

2 种紫花苜蓿耐盐生理特性的初步研究

黄 婷¹, 麻冬梅¹, 王文静¹, 赵丽娟¹, 马巧利², 蔡进军^{3,4}

(1.宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复省部共建国家重点实验室培育基地,西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,银川 750021;2.宁夏大学农学院,银川 750021;3.宁夏农林科学院农业资源环境研究所,银川 750021;4.西北农林科技大学资源与环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:为研究 2 种紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)“阿迪娜”(耐盐基因型)和“秘鲁”(敏盐基因型)在盐胁迫处理下的生理特性与耐盐机理,采用 150 mmol/L NaCl 胁迫处理 2 种紫花苜蓿幼苗,分别测定盐处理前和处理后 2,4,6,8,16 h 的过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、丙二醛(MDA)、脯氨酸(PRO)、相对含水量(RWC)和叶绿素(Chl)含量。结果表明:2 种紫花苜蓿的过氧化氢酶活性、过氧化物酶活性和丙二醛含量在盐胁迫下总体呈上升趋势,脯氨酸含量和相对含水量表现出相反的趋势。叶绿素含量在盐胁迫前期稳定不变,但在胁迫后期显著性下降;2 种紫花苜蓿的相对含水量和叶绿素含量的变化趋势与植株表型变化相对应。主成分分析表明,过氧化氢酶和丙二醛的贡献率最大,能更好地为苜蓿耐盐机理及分子育种研究提供理论依据。

关键词:紫花苜蓿; 盐胁迫; 生理指标; 耐盐机理

中图分类号:S541.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2020)02-0216-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.031

Preliminary Study on Physiological Characteristics of Salt Tolerance of Two Genotypes of Alfalfa

HUANG Ting¹, MA Dongmei¹, WANG Wenjing¹, ZHAO Lijuan¹, MA Qiaoli², CAI Jinjun^{3,4}

(1.Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2.Agricultural College of Ningxia University, Yinchuan 750021; 3.Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750021; 4.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The physiological characteristics and salt tolerance mechanism of two genotypes of alfalfa (*Medicago sativa* L.) Adrenalin (salt-stress tolerant) and Peru (salt-stress sensitive) under salt stress were explored by using 150 mmol/L NaCl to deal with two genotypes of alfalfa seedlings. Catalase (CAT), malondialdehyde (MDA), peroxidase (POD), relative water content (RWC), Chlorophyll (Chl), and proline (PRO) were respectively determined before and after 2, 4, 6, 8, 16 hour of salt stress. The result showed that the catalase activity, the peroxidase activity, and the malondialdehyde content of two genotypes of alfalfa showed a trend of increase under salt stress, while the proline content and the relative water content showed an opposite trend. The chlorophyll content significantly decreased. In addition, it was found that the variation of the relative water content and the chlorophyll content corresponded to the change of plant phenotype. Principal component analysis showed that the catalase and the malondialdehyde contributed the most, which could provide a theoretical basis for the research on salt tolerance mechanism and molecular breeding of alfalfa.

Keywords: alfalfa; salt stress; physiological indices; salt tolerance mechanism

土壤盐渍化对农牧业主产、生态环境以及可持续发展的威胁是一个世界性的问题,目前全球盐渍土面积已达 9.5×10^8 hm²,中国盐渍土总面积约 2 亿 hm²,我国盐碱地主要分布在东北滨海地区以及西北

干旱半干旱地区^[1]。对于盐碱化地区,多数学者^[2]认为,改良盐碱地最经济有效的方法是种植耐盐植物。牧草有适应性广、抗盐性强的特性,是改良和利用盐碱地的主要植物。紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)被誉为“牧草之王”,是世界上栽培利用最广泛的耐盐性较强的优良豆科牧草,培育耐盐苜蓿品种进行盐碱地改良,是开发利用盐渍化土地资源的有效措施之一^[3]。有研究^[4]表明,紫花苜蓿在种子萌发期、苗期对盐比较敏感,生长后期相对不敏感,苗期是耐盐性鉴定的最佳时期;张喜斌等^[5]以 60 个国内外紫花苜蓿品种为试材,通过表型初步筛选出耐盐、敏盐品种,并利用主成分分析和隶属函数法对初步筛选出品种进行综合评价,筛选出最敏感盐品种“秘鲁”和最耐盐品种“阿迪娜”;倪星^[6]以 60 个国内外紫花苜蓿品种为材料,通过在紫花苜蓿种子萌发期和苗期 2 个生育期筛选出 5 个极耐盐品种和 5 个极敏盐品种,其中包括“阿迪娜”和“秘鲁”。由此,本试验选用“阿迪娜”和“秘鲁”幼苗为试验材料,系统地研究了盐胁迫下紫花苜蓿生理指标的变化,包括抗氧化酶(CAT、POD)、细胞膜相关(MDA)、相对含水量(RWC)、渗透调节物质(PRO)和叶绿素含量(Chl),探讨盐胁迫下紫花苜蓿生理特性的变化,揭示紫花苜蓿耐盐机制,为紫花苜蓿分子育种研究以及盐碱地的改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

