

甘蓝型油菜苗期生长阶段对 NaCl 胁迫的生理响应

丁娟, 黄镇, 张学贤, 卢虹, 刘璐, 徐爱遐*

(西北农林科技大学 农学院, 陕西杨陵 712100)

摘要:以甘蓝型油菜自交系 2205(强耐盐型)、487(中耐盐型)和 1423(敏盐型)为材料,采用土培+水培方法于五叶期研究了 0(无盐胁迫, CK)、60 mmol · L⁻¹(低盐)、120 mmol · L⁻¹(中低盐)、180 mmol · L⁻¹(中盐)、240 mmol · L⁻¹(高盐)NaCl 胁迫后的叶片 MDA、可溶性糖、甜菜碱和叶绿素含量的变化特征,为油菜耐盐性评价提供理论依据。结果显示:(1)叶片 MDA 含量在低盐和中低盐胁迫下降低且显著低于 CK,在中盐和高盐胁迫下显著升高,并以品系 2205 含量最低且升幅最小,品系 1423 最高且升幅最大。(2)叶片可溶性糖含量在低盐和中低盐胁迫下减少(但 2205 在中低盐胁迫下显著高于 CK),在中盐和高盐胁迫下升高且显著高于 CK,并以品系 2205 含量最高增幅最大且显著高于品系 487 和 1423,品系 1423 含量最低且增幅最小。(3)叶片甜菜碱含量随 NaCl 浓度升高增加,品系 2205 和 487 在中低以上盐浓度胁迫下显著升高,品系 1423 仅在高盐胁迫下显著升高,并以品系 2205 含量最高且增幅最大,1423 含量最低且增幅最小。(4)叶片叶绿素含量在低盐和中低盐胁迫下显著增加,且以 2205 叶片叶绿素含量最高且增幅最大,但在中盐和高盐胁迫下显著减少,并以品系 1423 含量最低且降幅最高。研究表明,120 mmol · L⁻¹以下 NaCl 胁迫对油菜苗期生长可能有促进作用,180 mmol · L⁻¹以上 NaCl 胁迫则有明显抑制作用,且 NaCl 浓度越高油菜受伤害越重;油菜苗期生长阶段,NaCl 胁迫浓度在 120~180 mmol · L⁻¹时各生理指标发生显著变化,可能是鉴定耐盐性强弱的适宜浓度;综合分析认为,品系 2205 具有强的耐盐性,品系 1423 耐盐性最差,这之前萌芽期和幼苗期鉴定结果一致。

关键词:甘蓝型油菜;苗期;NaCl 胁迫;生理效应

中图分类号:Q945.78

文献标志码:A

Physiological Effects on *Brassica napus* Seedlings under NaCl Stress

DING Juan, HUANG Zhen, ZHANG Xuexian, LU Hong, LIU Lu, XU Aixia*

(College of Agriculture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With three different salt tolerance *Brassica napus* inbred lines 2205 (strong salt-tolerant), 487 (medium salt-tolerant) and 1423 (sensitive) seedlings as tested materials, we studied the variation of several physiological indexes (the contents of MDA, soluble sugar, betaine and chlorophyll) after NaCl treatments 0 (CK), 60 mmol · L⁻¹ (low salt), 120 mmol · L⁻¹ (mid-low salt), 180 mmol · L⁻¹ (medium salt), 240 mmol · L⁻¹ (high salt) and its relationship with salt resistance in the 5-leaf stage by soil culture and hydroponics, to provide theoretical guidance for the evaluation of rapeseed salt tolerance. The results showed that: (1) Leaf MDA content under low salt and mid-low salt stress reduced and significantly lower than that of CK (no salt stress), under medium salt and high salt stress significantly increased, and the content in

收稿日期: 2014-03-19; 修改稿收到日期: 2014-10-23

基金项目: 国家 863 计划(2011AA10A104); 国家自然科学基金项目(31301350); 西北农林科技大学唐仲英育种基金

作者简介: 丁娟(1990—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事油菜抗逆性研究。E-mail: 651082506@qq.com

