

# Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下饲用油菜的生理响应特征

杨 洋, 王亚娟, 阴法庭, 张凤华\*

(1. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003; 2. 石河子大学新疆兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003)

**摘要:** 研究 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫下饲用油菜的响应特征, 通过设置 50、80、150 mmol/L 3 个不同 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浓度梯度, 分析饲用油菜在 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫下生物量, K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 运输, 渗透调节物质及其保护酶活性的变化特征。试验表明, 随着 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浓度的增加, 饲用油菜的株高、根长、干重、鲜重逐渐降低。饲用油菜植株根和叶中 Na<sup>+</sup> 随 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浓度的增加逐渐增加, 茎中 K<sup>+</sup> 随 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浓度的增加逐渐降低。饲用油菜植株渗透调节物质丙二醛、脯氨酸、甜菜碱随 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浓度的增加均有不同程度的增加趋势; 可溶性蛋白和总糖随着 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浓度的增加逐渐降低。饲用油菜植株中过氧化氢酶、过氧化物酶、超氧化物歧化酶由于 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫的影响, 酶系统平衡状态紊乱, 叶片受损。由此可知, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫下饲用油菜可通过增加甜菜碱的含量来平衡丙二醛、脯氨酸对其膜系统造成的损伤, 同时降低活性氧的量以维持保护酶系统稳定。

**关键词:** Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫; 渗透调节; 离子调节; 保护酶; 饲用油菜

中图分类号: S548; S565.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2023)02-0126-06

## Physiological Response Characteristics of Forage Rapeseed under Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Stress

YANG Yang, WANG Yajuan, YIN Fating, ZHANG Fenghua\*

(1. College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003; 2. Key laboratory of Oasis Ecological Agriculture, Xinjiang Corps, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** The response characteristics of forage rapeseed under Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> stress were studied. The variation characteristics of biomass, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> transport, osmotic regulatory substances and protective enzyme activities of rapeseed under Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> stress were analyzed by setting the concentration gradients of 50, 80, 150 mmol/L of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. The results showed that: With the increase of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> concentration, the biomass of rapeseed decreased gradually. Na<sup>+</sup> in roots and leaves increased gradually with the increase of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> concentration, while K<sup>+</sup> in stems decreased gradually with the increase of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> concentration. Under the stress of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, feeding rapeseed could balance the damage caused by malondialdehyde and proline to its membrane system by increasing the content of betaine, and meanwhile reduce the amount of reactive oxygen to maintain the stability of protective enzyme system.

**Key words:** Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> stress; Osmotic adjustment; Ionic regulation; Protective enzyme; Forage rapeseed

我国有大面积的盐碱化土壤, 分布广、面积大、类型多<sup>[1]</sup>。据统计, 我国的盐碱化土壤面积约 3 460 万 hm<sup>2</sup>, 耕地盐碱化面积 760 万 hm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>, 约占全国耕地总面积的 6%。据调查, 新疆约有 160 万 hm<sup>2</sup> 的盐碱化低产耕地, 占新疆总耕地面积的 32%<sup>[3]</sup>, 其盐碱地类型多样, 同时新疆作为重要的畜牧产业基地, 饲料供应不足问题一直是制约畜牧产业可持续发展的主要障碍之一, 开发经济生

态效益高的盐碱土壤饲草资源越来越受到广泛关注; 饲用油菜 (*Brassica napus*) 又名双低 (低芥酸、低硫代葡萄糖甙) 油菜, 具有抗性强、生长迅速、产量高、营养价值高, 适口性好等特点<sup>[4-5]</sup>, 是一种优质的饲草。近年来, 研究盐碱胁迫对植物的影响大多集中在小麦<sup>[6-7]</sup>、水稻<sup>[8]</sup> 以及抗性强的牧草如碱蓬<sup>[9]</sup>、羊草<sup>[10]</sup> 等, 对饲用油菜抗性研究相对较少。

盐碱地土壤中既含有中性盐 NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 同时也含有大量碱性盐 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、NaHCO<sub>3</sub>, 分别称为碱胁迫和盐胁迫<sup>[11]</sup>; 碱胁迫对植物伤害程度大于盐胁迫<sup>[12-13]</sup>, 它主要影响土壤 pH; 研究表明, 盐碱胁迫可以抑制植物对钾钠离子的吸收<sup>[14]</sup>; 随着胁迫浓度的增大, 植株鲜重呈下降趋势, 脯氨酸、丙

