

混合盐碱胁迫对芸芥生长发育和生理性状的影响

范惠玲,白生文*,刘 钊,李振洲,何志军,朱雪峰,秦明岗

(河西学院农业与生物技术学院,甘肃 张掖,734099)

摘要:为评价不同生长期芸芥对混合盐碱胁迫的耐受性及相应的生理机制,采用不同浓度的混合盐碱溶液分别进行种子萌发期、苗期及成株期胁迫试验。结果表明:(1)在种子萌发期,低浓度(20和30mmol·L⁻¹)混合盐碱胁迫仅延迟了芸芥种子的萌发时间,对种子活力的影响较小;40mmol·L⁻¹盐碱胁迫下,发芽势和发芽率均显著低于对照值;≥50mmol·L⁻¹盐碱处理下,种子完全丧失活力。(2)苗期叶片相对含水量与盐碱浓度和胁迫时间均呈负相关,盐碱浓度≥40mmol·L⁻¹,相对含水量显著下降,而丙二醛含量显著升高;随盐碱浓度增加及胁迫时间延长,叶片可溶性糖和脯氨酸含量总体呈增加趋势,而可溶性蛋白含量却逐渐降低,说明芸芥幼苗对盐碱胁迫的适应在一定程度上主要取决于可溶性糖和脯氨酸等有机物质的积累;(3)成株期低浓度胁迫对株高和开花期影响不显著,≥40mmol·L⁻¹盐碱胁迫时,株高降低,开花期延迟,单株角果数少,部分种子干瘪或败育。60mmol·L⁻¹胁迫下植株能存活,但不能开花结实,70mmol·L⁻¹胁迫则严重抑制了营养生长和生殖生长,甚至死亡。混合盐碱胁迫对芸芥根长、鲜重、干重和含水量均有一定的抑制作用,对根重影响显著,低浓度胁迫促进根的伸长,盐碱浓度≥40mmol·L⁻¹时,根长逐渐变短,显著低于对照。总之,萌发期和成株期芸芥对NaCl+Na₂SO₄+NaHCO₃+Na₂CO₃混合盐碱胁迫的耐受性不同,苗期可溶性糖和脯氨酸作为主要的调节物质在芸芥适应较高浓度盐碱逆境中起到了重要作用。

关键词:芸芥;混合盐碱;萌发期;幼苗期;成株期;生长发育;生理机制

中图分类号:S565.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1007–9084(2018)04–0544–08

Effects of mixed salt – alkaline on growth and physiological characteristics in *Eruca sativa*

FAN Hui – ling, BAI Sheng – wen*, LIU Zhao, LI Zhen – zhou, HE Zhi – jun, ZHU Xue – feng, QIN Ming – gang

(College of Agriculture and Biotechnology, Hexi University, Zhangye 734099, China)

Abstract: To assess the tolerance of *E. sativa* to mixed salt – alkaline in different growth phase, and to reveal physiological mechanisms responding to salt – alkaline stress, the experiments were conducted using different concentration of salt – alkaline during germination, seedling stage and adult stage. Our results showed that: (1) At germination stage, initial germination was delayed but the seed vigor was not lost when stressed under low concentration of 20 mmol·L⁻¹ and 30 mmol·L⁻¹ mixed salt – alkaline. Under 40 mmol·L⁻¹ salt – alkaline stress, the germination potentiality and germination rate were significantly lower than that of the control group. When the concentration was higher than 50 mmol·L⁻¹, the seed vigor were lost completely. (2) Relative water content of leaves (RWC) had negative correlation with the level of salt – alkaline concentration and the stress time. When the salt – alkaline concentration was higher than 40 mmol·L⁻¹, RWC was decreased significantly, but malondialdehyde (MDA) content was increased obviously. Both proline and soluble sugar content were significantly increased with the increasing of salt – alkaline concentration and time prolong, but the soluble protein content was reduced gradually, which indicated that the adaptation of *E. sativa* seedling to saline – alkali stress depended partly on the accumulation of organic material such as soluble sugar and proline etc. (3) At adult stage, effects of salt – alkaline stress on plant height and flowering period were considered, there were no significantly difference between the ex-

perimental group and control group when concentration of salt – alkaline was low (20 and 30 mmol · L⁻¹). When salt – alkaline concentration was 40 mmol · L⁻¹ to 50mmol · L⁻¹, compared with CK, the experimental group presented shorter plants height, delayed flowering period and less number of efficient horns per plant. *E. sativa* failed to seed when the concentration of salt – alkaline was 60 mmol · L⁻¹. Vegetative and reproductive growth were inhibited seriously, or even death as the concentration of salt – alkaline was 70 mmol · L⁻¹. Root length, fresh weight, dry weight and water content were inhibited under salt – alkaline stress of different concentrations, especially the fresh root weight. When the concentration was less than 30 mmol · L⁻¹, root length was longer than CK, while it was significantly shorter than CK when the concentration was higher than 40 mmol · L⁻¹. In conclusion, salt – alkaline (NaCl + Na₂SO₄ + NaHCO₃ + Na₂CO₃) tolerance in *E. sativa* at germination stage and adult stage were different, soluble sugar and proline as the main organic substances played an important role in adapting to high salt – alkaline stress.