* 通信作者: 徐爱遐, 教授, 硕士生导师, 主要从事油菜遗传育种研究。E-mail: xuaixia@nwsuaf.edu.cn

2205 is the lowest and increase the minimum, while the content in 1423 is the highest and furthest. (2) Leaf soluble sugar content reduced under low salt and mid-low salt stress, (but for 2205 that is significantly higher than that of CK under mid-low salt stress), increased under medium salt and high salt stress and is significantly higher than that of CK. The soluble sugar content is the highest level and the biggest increase in 2205, and significantly higher than that in 487 and 1423. while the soluble sugar content is the lowest and the smallest increase in 1423. (3) The betaine content increased with the increase of concentration of NaCl. The content were significantly increased in 2205 and 487 above the mid-low concentration of salt stress, only raised significantly in 1423 under high salt stress. The content is the most and the highest levels in 2205 and the lowest and the smallest increase in 1423. (4) Leaf chlorophyll content increased significantly under low salt and mid-low salt stress, of which is the highest levels in 2205 and the biggest increase. The chlorophyll content significantly reduced under medium salt and high salt stress, especially under high salt stress the chlorophyll content is low, of which is the lowest and highest reduce in 1423. This study can be concluded that below the mid-low salt concentration ($120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), NaCl stress may promote the rape seedling growth; above the medium salt concentration ($180 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), rape seedling growth was significantly inhibited, rapeseed will be more severe injuries with the higher NaCl concentration. At rapeseed seedling growth stage, the physiological indicators changed significantly when NaCl stress concentration at the $120 - 180 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; this concentration range may be suitable for the identification of salt resistance strength. Various physiological indicators showed that 2205 with strong salt resistance, 1423 with the worst salt resistance, which are consistent with the actual performance of germination stage and seedling stage result.

Key words: *Brassica napus* L.; seedling stage; salt stress; physiological effect

土壤盐渍化是危害农业生产的主要因素之一,中国目前有 0.8 亿 hm^2 具有农业生产潜力的盐碱地^[1],其中相当部分的盐碱地处于农业生产适宜区,既是非常宝贵的土地资源,也是保证中国农产品供给的后备耕地资源。盐渍土的生物治理和综合开发是未来农业发展的重大课题,而提高植物的抗盐性、选育耐盐植物品种是解决这一课题的经济有效方法^[2-3]。油菜作为主要的油料作物,提供了居民消费中近 60% 的植物油脂^[4]。甘蓝型油菜在三大栽培类型油菜中种植面积最大,且被认为是比较耐盐的作物之一^[5],因此开展甘蓝型油菜耐盐性研究,选育耐盐高产品种,对利用大面积的盐碱地和保证植物油供应具有极其重要的战略意义。

盐胁迫对植物造成的伤害,主要包括脱水、离子毒害和离子营养不平衡或营养缺乏等,水稻、小麦、玉米和马铃薯等作物耐盐性的研究开展较多^[6-10],并获得了很多有价值的成果,但其根本的耐盐生理机制和基因尚不清楚。目前关于油菜的耐盐性研究比较少,Chakraborty 等^[11]和 Shirazi 等^[12]研究证明,甘蓝型油菜和埃塞俄比亚芥与芥菜型油菜相比,苗期叶片中积累较少的 Na^+ ,受盐害较轻;盐胁迫使膜稳定性、组织含水量、叶绿素含量及钾含量降低,耐盐品种较盐敏感品种受伤害程度低。Ashraf 等^[13]研究发现,盐胁迫下芸薹属双二倍体种(甘蓝型油菜、埃塞俄比亚芥和芥菜型油菜)和二倍体种

(白菜型油菜、黑芥和甘蓝)比较,前者茎和根积累较少的 Na^+ 和较多的 K^+ ,苗期具有更高的茎秆重和根重,更强的光合能力和水分利用率,显现出双二倍体种较二倍体种耐盐性强。龙卫华等^[4]和黄镇等^[14]研究表明,盐胁迫对芸薹属各栽培种的发芽率有不同程度抑制作用,在盐胁迫条件下,白菜型油菜发芽率最高,甘蓝型油菜次之,芥菜型油菜最差,但是其它的生物学指标(苗长、根长、鲜质量、叶绿素含量)并不表现上述规律。Ahmad^[15]报道,甘蓝型油菜不同生长期耐盐性表现不一致,且发现发芽期的耐盐性对预测品种的整体耐盐性参考价值不大。综上所述,前人有关油菜耐盐性的研究多集中在种子萌发阶段盐胁迫下生物学特性的变化,而对油菜耐盐生理指标,尤其对苗期盐胁迫的生理效应几乎未见报道。因此,本研究借鉴小麦、玉米等作物中利用效果较好的几个耐盐生理指标,研究甘蓝型油菜苗期盐胁迫后的生理响应特征,揭示油菜苗期相关生理指标变化与其耐盐性的关系,为油菜耐盐种质的筛选和耐盐品种的选育提供方法指导和可靠材料。