收稿日期: 2020-03-19

基金项目: 兵团重大计划项目 (2018AA005); 兵团科技合作计划项目 (2020BC001)

作者简介: 杨 洋 (1992-), 女, 硕士, 从事绿洲农业生态研究。

通讯作者: 张凤华, 女, 博士, 教授, E-mail: zfh2000@126.com

二醛含量均呈上升趋势,SOD、POD活性呈先升高后降低趋势<sup>[15-16]</sup>;迄今为止,对于盐胁迫的研究主要集中在NaCl<sup>[17]</sup>,对碱胁迫的研究较少。

基于此,通过种植饲用油菜,明确其生物量、渗透调节物质、保护酶在Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下的响应特征,为油菜的抗逆生理学研究及耐盐碱饲草选育、盐碱地生物治理提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验地点位于石总场四分场,试验材料为华油杂62号。

### 1.2 模拟碱性盐胁迫设计

本试验设置50、80、150 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>处理组,以清水为对照(CK)。2018年9月22日移栽五叶期的油菜于内径17 cm,高20 cm的带有底座的塑料花盆中;栽培基质为花土;每个处理20盆,每盆移栽一株;移栽后定期浇营养液,为避免产生盐激反应,第一次从最低浓度开始浇,依次达到最高浓度;于9月28日和10月3日施肥(尿素),每盆均施1 g;于花期取样并测定其指标。

### 1.3 指标测定

油菜单株质量用电子秤称量,株高及根长用卷尺测量;钾钠离子采用离子色谱仪测定;脯氨酸采用茚三酮法测定,丙二醛的测定采用硫代巴比妥酸法<sup>[18-21]</sup>;SOD、POD、CAT保护酶活性,甜菜碱测定参考孔祥生等的方法<sup>[20]</sup>;可溶性蛋白质采用考马斯亮G-250法测定<sup>[20-21]</sup>;可溶性总糖采用硫酸蒽酮法进行测定<sup>[22]</sup>。

### 1.4 数据统计分析

采用Excel 2007、SPSS 16.0进行数据统计分析,采用Origin 8.0制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下饲用油菜生物量变化

如图1所示,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下,油菜株高显著降低( $P<0.05$ ),随着Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度的增大,植株生长量越来越小,组间差异显著;油菜根长在重度碱胁迫下与CK差异显著,在浓度为50、80 mmol/L的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下无显著差异。随Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度的增大,油菜植株的干、鲜重均呈现降低趋势,在浓度为150 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下,与CK差异显著。

### 2.2 不同Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下饲用油菜K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>的变化

如图2所示,在浓度为150 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下,油菜植株根和叶Na<sup>+</sup>含量与CK相比显著