Key words: *Eruca sativa*; mixed salt – alkaline; germination stage; seedling stage; adult stage; growth and development; physiological mechanisms

盐碱胁迫已成为仅次于干旱胁迫的第二大阻碍作物正常生长发育的不利因素,在这种非生物逆境下,作物表现出生长缓慢、黄化早衰、品质下降以及产量降低等^[1]现象,对农业生产造成极大危害。河西走廊属典型干旱荒漠大陆性气候,该区域内分布着 179.8 万公顷的盐碱地^[2],土壤盐害成分很复杂,主要的致害离子有 Na⁺、Cl⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻、SO₄²⁻^[3]。田间的盐胁迫多数为混合胁迫,土壤盐胁迫与碱胁迫往往相伴发生,从而给许多地区带来严重的问题。因此,采用混合盐碱(NaCl + Na₂SO₄ + NaHCO₃ + Na₂CO₃)代替单盐(NaCl 或 Na₂SO₄ 或 Na₂CO₃)来研究作物耐盐碱性更能反映田间盐碱胁迫情况,对于作物耐盐碱育种研究具有重要意义。

芸芥(*Eruca sativa* Mill)泛指芝麻菜属的所有种,是一种药、油、蔬多用途作物。在长期的栽培过程中,芸芥群体积累了较多的优良抗逆基因资源,具有较强的抗旱、耐瘠薄、抗白粉病、耐低温等特性,因此是十字花科植物育种的重要资源^[4]。从野生和栽培环境可以推测,芸芥还具有一定的耐盐性^[5]。目前对于芸芥的研究主要集中在对地上部分,或仅采用单盐,如 NaCl^[6]或 Na₂SO₄^[7]胁迫下芸芥生理指标研究,而对于混合盐碱胁迫下芸芥叶片、根系、生理响应特征方面的系统研究极少。由于芸芥分布地区土壤盐分的复杂性,采用单盐胁迫不能全面反映田间实际情况,得到的结果对于进行耐盐机理分析以及指导育种研究均有一定的局限性。

本试验采用由两种中性盐(NaCl: Na₂SO₄ = 1: 9)和两种碱性盐(Na₂CO₃: NaHCO₃ = 1: 9)组成的混合盐碱来模拟芸芥分布地区田间土壤盐分组成状况,并设定不同浓度,包括 0、20、30、40、50、60 和 70mmol · L⁻¹的盐碱溶液,对芸芥进行芽期、苗期和

成株期胁迫试验,并测定了不同指标,通过不同指标的变化特征评价芸芥对混合盐碱胁迫的耐受性,初步探明芸芥在混合盐碱胁迫下的生理变化机制,为挖掘耐盐芸芥种质资源并为河西走廊盐碱地区合理种植芸芥提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

陇西芸芥种子由河西学院农业与生物技术学院农学教研室提供。试验前挑选饱满一致的种子,在 70% 酒精中浸泡 30s,用 40% 次氯酸钠溶液消毒 15min,无菌水清洗 3 次,晾干后备用。

1.2 试验设计和盐溶液配置

所有试验均采用随机区组设计,重复 3 次。选用 1/2 Hoagland 营养液^[8],在营养液中加入 NaCl、Na₂SO₄、Na₂CO₃ 和 NaHCO₃ 四种盐,分别配置浓度为 20、30、40、50、60 和 70mmol · L⁻¹的混合盐碱溶液,并选择不加盐的营养液作对照。混合盐碱溶液由两种中性盐(NaCl: Na₂SO₄ = 1: 9)和两种碱性盐(Na₂CO₃: NaHCO₃ = 1: 9)组成,具体比例见表 1。

1.3 芸芥种子芽期胁迫试验

参照王治江等^[9]的方法并略加修改,用浓度分别为 20、30、40、50、60 和 70mmol · L⁻¹的混合盐碱溶液进行胁迫处理,以蒸馏水为对照(CK)。将种子置于智能人工气候箱中发芽,白/夜温度为 25℃/20℃,时间为 14h/10h,光照为 6 000 Lx,湿度 75%。试验过程中每天采用称重补水法按时补充水分,以保持培养皿内盐浓度不变,并统计发芽种子数(发芽标准以胚根突破种皮达到种子长为发芽)。处理和对照均设 3 次重复,每个重复 50 粒种子,以滤纸为发芽床。从胁迫处理后第 2d 开始,每天调查各处

理发芽数,共计 7d,计算发芽势、发芽率以及相对盐害率。发芽第 10d,每个处理中随机取 10 个芽苗,用蒸馏水洗净,滤纸吸干表面水分,立即用分析天平

称其鲜重。同时,每个培养皿随机取 10 个芽苗,用直尺测量胚根长和胚轴长。

表 1 混合盐碱溶液的离子浓度及其所含盐分质量
Table 1 Ion concentration of mixed salt – alkaline solution and weight of salt and alkaline