1 材料和方法

1.1 试验材料

参试的 3 个甘蓝型油菜高代自交系 2205、487、1423 均来自西北农林科技大学油菜资源课题组。萌芽期和幼苗期试验已初步证明这 3 份材料分别表

现强耐盐型、中耐盐型和盐敏感型^[14]。

1.2 材料培养与盐胁迫处理

试验于 2013 年在西北农林科技大学玻璃温室进行。人工挑选上述 3 个甘蓝型油菜高代品系健康饱满的当年自交种子,播种于盛有营养土的塑胶(60 mm×60 mm×110 mm)穴盘中,每个材料种 2 盘,一片真叶时定苗,每穴留 1~2 苗。待幼苗长至 5 叶期时选择长势良好并且整齐一致的单株,小心剥离根部营养土,用泡沫漂浮板固定后移栽到盛有霍格兰营养液的塑料盆中(540 mm×415 mm×185 mm),每个材料移栽 15 盆,每盆 3 株。据预试验结果设置 5 个梯度 NaCl 浓度对每个材料进行胁迫处理,3 次重复。以 Hogland 营养液为母液配制 NaCl 溶液,NaCl 浓度分别为:0(无胁迫,CK)、60(低盐胁迫)、120(中低盐胁迫)、180(中盐胁迫)和 240 mmol·L⁻¹(高盐胁迫)。移栽后缓苗 2 d,测定胁迫前各生理指标,以考察每个材料受胁迫处理前各生理指标差异,同时考察各处理间材料的一致性。取样方法如下:每一生理指标剪取每盆中 3 个单株同部位正常功能叶片各 1 cm² 形成混合样,经蒸馏水冲洗干净后用吸水纸吸取附着的水分备用。取样后分别用上述 5 个梯度浓度 NaCl 溶液进行胁迫处理,处理期间每天每盆补充 100 mL 霍格兰营养液,每 5 d 更换 1 次营养液,胁迫 2 周后再次按上述方法取样进行各项生理指标测定。

1.3 测定指标及方法

丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法^[16];可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^[16];甜菜碱含量测定采用比色法^[17];叶绿素含量测定采用分光光度法^[18]。

1.4 数据处理和分析

每个处理生理指标数据采用 3 次重复的测定平均值。用 Microsoft Excel 2003、SAS 6.0 进行数据处理和统计分析,采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对甘蓝型油菜叶片 MDA 含量的影响

由图 1 可知,NaCl 胁迫前,甘蓝型油菜各品系叶片 MDA 含量表现为 2205>487>1423,且差异显著($P<0.05$);同一品系不同处理间的 MDA 含量则差异不显著。说明耐盐性不同油菜品系间的叶片 MDA 含量在无外界非生物胁迫条件下就存在显著性差异,但同一品系在胁迫处理前是基本一致的。

在梯度浓度 NaCl 胁迫 2 周后,随着盐胁迫浓度的增加各材料叶片 MDA 含量变化趋势基本一致,均表现出先降低再升高的趋势,即低盐和中低盐胁迫下,叶片 MDA 含量下降且显著低于 CK(无盐胁迫),在中盐和高盐胁迫下,叶片 MDA 含量迅速大量升高且显著高于 CK(487 例外)。由此可见,中低盐胁迫可能有促进油菜生长的作用,只有中度和重度盐胁迫才会伤害油菜叶片细胞膜系统,表现出 MDA 含量迅速升高现象。就每个材料在同一浓度 NaCl 胁迫下的叶片 MDA 含量来看,无盐胁迫(CK)下,叶片 MDA 含量表现为 487>2205>1423,2205 和 487 与 1423 显著差异;在低盐和中低盐胁迫下,3 份材料差异多不显著;在中盐和高盐胁迫下,3 份材料间多差异显著,并以敏盐材料 1423 的叶片 MDA 含量最高且增幅最大(中盐、高盐下分别较 CK 升高 34.92 和 53.35%),强耐盐材料 2205 和中耐盐材料 487 叶片 MDA 含量均较低且增幅小,说明 1423 受盐害最重,2205 和 487 受盐害较轻。另外,在 NaCl 浓度为 180~240 mmol·L⁻¹时,3 个品系耐盐性表现显著差异,可认为是进行耐盐性鉴定比较适宜的盐浓度。