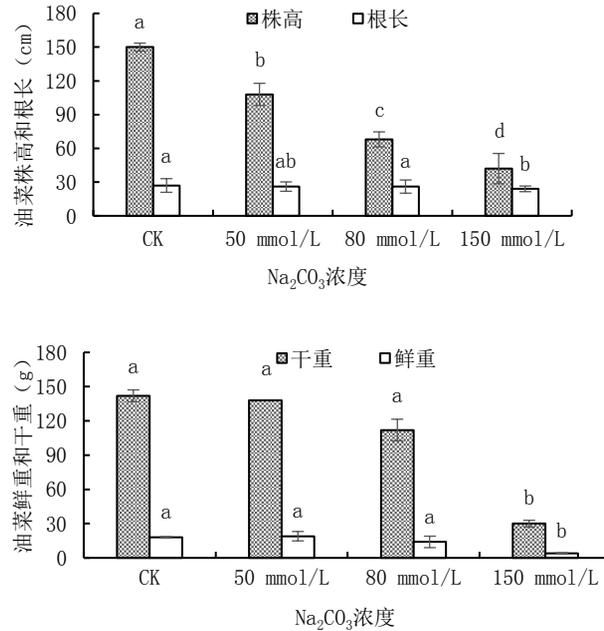


图1 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下油菜株高、根长、鲜重、干重的变化

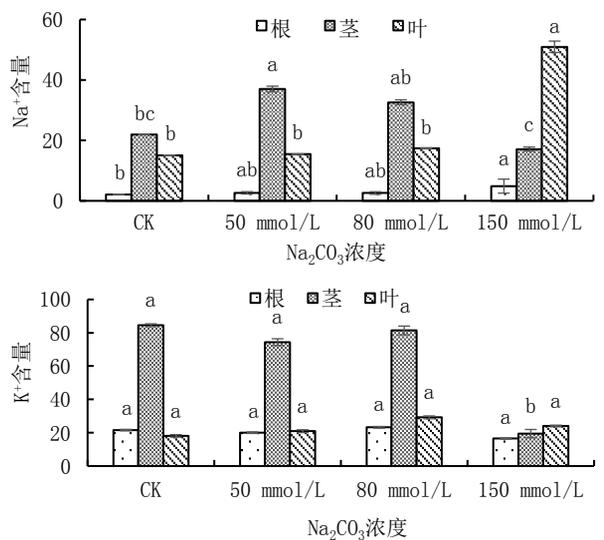


图2 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下油菜中K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>含量的变化

增加,浓度为50、80 mmol/L的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下与CK相比无显著增加;油菜茎中Na<sup>+</sup>含量与其相反,在浓度为50 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下,与CK相比显著增加,且随胁迫程度增加逐渐降低。油菜植株根和叶各处理间K<sup>+</sup>含量无显著差异,油菜植株茎中K<sup>+</sup>含量在浓度为150 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>处理时与CK差异显著。在没有进行Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>处理的CK组油菜,K<sup>+</sup>的含量明显高于Na<sup>+</sup>,随着Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度增大,油菜植株中Na<sup>+</sup>含量迅速增加,K<sup>+</sup>含量降低。