盐碱溶液浓度 Solution concentration /(mmol · L ⁻¹)	离子浓度 Ion concentration/(mmol · L ⁻¹)					盐分质量 Weight/g			
	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃
20	30	1.0	9.0	9.0	1.0	0.058 5	0.756 0	1.278 0	0.106 0
30	45	1.5	13.5	13.5	1.5	0.087 8	1.134 0	1.917 0	0.159 0
40	60	2.0	18.0	18.0	2.0	0.117 0	1.512 0	2.556 0	0.212 0
50	75	2.5	22.5	22.5	2.5	0.146 3	1.890 0	3.195 0	0.265 0
60	90	3.0	27.0	27.0	3.0	0.175 5	2.268 0	3.834 0	0.318 0
70	105	3.5	31.5	31.5	3.5	0.204 8	2.646 0	4.473 0	0.371 0

相对盐害率 = (对照发芽率 - 处理发芽率) / 对照发芽率 × 100%

采用发芽率、芽苗鲜重、胚根长和相对盐害率等指标评价混合盐碱胁迫对芸芥种子萌发和芽苗生长的影响。

1.4 芸芥苗期胁迫试验和耐盐生理指标测定

1.4.1 盆栽试验 参照刘自刚等^[10]的方法并略加修改,将试验用种播于盛有厚度一致(10cm)蛭石的塑料花盆中,每钵播种 10 粒,上覆 0.5cm 厚蛭石,对照与各处理均重复 3 次,放置在无加热的温室大棚中培养。种子发芽期正常浇水,出苗后间苗,并浇灌 1/2 Hoagland 营养液,每盆留幼苗 5 株。待生长至 5 片真叶时,添加含有 20、30、40、50、60 和 70mmol · L⁻¹ 的 1/2 Hoagland 营养液。分别在盐处理 14d、28d 和 42d 后剪取同一部位叶片,用去离子水清洗 2 次,自然晾干进行各项指标测定。

1.4.2 叶片相对含水量和保水力的测定 叶片组织含水量和保水力的测定均参照陈松河^[11]的方法,相对含水量按下式计算。

相对含水量 = (组织鲜重 - 组织干重) / (饱和鲜重 - 组织干重) × 100%

叶片保水力的测定方法:在室内自然干燥条件下,取相同部位鲜叶在 48h 内定时称重直至基本恒重,计算每一时期累计失水量占总水分含量的百分比,即失水率,失水率越大,则保水力越小。

1.4.3 丙二醛、可溶性蛋白质、可溶性糖和脯氨酸含量的测定 参照高俊风的方法^[12],采用磺基水杨酸法测定脯氨酸含量,蒽酮比色法测定可溶性糖含量,考马斯亮蓝 G - 250 染色法测定可溶性蛋白质含量,硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量。

1.5 芸芥成株期胁迫试验

按上述 1.4.1 中描述的盆栽试验进行培养,各盐浓度重复 3 次(盆),每盆留苗 3 ~ 5 株,观察、记

载植株地上部生长发育情况并拍照。

采用根重、根长和含水量等指标来分析混合盐碱胁迫对根系生长的影响特征。待芸芥成熟时,小心将植株从蛭石中取出,并剪下根系,在自来水中漂洗数次,直至将蛭石完全洗净,然后用蒸馏水漂洗 2 次,自然晾干表面水分后,置于纸信封中,立即称其鲜重(FW)。用直尺测量根的长度。将根按单株置于烘箱中,105℃下杀青 20min,80℃下烘干至恒重,冷却至室温后称取干重(DW),计算根组织含水量(DWC)。

DWC = (FW - DW) / DW × 100%

1.6 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2003 软件整理数据,并针对脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白质含量作图,采用 DPS 7.05 统计软件进行方差显著性分析与 LSD (P < 0.05)多重比较。

2 结果与分析

2.1 混合盐碱胁迫对芸芥种子萌发和芽苗生长发育的影响

由表 2 可知,不同浓度混合盐碱处理均降低了芸芥种子的发芽势和发芽率,芽苗鲜重、胚轴长和胚根长也低于对照。但是低浓度胁迫时(20 和 30mmol · L⁻¹),发芽势仍分别达到 77% 和 84%,发芽率也高达 92% 和 99%,相对盐害率较低,说明低浓度胁迫主要延迟了芸芥种子的萌发时间,对种子的活力影响较小;当浓度 ≥ 40mmol · L⁻¹ 时,发芽势和发芽率均显著低于对照值,胚轴、胚根长均显著变短,严重抑制了芸芥种子的萌发和芽苗的生长。因此,可选用 40mmol · L⁻¹ 的混合盐碱溶液鉴定不同芸芥材料在芽苗期的耐盐性。混合盐碱浓度在 50 ~ 70mmol · L⁻¹ 之间,芸芥种子不能发芽,说明高浓度混合盐碱完全抑制了种子的萌发。

