究中, 在各个盐分胁迫下, 中国柽柳叶片内 MDA 含量均高于 CK。土壤含盐量在 0.4%—1.2% 范围时, MDA 含量虽高于 CK, 但各个盐分胁迫之间差异不显著, 可见在该盐度范围内中国柽柳受到膜脂过氧化作用影响较小。在含盐量为 1.6% 时, MDA 含量显著升高, 柽柳叶片细胞受到膜脂过氧化作用逐渐加强。但在土壤含盐量为 2.0% 时, MDA 含量出现降低的现象, 这可能与抗氧化酶系统的调节有关。

4 结论

(1) 在 CK 下, 中国柽柳扦插成活率为 100%; 中国柽柳适合在不高于 0.8% 的盐分下进行扦插繁殖, 当超过 0.8% 以后, 随盐胁迫的增强, 中国柽柳扦插成活率显著降低, 当含盐量超过 2.0% 时, 中国柽柳扦插难以成活。

(2) 在适度盐分胁迫下, 中国柽柳扦插幼苗可通过叶绿素含量提高增强自身光合作用以适应盐胁迫, 但盐分胁迫过强时, 叶绿素合成受到破坏, 叶绿素含量降低。

(3) 在盐分胁迫下, 柽柳扦插幼苗通过提高 SOD 和 POD 活性清除多余的活性氧自由基, 减少膜脂过氧化作用对细胞造成的伤害, 但活性氧自由基过多积累时, 使酶系统受到损伤, 抗氧化酶活性降低。

(4) 在低盐条件下, 中国柽柳受到由盐胁迫引起的膜脂过氧化作用的影响较小, 柽柳幼苗叶片内 MDA 含量变化不显著, 但随着盐胁迫的增强, 柽柳幼苗细胞膜受膜脂过氧化作用的伤害越来越严重, MDA 积累就越多。

致谢:感谢滨州学院黄河三角洲生态环境研究中心的各位老师给予的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Zhou D, Lin Z L, Liu L M. Regional land salinization assessment and simulation through cellular automaton-Markov modeling and spatial pattern analysis. *Science of the Total Environment*, 2012, 439(11): 260-274.
- [2] 蔺娟, 地里拜尔·苏力坦. 土壤盐渍化的研究进展. *新疆大学学报: 自然科学版*, 2007, 24(3): 318-323, 328-328.
- [3] 王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 陈志刚. 盐碱地可持续利用研究综述. *地理学报*, 2011, 66(5): 673-684.
- [4] 尹勤瑞. 盐碱化对土壤物理及水动力学性质的影响 [D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2011.
- [5] Yu R H, Liu T X, Xu Y P, Zhu C, Zhang Q, Qu Z Y, Liu X M, Li C Y. Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao irrigation district of north China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 1952-1960.
- [6] Scott M, Ian M. Predicting salinity impacts of land-use change: Groundwater modeling with airborne electromagnetics and field data, SE Queensland, Australia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007, 9(2): 124-129.
- [7] Gao F, Huang Q, Sun X Y, Yan Z L. Study on dynamic changes of the soil salinization in the upper stream of the Tarim river based on RS and GIS. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 11(part c): 1135-1141.
- [8] Zhang T T, Zeng S L, Gao Y, Ouyang Z T, Li B, Fang C M, Zhao B. Assessing impact of land uses on land salinization in the Yellow River