通过利用 MS 培养基、水培和盆栽 3 种培育方式的耐盐性鉴定,从 310 个紫花苜蓿品种中筛选出 2 个极度耐盐和敏盐的紫花苜蓿品种“阿迪娜”(耐盐基因型)和“秘鲁”(敏盐基因型)。

1.2 种子预处理

选取成熟健康的 2 种紫花苜蓿种子,采用 75% 的乙醇表面振荡消毒 30 s,0.1% HgCl₂ 振荡灭菌 8 min,最后用去离子水清洗 3~5 次。

1.3 试验方法

本试验于 2019 年 4 月 10—25 日在宁夏大学西部生态中心进行。首先采用水培法,将预处理之后的 2 种紫花苜蓿种子置于铺 2 层滤纸的培养皿(直径 8.5 cm)中,并将培养皿置于温度(25±1)℃,光周期 16 h/d,光照强度 3 000~4 000 lx 的培养室中吸胀发芽。每天观察其湿度情况喷洒适量蒸馏水。7 天后将培养皿中已发芽的幼苗移入盛有 Hoagland 溶液的培养盆(33 cm×23 cm)中,每周更换 1 次培养液,并清洗培养盆。待生长至 25 天后将生长状况良好且长势较一致的幼苗进行分组。采用浓度 150 mmol/L 的 NaCl 溶液对每个品种已分组好的幼苗进行盐胁迫处理,分别在 0(CK),2,4,6,8,16 h 6 个时间点取样,每个时

间点 3 个重复。取样时快速称取 1~1.5 g 的叶片放入自封袋中,记号笔标记后迅速投入液氮中,存放于-80℃冰箱中待用。随后分别测定过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)含量、脯氨酸(PRO)含量、叶绿素含量(Chl)和相对含水量(RWC)(其中叶绿素含量和相对含水量需要取鲜样立即进行测定)。

1.4 生理指标测定

过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法^[7]测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法^[7]测定;丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法^[7]测定;脯氨酸含量采用磺基水杨酸提取,茚三酮比色法^[7]测定;叶绿素含量采用 SPAD-520 测定仪^[8]测定;叶片相对含水量(RWC)采用称量法,剪取幼苗同一部位叶片 30 片,迅速放入已知质量的干燥干净的铝盒里,称得鲜质量(W_f),然后在铝盒中加入蒸馏水浸泡叶片 8 h,取出用吸水纸擦干叶片表面的水分,称得饱和鲜质量(W_t),然后在 105℃下杀青,80℃下烘干至质量恒定,称得干质量(W_d),利用公式得出叶片相对含水量($RWC = (W_f - W_d) / (W_t - W_d) \times 100\%$)^[9]。所有指标测量均为 3 次重复,计算结果取平均值。

1.5 数据分析

采用 Excel 2010、SPSS 20.0 和 RStudio 软件进行数据分析及作图。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫下紫花苜蓿的表型变化