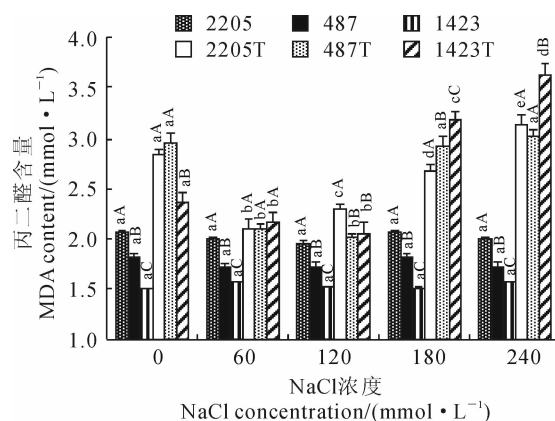


图 1 NaCl 胁迫前、后甘蓝型油菜叶片 MDA 含量的变化

2205(2205T)、487(487T) 和 1423(1423T) 分别为 NaCl 胁迫前(后)品系;不同小写字母表示同一材料不同浓度间在 0.05

水平存在显著性差异,而不同大写字母表示同一浓度

不同材料间在 0.05 水平存在显著性差异;下同

Fig. 1 Changes of MDA content in leaves of

B. napus before and after NaCl stress

2205(2205T), 487(487T) and 1423(1423T) indicate the lines before(after) NaCl stress, respectively; The different normal letters

indicate significant difference among different concentrations

within the same material at 0.05 level, while the capital letters

indicate significant difference among the different materials

within the same concentration at 0.05 level. The same as below

2.2 盐胁迫对甘蓝型油菜叶片可溶性糖含量的影响

由图 2 可知,NaCl 胁迫前,3 份材料叶片可溶性糖含量均表现为品系 487 显著高于品系 2205 和 1423,说明在自然生长条件下,不同基因型材料叶片可溶性糖含量可能存在显著差异;每个材料各处理间的叶片可溶性糖含量差异不显著,又说明受处理材料在胁迫处理前是基本一致的。

梯度浓度 NaCl 胁迫 2 周后,随着盐胁迫浓度的增高各材料叶片可溶性糖含量变化趋势基本一致,表现出先降低再升高的趋势。其中,在低盐胁迫下,各品系叶片可溶性糖含量均降低,且盐敏感材料 1423 显著低于 CK;在中低盐胁迫下,各品系叶片可溶性糖含量回升,且强耐盐材料 2205 显著高于 CK,487 和 1423 均仍低于 CK;在中盐和高盐胁迫下,各品系叶片可溶性糖含量均继续增加,且均显著高于相应 CK。

就各品系在同一浓度 NaCl 胁迫下的叶片可溶性糖含量表现来看,在无盐胁迫下,叶片可溶性糖含量表现为 2205 和 487 略高于 1423,三者无显著差异;在低盐胁迫下,叶片可溶性糖含量以 2205 最高,其次是 487,1423 最低,且 2205 与 1423 差异显著;在中低盐、中盐和高盐胁迫下,叶片可溶性糖含量均仍以 2205 最高且增幅最大(分别为 23.49%、31.69%和 34.60%),其次是 487,1423 最低且增幅最小(分别为-1.52%、12.98%和 17.63%),2205 与 487 和 1423 差异显著,但 487 与 1423 差异不显著。由此可见,当盐害发生时,强耐盐材料 2205 首先表现出应激反应,在体内大量合成可溶性糖以减

轻伤害,而耐盐性较差的 487 和 1423 反应较滞后,且其积累可溶性糖的能力较低。另外,NaCl 浓度在 120~240 mmol·L⁻¹时,各品系叶片可溶性糖含量急剧大量增加,耐盐性越强,叶片可溶性糖含量越高、增幅越大,强耐盐材料 2205 和盐敏感材料 1423 差异显著,因此在该浓度范围内根据叶片可溶性糖含量鉴定材料的耐盐性效果较好。

2.3 盐胁迫对甘蓝型油菜叶片甜菜碱含量的影响

由图 3 可知,在 NaCl 胁迫前,各材料叶片甜菜碱含量无明显差异,也无明显的变化规律;同时,每个品系内各处理间的叶片甜菜碱含量差异不显著,说明受处理材料在胁迫处理前是基本一致的。

梯度浓度 NaCl 胁迫 2 周后,各品系叶片甜菜碱含量随盐胁迫浓度的增高变化趋势基本一致,即随着盐浓度增加而增加。其中,在低盐胁迫下,各品系叶片甜菜碱含量均略高于 CK,但与 CK 无显著差异;在中低盐胁迫下,品系 2205 和 487 叶片甜菜碱含量比 CK 显著增加,1423 叶片甜菜碱含量虽增加但与 CK 差异不显著;在中盐和高盐胁迫下,各品系叶片甜菜碱含量均继续增加,但增加幅度较小,品系 1423 仅在高盐胁迫下与 CK 差异显著,品系 2205 和 487 在中盐和高盐胁迫下均比 CK 显著增加,但两品系间差异不显著。

就各品系在同一浓度 NaCl 胁迫下的叶片甜菜碱含量比较而言,无盐胁迫下的品系 2205、487、1423 间无显著差异;低盐胁迫下,品系 2205 叶片甜菜碱含量高,其次是 1423 和 487,但三者之间差异不显著;中低盐和中盐胁迫下,仍以品系 2205 叶片

