

干旱胁迫下黑果枸杞幼苗对外源水杨酸的生理响应

可静¹, 李进^{1,*}, 李永洁²

¹新疆师范大学生命科学学院, 新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室, 乌鲁木齐830054; ²乌鲁木齐市第八中学, 乌鲁木齐830000

摘要: 以黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)幼苗为试验材料, 采用控制水分梯度模拟干旱胁迫条件, 研究在不同程度干旱胁迫下黑果枸杞幼苗对外源水杨酸(SA, 0.1、0.5 mmol·L⁻¹)的生理响应。结果表明: 在干旱胁迫及喷施SA的条件下, 渗透调节物质随着胁迫程度的加大, 有显著增长; MDA含量随着干旱胁迫程度的增加而递增, 而在喷施SA的情况下, MDA含量比各自未喷施SA对照有所下降; SOD、POD、CAT活性在轻度胁迫下有所增高, 喷施SA后, 中重度干旱胁迫的抗氧化酶活性升高并高于对照。说明干旱胁迫对黑果枸杞生理生化指标有一定的影响, 喷施外源水杨酸能增强黑果枸杞的抗旱能力。

关键词: 黑果枸杞; 外源水杨酸; 干旱胁迫; 幼苗; 生理响应

黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)属于茄科枸杞属植物, 是我国西北地区特有的一种耐盐、抗旱、防风固沙、具有药用价值的多刺灌木(陈海魁等2008), 其果实富含花色苷类色素(Zheng等2011)、甜菜碱(刘增根等2012)、多糖(Lv等2013)、糖蛋白(汪亚娟2013)、脂肪酸(Peng等2012)以及黄酮(陈晨等2011)等物质, 其功效作用及营养价值, 特别是抗氧化及防治心脑血管疾病等的功效(林丽等2012)已被社会认同和接受, 并成为生物活性研究领域的热点之一(矫晓丽等2011)。近年来, 黑果枸杞野生资源正遭受着前所未有的采伐压力(阿力同·其米克等2014), 所以人工栽培工作迫在眉睫, 其生态效益明显, 经济效益高, 具有广阔的应用前景和开发空间。目前对于黑果枸杞的研究多集中在黑果枸杞果实中黄酮、多糖与花色苷提取及生物功效(李进等2010; 闫亚美等2014)、组织培养(浩仁塔本等2005)、成分分析、耐盐机理(王龙强和藺海明2011)等方面。鉴于新疆位于我国西北干旱半干旱区这样独特的地理位置, 由于严重缺水, 黑果枸杞人工种植面临的干旱胁迫问题不容小觑, 制约了黑果枸杞果实收获及加工产业的可持续发展, 因此, 在改善黑果枸杞栽培环境的同时, 提高黑果枸杞抗旱能力成为亟待解决的关键问题。

目前, 在干旱胁迫下, 植物对施加的外源生长物质的响应规律已成为一个热门的研究问题。已有大量研究发现, 干旱胁迫下植物对水杨酸(salicylic acid, SA)的响应体现在植物形态指标和生理指标产生变化。因此, 越来越多的研究者开始关注于SA对改变植物抗旱能力所起的作用(徐萍等2014)。但是, 目前有关干旱胁迫下植物对SA的响

应研究多集中在农作物和蔬果上(王晓黎等2011), 却没有有关干旱胁迫下黑果枸杞对外源SA的生理响应的研究。

本文以黑果枸杞为实验材料, 研究了在不同程度干旱胁迫下黑果枸杞对不同浓度外源SA的生理响应, 以期选出增强其抗旱性的适宜的水杨酸处理浓度, 为今后深入、系统地研究黑果枸杞抗旱机制及充分开发利用黑果枸杞资源和推广栽培提供科学的理论数据, 同时也为抗旱节水型经济作物的选育提供参考。

材料与方法

1 材料与处理

黑果枸杞(*Lycium ruthenicum* Murr.)种子于2013年8月采自新疆博湖县开都河流域。挑选饱满、大小一致的种子在适宜环境中培育成幼苗(李永洁等2014)。选用生长良好、长势基本一致的黑果枸杞幼苗, 在新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室进行盆栽试验, 使用沙壤土培养, 每盆5株。待苗长至10 cm左右, 进行土壤干旱胁迫和水杨酸喷施处理(蒋明敏等2012), 每个处理3次重复, 共50盆。

土壤干旱胁迫处理采用水分梯度划分进行设计, 设正常对照(CK, 85%~90%土壤最大持水量)、轻度胁迫(D₁, 60%~65%土壤最大持水量)、中度胁迫(D₂, 40%~45%土壤最大持水量)、重度胁迫(D₃,

收稿 2015-12-09 修定 2016-02-19

资助 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2014211A041)。

* 通讯作者(E-mail: xjcjlj4@xjnu.edu.cn)。

20%~25%土壤最大持水量) 4个水平。每个处理3次重复。胁迫开始后每天使用电子天平称重并补差, 维持各处理土壤水分含量。胁迫持续28 d (苏丹等2007)。

SA处理使用的SA为分析纯, 蒸馏水溶解后, 用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH调至pH值为6.8, 配成 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 母液, 使用前分别配成 0.1 、 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每天喷施叶面, 喷施时间为早晨9:30, 连续3 d。药液用量为每盆20 mL, 对照喷等量蒸馏水。

2 指标测定

上述处理后第28天(李永洁等2014), 分别随机取各处理组黑果枸杞叶片, 3次重复, 测定抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性及丙二醛(malondialdehyde, MDA)、可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸的含量。SOD、POD、CAT活性及MDA含量采用试剂盒(南京建成生物工程研究所)测定。可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝法(高俊凤2006)测定; 脯氨酸含量采用酸性茚三酮比色法(Bates等1973)测定; 可溶性糖含量测定采用蒽酮法(张志良等2009)。