### 2.3 不同Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下饲用油菜渗透调节物质含量变化

如图3所示,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下,油菜叶片中的丙

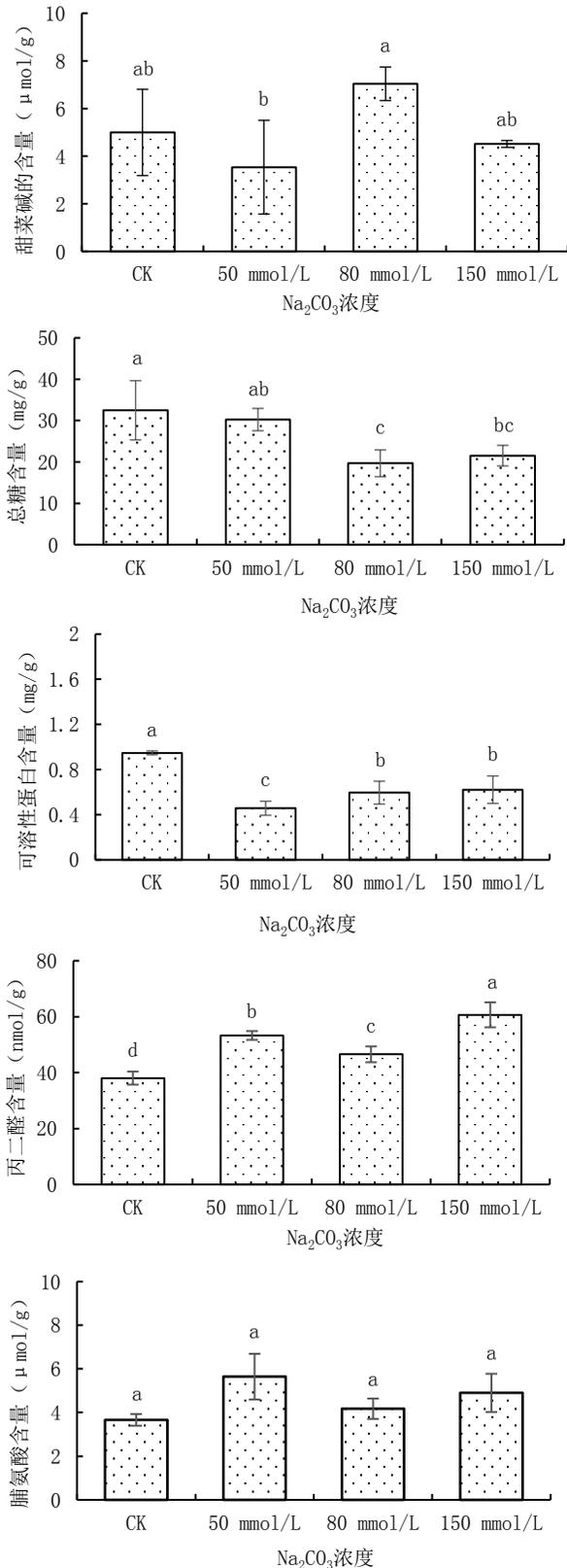


图3 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下油菜中丙二醛、甜菜碱、脯氨酸、总糖、可溶性蛋白含量的变化

二醛含量呈增加趋势,各处理间与CK差异显著,浓度为150 mmol/L的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下含量最高。

油菜叶片中甜菜碱含量,随着碱浓度的增大在轻度时呈明显降低趋势,在中度时增加达到最

大,在重度时含量下降,且在浓度为50、80 mmol/L的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>处理间差异显著,随Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度继续增加,甜菜碱的积累受到抑制。

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下,油菜叶片中的脯氨酸含量呈增加趋势,总糖和可溶性蛋白含量与CK相比呈降低趋势。油菜叶片中的总糖在浓度为80、150 mmol/L的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>处理时与CK差异显著;可溶性蛋白各处理与CK均有显著差异。

#### 2.4 不同Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下饲用油菜保护酶活性变化

如图4所示,随Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度的增大,CAT的活性呈现增加趋势,POD和SOD活性呈现先降低后升高的趋势;CAT酶活性随着碳酸钠浓度的升高呈现增大趋势,且在浓度为80 mmol/L时最大。POD活性在50 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫时降低,80、150 mmol/L时增加;SOD活性在浓度为50、80 mmol/L的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫时降低,150 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫时增加。

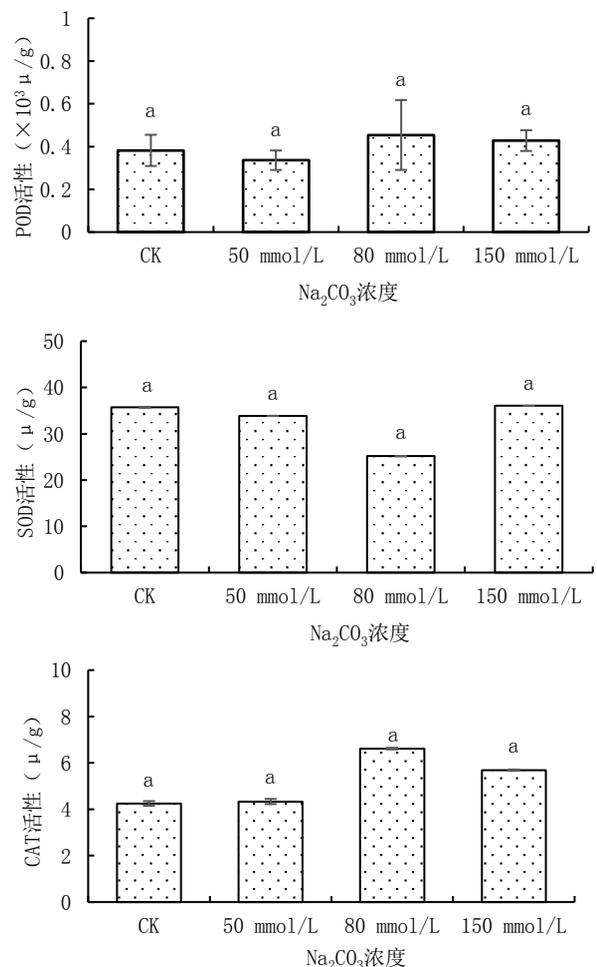


图4 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下油菜中保护酶活性的变化

### 3 讨论

#### 3.1 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫对饲用油菜生物量的影响

盐碱胁迫会使植物生长受到抑制<sup>[23]</sup>。有研究表

明,植株生长发育受到抑制,可能是盐碱胁迫抑制了植物细胞的有丝分裂<sup>[24]</sup>,但是植物对盐碱胁迫逆境都有承受限度,蔬菜植物为 1.6 ds/m,果树为 1.4 ds/m,大田作物为 3.4 ds/m<sup>[25]</sup>。本研究中,随 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度的增大,植株生长量越来越小,油菜根长与CK相比差异不显著,说明 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫对油菜地下部分影响较小,对地上部分影响较大,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>对油菜生长有较强的抑制作用,这与前人研究结果相似,主要是由于较高的pH能够破坏植物根系,打破植物体内的离子平衡,使细胞代谢紊乱,因此植物需要消耗更多的能量以抵御高pH伤害,所以油菜植株在Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下受到的抑制作用较强。