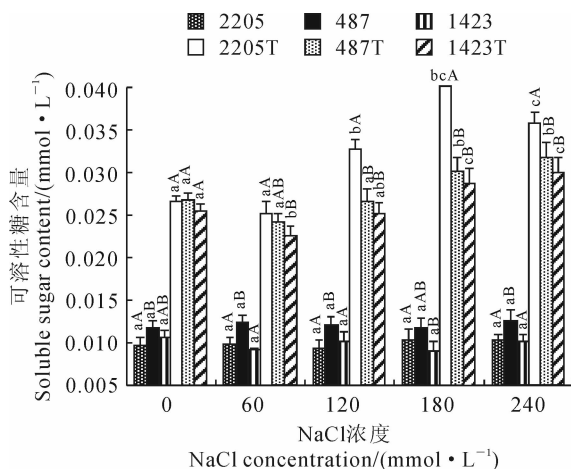


图 2 NaCl 胁迫前、后甘蓝型油菜叶片可溶性糖含量的变化

Fig. 2 Changes of soluble sugar content in leaves of *B. napus* before and after NaCl stress

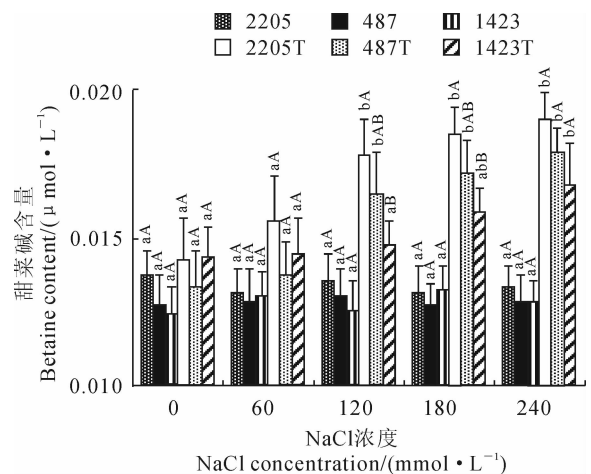


图 3 NaCl 胁迫前、后甘蓝型油菜叶片甜菜碱含量的变化

Fig. 3 Changes of betaine content in leaves of *B. napus* before and after NaCl stress

甜菜碱含量最高且升幅最大(较 CK 分别增加 24.33% 和 29.26%),其次是 487,品系 1423 叶片甜菜碱含量最低且升幅最小(分别为 2.92% 和 10.75%),2205 与 1423 间差异显著,其余均不显著;在高盐胁迫下,仍以品系 2205 叶片甜菜碱含量最高,其次是 487,1423 叶片甜菜碱含量最低,但 3 份材料之间差异均不显著。由此可见,盐胁迫下甘蓝型油菜叶片甜菜碱含量的变化其与耐盐性有一定的相关性,品系叶片甜菜碱含量越高,其耐盐性越强。另外,当 NaCl 浓度在 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,油菜叶片甜菜碱含量迅速大量升高,之后平稳增加;NaCl 浓度在 $120 \sim 180 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,耐盐性强的材料叶片甜菜碱含量最高且较 CK 增幅最大,强耐盐和敏盐型材料甜菜碱含量有显著差异,在该浓度下根据叶片甜菜碱含量鉴定材料的耐盐性较好。

2.4 盐胁迫对甘蓝型油菜叶片叶绿素含量的影响

由图 4 知,在 NaCl 胁迫前,各材料叶片叶绿素含量表现为品系 2205 和 487 较高,但二者之间无显著差异;品系 1423 叶片叶绿素含量较低,且与 2205 和 487 差异显著,说明耐盐性强的材料在无人胁迫处理前本身就具有较高的叶绿素含量。同时,每个材料各处理间的叶片叶绿素含量差异不显著,又说明受处理材料在胁迫处理前是基本一致的。

梯度浓度 NaCl 胁迫 2 周后,各材料叶片叶绿素含量随盐胁迫浓度的增高变化趋势基本一致,即随着盐浓度增加先增加后降低。其中,在低盐和中低盐胁迫下,各材料叶片叶绿素含量均升高,但品系 2205 和 487 与 CK 差异显著,而品系 1423 与 CK 差异不显著;在中盐和高盐胁迫下,各材料叶片叶绿素

含量急剧下降,均显著低于 CK,并以高盐胁迫下叶片叶绿素含量最低,且与中盐胁迫差异显著。说明低盐和中低盐胁迫可提高叶片叶绿素含量,进一步证明中低以下盐胁迫可能有促进油菜生长的作用。