2 种紫花苜蓿“阿迪娜”(耐盐基因型)和“秘鲁”(敏盐基因型)的幼苗在盐处理之前叶片舒展茎干直立,无萎蔫蜷缩现象。在 150 mmol/L NaCl 胁迫处理 2 h 后“阿迪娜”和“秘鲁”由于生理干旱茎开始弯曲下垂,叶片也有明显的萎蔫蜷缩,与“阿迪娜”相比,“秘鲁”的迫害程度更严重。令人意外的是,“阿迪娜”和“秘鲁”幼苗在盐胁迫 2 h 后茎叶因失水而萎蔫的症状没有持续加重,反而有所缓解,茎叶开始挺立舒展慢慢恢复。这有可能是因为植物体内产生了某些耐盐机制使得植物开始适应高盐环境。但是在盐胁迫处理 16 h 时,“阿迪娜”和“秘鲁”幼苗的茎叶随时间的延长逐渐萎蔫失活,接近死亡。由此可以看出,随着盐胁迫时间的增加,2 种紫花苜蓿短时间内发生明显萎蔫,随后出现一个平台期,最后随时间的延长盐伤害逐渐加重,直到最终死亡。

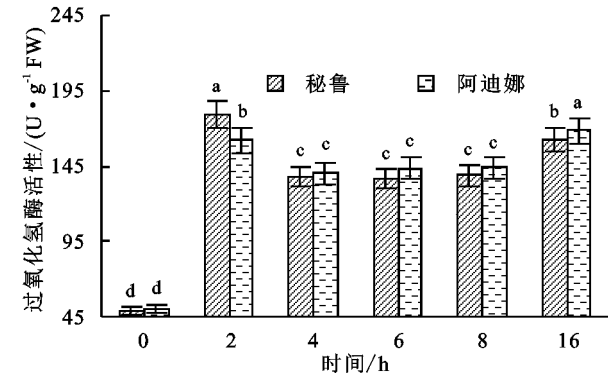
2.2 盐胁迫对紫花苜蓿抗氧化酶活性的影响

盐胁迫会导致植物细胞中线粒体和叶绿体电子传递的泄漏加剧^[10],引起活性氧的大量积累,对脂质、蛋白质、核酸造成氧化损伤^[11]。但是植物在适应

不良环境时,体内会形成多种抗氧化酶所组成的抗氧化系统来清除活性氧,将其控制在正常水平,其中,过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)被认定为用于清除活性氧的抗氧化酶系统中的 2 种重要酶^[12]。

试验结果表明:在 150 mmol/L NaCl 溶液处理下,2 个品种紫花苜蓿的过氧化氢酶(CAT)活性变化趋势一致(图 1)。“阿迪娜”和“秘鲁”在胁迫处理之前均保持在较低的水平,而在 2 h 时迅速升高,是对照组的 3.2、3.6 倍,2 h 与 4、6、8 h 存在显著性差异($P<0.05$);2 个品种紫花苜蓿的 CAT 活性在 4 h 突然降低,并在 4、8 h 之间保持在一个稳定的水平。4、6、8 h 的“阿迪娜”CAT 活性与 2 h 相比分别降低 13.7%、11.4%、11.2%。4、6、8 h 的“秘鲁”与 2 h 相比,分别降低 22.8%、23.6%、22.5%。“阿迪娜”和“秘鲁”的 CAT 活性在 16 h 又明显升高,均呈显著差异($P<0.05$)。2 个品种紫花苜蓿的过氧化物酶(POD)活性较对照组均呈增加趋势(图 2)。“秘鲁”的 POD 活性表现出缓慢的增加,2、4、6、8、16 h 分别增加 2.5%、3.5%、2.9%、2.7%、3.5%;“阿迪娜”2、4、6、8、16 h 5 个时间点分别增加 2.7%、6.1%、6.2%、4.2%、9.0%,较对照组均差异显著($P<0.05$),而且在 6 h 出现了 1 个小峰后逐渐下降,在 16 h 达到最大。