混合盐碱胁迫对芸芥不同性状的影响程度不同。20~40mmol·L⁻¹胁迫下,胚根长分别降低到对照的14.3%、20.0%和6.1%,胚轴长降低到对照的48.5%、63.6%和39.7%,而芽苗鲜重降低到对

照的89.2%、97.3%和76.2%。这些结果表明,混合盐碱胁迫对胚根长的影响最大,对胚轴长的影响次之,对芽苗鲜重的影响最小。因此,鉴定发芽期芸芥的耐盐性时可选择胚根长作为鉴定指标。

表 2 不同浓度混合盐碱胁迫对芸芥种子萌发指标的影响
Table 2 Effects of mixed salt – alkaline stress on germination indexes in *E. sativa*

浓度 Concentration/ (mmol·L ⁻¹)	发芽势/% Germination potential	发芽率/% Germination rate	相对盐害率/% Injuring rates	鲜重/g Fresh weight	胚轴长/cm Hypocotyl length	胚根长/cm Radicule length
CK	100±0.0a	99±0.2a	0±0.0a	0.018 5±0.000 7a	2.97±0.08a	4.05±0.05a
20	77±0.0c	92±1.5b	7±0.5b	0.016 5±0.013 0b	1.44±0.41b	0.58±0.26c
30	84±0.1b	99±0.1a	0±0.0a	0.018 0±0.0290a	1.89±0.59c	0.81±0.40b
40	18±0.8d	49±0.3c	51±0.1c	0.014 1±0.166 1c	1.18±0.12d	0.25±0.07d
50	0±0.0e	0±0.0d	100±0.0d	0.000 0±0.000 0d	0.00±0.00e	0.00±0.00e
60	0±0.0e	0±0.0d	100±0.0d	0.000 0±0.000 0d	0.00±0.00e	0.00±0.00e
70	0±0.0e	0±0.0d	100±0.0d	0.000 0±0.000 0d	0.00±0.00e	0.00±0.00e
平均值 Mean	29.8	40	59.60	0.008 2	0.75	0.27
相对值 Relative value/%	29.8	40	—	44.32	25.25	6.67

注:不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$),以下同
Notes: Different letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level. Same as below

2.2 混合盐碱胁迫对芸芥苗期叶片水分生理及渗透调节物质的影响

2.2.1 对叶片组织相对含水量及叶片保水力的影响 从表3可以看出,芸芥叶片组织相对含水量与混合盐碱浓度和胁迫时间均呈负相关关系。在同一

取样时间内,随着混合盐碱浓度的增大,叶片相对含水量总体呈下降趋势。胁迫14d、28d和42d后,各胁迫处理叶片相对含水量的均值依次为70.02%、63.82%和58.22%,较对照值分别降低了28.94%、9.88%和16.88%。

表 3 混合盐碱胁迫对芸芥叶片相对含水量的影响
Table 3 Effects of mixed salt – alkaline stress on DWC of *E. sativa*/%

浓度 Concentration /(mmol·L ⁻¹)	相对含水量 DWC		
	盐碱胁迫 14 d Salt – alkaline stress for 14 d	盐碱胁迫 28 d Salt – alkaline stress for 28 d	盐碱胁迫 42 d Salt – alkaline stress for 42 d
CK	98.53±0.02a	70.82±2.86a	70.04±0.06a
20	78.35±2.45b	70.81±0.01a	67.00±1.00b
30	75.86±0.58bc	69.03±2.25a	60.77±3.21c
40	73.35±0.05c	64.72±2.49b	59.33±2.75c
50	66.00±2.94d	60.55±0.51c	56.47±0.06d
60	66.17±2.69d	61.36±2.03c	52.97±0.05e
70	60.37±0.40e	56.43±0.75d	52.80±0.72e
平均值 Mean	70.02	63.82	58.22
(对照 – 平均)/对照/% (CK – Mean)/CK	28.94	9.88%	16.88%

表 4 混合盐碱胁迫对芸芥叶片保水力(失水率)的影响
Table 4 Effects of mixed salt – alkaline stress on water holding capacity of *E. sativa* leaves/%

浓度 Concentration /(mmol·L ⁻¹)	失水率 Percentage of water lost								
	2h	4h	6h	8h	10h	24h	32h	48h	Mean Sequence
CK	14.34	32.17	37.83	41.45	45.06	72.41	78.07	92.05	51.67 7
20	29.28	37.14	42.51	46.82	50.69	77.53	81.77	90.95	57.09 6
30	30.77	38.84	44.49	48.60	52.11	78.83	81.24	90.02	58.11 5
40	29.04	38.21	44.27	49.12	53.43	81.37	84.33	89.58	58.67 4
50	39.81	42.83	48.68	53.30	57.36	85.75	88.30	90.47	63.31 3
60	43.04	54.60	58.82	61.00	62.86	77.96	79.59	90.52	66.05 2
70	42.73	53.43	61.11	66.94	71.47	89.99	89.23	90.12	70.63 1
平均值 Mean	35.78	44.17	49.98	54.30	57.99	81.90	84.08	90.28	62.31