就各品系在同一浓度 NaCl 胁迫下的叶片叶绿素含量比较而言,在低盐和中低盐胁迫下,均以品系 2205 叶片叶绿素含量最高且增幅最大(分别为 9.57% 和 19.41%),其次为 487,1423 含量最低且增幅最小,2205 与后两者差异显著;在中盐和高盐胁迫下,各品系叶片叶绿素含量虽显著降低,但仍均以品系 2205 叶片叶绿素含量最高且降幅最小,其次是 487 或者 1423;中盐胁迫下品系 2205 与 487 差异显著,而在高盐胁迫下品系 2205 与 1423 差异显著。

综上所述,强耐盐材料 2205 在处理过程中始终保持高的叶片叶绿素含量,而敏盐材料 1423 叶绿素含量较低;强耐盐品系 2205 叶片叶绿素含量在中低盐和低盐胁迫下增幅最高,在中盐和高盐胁迫下降幅最小,而盐敏感品系 1423 叶片叶绿素含量在中低盐和低盐胁迫下增幅最小,在中盐和高盐胁迫下降幅最大。因此,甘蓝型油菜叶片叶绿素含量可作为耐盐性鉴定比较好的指标。

3 讨论

植物在盐胁迫下的生理生化反应是十分复杂的过程^[16],可以通过自身渗透物质调节和激素调节、光合途径、抗氧化酶系统等来增强抗逆适应性,本试验选择 MDA 含量、可溶性糖含量、甜菜碱含量和叶绿素含量 4 个耐盐性指标,以 3 份耐盐性不同的甘蓝型油菜苗期材料为研究对象,研究了盐胁迫下油菜苗期生理特性的变化并验证了耐盐性强弱。

首先,MDA 是膜脂氧化的最终分解产物^[17],增强脂质过氧化作用,且具有细胞毒性,最终导致膜系统的破坏^[18-19]。MDA 含量越高说明膜脂过氧化程度越高,MDA 含量与抗逆性呈负相关。本研究中,在胁迫 2 周前和无盐胁迫下,耐盐性强的甘蓝型油菜品系 2205 和 487 的幼苗叶片 MDA 含量大于耐盐性弱的 1423,出现这种现象的原因可能是,本试验在玻璃温室进行,条件虽可控制,但很难达到理想状态,很可能是另外的非生物胁迫因素胁迫导致。在本研究主胁迫因子 NaCl 胁迫后,随 NaCl 浓度增加(大于 $180 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),油菜幼苗叶片 MDA 含量表现为品系 $2205 < 487 < 1423$,这一结果说明强耐盐型品系 2205 确实具有好的耐盐性,盐敏感型 1423 耐盐性较差。另外,低盐和中低盐胁迫下,3 份

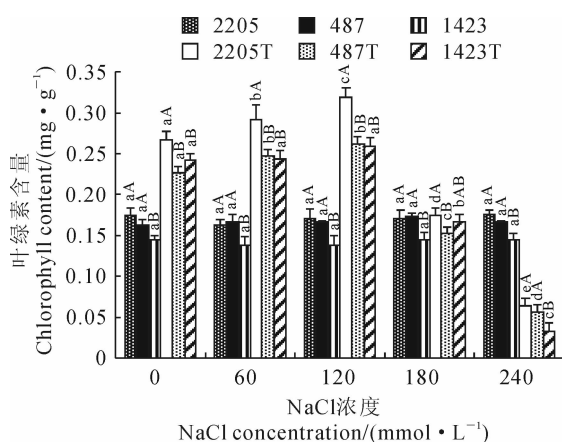


图 4 NaCl 胁迫前、后甘蓝型油菜叶片叶绿素含量的变化

Fig. 4 Changes of chlorophyll content in leaves of *B. napus* before and after NaCl stress

材料叶片 MDA 含量较 CK 显著降低,出现这种现象可能是补充的 Na^+ 有利于油菜的生长发育,这与黄镇等^[14]、龙卫华等^[4]、夏方山等^[20] 相关研究结果一致。