3 数据处理及分析

使用SPSS 17.0软件处理及分析数据, 不同胁迫处理数据采用One Way ANOVA ($P < 0.05$)进行方差分析, 使用Excel 2010软件作图。

实验结果

1 不同干旱胁迫下黑果枸杞幼苗渗透调节物质对外源水杨酸的响应

1.1 不同干旱胁迫下黑果枸杞幼苗可溶性糖含量对外源水杨酸的响应

由图1可以看出, 在未喷施外源SA的情况下, 随着干旱胁迫程度的加剧, D_1 、 D_2 、 D_3 处理组的可溶性糖含量均较对照有所增长并且差异显著。在喷施外源SA的情况下, CK+ $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA和CK+ $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理组可溶性糖含量较CK+ $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA分别增长5.0%和13.8%, 但差异不显著; D_1 + $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA和 D_1 + $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理较 D_1 + $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA组均有所增长且差异显著; D_2 + $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA和 D_2 + $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理较 D_2 + $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理组有所增长但差异不显著; D_3 + $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA和 D_3 + $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理较 D_3 + $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理组有所增长且差异显著。

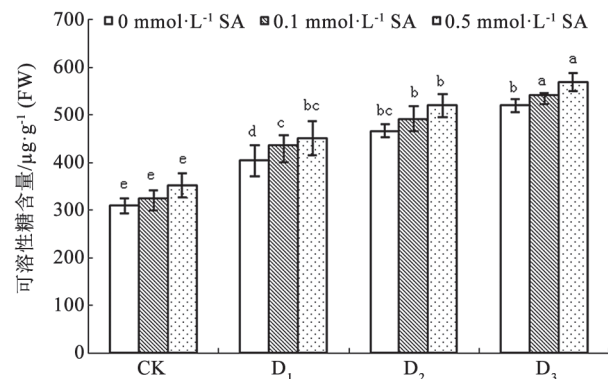


图1 外源水杨酸对干旱胁迫下黑果枸杞可溶性糖的影响
Fig.1 Effects of exogenous SA on the soluble sugar content of *L. ruthenicum* under drought stress

CK: 对照, 土壤含水量为85%~90%; D_1 : 轻度胁迫, 土壤含水量为60%~65%; D_2 : 中度胁迫, 土壤含水量为40%~45%; D_3 : 重度胁迫, 土壤含水量为20%~25%。各柱形上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下图同。

在干旱胁迫程度相同时, 黑果枸杞可溶性糖含量表现为: $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理 > $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理 > 蒸馏水处理。说明在一定范围内随着干旱胁迫强度的增加, 各处理的黑果枸杞幼苗的可溶性糖含量都呈现逐渐升高的趋势, SA处理可以增加干旱胁迫下黑果枸杞可溶性糖含量, 从而提高黑果枸杞幼苗的抗旱性, 且 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA效果优于 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA。

1.2 不同干旱胁迫下黑果枸杞幼苗可溶性蛋白含量对外源水杨酸的响应

由图2可以看出, 随着胁迫程度的加深, 各处

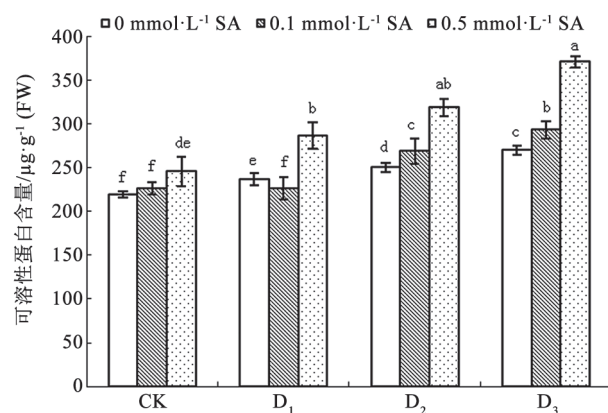


图2 外源SA对干旱胁迫下黑果枸杞可溶性蛋白含量的影响
Fig.2 Effects of exogenous SA on the soluble protein content of *L. ruthenicum* under drought stress

理组可溶性蛋白含量递增。CK+0.5 mmol·L⁻¹ SA处理组较CK+0 mmol·L⁻¹ SA增长并且差异显著; D₁+0.5 mmol·L⁻¹ SA处理组较D₁+0 mmol·L⁻¹ SA增长且差异显著; D₂+0.1和0.5 mmol·L⁻¹ SA处理组均较D₂+0 mmol·L⁻¹ SA处理组增长且差异显著; D₃+0.1和0.5 mmol·L⁻¹ SA处理组也均较D₃+0 mmol·L⁻¹ SA有所增长且差异显著。由此可以看出, 干旱胁迫程度相同时, 喷施0.5 mmol·L⁻¹ SA溶液促进可溶性蛋白积累的效果高于喷施0.1 mmol·L⁻¹ SA处理; 干旱胁迫程度越大, 可溶性蛋白含量越高。

1.3 不同干旱胁迫下黑果枸杞幼苗脯氨酸含量对外源水杨酸的响应

由图3可看出, 未喷施外源SA情况下, 随着干旱胁迫程度的加深, 各处理组脯氨酸含量均逐渐升高, D₁、D₂、D₃处理组较对照分别增加10.2%、18.2%、27.1%, 且差异显著。在喷施外源SA情况下, CK+0.1和0.5 mmol·L⁻¹ SA处理组脯氨酸含量较CK+0 mmol·L⁻¹ SA稍有增长但差异不显著; D₁、D₂、D₃的0.1和0.5 mmol·L⁻¹ SA处理组的脯氨酸含量均较各自干旱胁迫下0 mmol·L⁻¹ SA处理组显著增加; 在每个干旱处理组中, 也是喷施0.5 mmol·L⁻¹ SA处理组的脯氨酸含量最高。这表明, 干旱胁迫的程度越大, 脯氨酸积累越明显, 喷施适宜浓度的SA可促进黑果枸杞脯氨酸的积累, 其中0.5 mmol·L⁻¹ SA喷施效果较好。