总体上,2 个品种紫花苜蓿的 CAT 和 POD 活性均随盐胁迫时间的增加变化趋势一致,在短时间内突然增加达到 1 个峰值后降低,然后又随着时间的增加逐渐增加。



注:不同字母表示相同处理不同时间点之间的显著性差异($P<0.05$)。下同。

图 1 盐胁迫下紫花苜蓿叶片中 CAT 活性随时间的变化

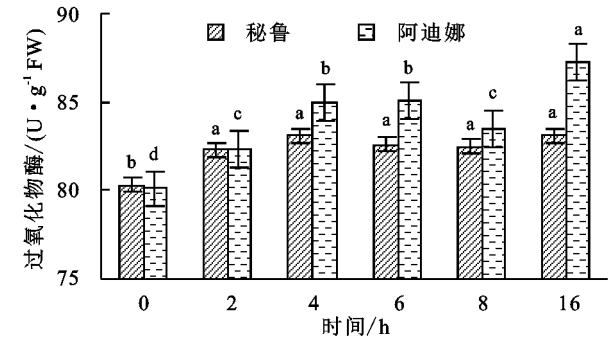


图 2 盐胁迫下紫花苜蓿叶片中 POD 活性随时间的变化

2.3 盐胁迫对紫花苜蓿丙二醛(MDA)含量的影响

丙二醛(MDA)是植物在逆境胁迫下,活性氧对细胞功能的破坏,导致细胞脂质过氧化的产物。因此,MDA 含量可以准确反映出植株受到伤害的程度。试验结果表明:在 150 mmol/L NaCl 溶液处理下,2 个品种的紫花苜蓿 MDA 含量大体上都随时间的延长呈上升趋势。“秘鲁”的 MDA 含量在 2 h 显著上升,2~6 h 处于稳定状态,随后逐渐上升,在 16 h 时达到顶峰。2、4、6、8、16 h“秘鲁”的 MDA 含量与 0 h 相比分别上升 6.1%、5.8%、6.5%、9.3%和 14.0%;“阿迪娜”的 MDA 含量随时间的延长快速增加,在 8 h 时达到顶峰后降低,在 2、4 h 2 个时间点显著增加($P<0.05$),其 2、4、6、8、16 h 的 MDA 含量与 0 h 相比,分别增加 2.6%、10.2%、10.7%、16.4%和 13.1%(图 3)。

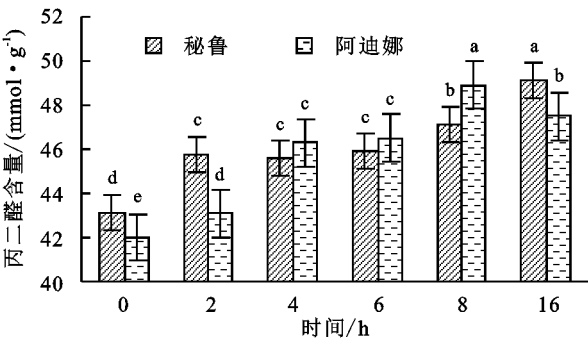


图 3 盐胁迫下紫花苜蓿叶片中 MDA 含量随时间的变化

2.4 盐胁迫对紫花苜蓿脯氨酸(PRO)含量和相对含水量(RWC)的影响

植物在逆境胁迫下,细胞大量失水,导致渗透胁迫,为了维持正常的生理代谢,植株体内开始积累用于渗透调节的物质。脯氨酸(PRO)是目前所知分布最广的渗透保护物质,动物、植物、真菌、藻类中都有脯氨酸的累积。在干旱、高盐、高温、冰冻、紫外线以及重金属等胁迫条件下,脯氨酸合成的增加和降解的减少会导致植物体内脯氨酸大量累积,植物通过提高体内脯氨酸的含量调节渗透平衡,从而保护细胞的结构。

试验结果表明,150 mmol/L NaCl 浓度处理下,“秘鲁”和“阿迪娜”的 PRO 含量在 2 h 时均显著性增加($P<0.05$),较对照组分别增加 189.0%、172.8%。其后,2 个品种紫花苜蓿的 PRO 含量先降低后上升。“秘鲁”在 4、6、8、16 h 的 PRO 含量较对照组分别增加 104.9%、76.7%、81.0%、137.4%。“阿迪娜”在 4、6、8、16 h 的脯氨酸含量较对照组分别增加 114.5%、95.8%、94.6%、122.3%(图 4)。2 种紫花苜蓿的 RWC 在盐胁迫 2 h 时显著性降低($P<0.05$),在 2 h 后 2 个品种紫花苜蓿的 RWC 逐渐增加,“秘鲁”在 2、4、6、8、16 h 的 RWC 较对照组分别降低 22.9%、19.3%、15.7%、13.3%和 26.5%。“阿迪娜”在 2、4、6、8、16 h 的 RWC 较对照组分别降低 23.5%、17.6%、16.5%、12.9%和 30.6%(图 5)。