注:表中数据为混合盐碱胁迫第42d的测定结果
Notes: Data are the results under salt – alkaline stress for 42d

由表4可知,随盐碱浓度增大,叶片失水率逐渐升高。不同浓度胁迫下的平均失水率为62.31%,较对照(51.67%)升高了20.59%。这说明混合盐碱胁迫不同程度地降低了芸芥叶片的保水力,其中70mmol·L⁻¹胁迫对叶片保水力的影响最大,失水率比对照高36.69%。

2.2.2 混合盐碱胁迫对芸芥苗期叶片渗透调节物质含量的影响 由表5可知,在低浓度混合盐碱胁迫下,叶片丙二醛(MDA)含量比对照降低,当胁迫浓度为40mmol·L⁻¹开始,MDA含量随胁迫浓度增加显著高于对照,且随胁迫浓度增加和胁迫时间延长呈增加趋势,即细胞膜脂过氧化或细胞膜受破坏的程度明显加重。胁迫28d和42d后叶片丙二醛含量分别较胁迫14d后的高2.78和3.24μmol·g⁻¹。

盐碱胁迫28d后,低浓度盐碱胁迫下可溶性蛋白质含量均显著大于对照值,也显著高于其它浓度

胁迫下的测定值,这说明30mmol·L⁻¹处理有利于叶片中可溶性蛋白质的累积;当盐碱浓度≥40mmol·L⁻¹时,可溶性蛋白质含量显著下降,60和70mmol·L⁻¹处理间差异不显著;胁迫42d后,随着盐碱浓度的增加,可溶性蛋白质的含量逐渐减小,不同浓度胁迫处理下蛋白质含量均低于对照。

叶片可溶性糖含量随胁迫浓度的增大而逐渐增大,且各浓度胁迫下可溶性含量显著高于对照值。20和30mmol·L⁻¹胁迫下可溶性糖含量差异较小,40和50mol·L⁻¹浓度处理间差异亦较小,当浓度为70mmol·L⁻¹时,可溶性糖含量达最高。

芸芥叶片脯氨酸含量随混合盐碱浓度的增加呈上升趋势。不同浓度盐碱胁迫下,叶片脯氨酸含量与对照值间均达显著差异水平,当盐碱浓度≥50mmol·L⁻¹时,脯氨酸含量与较低浓度(如20和30mmol·L⁻¹)处理下的脯氨酸含量间达显著差异。

表5 混合盐碱胁迫下芸芥叶片渗透调节物质含量的变化
Table 5 Changes of mixed salt – alkaline stress on osmotic adjustment substances content of *E. sativa*

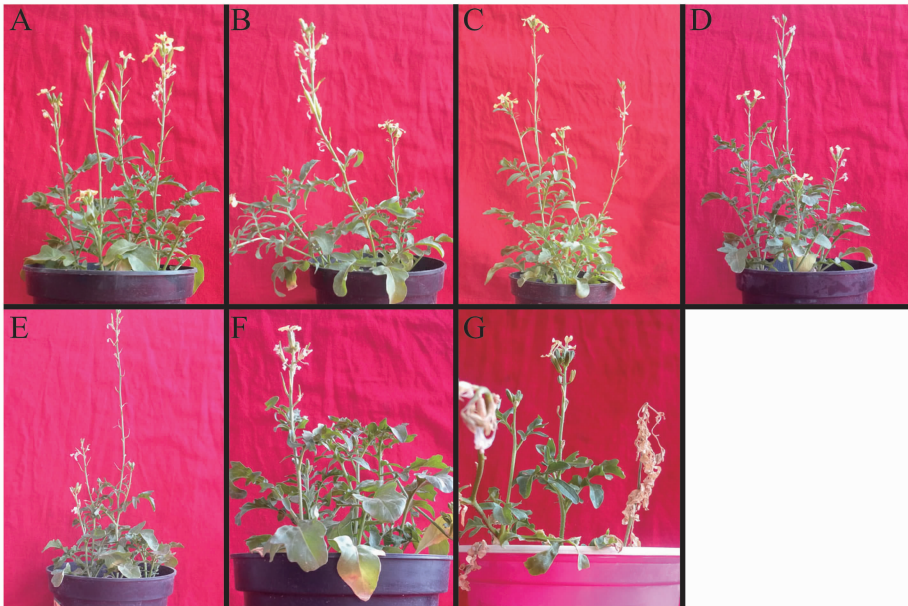
浓度 Concentration /(mmol·L ⁻¹)	丙二醛含量 MDA content /(μmol·g ⁻¹)			可溶性蛋白质 Soluble proteins content/(mg·g ⁻¹)		可溶性糖含量 Soluble sugar content/(mg·g ⁻¹)		游离脯氨酸含量 Proline content /(μg·g ⁻¹)	
	14d	28d	42d	28d	42d	28d	42d	28d	42d
CK	2.31±0.02d	5.18±0.02e	5.67±0.18bc	3.65c	4.09a	0.31f	0.43e	70.20f	81.83f
20	1.93±0.02 e	3.28±0.01g	4.16±0.07d	4.04b	3.84b	0.46e	0.66d	76.23e	97.59e
30	2.45±0.12cd	4.19±0.04f	5.34±0.07c	4.52a	3.30c	0.49d	0.69d	91.06d	98.67e
40	2.52±0.06c	5.53±0.21d	6.02±0.02b	3.26d	2.65d	0.56c	0.87c	118.66c	121.03d
50	2.71±0.00b	6.49±0.23b	6.08±0.27b	2.82e	2.43e	0.57c	0.97b	146.31b	138.33c
60	3.21±0.05a	6.25±0.02c	6.74±0.02a	2.36f	2.43e	0.59b	1.00b	149.33a	153.97b
70	3.20±0.07a	6.98±0.17a	7.12±0.47a	2.34f	1.35f	0.64a	2.14a	150.39a	158.45a