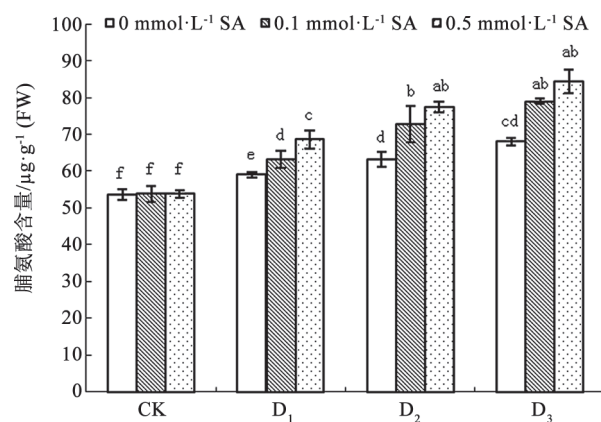


图3 外源水杨酸对黑果枸杞干旱胁迫下脯氨酸含量的影响
Fig.3 Effects of exogenous SA on the proline content of *L. ruthenicum* under drought stress

2 不同干旱胁迫下黑果枸杞幼苗MDA含量对外源水杨酸的响应

干旱胁迫下, 植物细胞中的活性氧逐渐积累, 最终发生膜脂过氧化反应, 导致过氧化物MDA的产生和积累(谢志玉等2010)。如图4所示, 未喷施外源SA的情况下, 黑果枸杞MDA含量随干旱胁迫程度的增加呈逐渐增加的趋势。喷施外源SA情况下, 各处理MDA含量总体趋势随胁迫程度的加深而逐渐升高, CK+0.1和0.5 mmol·L⁻¹ SA处理组的MDA含量较CK+0 mmol·L⁻¹ SA略有降低但差异不显著; D₁、D₂、D₃的0.1 mmol·L⁻¹ SA处理组分别较各自相同干旱胁迫下0 mmol·L⁻¹ SA处理组的MDA含量分别减少12.7%、21.5%、12.5%, 并且差异显著; 而D₁、D₂、D₃的0.5 mmol·L⁻¹ SA处理组分别较各自相同干旱胁迫下0 mmol·L⁻¹ SA处理组的MDA含量分别减少7.6%、5.9%、6.8%, 但差异不太大。由此可以看出, 随着干旱胁迫程度的加深, MDA含量大幅增加, 而适宜浓度SA处理可以降低干旱胁迫下黑果枸杞的MDA含量, 以0.1 mmol·L⁻¹ SA比0.5 mmol·L⁻¹ SA的效果好。

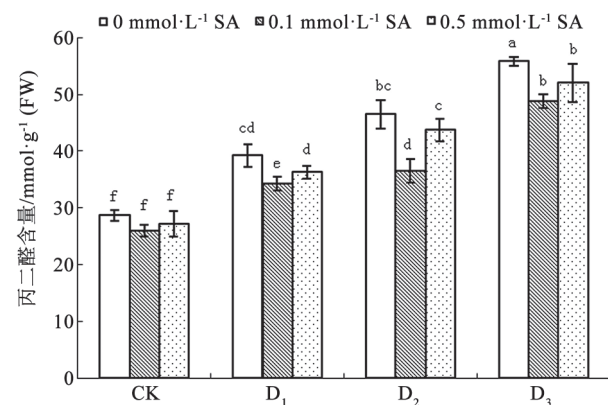


图4 外源水杨酸对干旱胁迫下黑果枸杞丙二醛的影响
Fig.4 Effects of exogenous SA on the MDA content of *L. ruthenicum* under drought stress

3 不同干旱胁迫下黑果枸杞幼苗抗氧化酶活性对外源水杨酸的响应

在正常生理条件下, 植物自身可以清除体内不断产生的多余的自由基, 使植物体内的自由基浓度维持在一个对植物体无害的恒定范围内。但在干旱胁迫时, 植物体内活性氧的产生与清除的

代谢平衡被破坏,植物细胞内自由基的含量会增加,从而引起细胞膜损伤,导致膜透性增大并引发质膜过氧化作用。植物会增高保护酶的活性来增强去除活性氧或氧自由基的能力,酶活性越高清除氧自由基的能力越强,植物的抗逆能力就越强。过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)是细胞抵御活性氧伤害的酶保护系统,具有清除超氧自由基、控制膜脂过氧化的作用,在保护细胞膜正常代谢方面起重要作用。它们的活性变化一方面反映细胞内活性氧与其清除系统之间的平衡状态,另一方面可以反映植物对于干旱胁迫的适应性(金忠民等2010)。

3.1 不同干旱胁迫下黑果枸杞幼苗过氧化氢酶活性对外源水杨酸的响应

由图5可以看出,未喷施外源SA的情况下, D_1 的CAT活性较对照增加23.8%, D_2 和 D_3 的CAT活性较对照分别减少4.7%和10.7%。喷施外源SA处理后, $CK+0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA、 $CK+0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理组的CAT活性较 $CK+0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA降低且差异显著; D_1 组喷施0.1和 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA的CAT活性也较 $D_1+0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA有显著降低;但 D_2 和 D_3 的 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理组的CAT活性均分别高于各自干旱程度下的0和 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA组。实验结果说明,黑果枸杞可以抵御轻度干旱胁迫,但对于中、重度干旱胁迫,适宜浓度($0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)的外源SA,可在一定程度上缓解干旱胁迫对黑果枸杞的伤害,提高其耐旱性。