结合 PRO 和 RWC 2 个生理指标在各个时间点的变化情况,可以看出在盐胁迫导致植物失水最严重的时间点是 2 h 和 16 h;同时,盐胁迫导致植物体内 PRO 含量严重富集的时间点也是在 2,16 h。植物在受到盐胁迫时,短时间内(2 h)以及随着胁迫时间的延长(16 h)均会产生相应的生化反应来响应盐胁迫,这与 Munns 等^[13]的两相生长理论——植物生长对盐度的反应分为 2 个阶段:一个是快速的渗透阶段,它会抑制幼叶的生长;另一个是较慢的离子阶段,它会加速成熟叶的衰老相吻合。

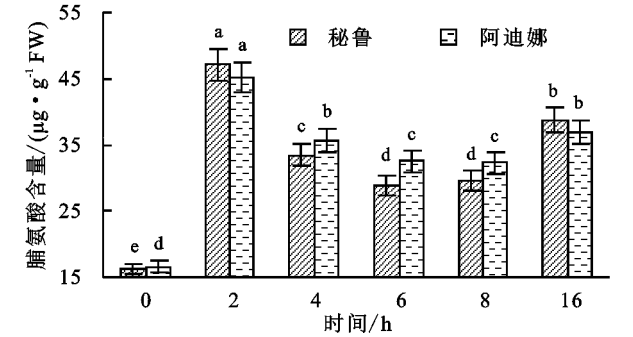


图 4 盐胁迫下紫花苜蓿叶片脯氨酸含量随时间的变化

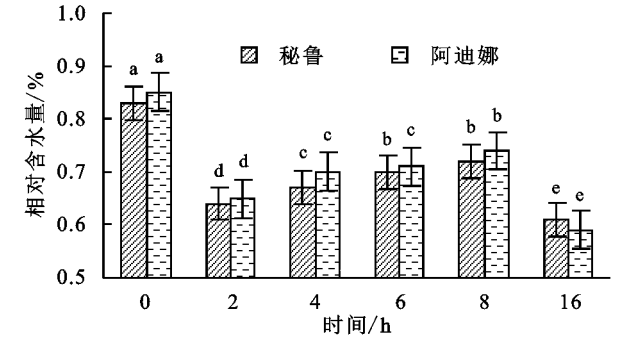


图 5 盐胁迫下紫花苜蓿叶片相对含水量随时间的变化

2.5 盐胁迫对紫花苜蓿叶绿素(Chl)含量的影响

在盐胁迫下,叶绿体是感知胁迫最灵敏的质体之一,盐害导致叶绿体的结构遭到破坏,从而导致光合作用下降^[14],因此,叶绿素含量也是用于衡量植物耐盐碱的关键指标。本研究结果表明,150 mmol/L

NaCl 溶液处理下,2 个品种紫花苜蓿叶片中叶绿素含量在 0,2,4,6,8 h 随着时间的延长没有产生明显变化,各时间点不存在显著差异;但在盐胁迫后 16 h 时,“阿迪娜”和“秘鲁”的叶绿素含量均显著降低($P<0.05$),较对照组分别降低 3.4% 和 12.4%(图 6)。由图 1 可知,2 个紫花苜蓿品种的叶子在盐胁迫后短时间内只是失水萎蔫,但是在 16 h 后叶子严重失活失绿,这些数据的变化趋势与表型变化是高度一致的。