其次,可溶性糖和甜菜碱作为渗透调节物质在植物适应盐分和干旱逆境中发挥着重要作用,能够提高细胞的渗透调节能力,降低因渗透失水造成对细胞膜、酶及蛋白质结构与功能的伤害^[21-22]。植物受胁迫后,可溶性糖含量和甜菜碱含量越高,表明其渗透调节能力越强,抗逆性越强。本研究中,各品系叶片可溶性糖含量在低盐胁迫下均降低,在中盐和高盐胁迫下才出现快速上升,其中耐盐性强的品系 2205 在 NaCl 浓度 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时即表现迅速大量增加,之后随 NaCl 浓度增加相对平稳增加;而品系 487 和 1423 在 NaCl 浓度 $180 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时才表现显著增加,之后随 NaCl 浓度增加缓慢增加。出现这种现象可能是由于在轻度盐胁迫下,仅造成细胞内原有的可溶性糖分解作为能量来源被消耗;当盐浓度升高到一定程度时,细胞内外出现渗透不平衡,可溶性糖才会迅速大量增加,以提高植株吸水能力、抵御盐胁迫的危害。当可溶性糖含量快速增长到一定量以后,随盐浓度升高其增加比较缓慢,甚至有可能出现下降,本研究未进行更高浓度的盐胁迫,因此不能确定可溶性糖出现再下降的盐浓度。同时,耐盐性越强的材料,受盐胁迫后其出现应激反应越早。这一结果与袁亚芳等^[23] 发现火龙果幼苗叶片可溶性糖含量在胁迫初期均呈下降趋势,随后上升达到最大值后再下降有相似之处,说明植物受盐胁迫后其调节能力也是有限的。

同时,本研究中无盐胁迫的各材料油菜叶片甜菜碱含量与 2 周前比较升高,但升高幅度远小于其它 3 个生理指标(MDA、可溶性糖和叶绿素),即油

菜苗期生长阶段叶片甜菜碱含量相对稳定。在梯度盐胁迫下,甜菜碱的变化与叶片可溶性糖含量的变化相似,在 NaCl 浓度为 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,耐盐性强的品系 2205 和 487 的叶片甜菜碱含量增加比较快而显著,之后随 NaCl 浓度增加缓慢;耐盐性弱的品系 1423 在 NaCl 浓度 $180 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的叶片甜菜碱含量增加比较快而显著,之后增加缓慢。陈少良等^[24] 关于杨树叶片受到盐胁迫后甜菜碱浓度也表现显著提高的趋势。

另外,叶绿素是植物进行光合作用所必需的,植物在受到盐胁迫时会积累光合色素,有利于植株在胁迫下维持正常的光合作用,从而增强植株对盐胁迫的耐受能力^[25]。本研究中,在低 NaCl 浓度(小于 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)胁迫下 3 个品系叶绿素含量均增加,之后随 NaCl 浓度(大于 $180 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)的增大迅速下降,这一研究结果进一步说明,低浓度盐胁迫可促进油菜生长。该结果与孙璐等^[26] “高粱叶片叶绿素含量在低浓度 NaCl 胁迫增加,但在高浓度 NaCl 胁迫下则明显降低”的研究结果一致。

综上所述,低盐和中低盐胁迫可以促进油菜幼苗的生长,在中盐和高盐胁迫条件下,3 个品系植株生长均受到伤害,但它们受伤害程度明显不同并且对盐胁迫的响应也有差异,其中以品系 2205 最为耐盐,品系 1423 对盐最敏感;在 $120 \sim 180 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内鉴定 3 个品系的耐盐性效果较好,对于深入开展油菜耐盐性研究具有重要指导意义。但是,耐盐性是一个非常复杂的性状,本研究无论试验材料数量,还是生理指标均不够全面,进一步深入研究需要增加其他耐盐鉴定指标和试验材料。另外植物在受到盐分胁迫时,同时也会受到其他胁迫的影响,如干旱和高温等^[1],所以交叉胁迫下甘蓝型油菜的耐盐性尚有待研究。

参考文献:

- [1] 黄昌勇. 土壤学(2 版)[M]. 北京:中国农业出版社,2000:303.
- [2] ZHU J K. Salt and drought stress signal transduction in plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2002, 53: 247-273.
- [3] LIN N F, TANG J. Geological environmental and the causes for desertification in arid and semiarid regions in China[J]. *Environmental Geology*, 2001, 41(7): 806-815.
- [4] LONG W H(龙卫华), PU H M(浦惠明), ZHANG J F(张洁夫), et al. Screening of *Brassica napus* for salinity tolerance at germination stage[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Science* (中国油料作物学报), 2013, 35(3): 271-275 (in Chinese).
- [5] MARNVILLE J W, BALIGAR B V. Testing crops for salinity tolerance[C]//Proc. workshop on adaptation of plants to soil stresses. Intersoil Publication, 1993: 234-247.
- [6] ZHANG X K(张学昆), TAKESHI N, LONG W H(龙卫华), et al. Recent progress in drought and salt tolerance studies in *Brassica crops* [J]. *Breeding Science*, 2014, 64: 60-73.