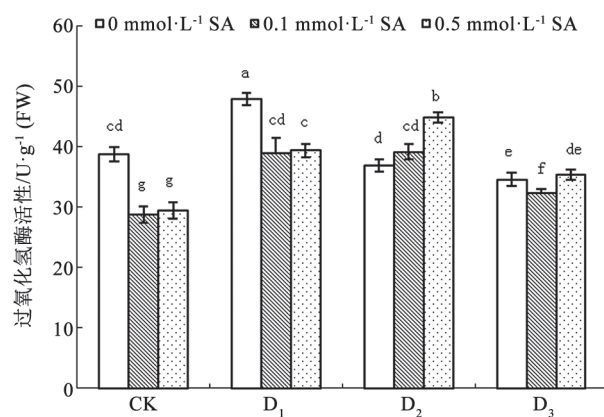


图5 外源水杨酸对干旱胁迫下黑果枸杞幼苗过氧化氢酶活性的影响

Fig.5 Effects of exogenous SA on the CAT activity of *L. ruthenicum* under drought stress

3.2 不同干旱胁迫下黑果枸杞幼苗过氧化物酶活性对外源水杨酸的响应

POD是植物逆境条件下清除活性氧自由基最关键的酶之一。由图6可看出,未喷施外源SA的情况下, D_1 的POD活性较CK增加28.0%, D_2 、 D_3 的POD活性较CK分别减少4.1%和10.3%。喷施外源SA处理后, $CK+0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理组POD活性较 $CK+0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA显著降低, $CK+0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理组POD活性较 $CK+0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA显著升高; $D_1+0.1$ 和 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理组的POD活性均较 $D_1+0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA显著降低; D_2 和 D_3 的 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理组POD活性均比各自干旱胁迫下的 $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA组显著升高。实验结果说明,黑果枸杞可以抵御轻度干旱胁迫,但对于中、重度干旱胁迫,适宜浓度($0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)的外源SA即可缓解干旱胁迫对黑果枸杞的伤害,提高其耐旱性。

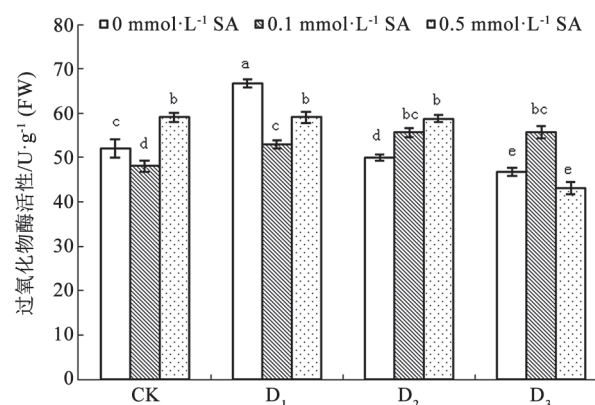


图6 外源水杨酸对干旱胁迫下黑果枸杞幼苗POD活性的影响
Fig.6 Effects of exogenous SA on the POD activity of *L. ruthenicum* under drought stress

3.3 不同干旱胁迫下黑果枸杞幼苗超氧化物歧化酶活性对外源水杨酸的响应

图7显示,在未喷施SA的情况下,3种干旱程度下的SOD活性均高于对照,在 D_1 、 D_2 情况下较对照显著升高。喷施外源SA处理后, $CK+0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA和 $D_2+0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理组的SOD活性分别较 $CK+0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA、 $D_2+0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA显著减小; $D_1+0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 较 $D_1+0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 显著升高。 $D_3+0.5$ 和 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA处理组均较 $D_3+0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA组SOD活性增高。由此看见,黑果枸杞具有一定的抗旱性,喷施外源SA可在一定程度上提高其抗旱性。

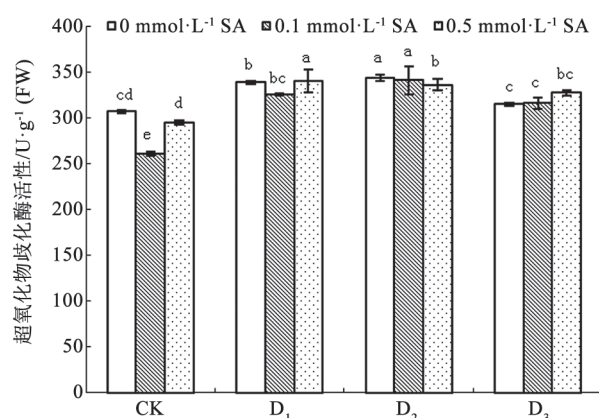


图7 外源水杨酸对干旱胁迫下黑果枸杞幼苗SOD活性的影响
Fig.7 Effects of exogenous SA on the SOD activity of *L. ruthenicum* under drought stress