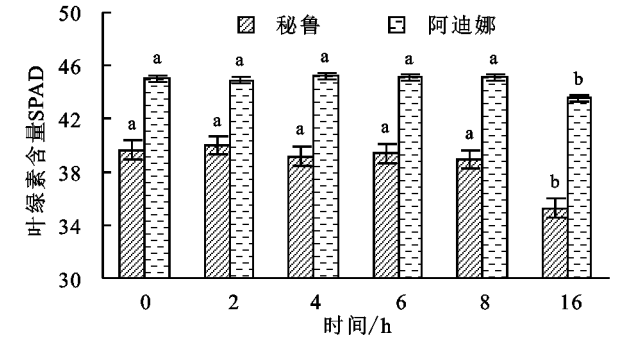


图 6 盐胁迫下紫花苜蓿叶片中叶绿素含量随时间的变化

2.6 主成分分析

主成分分析也称主分量分析,旨在利用降维的思想,把多指标转化为少数几个综合指标,当累计贡献率达到 79.78%保留前 4 个主成分(表 1)。对 2 个品种的紫花苜蓿在 150 mmol/L NaCl 浓度胁迫下的 6 个生理指标主成分分析表明,第 1~4 主成分贡献率分别 29.3%,21.62%,16.37%,12.49%,累计贡献率达到 79.78%。第 1 主成分中特征向量值较大的指标为过氧化氢酶和丙二醛,是对第 1 主成分影响较大的特征向量;第 2 主成分中特征向量值较大的指标为脯氨酸含量,是对第 2 主成分影响较大的特征向量;第 3 主成分中特征向量值较大的指标为过氧化氢酶和丙二醛,是对第 3 主成分影响较大的特征向量;第 4 主成分中特征向量值较大的指标为丙二醛和叶绿素含量,是对第 4 主成分影响较大的特征向量。

表 1 紫花苜蓿耐盐指标的主成分分析

主成分	各指标特征向量						特征值	贡献率	累计贡献率
	CAT	POD	MDA	PRO	RWC	Chl			
1	1.36	0.94	1.10	0.63	1.37	-0.48	1.76	29.30	29.30
2	-0.15	-1.30	0.35	0.75	0.12	-1.53	1.30	21.62	50.92
3	0.32	-0.20	0.98	-1.48	0.41	-0.34	0.98	16.37	67.29
4	-1.10	-0.15	1.02	0.22	-0.44	0.53	0.75	12.49	79.78

3 讨论

植物苗期对盐胁迫更为敏感,因此苗期的耐盐性能够代表植物的耐盐程度。本试验对苗期的 2 种紫花苜蓿进行耐盐性研究。

过氧化氢酶(CAT)是植物体内主要的抗氧化酶之一,担负清除或分解自由基(O_2^-)和双氧水(H_2O_2)的作

用,能催化 H_2O_2 转变为 H_2O ,从而使细胞免于遭受过氧化氢的毒害。本研究中,在盐处理初期,2 种紫花苜蓿的 CAT 活性在短时间内显著性增加后稳定保持在某一个水平后又明显的上升,这与 Wu 等^[15]的研究一致,但是与 Luo 等^[16]的研究呈现出不同的趋势,这可能是盐浓度不一样引起的。“阿迪娜”的 POD 活性在胁

迫前期稳定地增加在 6 h 出现 1 个峰值后降低,最后在 16 h 达到最大值,而“秘鲁”活性在胁迫 2 h 时显著性增加,随后保持在一个水平之后最后达到最大值,2 个品种紫花苜蓿增加趋势虽然稍有不同,但是均呈上升趋势,这与 Muhammad 等^[17]研究结论一致。大体上,过氧化氢酶活性和过氧化物酶活性在胁迫初期均呈增加趋势,这是植物对胁迫初期的适应过程,这一结果与梁超等^[12]对小麦盐胁迫的研究相类似。随着胁迫时间的延长 CAT 和 POD 活性均显著下降,说明长时间的盐胁迫使细胞受到了严重伤害,已经超出了抗氧化酶对活性氧自由基清除能力的极限。

细胞膜结构和功能的紊乱和膜透性的变化是逆境胁迫作用的关键所在。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的产物之一,通常用来作为细胞膜膜脂过氧化程度及对逆境反应强弱的重要指标。有研究^[18]发现,在逆境条件植物细胞可通过多种途径产生超氧阴离子、 H_2O_2 等活性氧,超氧阴离子和 H_2O_2 可进一步反映生成毒性更强的羟自由基($OH^\cdot$),它能转化脂肪酸为有毒的过氧化物,破坏生物膜,造成 MDA 的累积。本研究中,2 个品种紫花苜蓿的 MDA 含量随盐胁迫时间的延长均增加,这与 Smirnoff^[19]、Bowler 等^[20]和 Scandalios^[21]的研究结果一致。在盐胁迫初期“秘鲁”中的 MDA 含量大幅度增加,增加速度明显大于“阿迪娜”的增加速度,这和杨升等^[14]的研究结果相似:盐胁迫下,抗盐性较强的牧草 MDA 的增长率明显低于抗盐性较差的牧草。因此,说明不同耐盐程度的植物在盐胁迫下产生的丙二醛含量也不同。