2.3 混合盐碱胁迫对芸芥成株期植株地上部生长发育及根系生长特征的影响

2.3.1 对地上部生长的影响 如图1所示,20和30mmol·L⁻¹低浓度胁迫下,株高和开花期较对照相差不大,每个植株上都能结有效角果。在40和50mmol·L⁻¹盐碱胁迫下,株高较对照低,开花期较对照晚,单株角果数少,且有空角果出现,有些角果中种子干瘪或败育。60和70mmol·L⁻¹盐碱胁迫对植株的伤害较严重,受害症状主要表现为:株高明显降低,茎基部老叶较幼叶先受到伤害,叶片边缘先出现黄化或褐斑症状,其后向叶片中脉逐渐延展;盐碱胁迫后期,部分植株的整片叶黄化、脱落,地上部全部变成青枯状甚至死亡;生殖生长期,有些植株不能现蕾,有些虽能现蕾但后期不能开花。

2.3.2 对根系生长特性的影响 由表6所示,不同浓度盐碱处理后,根系平均鲜重、干重和含水量随盐

碱浓度增大呈下降趋势,尤其是50、60和70mmol·L⁻¹三个高浓度处理下,显著低于对照和其它较低浓度处理。而对根长而言,低浓度盐碱胁迫对芸芥根长有一定的促进作用,尤其是30mmol·L⁻¹胁迫处理下,根长较对照长0.90cm;盐碱浓度≥40mmol·L⁻¹时,随浓度增大根长逐渐变短,70mmol·L⁻¹盐碱胁迫处理下,芸芥根长仅6.63±0.02cm,比对照值低2.85cm。虽然在盐碱胁迫下各性状总体呈下降趋势,但是响应程度各有不同,40mmol·L⁻¹胁迫下,鲜重、干重、含水量及根长分别为对照的48.5%、74.4%、73.9%和92.2%,70mmol·L⁻¹胁迫下,鲜重、干重、含水量及根长分别为对照的15.5%、25.6%、41.9%和78.2%。这说明根系鲜重对混合盐碱胁迫的反应最敏感,可选作判断成株期芸芥耐盐性指标之一。



注/Note: A:CK; B:20mmol · L⁻¹; C:30mmol · L⁻¹; D:40mmol · L⁻¹; E:50mmol · L⁻¹; F:60mmol · L⁻¹; G:70mmol · L⁻¹

图 1 混合盐碱胁迫对芸芥植株生长发育的影响

Fig. 1 Effects of mixed salt – alkaline stress on plants growth and development of *E. sativa*

表 6 混合盐碱胁迫对芸芥根重、根长和根含水量的影响

Table 6 Effects of mixed salt – alkaline on root weight,length and water content of *E. sativa*

浓度 Concentration /(mmol · L ⁻¹)	鲜重 Fresh weight/g	干重 Dry weight/g	含水量 Water content/%	根长 Root length/cm
CK	1.03 ± 0.06a	0.43 ± 0.01a	61.88 ± 0.01a	8.48 ± 0.08b
20	0.82 ± 0.02b	0.39 ± 0.01b	52.02 ± 1.12c	8.58 ± 0.01b
30	0.72 ± 0.03c	0.34 ± 0.00c	54.48 ± 0.00b	9.48 ± 0.17a
40	0.50 ± 0.02d	0.32 ± 0.00d	45.73 ± 0.02d	7.82 ± 0.23c
50	0.20 ± 0.00e	0.14 ± 0.00e	36.23 ± 0.40e	7.66 ± 0.04cd
60	0.19 ± 0.00e	0.11 ± 0.00f	28.76 ± 0.00f	7.52 ± 0.00d
70	0.16 ± 0.01e	0.11 ± 0.01f	25.90 ± 0.05g	6.63 ± 0.02e
平均值 Mean	0.43	0.24	40.52	7.93
相对值 Relative value	41.72%	54.15%	65.48%	92.42%