讨 论

1 干旱胁迫下黑果枸杞渗透调节物质含量对外源水杨酸的响应变化特征

植物细胞对于逆境的响应,体现在提高细胞液浓度以维持细胞膨压和防止原生质过度脱水,积累大量可溶性糖和可溶性蛋白,进而增强植物抗逆性(潘瑞炽2004)。植物体细胞内可溶性蛋白含量对于维持植物细胞渗透势有重要作用,有效积累可溶性蛋白有利于植物抵抗逆境的伤害(李合生等2002)。本实验结果表明,在干旱胁迫下,黑果枸杞可溶性蛋白含量随干旱程度的加重逐渐递增,可溶性蛋白含量在重度干旱胁迫下与对照、轻、中度胁迫差异显著,与文冠果幼苗(谢志玉等2010)和树木可溶性蛋白(Clifford等1998)含量关系的结果类似。植物细胞通过积累大量的可溶性糖,使细胞原生质浓度增大,进而引起抗脱水作用,增强植物的抗旱性(徐建欣等2014)。植物体内脯氨酸含量的高低可以作为衡量植物抗逆性强弱的一个重要指标,含量越高,植物响应逆境的渗透调节能力越强(黄国宾等2012)。黑果枸杞幼苗叶中脯氨酸和可溶性糖含量随干旱胁迫程度加剧而升高,且二者含量在干旱胁迫下显著高于对照,说明黑果枸杞幼苗在干旱胁迫下能有效积累脯氨酸和可溶性糖来改变细胞渗透势,从而改变自身的渗透调节能力以提高抗旱能力。

已有前人实验证明,在干旱胁迫下,野生龙葵对外源施加SA响应是通过提高脯氨酸含量体现的

(常云霞等2014),紫御谷通过增加可溶性蛋白和可溶性糖含量来实现对外源施加SA响应(易小林等2013)。丹参则显著提高蔗糖和可溶性糖的积累来响应SA(王春丽等2012)。本试验中,0.1和0.5 mmol·L⁻¹ SA处理后黑果枸杞与单一干旱胁迫处理相比,可溶性蛋白含量有所升高,0.5 mmol·L⁻¹ SA处理组的可溶性蛋白含量显著高于对照组,0.1和0.5 mmol·L⁻¹ SA喷施处理黑果枸杞的脯氨酸、可溶性糖的含量均较对照组有所增加,并且0.5 mmol·L⁻¹ SA效果优于0.1 mmol·L⁻¹ SA,说明黑果枸杞幼苗通过提高体内渗透调节物质的含量来实现对适宜浓度外源SA处理的响应,增强耐旱性。

2 外源SA处理对干旱胁迫下黑果枸杞丙二醛含量的影响

MDA是膜脂过氧化的产物,它的含量变化与细胞膜脂过氧化程度的高低呈正相关(孙昊等2013)。MDA含量高低可在一定程度上反映植物细胞膜脂过氧化水平和膜结构受伤害程度及植株自我修复的能力(张军等2014)。本实验中,黑果枸杞幼苗叶片MDA含量随着胁迫程度的增加而增加,意味着其膜脂过氧化作用增强。轻度胁迫组较对照组有小幅的增加,意味着轻度胁迫时幼苗受伤害程度较小,黑果枸杞幼苗具有一定的抗旱性。随着胁迫度的加深,保护酶活性受到一定程度的抑制,MDA大量产生,说明此时黑果枸杞已受到一定程度的影响。单长卷等(2014)发现小麦幼苗在干旱胁迫下对于SA的响应是通过降低MDA含量。本试验结果表明:喷施外源SA能够降低MDA含量,并且0.1 mmol·L⁻¹ SA处理MDA下降程度较0.5 mmol·L⁻¹ SA处理明显,说明适宜浓度的SA处理可有效降低干旱胁迫下黑果枸杞幼苗MDA含量,保护黑果枸杞细胞膜结构的稳定性,从而减轻干旱胁迫对黑果枸杞幼苗的伤害程度,提高其抗旱性。

3 外源SA处理对干旱胁迫下黑果枸杞抗氧化酶活性影响

植物细胞抵抗活性氧伤害的酶保护系统中SOD、CAT和POD是植物体内清除活性氧的3种重要酶,在维护细胞膜正常代谢、防止膜脂过氧化以及清除超氧自由基方面起到了重要作用(金忠民2010)。本实验中,单一干旱胁迫下黑果枸杞SOD、POD、CAT活性都发生了改变,但变化结果不一

致,轻度干旱胁迫下CAT、POD、SOD活性增加,而在中、重度干旱胁迫下略有降低,这一现象与云南陆稻(upland rice)和台湾海桐(*Pittosporum pentandrum*) (徐建欣等2014; 林武星等2014)在干旱胁迫下抗氧化酶活性的变化趋势表现一致,说明黑果枸杞幼苗有较强的抗氧化酶诱导合成能力,能有效保护干旱胁迫下自身的生物膜系统,具有一定的抗旱性。关于SA提高保护酶活性已有相关报道,马玄等(2015)的研究表明,新疆赛买提杏在采摘后,外源SA处理可以提高SOD、POD和CAT活性,李兆亮等(1998)证明了外源SA能显著提高被处理黄瓜叶片的SOD和POD活性,并且还能诱导同植株的非处理叶片中SOD和POD活性增加。本研究结果表明,在喷施了外源SA后, CAT、POD和SOD活性在中、重度干旱胁迫下较对照是有所升高的,说明适宜浓度的外源SA可有效提高黑果枸杞的抗旱性。

综上所述,在干旱胁迫下黑果枸杞具有一定的抗旱能力,而对于喷施适宜浓度的外源SA,黑果枸杞的生理响应对策是通过进一步促进干旱胁迫下黑果枸杞体内渗透调节物质含量和抗氧化酶活性,以减轻膜脂过氧化作用的伤害,缓解旱害。但外源SA在分子水平上是怎样调控干旱胁迫下黑果枸杞的生理生化反应的,还需进一步研究。