目前,已经有很多试验^[22]证明,脯氨酸的累积与植物对环境胁迫的耐受能力正相关。周广生等^[23]认为,脯氨酸的积累量与其耐盐性呈负相关;Sanada 等^[24]认为,脯氨酸含量上升,可能是对逆境胁迫下细胞结构和功能遭受伤害的一种适应性反应,对植物本身起到一定的防护作用;也有研究^[25]表明,脯氨酸含量可作为植物细胞渗透调节的关键物质,可用于衡量植物耐盐碱的关键指标;而赵勇^[26]认为,盐胁迫下植物组织中脯氨酸含量不能作为植物的耐盐指标。脯氨酸含量与植物耐盐性的关系一直存在着争议,因此脯氨酸还有待于进一步深入研究。Wu 等^[15]和 Muhammad 等^[17]的研究表明,随着盐胁迫时间的延长植物体内的相对含水量必然会减少。在本研究发现,在盐胁迫后短时间内植物体内的相对含水量急速减少后又短暂上升,这可能与植物体内的某些生理生化反应有密切的关系。另外,相对含水量在盐胁迫前较高,在盐胁迫 2 h 后相对含水量显著下降,随着胁迫时间的增加相对含水量上升后又逐渐下降,脯氨酸含量与相对含水量表现出相反的趋势。在盐胁迫前,脯

氨酸含量较低,但是在盐胁迫 2 h 后显著性上升。由此进一步证实植物在逆境胁迫下细胞大量失水,导致渗透胁迫,植株体内会积累脯氨酸等物质来维持植物正常的生理代谢。

叶绿体是受盐胁迫影响最敏感的细胞器,盐胁迫破坏叶绿体结构,使叶绿素含量下降,引起植株光合能力减弱。随着胁迫时间延长,植物体内的叶绿素含量逐渐下降,如 Luo 等^[16]采用 250 mmol/L NaCl 溶液胁迫处理紫花苜蓿,分别测定了胁迫前和胁迫后 1,3,6,12,24 h 的叶绿素的含量,发现叶绿素含量在胁迫后 1 h 显著性下降($P < 0.05$),而在本研究中,2 种紫花苜蓿的叶绿素含量在胁迫后短时间内保持稳定水平,反而在胁迫 16 h 显著性下降($P < 0.05$),这可能与盐浓度大小有关,浓度大,叶绿素含量会在短时间内急速下降,浓度小,叶绿素含量随时间的延长缓慢降低。

4 结论

(1)在盐胁迫下,2 种紫花苜蓿的过氧化氢酶活性、过氧化物酶活性和丙二醛含量总体呈上升趋势。

(2)在盐胁迫 2 h 时的“秘鲁”和“阿迪娜”的脯氨酸含量较对照组分别增加 189.0% 和 172.8%,相对含水量较对照组分别减少 22.9% 和 23.5%。脯氨酸含量显著增加,相对含水量显著降低,二者表现出相反的趋势。

(3)叶绿素含量在盐胁迫前期稳定不变,但是在胁迫后期“秘鲁”和“阿迪娜”却分别下降 12.4% 和 3.4%。叶绿素含量的变化趋势与植株表型变化相对应。

(4)主成分分析表明,过氧化氢酶活性和丙二醛含量的贡献率最大,能更好地为苜蓿耐盐机理及分子育种研究提供理论依据。

参考文献:

- [1] 王遵亲.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,2013:134-135.
- [2] 景艳霞,袁庆华.NaCl 胁迫对苜蓿幼苗生长及不同器官中盐离子分布的影响[J].草业学报,2011,20(2):134-139.
- [3] 王珺,柳小妮.3 个紫花苜蓿品种耐盐突变材料的耐盐性评价[J].草业科学,2011,28(1):79-84.
- [4] 王静,许兴,麻冬梅.紫花苜蓿种质资源萌发期耐盐性鉴定[J].核农学报,2018,32(10):1939-1948.
- [5] 张喜斌,秦楚,麻冬梅,等.紫花苜蓿苗期耐盐性鉴定[J].北方园艺,2017,22(7):43-50.
- [6] 倪星.紫花苜蓿种质资源的耐盐性综合评价研究[D].银川:宁夏大学,2016.
- [7] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2012:348-351.
- [8] 戴海芳,武辉,阿曼古丽·买买提阿力,等.不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选[J].中国农业科学,2014,16(7):1290-1300.