- [7] ZHAO Y(赵 勇), MA Y Q(马雅琴), WENG Y J(翁跃进). Variation of betaine and proline contents in wheat seedlings under salt stress [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology* (植物生理与分子生物学学报), 2005, **31**(1): 103—106 (in Chinese).
- [8] WANG B Z(王宝增), CHEN J X(陈建喜), CAO J L(曹君丽). Comparison of salt tolerance in different varieties of *Zea mays* L. [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences* (黑龙江农业科学), 2009, (4): 38—39 (in Chinese).
- [9] JIANG J H(姜静涵), GUAN R X(关荣霞), GUO Y(郭 勇). Simple evaluation method of tolerance to salt at seedling stage in soybean [J]. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 201, **39**(7): 1 248—1 256 (in Chinese).
- [10] ZHANG P(张 鹏), XU CH(徐 晨), XU K ZH(徐克章). Fast identification method of salt-tolerance and research on salt-tolerance at different stages of soybean cultivars [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Science* (中国油料作物学报), 2013, **35**(5): 572—578 (in Chinese).
- [11] CHAKRABORTY K, SAIRAM R K, BHATTACHARYA R C. Differential expression of salt overly sensitive pathway genes determines salinity stress tolerance in *Brassica* genotypes [J]. *Plant Physiol. Bioch.*, 2012, 51: 90—101.
- [12] SHIRAZI M U, RAJPUT M T, ANSARI R, *et al.* Salt tolerance in *Brassica* species at early seedling stage [J]. *Sindh Univ. Res. J.*, 2011, **43**(2): 203—208.
- [13] ASHRAF M, NAZIR N, MCNEILLY T. Comparative salt tolerance of amphidiploid and diploid *Brassica* species [J]. *Plant Sci.*, 2001, **160**(4): 683—689.
- [14] HUANG ZH(黄 镇), YANG R G(杨瑞阁), XU A X(徐爱遐). Effects of saline stress on seed germination and seedlings properties of three types' rapeseeds [J]. *Journal of Northwest A&F University* (Nat. Sci. Edi.) (西北农林科技大学学报·自然科学版), 2010, **38**(7): 49—53 (in Chinese).
- [15] AHMAD B. The influence of salt stress on seed germination, growth and yield of canola cultivars [J]. *Not Bot. Hort Agrobot Cluj*, 2010, **38**(1): 128—133.
- [16] 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: 195—197, 260—261.
- [17] ZHOU Q(周 芹), WU Y M(吴玉梅), HU X H(胡晓航), *et al.* Determination of betaine content in Beet Root by colorimetric method [J]. *Sugar Crops of China*, 2008, (4): 27—28, 30 (in Chinese).
- [18] 高俊凤. 植物生理学实验技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 101—103.
- [19] WANG P Y(王佩羽), LI CH H(李长慧), LI SH J(李淑娟), *et al.* Comparison of salinity tolerance of four herbage at the seedling stage [J]. *Pratacultural Science* (草业科学), 2013, **30**(4): 590—595 (in Chinese).
- [20] XIA F SH(夏方山), DONG Q L(董秋丽), DONG K H(董宽虎), *et al.* Effect of salinity on physiological characteristics of *Saussurea runcinata* at seedling stage [J]. *Grassland and Turf* (草原与草坪), 2010, **30**(3): 21—28 (in Chinese).
- [21] LIU Y H(刘雅辉), WANG X P(王秀萍), ZHANG G X(张国新), *et al.* Study on selection of physiological indices for salt tolerance and comprehensive evaluation of cotton during seedling stage [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2012, **28**(6): 73—78 (in Chinese).
- [22] LI M(李 敏), ZHANG J(张 健), LI Y J(李玉娟), *et al.* Effects of salt stress on physiological indexes of Osier variety L0911 [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi* (江西农业学报), 2012, **24**(8): 56—58 (in Chinese).
- [23] YUAN Y F(袁亚芳), CHEN M X(陈明贤), CHEN Q X(陈清西), *et al.* The different of salt tolerance of different *Pitaya* cultivars [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops* (热带作物学报), 2013, **34**(1): 92—97 (in Chinese).
- [24] CHEN SH L(陈少良), LI J K(李金克), BI W F(毕望富), *et al.* Genotypic variation in accumulation of salt ions, betaine and sugars in poplar under conditions of salt stress [J]. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), 2001, **18**(5): 587—596 (in Chinese).
- [25] WANG Y X(王玉祥), ZHANG B(张 博), WANG T(王 涛). Effect of salt stress on the contents of chlorophyll and betaine and its membrane permeability of *Medicago sativa* [J]. *Pratacultural Science* (草业科学), 2009, **26**(3): 53—56 (in Chinese).
- [26] SUN L(孙 璐), ZHOU Y F(周宇飞), LI F X(李丰先), *et al.* Impacts of salt stress on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of sorghum seedlings [J]. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2012, **45**(16): 3 265—3 272 (in Chinese).