参考文献

- Alitong Q, Jin XF, Ye ZM, Wang QF, Chen JM, Yang CF (2014). Reproductive ecology research on populations of a medicinal plant (*Lycium ruthenicum* Murr.) from Xinjiang reveals factors affecting fruit production. *Plant Sci J*, 32 (6): 570–576 (in Chinese with English abstract) [阿力同·其米克, 金晓芳, 叶忠铭, 王青锋, 陈进明, 杨春锋(2014). 新疆产药用植物黑果枸杞有性生殖产出差异的繁殖生态学研究. *植物科学学报*, 32 (6): 570–576]
- Bates L, Waldren R, Teare I (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil*, 39: 205–207
- Chang YX, Xu KD, Yang TW, Mo JY, Chen L (2014). Mitigative effects of exogenous salicylic acid on the inhibition of drought stress to wild *Solanum nigrum* seedlings. *Agric Res Arid Areas*, 32 (4): 43–46, 64 (in Chinese with English abstract) [常云霞, 徐克东, 杨同文, 莫家勇, 陈龙(2014). 外源水杨酸对野生龙葵幼苗干旱胁迫的缓解效应. *干旱地区农业研究*, 32 (4): 43–46, 64]
- Chen C, Wen HX, Zhao XH, Tao YD, Shao Y, Mei LJ (2011). Fast determination of phenolic acids in *Lycium ruthenicum* Murr. juice by solid phase extraction and HPLC. *Chin J Chin Mater Med*, 36 (7): 896–898 (in Chinese with English abstract) [陈晨, 文怀秀, 赵晓辉, 陶燕铎, 邵赞, 梅丽娟(2011). 固相萃取快速测定黑果枸杞果汁中酚酸类化合物. *中国中药杂志*, 36 (7): 896–898]
- Chen HK, Pu LK, Cao JM, Ren X (2008). Current research state and exploitation of *Lycium ruthenicum* Murr. *Heilongjiang Agric Sci*, (5): 155–157 (in Chinese with English abstract) [陈海魁, 蒲凌奎, 曹君迈, 任贤(2008). 黑果枸杞的研究现状及其开发利用. *黑龙江农业科学*, (5): 155–157]
- Clifford SC, Arndt SK, Corlett JE, Joshi S, Sankhla N, Popp M, Jones HG (1998). The role of solute accumulation, osmotic adjustment and changes in cell wall elasticity in drought tolerance in *Ziziphus mauritiana* (Lamk.). *J Exp Bot*, 49 (323): 967–977
- Gao JF (2006). *Plant Physiology Experiment Instruction*. Beijing: Higher Education Press, 94–105 (in Chinese) [高俊凤(2006). *植物生理学实验指导*. 北京: 高等教育出版社, 94–105]
- Haoren TB, Zhao Y, Guo YS, Liu PS (2005). Tissue culture of *Lycium ruthenicum* Murr. *Plant Physiol Commun*, 41 (5): 82 (in Chinese with English abstract) [浩仁塔本, 赵颖, 郭永盛, 刘平生(2005). 黑果枸杞的组织培养. *植物生理学通讯*, 41 (5): 82]
- Huang GB, Zhang XH, Yang SL, Li JY, Xu CH, Rong ZN, Yang LY, Gong M (2012). Involvement of osmotic regulation in enhancement of drought resistance in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) plants through circular drought-hardening. *Plant Physiol J*, 48 (5): 465–471 (in Chinese with English abstract) [黄国宾, 张晓海, 杨双龙, 李军营, 徐超华, 荣智媛, 杨利云, 龚明(2012). 渗透调节参与循环干旱锻炼提高烟草植株抗旱性的形成. *植物生理学报*, 48 (5): 465–471]
- Jiang MM, Xu S, Xia B, Peng F, Wang R (2012). Effects of exogenous calcium chloride, salicylic acid and nitric oxide on drought resistance of *Lycoris radiata* under drought stress. *Plant Physiol J*, 48 (9): 909–916 (in Chinese with English abstract) [蒋明敏, 徐晟, 夏冰, 彭峰, 汪仁(2012). 干旱胁迫下外源氯化钙、水杨酸和一氧化氮对石蒜抗旱性的影响. *植物生理学报*, 48 (9): 909–916]
- Jiao XL, Chi XF, Dong Q, Xiao YC, Hu FZ (2011). Analysis of the nutritional components of *Lycium ruthenicum*. *Amino Acid Biotic Resour*, 33 (3): 60–62 (in Chinese with English abstract) [矫晓丽, 迟晓峰, 董琦, 肖远灿, 胡凤祖(2011). 柴达木野生黑果枸杞营养成分分析. *氨基酸和生物资源*, 33 (3): 60–62]
- Jin ZM, Sha W, Zang W, Sun W, Chai H (2010). Effects of drought stress on protective enzymes of *Trifolium repens* seedlings. *J Northeast Forest Univ*, 38 (7): 52–53 (in Chinese with English abstract) [金忠民, 沙伟, 臧威, 孙微, 柴华(2010). 干旱胁迫对白三叶幼苗保护酶的影响. *东北林业大学学报*, 38 (7): 52–53]
- Li HS, Meng QW, Xia K (2002). *Modern Plant Physiology*. Beijing: Higher Education Press, 82–110 (in Chinese) [李合生, 孟庆伟, 夏凯(2002). *现代植物生理学*. 北京: 高等教育出版社, 82–110]
- Li J, Li SZ, Feng WJ, Yuan H (2010). *In vitro* antioxidant and free radical scavenging activities of total flavonoids from the leaves of *Lycium ruthenicum* Murr. *Food Sci*, 31 (13): 259–262 (in Chinese with English abstract) [李进, 李淑珍, 冯文娟, 原慧(2010). 黑果枸杞叶总黄酮的体外抗氧化活性研究. *食品科学*, 31 (13): 259–262]
- Li YJ, Li J, Xu P, He HW (2014). Physiological responses of *Lycium*