3 讨论

3.1 芸芥对混合盐碱胁迫的耐受性

迄今为止,将 NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃ 和 Na₂CO₃ 四种盐分按照不同比例混合,采用混合盐碱胁迫研究其对植物种子萌发和幼苗生长的影响,在紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)^[13]、白三叶种子 (*Trifolium repens*)^[14]、高粱 (*Sorghum bicolor* Moench)^[15] 等植物上均有报道,而在芸芥乃至近缘植物上报道较少。本试验以由两种中性盐 (NaCl: Na₂SO₄ = 1: 9) 和两种碱性盐 (Na₂CO₃: NaHCO₃ = 1: 9) 组成的混合盐碱为胁迫处理溶液,分别对萌发期芸芥种子的发芽势、发芽率、胚根长、芽苗长,苗期 (包括 14d、28d 和 42d 三个时期) 芸芥叶片的丙二醛、脯氨酸、可溶性蛋白质、可溶性糖和相对含水量等指标,成株期芸芥植株生长情况和根系变化特征进行了研究,以期探

明芸芥对混合盐碱胁迫的耐受性及生理调节机制,为今后筛选耐盐性不同的芸芥乃至近缘植物提供参考依据。

3.2 萌发期芸芥对混合盐碱胁迫的敏感浓度及敏感鉴定指标

种子萌发与早期幼苗生长阶段是作物能否在盐碱胁迫下完成生育周期最为关键的时期,芽期耐盐性的强弱影响出苗好坏^[16]。本研究结果发现,20 和 30mmol · L⁻¹混合盐碱胁迫下,芸芥种子的发芽势均低于对照值,但发芽率与对照值差异较小,这表明低浓度盐碱胁迫仅仅推迟了种子的萌发时间,并没有使之失去活力。盐胁迫下油菜 (*Brassica napus*) 种子的萌发也表现类似的结果^[17];40mmol · L⁻¹混合盐碱胁迫下,发芽势和发芽率显著低于对照,仅极少量种子能发芽,其余种子因渗透胁迫造成吸水困难,最终导致非正常发芽,如有芽无胚根、有胚根而

无胚芽、胚根腐烂、子叶死亡、甚至种子坏死等现象; $\geq 50\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 混合盐碱胁迫下,芸芥种子不能萌发,这时高盐高碱的共同作用已经超过种子的耐受限度,造成永久性毒害,使种子完全丧失活力。盐碱胁迫对种子萌发的影响多以对胚根的影响作为指标之一^[18],本试验结果也发现,混合盐碱胁迫对芸芥不同性状值的影响程度不同,对胚根长的影响最大,因此在判断不同芸芥材料萌发期的耐盐性时,首先选择胚根长作为鉴定指标。

3.3 芸芥在混合盐碱胁迫下根系相关指标的变化特征

混合盐碱胁迫对绿豆(*Vigna radiata*)种苗胚根重量可产生显著影响^[19]。本研究中发现,盐碱胁迫对成株期根系长度、鲜重、干重和含水量均有一定的抑制作用,但对根重影响最大,其主要原因可能是根组织直接暴露在盐碱环境而遭受生理干旱的吸水障碍,同时在高 pH 环境的双重作用下,导致呼吸作用等生理过程受到影响,吸收的水分不足以支撑细胞代谢,从而导致根组织中物质合成量的下降。本试验结果还表明,混合盐碱胁迫对芸芥根系长度影响较大,混合盐碱 $\leq 30\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,根长较对照增加,混和盐碱 $\geq 40\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,根长逐渐变短,且与对照差异显著,这说明低浓度混合盐碱条件可以促进根系的伸长,而高浓度盐碱对根系的伸长起到显著抑制作用。由于试验条件的限制,对于盐碱胁迫下根系空间分布、走向以及根系自身对盐碱的调节能力还有待进一步研究。

3.4 苗期芸芥 MDA 与渗透调节物质对混合盐碱胁迫的响应

MDA 含量高低可反映植物在逆境条件下的损伤程度。MDA 含量越高,膜脂过氧化程度越高,抗逆性则越弱。本试验结果表明, $\leq 30\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 低盐胁迫下,芸芥叶片 MDA 含量较对照值降低,出现这种现象可能是由于补充的 Na^+ 有利于芸芥的生长发育所致。之后,随着混合盐碱浓度的增加,芸芥叶片中 MDA 含量逐渐增加,当浓度 $\geq 40\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MDA 含量积累均显著高于对照,表明叶片质膜受破坏的程度逐渐加重。这一结果与萌发期芸芥所测定的相关发芽指标和成株期芸芥植株生长变化的特征基本一致。

在盐胁迫下,植物细胞内可积累诸如脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白等有机物质以调节细胞内的渗透势,维持水分平衡。随混合盐碱胁迫浓度的增加和胁迫时间的延长,芸芥叶片可溶性糖含量亦呈增加的趋势,其中胁迫 28d 后的结果随浓度增大表现