### 3.2 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫对饲用油菜K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>的影响

研究表明,植物根系最重要的据盐机制是通过其根系对盐碱离子的过滤作用进行的<sup>[26]</sup>。对于非盐生植物而言,其对盐碱的抗性主要依赖于根系对离子的选择性吸收<sup>[27-28]</sup>,耐盐碱的大麦体内盐碱分布有明显区域化,根系吸收的Na<sup>+</sup>向地上部运输较少,保存在根系中的较多,对K<sup>+</sup>的选择性强<sup>[29]</sup>,耐盐碱的棉花<sup>[30]</sup>也存在类似的耐盐碱机理。本研究表明,油菜的盐碱区域化特性与以上几种作物不同,CK组油菜中K<sup>+</sup>的含量明显高于Na<sup>+</sup>,随碱浓度增大,油菜植株中Na<sup>+</sup>含量迅速增加,K<sup>+</sup>含量降低,其吸收的Na<sup>+</sup>向地上部分运输较多,根系中留存较少,说明油菜的根先对Na<sup>+</sup>进行截留,当根中Na<sup>+</sup>含量增加到一定平衡点时,根中的Na<sup>+</sup>外排率上升,使茎中Na<sup>+</sup>积累量迅速增加,进而运输到油菜叶片中,从而抑制K<sup>+</sup>运输,造成植株中离子不均衡;其中,茎对Na<sup>+</sup>的截留具有很强的能力,说明根系对Na<sup>+</sup>的积累及对K<sup>+</sup>向地上部的选择性运输是油菜耐盐碱性能强的主要原因,其机理有待于进一步研究。

### 3.3 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫对饲用油菜渗透调节物质的影响

细胞膜是植物在遭受盐碱胁迫时最先受到伤害的器官,植物膜脂过氧化会产生丙二醛(MDA),其累积量越多,说明植物受损程度越大;脯氨酸是植物体内表现其抗逆能力的一种重要渗透调节物质,对盐碱胁迫反应较敏感,其累积量越多,说明植物受损程度越小<sup>[31]</sup>。研究表明,随着盐、碱浓度的加大,丙二醛含量增加,植物叶片质膜所受伤害逐渐增大<sup>[32-33]</sup>。本研究表明,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下,油菜叶片中的丙二醛含量各处理间与CK相比差异显著,且在150 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下含量最高,随Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度的增大,脯氨酸含量显著增加,说明Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫对油菜叶片质膜造成严重损

伤,且在此过程中油菜叶片通过合成大量的脯氨酸来调节产生丙二醛对其造成的损伤。

甜菜碱是一种广泛分布在植物、动物和细菌体内的渗透调节物质<sup>[34]</sup>,作为一种渗透调节剂、酶的保护剂,在盐碱逆境胁迫下可使细胞膜的完整性得到保持<sup>[35]</sup>。本试验表明,油菜叶片中甜菜碱含量随着Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度的增大呈先升高后降低的趋势,在浓度为80 mmol/L时达到最大,在150 mmol/L时含量下降,且50、80 mmol/L处理间差异显著,说明在50、80 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下,油菜叶片可以通过提高甜菜碱醛脱氢酶的活性,来增加细胞质中甜菜碱的积累,进而提高对Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫的适应,但是随着Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度继续增加,甜菜碱的积累受到抑制,说明油菜叶片通过甜菜碱渗透调节在50、80 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下进行,油菜叶片在80 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下,可通过合成甜菜碱减轻丙二醛和脯氨酸对其造成的损伤,来保持细胞膜的完整性。