- [9] Morgan J A. Interaction of water supply and N in wheat [J]. Plant Physiology, 2009, 76: 112-117.
- [10] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2012, 7(9): 405-443.
- [11] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48(12): 909-930.
- [12] 梁超, 王超, 杨秀风, 等. 德抗 961 小麦耐盐生理特性研究[J]. 西北植物学报, 2009, 26(10): 2075-2082.
- [13] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2010, 59(6): 651-681.
- [14] 杨升, 张华新, 张丽. 植物耐盐生理生化指标及耐盐植物筛选综述[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(3): 59-65.
- [15] Wu B, Munkhtuya Y, Li J J. Comparative transcriptional profiling and physiological responses of two contrasting oat genotypes under salt stress[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 23-38.
- [16] Luo D, Zhou Q, Wu Y G. Full-length transcript sequencing and comparative transcriptomic analysis to evaluate the contribution of osmotic and ionic stress components towards salinity tolerance in the roots of cultivated alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. BMC Plant Biology, 2019, 19(1): 457-478.
- [17] Muhammad S H, Sudisha J, Tariq P, et al. Physiological and transcriptional variations inducing complex adaptive mechanisms in grapevine by salt stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 16(2): 238-257.
- [18] Munnik T, Ligterink W, Meskiene I, et al. Distinct osmosensing protein kinase pathways are involved in signaling moderate and severe hyperosmotic stress[J]. Plant Journal 1999, 20(3): 381-388.
- [19] Smirnov N. The role of active oxygen in the response of plant to water deficit and desiccation[J]. New Phytol, 1993, 125(10): 27-58.
- [20] Bowler C, Montagu M V, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1992, 34(4): 43-63.
- [21] Scandalios J G. Oxygen stress and superoxide dismutase[J]. Plant Physiology, 1993, 101(1): 7-11.
- [22] 张显强. NaCl 胁迫对玉米幼苗叶片蛋白质降解和脯氨酸积累的影响[J]. 贵州农业科学, 2012, 30(2): 3-4.
- [23] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. 中国农业科学, 2013, 36(11): 1378-1382.
- [24] Sanada Y, Ueda H, Kuribayashi K, et al. Novel light-dark change of proline levels in halophyte (*Mesembryanthemum crys-tallinum* L.) and glycophytes (*Hordeum vulgare* L. and *Triticum aestivum* L.) leaves and roots under salt stress[J]. Plant and Cell Physiology, 2009, 36(6): 965-970.
- [25] 张永锋, 梁正伟, 隋丽, 等. 盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿生理特性的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(4): 230-235.
- [26] 赵勇. 盐胁迫下植物组织中甜菜碱和脯氨酸变化的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- (上接第 100 页)
- [21] Tuo D F, Xu M X, Zhao Y G, et al. Interactions between wind and water erosion change sediment yield and particle distribution under simulated conditions[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(5): 590-598.
- [22] Reaney S M, Bracken L J, Kirkby M J. The importance of surface controls on overland flow connectivity in semi-arid environments: Results from a numerical experimental approach [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(4): 2116-2128.
- [23] Zhang X, Li P, Li Z B, et al. Effects of precipitation and different distributions of grass strips on runoff and sediment in the loess convex hillslope[J]. Catena, 2018, 162: 130-140.
- [24] 秦富仓, 余新晓, 张满良, 等. 小流域林草植被控制土壤侵蚀机理研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1618-1622.
- [25] 张思毅, 梁志权, 谢真越, 等. 植被调控红壤坡面土壤侵蚀机理[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 1-5.
- [26] Trout T J, Neibling W H. Erosion and sedimentation processes on irrigated fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993, 119(6): 947-963.
- [27] Shih H M, Yang C T. Estimating overland flow erosion capacity using unit stream power[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(1): 46-62.
- [28] Mirzaee S, Ghorbani-Dashtaki S. Deriving and evaluating hydraulics and detachment models of rill erosion for some calcareous soils[J]. Catena, 2018, 164: 107-115.
- [29] Wang B, Zhang G H, Yang Y H, et al. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 266: 68-75.