- ruthenicum* Murr. seedlings to drought stress. *Arid Zone Res*, 31 (4): 756–762 (in Chinese with English abstract) [李永洁, 李进, 徐萍, 何宏伟(2014). 黑果枸杞幼苗对干旱胁迫的生理响应. 干旱区研究, 31 (4): 756–762]
- Li ZL, Yuan YB, Liu CL, Cao ZX (1998). Regulation of antioxidant enzymes by salicylic acid in cucumber leaves. *Acta Bot Sin*, 40 (4): 69–74 (in Chinese with English abstract) [李兆亮, 原永兵, 刘成连, 曹宗巽(1998). 水杨酸对黄瓜叶片抗氧化剂酶系的调节作用. 植物学报, 40 (4): 69–74]
- Lin L, Li J, Lv HY, Ma YT, Qian YP (2012). Effect of *Lycium ruthenicum* anthocyanins on atherosclerosis in mice. *Chin J Chin Mater Med*, 37 (10): 1460–1466 (in Chinese with English abstract) [林丽, 李进, 吕海英, 马玉婷, 钱一萍(2012). 黑果枸杞花色苷对小鼠动脉粥样硬化的影响. 中国中药杂志, 37 (10): 1460–1466]
- Lin WX, Gu L, Zhu W, Nie S (2014). Effects of drought stress on growth and physiological and biochemical characteristics of *Pit-tosporum pentandrum*. *Pratacultural Sci*, 31 (10): 1915–1922 (in Chinese with English abstract) [林武星, 谷凌, 朱炜, 聂森(2014). 干旱胁迫对台湾海桐生长和生理生化特性的影响. 草业科学, 31 (10): 1915–1922]
- Liu ZG, Tao YD, Shao Y, Zhang HG (2012). Determination of betaine in *Lycium ruthenicum* Murr. and *Lycium barbarum* L. *Chin J Spectrosc Lab*, 29 (2): 694–697 (in Chinese with English abstract) [刘增根, 陶燕铎, 邵赞, 张怀刚(2012). 柴达木枸杞和黑果枸杞中甜菜碱的测定. 光谱实验室, 29 (2): 694–697]
- Lv X, Wang C, Cheng Y, Huang L, Wang Z (2013). Isolation and structural characterization of a polysaccharide LRP4-A from *Lycium ruthenicum* Murr. *Carbohydr Res*, 365 (10): 20–25
- Ma X, Chang XH, Guo KY, Zhao YT, Zhu X (2015). Effect of disease resistance and active oxygen metabolism in apricot fruits by salicylic acid treatment. *Food Sci Technol*, 40 (4): 57–61 (in Chinese with English abstract) [马玄, 常雪花, 郭科燕, 赵亚婷, 朱璇(2015). 水杨酸处理对杏果实采后抗病性及活性氧代谢的影响. 食品科技, 40 (4): 57–61]
- Pan RC (2004). *Plant Physiology*. Beijing: Higher Education Press (in Chinese) [潘瑞炽(2004). 植物生理学. 北京: 高等教育出版社]
- Peng Q, Song JJ, Lv XP, Wang ZF, Huang LJ, Du YG (2012). Structural characterization of an arabinogalactan-protein from the fruits of *Lycium ruthenicum*. *J Agric Food Chem*, 60: 9424–1231
- Shan CJ, Zhao XL, Tang JX (2014). Effects of exogenous salicylic acid on antioxidant properties of wheat seedlings under drought stress. *J Triticeae Crops*, 34 (1): 91–95 (in Chinese with English abstract) [单长卷, 赵新亮, 汤菊香(2014). 水杨酸对干旱胁迫下小麦幼苗抗氧化特性的影响. 麦类作物学报, 34 (1): 91–95]
- Su D, Sun GF, Zhang JZ, Jiang CD, Yu QB, Gu DF, Dong R (2007). Effects of soil water stress on growth and biomass distribution of *Sedum aizoon* and *Sedum spectabilis*. *Acta Horti Sin*, 34 (5): 1317–1320 (in Chinese with English abstract) [苏丹, 孙国峰, 张金政, 姜闯道, 于强波, 顾德锋, 董燃(2007). 水分胁迫对费菜和长药八宝生长及生物量分配的影响. 园艺学报, 34 (5): 1317–1320]
- Sun H, Wang Q, Guan Y, Liu BD (2013). Effects of *Microlepis strigosa* under drought stress on physiological change laws. *Plant Sci J*, 31 (6): 576–582 (in Chinese with English abstract) [孙昊, 王茜, 关阳, 刘保东(2013). 粗毛鳞盖蕨干旱胁迫下生理变化规律的研究. 植物科学学报, 31 (6): 576–582]
- Wang CL, Liang ZS, Li DR, Yang JL (2012). Influence of salicylic acid and methyl jasmonate on leaf microstructure, leaf photosynthesis, and non-structure sugar accumulation of *Salvia miltiorrhiza* bunge seedlings. *Plant Sci J*, 30 (5): 501–510 (in Chinese with English abstract) [王春丽, 梁宗锁, 李殿荣, 杨建利(2012). 水杨酸和茉莉酸甲酯对丹参幼苗叶片显微结构、光合及非结构糖积累的影响. 植物科学学报, 30 (5): 501–510]
- Wang LQ, Lin HM (2011). Salt tolerance in seedling period of medicinal halophyte *Lycium ruthenicum*. *Sci Technol Rev*, 29 (10): 29–33 (in Chinese with English abstract) [王龙强, 蔺海明(2011). 黑果枸杞苗期耐盐机制研究. 科技导报, 29 (10): 29–33]
- Wang XL, Hao JH, Dong CJ, Zhang ZG, Cui SM, Shang QM (2011). Effect of exogenous salicylic acid on PSII activity and absorbed light allocation in leaves of cucumber seedling. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 31 (8): 1644–1650 (in Chinese with English abstract) [王晓黎, 郝敬虹, 董春娟, 张志刚, 崔世茂, 尚庆茂(2011). 外源水杨酸对黄瓜幼苗叶片PS II活性和光能分配的影响. 西北植物学报, 31 (8): 1644–1650]
- Wang YJ (2013). iTRAQ-based proteomics analysis of *Lycium ruthenicum* Murr. with salt (NaCl) treatment (Master's thesis). Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese with English abstract) [汪亚娟(2013). 基于iTRAQ技术的盐(NaCl)胁迫下黑果枸杞蛋白质组学研究(硕士论文). 兰州: 兰州大学]
- Xie ZY, Zhang WH, Liu XC (2010). Growth and physiological characteristics of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings under soil drought stress. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 30 (5): 948–954 (in Chinese with English abstract) [谢志玉, 张文辉, 刘新成(2010). 干旱胁迫对文冠果幼苗的生长和生理生化特征的研究. 西北植物学报, 30 (5): 948–954]
- Xu JX, Yang J, Liu SZ, Wang YY (2014). Effect of drought stress on physiological characteristics of upland rice seedling in Yunnan province. *Chin Agric Sci Bull*, 30 (27): 145–152 (in Chinese with English abstract) [徐建欣, 杨洁, 刘实忠, 王云月(2014). 干旱胁迫对云南陆稻幼苗生理特性的影响. 中国农学通报, 30 (27): 145–152]
- Xu P, Li J, Lv HY, Li YJ, Zhang X (2014). Effect of salicylic acid on stomata aperture of epidermis in *Ammodendron argenteum* cotyled under drought stress. *Plant Physiol J*, 50 (4): 510–518 (in Chinese with English abstract) [徐萍, 李进, 吕海英, 李永洁, 张侠(2014). 干旱胁迫下水杨酸对银沙槐子叶表皮气孔开度的影响. 植物生理学报, 50 (4): 510–518]
- Yan YM, Dai YM, Ran LW, Cao YL, Luo Q, Li XY, Qin K, Dai GL, Zeng XX (2014). Composition and *in vitro* antioxidant activity of anthocyanins extracted from *Lycium ruthenicum* Murr., different fruits and vegetables. *Sci Technol Food Ind*, 35 (16): 133–136 (in Chinese with English abstract) [闫亚美, 代彦满, 冉林武, 曹有龙, 罗青, 李晓莺, 秦垦, 戴国礼, 曾晓雄(2014). 黑果枸杞与5种果蔬中花色苷组成及体外抗氧化活性比较. 食品工业科技, 35 (16): 133–136]
- Yi XL, Li MY, Huang J, Chi H (2013). Effects of salicylic acid peroxidation in purple majesty (*Pennisetum glaucum*) seedlings under drought, high temperature or the dual stress. *J Southwest Univ*