植物能够提高耐盐碱性主要通过渗透调节,可溶性糖是植物体内重要的渗透调节物质<sup>[36]</sup>,可溶性蛋白影响植物细胞内渗透势的大小<sup>[37]</sup>。植物体通过增加渗透调节物质来平衡渗透势,以减小盐碱胁迫对其造成的伤害<sup>[38]</sup>,糖作为调节渗透胁迫的小分子物质,植物在盐碱胁迫过程中,可以增加渗透性溶质,可溶性蛋白的质量分数可体现植物细胞内酶系统的稳定<sup>[39]</sup>。本试验表明,油菜叶片可溶性蛋白含量呈降低趋势,且各处理与CK间差异显著,说明Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫已使油菜叶片细胞内酶系统稳定性遭到破坏。研究表明,脯氨酸的合成依赖于糖分解代谢和呼吸作用<sup>[40]</sup>,因此Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下油菜叶片中脯氨酸含量积累,总糖含量有明显的降低,且各处理与CK间差异显著,可能是由于Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下脯氨酸含量增加导致糖含量减少。

### 3.4 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫对饲用油菜保护酶活性的影响

植物体内的保护酶系统能清除盐碱胁迫诱产生的自由基,减轻盐碱胁迫的危害<sup>[41]</sup>,SOD、POD、CAT是植物体内保护酶系统中的重要组成部分,它们之间具有一定的协同作用<sup>[42-43]</sup>。试验表明,在Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下,油菜植株叶片中的CAT活性呈现增加趋势,POD、SOD活性呈现先降低后增加的趋势。说明轻、中度碱胁迫抑制了POD、SOD的活性,且浓度越大抑制程度越高,因此在50、80 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下,CAT在整个酶系统中发挥了主要作用,而POD、SOD发挥作用较小;在150 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫时,POD、SOD活性均增

大, CAT活性降低,但仍高于CK,此时POD、SOD在整个酶系统中发挥的作用更大,而CAT发挥作用较小。在正常的环境条件下,植物体内活性氧(ROS)的产生和清除处于动态平衡状态,ROS维持在较低水平,不会造成细胞膜伤害<sup>[44]</sup>。盐碱胁迫可使植物体内产生大量活性氧,打破代谢平衡,从而使SOD、POD、CAT等保护酶活性大幅升高,从而加强了活性氧的清除<sup>[45-47]</sup>。当活性氧的生成超过保护酶系统的清除能力时,保护酶活性降低,膜脂过氧化程度加重,膜透性增加<sup>[48-49]</sup>。因此在碱胁迫下,由于生成大量的活性氧而导致酶系统的动态平衡状态紊乱,因此使得油菜叶片损伤严重。

## 4 结 论

综上所述,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫严重影响油菜生物量,K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>运输,渗透调节物质和保护酶活性,且在浓度为150 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫时影响最大,在50、80 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫时油菜叶片可通过合成甜菜碱、脯氨酸来平衡丙二醛对其膜系统造成的损伤,同时降低活性氧的量以维持保护酶系统稳定,本研究结果为油菜的抗逆生理学研究及耐盐碱饲草选育、盐碱地生物治理提供了理论依据。