缓慢上升,而胁迫 42d 后的结果随浓度增大呈现快速上升,出现这种现象可能是由于当胁迫浓度增大到一定值时,细胞内外出现渗透不平衡,可溶性糖会迅速大量增加,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升高到一定量以后,随盐浓度增大其增加幅度比较缓慢,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含量出现再下降的胁迫浓度。本试验中,随混合盐碱浓度的增加,芸芥叶片可溶性蛋白含量逐渐降低。这与前人在盐胁迫下玉米幼苗中可溶性蛋白含量的变化规律基本一致^[20]。出现这些结果是由于盐胁迫降低了蛋白质的合成速率,或者是加速了储藏蛋白质的水解所致。在盐碱、干旱等逆境胁迫下,植物体内游离脯氨酸的含量会明显升高,以降低细胞的水势,避免细胞脱水,且可以在高渗溶液中获得水分,以维持正常的新陈代谢。本试验结果发现,随混合盐碱溶液浓度的增加,芸芥叶片中脯氨酸含量也相应增加,且显著高于对照值,说明混合盐碱胁迫下芸芥可通过增加脯氨酸含量来维持细胞的渗透平衡。因此,芸芥幼苗期对混合盐碱胁迫的适应可能主要取决于可溶性糖和脯氨酸等有机渗透物质的积累。

综上所述,萌发期和成株期芸芥对混合盐碱胁迫的耐受性不同。 $\geq 40\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 混合盐碱胁迫严重抑制芸芥种子萌发,其它指标也显著下降。 $\geq 60\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 高浓度盐碱胁迫能使芸芥植株生理调节机能遭到严重破坏,使生长受到明显抑制甚至死亡。芸芥幼苗对一定浓度盐碱胁迫的适应能力主要取决于脯氨酸和可溶性糖等有机物质的大量累积,但从整体水平上阐明其耐盐碱生理机制尚需进一步深入研究。植物的耐盐碱性属于多基因控制的数量性状,本研究无论从试验材料的数量,还是生长发育及生理指标方面均不够全面,进一步深入、全面的研究需要增加其它试验材料和耐盐鉴定指标。

参考文献:

- [1] 陈 新,张宗文,吴 斌.裸燕麦萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选[J].中国农业科学,2014,47(10): 2 038 - 2 046.
- [2] 杨自辉,王继和,纪永福,等.河西走廊盐碱地治理模式研究[J].土壤通报,2005,36(4):479 - 482.
- [3] 韩多红,张 勇,晋 玲.碱性盐及混合盐碱胁迫对蒙古黄芪种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].中草药,2013,43(12):1 662.
- [4] 杨玉萍.我国芸芥的分布区域和品质特性及研究价值[J].甘肃农业科技,2001(7):15 - 17.

- [5] 孙万仓. 中国芸芥的分布、类型划分及油菜 - 芸芥杂交亲和性研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2000.
- [6] Ashraf M . Organic substances responsible for salt tolerance in *Eruca sativa* [J]. Biol Plantarum,1994,36(2): 255 - 259.
- [7] Hilda A, Babak D H, Azra A A. Morpho - physiological responses of Rocket (*Eruca sativa* L.) varieties to sodium sulfate (Na_2SO_4) stress: an experimental approach [J]. Acta Physiol Plant,2016,38:246.
- [8] 闫旭东. 植物耐盐性鉴定及评价技术规程[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2012.
- [9] 王治江,刘自刚,孙万仓,等. NaCl 和 Na_2SO_4 胁迫对白菜型冬油菜种子萌发的影响及其耐盐性分析[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(6):243 - 252.
- [10] 刘自刚,王志江,方 圆. NaCl 胁迫对白菜型冬油菜种子萌发和幼苗生理的影响[J]. 中国油料作物学报,2017,39(3):351 - 359.
- [11] 陈松河. 竹类植物耐盐性研究与园林应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [12] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2016.
- [13] 张晓磊,刘晓静,齐敏兴,等. 混合盐碱对紫花苜蓿苗期根系特征的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21(3):340 - 346.
- [14] 殷秀杰,燕昌江,李凤兰. 混合盐碱胁迫对白三叶种子萌发的影响[J]. 东北农业大学学报,2009,40(12):59 - 61.
- [15] 李玉明,石德成,李毅丹. 混合盐碱胁迫对高粱幼苗的影响[J]. 杂粮作物,2002,22(1):41 - 45.
- [16] 刘敏轩,张宗文,吴 斌. 黍稷种质资源芽、苗期耐中性混合盐胁迫评价与耐盐生理机制研究[J]. 中国农业科学,2012,45(18):3 733 - 3 743.
- [17] 许耀照,曾秀存,方 彦,等. 盐碱胁迫对油菜种子萌发和根尖细胞有丝分裂的影响[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(4):14 - 17.
- [18] 李海燕,丁雪梅,周 婵,等. 盐胁迫对三种盐生禾草种子萌发及其胚生长的影响[J]. 草地学报,2004,12(1):45 - 50.
- [19] 殷丽华,徐 鹏,柯希望,等. 混合盐碱胁迫对绿豆种子萌发与幼苗生长发育的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2015,27(5):40 - 43.
- [20] 郭丽红,陈善娜,龚 明. NaCl 胁迫对玉米幼苗中谷胱甘肽还原酶活性及可溶性蛋白质含量的影响[J]. 昆明师范高等专科学校学报,2002,24(4):27 - 30.

(责任编辑:王丽芳)