- (Nat Sci Ed), 35 (6): 41–45 (in Chinese with English abstract) [易小林, 李名扬, 黄娟, 池浩(2013). 水杨酸对于旱、高温及双重胁迫下紫御谷幼苗膜脂过氧化影响. 西南大学学报(自然科学版), 35 (6): 41–45]
- Zhang J, Lu M, Sun SG, Pang YH, Jing F, Chen XH (2014). Screening indexes for drought resistance of seven winter wheat cultivars at the grain-filling stage. *Plant Sci J*, 32 (2): 148–157 (in Chinese with English abstract) [张军, 鲁敏, 孙树贵, 庞玉辉, 敬樊, 陈新宏(2014). 7个冬小麦品种灌浆期抗旱性鉴定指标的综合评价. 植物科学学报, 32 (2): 148–157]
- Zhang ZL, Qu WJ, Li XF (2009). *Plant Physiology Experiment Instruction*. Beijing: Higher Education Press, 103–104 (in Chinese) [张志良, 瞿伟菁, 李小芳(2009). 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 103–104]
- Zheng J, Ding CX, Wang LS, Li GL, Shi JY, Li H, Wang HL, Suo YR (2011). Anthocyanins composition and antioxidant activity of wild *Lycium ruthenicum* Murr. from Qinghai-Tibet Plateau. *Food Chem*, 126: 859–865

Physiological responses of *Lycium ruthenicum* seedlings on exogenous salicylic acid under the drought stress

KE Jing¹, LI Jin^{1*}, LI Yong-Jie²

¹Xinjiang Key Laboratory of Special Species Conservation and Regulatory Biology, College of Life Sciences, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; ²Urumqi 80th Middle School, Urumqi 830000, China

Abstract: The purpose of this study is to explore the physiological responses when spraying exogenous salicylic acid (SA; 0.1 and 0.5 mmol·L⁻¹) on *Lycium ruthenicum* with controlling the water gradient in order to simulate the drought stress condition. The result showed that in the condition of drought and being sprayed exogenous SA, the substance of osmotic adjustment had a significant growth with the increase of the stress. The content of MDA increased with raising the drought stress. However, in the case of being sprayed exogenous salicylic acid, MDA content decreased compared to the ones which were not sprayed the exogenous acid. The activity of SOD, POD and CAT was increased with the light stress, besides, after exerting the SA, the activity of antioxidant enzyme of moderate and severe drought stress was increased and the activity was also higher than the control. The previous evidence shows that the drought stress has a certain influence on physiological and biochemical indexes of *L. ruthenicum*, which also indicates that spraying exogenous salicylic acid can enhance the drought-resistant ability of *L. ruthenicum*.

Key words: *Lycium ruthenicum*; exogenous salicylic acid; drought stress; seedling; physiological response

Received 2015-12-09 Accepted 2016-02-19

This work was supported by the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (Grant No. 2014211A041).

*Corresponding author (E-mail: xjcjlj4@xjnu.edu.cn).