## 参考文献:

- [ 1 ] 张明柱,黎庆淮,石秀兰.土壤学与农作学(第三版)[M].武汉:武汉大学出版社,1994:30-60.
- [ 2 ] 周和平,张立新,禹 锋,等.我国盐碱地改良技术综述及展望[J].现代农业科技,2007(11):159-161,164.
- [ 3 ] 加孜拉·阿山,王修贵,姚宛艳.新疆土壤盐碱化治理技术初步研究[J].节水灌溉,2011(11):50-52.
- [ 4 ] 黎咏蜀.饲用油菜栽培技术及营养价值研究[D].重庆:西南大学,2014.
- [ 5 ] 郭丛阳,王天河,杨文元,等.河西地区麦后复种饲用(绿肥)油菜栽培技术及效益分析[J].草业科学,2008,25(3):90-92.
- [ 6 ] Li X Y, Mu C S, Lin J X, et al. Effect of alkaline potassium and sodium salts on growth, photosynthesis, ions absorption and solutes synthesis of wheat seedlings[J]. Experimental Agriculture, 2014, 50(1): 144-157.
- [ 7 ] Li X Y, Liu J J, Zhang Y T, et al. Physiological responses and adaptive strategies of wheat seedlings to salt and alkali stresses [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2009, 55(5): 680-684.
- [ 8 ] Wang H, Wu Z H, Han J Y, et al. Comparison of ion balance and nitrogen metabolism in old and young leaves of alkali-stressed rice plants[J]. PLoS One, 2012, 7(5): e37817.
- [ 9 ] Yang C W, Shi D C, Wang D L. Comparative effects of salt and alkali stresses on growth, osmotic adjustment and ionic balance of an alkali-resistant halophyte *Suaeda glauca* (Bge) [J]. Plant Growth Regulation, 2008, 56: 179.
- [ 10 ] 蔺吉祥,张兆军,李晓宇,等.羊草早期幼苗在盐、碱生境下生长与生理适应性的研究[J].中国草地学报,2011,33(6):64-69.
- [ 11 ] 石德成,殷立娟.盐(NaCl)与碱(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)对星星草胁迫作用的差异[J].植物学报,1993,35(2):144-149.
- [ 12 ] Yang C, Jianaer A, Li C, et al. Comparison of the effect of salt-stress and alkali-stress on photosynthesis and energy storage of an alkali-resistant halophyte *Chloris virgata*[J]. Photosynthetica, 2008, 46: 273-278.
- [ 13 ] Yang C, Wang P, Li C, et al. Comparison of effects of salt and alkali stresses on the growth and photosynthesis of wheat[J]. Photosynthetica, 2008, 46: 107-114.
- [ 14 ] 王宇超,王得祥.盐胁迫对木本滨藜叶绿素合成及净光合速率的影响[J].农业工程学报,2012,28(10):151-158.
- [ 15 ] 王 晨,陈吉宝,庞振凌,等.甜高粱对混合盐碱胁迫的响应及耐盐碱种质鉴定[J].作物杂志,2016(1):56-61.
- [ 16 ] 闫艳华,杜京旗,高晓丽.碱性复合盐胁迫对番茄幼苗生理的影响[J].黑龙江农业科学,2015(12):82-83.
- [ 17 ] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annu Rev Plant Biol, 2008, 59: 651-681.
- [ 18 ] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2006:200-204.
- [ 19 ] 中国科学院上海植物生理研究所.现代植物生理学实验指南[M].北京:科学技术出版社,1999:405-420.
- [ 20 ] 孔祥生,易现峰.植物生理学实验技术[M].北京:中国农业出版社,2008:220-298.
- [ 21 ] 陈惠哲,Ladatko N,朱德峰,等.盐胁迫下水稻苗期Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>吸收与分配规律的初步研究[J].植物生态学报,2007,31(5):937-945.
- [ 22 ] 石连旋.松嫩不同盐碱化羊草草甸草原羊草光合及逆境生理生态特性研究[D].长春:东北师范大学,2007.
- [ 23 ] Grundmann Nakajima Seo, Butterweck. Anti-anxiety effects of *Apocynum venetum* L. in the elevated plus maze test[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2007, 110: 406-411.
- [ 24 ] 郭延清.酿酒葡萄砧木抗盐生理生化特性研究[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
- [ 25 ] 赵可夫.植物抗盐生理[M].北京:中国科学技术出版社,1993:9-10.
- [ 26 ] Waisel Y. Biology of Halophytes[M]. New York: Academic Press, 1972: 120-200.
- [ 27 ] Greenway, H. and Munns, R. Mechanisms of Salt Tolerance in Non-Halophytes[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1980, 31, 149-190.
- [ 28 ] 余叔文,汤章城.植物生理学和分子生物学[M].北京:科学出版社,1998:752-769.
- [ 29 ] 陆 炜,张思文,马得泉.中国大麦科学(第三期)[M].南昌:江西科学技术出版社,1993:209-214.
- [ 30 ] 郑青松,王仁雷,刘友良.钙对盐胁迫下棉苗离子吸收分配的影响[J].植物生理学报,2001,27(4):325-330.
- [ 31 ] Bates L S, Walderen R P. Rapid determination of free proline for water-stress studies[J]. Plant Soil, 1973, 39(1): 205-207.
- [ 32 ] 张永平,陈幼源,陈绯翔.盐碱胁迫对甜瓜种子萌发的影响