- Delta, China using an integrated and spatial statistical model. *Land Use Policy*, 2011, 28(4): 857-866.
- [9] 朱金方, 夏江宝, 陆兆华, 刘京涛, 孙景宽. 盐旱交叉胁迫对柽柳幼苗生长及生理生化特性的影响. *西北植物学报*, 2012, 32(1): 124-130.
- [10] 冯缨, 尹林克. 柽柳属植物镜下器官特征描述及分类学意义. *干旱区研究*, 2000, 17(3): 40-45.
- [11] 王霞, 侯平, 尹林克, 冯大千, 潘伯荣. 水分胁迫对柽柳植物可溶性物质的影响. *干旱区研究*, 1999, 16(2): 6-11.
- [12] 朱金方, 陆兆华, 夏江宝, 陈曦, 张萌, 刘京涛. 盐旱交叉胁迫对柽柳幼苗渗透调节物质含量的影响. *西北植物学报*, 2013, 33(2): 0357-0363.
- [13] 赵峰侠, 尹林克. 荒漠内陆河岸胡杨和多枝柽柳幼苗种群空间分布格局及种间关联性. *生态学杂志*, 2007, 26(7): 972-977.
- [14] 杨传平, 王玉成, 刘桂丰, 姜静. 应用 SSH 技术研究 NaHCO_3 胁迫下柽柳基因的表达. *遗传学报*, 2004, 31(9): 926-933.
- [15] Ladenburger C G, Hild A L, Kazmer D J, Munn L C. Soil salinity patterns in Tamarix invasions in the Bighorn Basin, Wyoming, USA. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65(1): 111-128.
- [16] Edward P G, Pamela L N. Comparative ecophysiology of Tamarix ramosissima and native trees in western U. S. riparian zones. *Journal of Arid Environments*, 2005, 61(3): 419-446.
- [17] 董兴红, 岳国忠. 盐胁迫对刚毛柽柳生长的影响. *华北农学报*, 2010, 25(增刊): 154-155.
- [18] 刘克东, 郑彩霞, 郝建卿. 甘蒙柽柳对 NaCl 胁迫的生理响应. *广东农业科学*, 2012, 39(10): 38-42, 55-55.
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [20] 罗广华, 王爱国. 现代植物生理学实验指南. 北京: 科学出版社, 1999.
- [21] 毛爱军, 王永健, 冯兰香, 许勇, 耿三省, 曹婉红. 疫病病菌侵染后辣椒幼苗体内保护酶活性的变化. *华北农学报*, 2003, 18(2): 66-69.
- [22] 赵世杰, 李德全. 现代植物生理学实验指南. 北京: 科学出版社, 1999.
- [23] 孙红叶, 李利, 刘国军, 张希明, 李应罡. 刚毛柽柳种子萌发对盐分与干旱胁迫的响应. *干旱区地理*, 2007, 30(3): 414-419.
- [24] 王素平, 郭世荣, 胡晓辉, 李静, 焦彦生. 盐胁迫对黄瓜幼苗叶片光合色素含量的影响. *江西农业大学学报*, 2006, 28(1): 32-38.
- [25] 王伟华, 张希明, 闫海龙, 梁少民, 杨小林. 盐处理对多枝柽柳光合作用和渗透物质的影响. *干旱区研究*, 2009, 26(4): 561-568.
- [26] 刘会超, 贾文庆. 盐胁迫对白三叶幼苗叶片叶绿素含量和细胞膜透性的影响. *广东农业科学*, 2008, (12): 58-60.
- [27] 宋福南, 杨传平, 刘雪梅, 李公斌. 盐胁迫对柽柳超氧化物歧化酶活性的影响. *东北林业大学学报*, 2006, 34(3): 54-56.
- [28] 彭立新, 周黎君, 冯涛, 李慧, 阎国荣. 盐胁迫对沙枣幼苗抗氧化酶活性和膜脂过氧化的影响. *天津农学院学报*, 2009, 16(4): 1-4.
- [29] 田国忠, 李怀方, 裘维蕃. 植物过氧化物酶研究进展. *武汉植物学研究*, 2001, 19(4): 332-344.
- [30] Sergio L, De Paola A, Cantore V, Pieralice M, Cascarano N A, Bianco V V, Di Venere D. Effect of salt stress on growth parameters, enzymatic antioxidant system, and lipid peroxidation in wild chicory (*Cichorium intybus* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34(6): 2349-2358.
- [31] Karim S, Behrouz S, Vahid R, Mahmood K, Adriano S. Salt stress induction of some key antioxidant enzymes and metabolites in eight Iranian wild almond species. *Acta Physiol Plantarum*, 2012, 34(1): 203-213.
- [32] 李婧男, 刘强, 贾志宽, 王平平. 盐胁迫对沙枣幼苗生长与生理特性的影响. *植物研究*, 2009, 29(5): 553-558.
- [33] 廖宝文, 邱凤英, 张留恩, 管伟, 李玫. 盐度对尖瓣海莲幼苗生长及其生理生态特性的影响. *生态学报*, 2010, 30(23): 6363-6371.