- [J]. 上海农业学报, 2009, 25(4): 22-25.
- [33] 闫永庆, 刘兴亮, 王 崑, 等. 白刺对不同浓度混合盐碱胁迫的生理响应[J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1213-1219.
- [34] Prasad K V S K, Saradhi P P. Enhanced tolerance to photoinhibition to transgenic plants through targeting of glycinebetaine biosynthesis into the chloroplasts[J]. Plant Sci, 2004, 166(5): 1197-1212.
- [35] 廖 岩. 植物耐盐性机理研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 2077-2089.
- [36] 肖 强, 郑海雷, 陈 瑶. 水淹对互花米草生长及生理的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 373-376.
- [37] 梁 洁, 严重玲, 李裕红, 等. Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>对NaCl胁迫下木麻黄扦插苗生理特征的调控[J]. 生态学报, 2004, 24(5): 1073-1077.
- [38] Tester M, Davenport R. Na<sup>+</sup> tolerance and Na<sup>+</sup> transport in higher plants[J]. Annals of Botany, 2003, 91: 503-527.
- [39] 马剑敏, 李 今, 张改娜, 等. Hg<sup>2+</sup>与POD复合处理对小麦萌发及幼苗生长的影响[J]. 植物学通报, 2004, 21(5): 531-538.
- [40] Manuel J, Reigosa Roger. Handbook of Plant Ecophysiology Techniques[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001: 365-383.
- [41] Zhu J K. Plants altolerance[J]. Trends in Plant Science, 2001, 6(2): 66-71.
- [42] 吕志英. 抗(耐)盐杨新无性系的筛选研究报告[M]. 南京: 南京林业大学出版社, 1995: 13-19.
- [43] 吕士行, 吕志英, 徐锡增, 等. 盐胁迫对杨树无性系生理特性及高生长的影响[J]. 南京林业大学学报, 1994(4): 13-18.
- [44] 袁 琳, 克热木·伊力, 等. NaCl胁迫对阿月浑子实生苗活性氧代谢与细胞膜稳定性的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 985-991.
- [45] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2002, 7: 405-410.
- [46] 张润花, 郭世荣, 樊怀福. 外源亚精胺对盐胁迫下黄瓜幼苗体内抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1333-1337.
- [47] Koca H, Bor M, Zdemir F, et al. The effect of salt stress on lipid peroxidation, antioxidative enzymes and proline content of sesame cultivars[J]. Experimental Botany, 2007, 60: 344-351.
- [48] Bandooglu E, Eyidan F, Yücel M, et al. Antioxidant responses of shoots and roots of lentil to NaCl salinity stress[J]. Plant Growth Regulation, 2004, 42: 69-77.
- [49] Shalata A, Neumann P M. Exogenous ascorbic acid (vitamin C) increases resistance to salt stress and reduces lipid peroxidation [J]. Journal of Experimental Botany, 2001, 52(364): 2207-2211.

(责任编辑: 王 昱)

## 《东北农业科学》征订启事

《东北农业科学》(原《吉林农业科学》)是吉林省农业科学院、中国农业科技东北创新中心主办的农业综合类学术期刊。2011版、2017版中文核心期刊,吉林省一级期刊。本刊融学术性、技术性、信息性和知识性于一体,是理论与实践相结合、普及与提高并重的刊物。旨在报道最新农业科研成果、研究进展和科技动态,传播农业科学知识,推广农业新品种和新技术,介绍农业生产新经验等。辟有作物育种栽培、生物技术、土壤肥料、植物保护、畜牧兽医、园艺果树、农业经济和农产食品加工等栏目。

《东北农业科学》面向全国公开发刊,主要为各图书情报部门的中文期刊采购和读者需求服务,为广大农民朋友、农业科研人员、农业技术推广人员、农业生产管理者和农业院校师生服务。

《东北农业科学》为双月刊,逢双月25日出版,刊号:ISSN2096-5877 CN22-1376/S,大16开144页,每期定价16.00元,全年96.00元。邮发代号:12-71,全国各地邮局(所)均可订阅,漏订者亦可随时向本刊编辑部订阅,不另收邮费。

电 话:0431-87063151

E-mail :jllykx@163.com

通讯地址:吉林省长春市生态大街1363号《东北农业科学》编辑部

邮政编码:130033