

NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫对白菜型冬油菜种子萌发的影响及其耐盐性分析

王治江, 刘自刚, 孙万仓, 方彦, 武军艳, 刘海卿, 赵艳宁,
蒲媛媛, 袁金海, 钱武, 陈奇, 方园, 徐梦雪

(甘肃省油菜工程技术研究中心, 甘肃省干旱生境作物重点实验室,
甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃兰州 730070)

摘要: 以 6 个耐盐性不同的白菜型冬油菜种子为材料, 将 NaCl 和 Na₂SO₄ 按摩尔比 1:1 混合, 设浓度为 0 (CK)、45、90、135、180、240 mmol·L⁻¹ 6 个处理, 测定其对种子萌发和生长参数的影响, 研究不同冬油菜种子萌发时的耐盐能力, 以期对耐盐冬油菜的筛选提供依据。结果表明: (1) 45 mmol·L⁻¹ 和 90 mmol·L⁻¹ 盐浓度对种子萌发的影响不明显; 135 mmol·L⁻¹ 和 180 mmol·L⁻¹ 盐浓度明显抑制了种子萌发, 表现为种子发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、胚根长、胚芽长、鲜重和干重均随盐浓度的增大而明显降低。因此, 135 ~ 180 mmol·L⁻¹ 盐浓度可认为是耐盐性鉴定的适宜范围。 (2) 不同指标对盐胁迫的敏感程度差异较大, 发芽指数、活力指数、胚芽长和鲜重与盐浓度均为极显著负相关, 对盐胁迫最为敏感。 (3) 3 个耐盐冬油菜 ky-1、ky-10-191 和 ky-NDJ 的种子发芽指数、活力指数、胚芽长和鲜重的耐盐临界值显著高于原有品系平油 1 号、10-191 和 ky-NDJ。ky-1、ky-10-191、ky-NDJ 的耐盐临界值分别为 133.895、123.264、107.399 mmol·L⁻¹, 而平油 1 号、10-191、NDJ 的耐盐临界值分别为 117.394、103.947、93.834 mmol·L⁻¹。用隶属函数法综合评价, 耐盐性强弱顺序依次为 ky-1 > ky-10-191 > 平油 1 号 > ky-NDJ > 10-191 > NDJ。可见, ky-1、ky-10-191 和 ky-NDJ 的耐盐性较平油 1 号、10-191 和 NDJ 均有所提高。

关键词: NaCl; Na₂SO₄; 盐胁迫; 白菜型冬油菜; 种子萌发; 耐盐性

中图分类号: S565.4; S503.4 **文献标志码:** A

Effects of NaCl and Na₂SO₄ stress on germination of winter rapeseed (*Brassica rapa* L.) and analysis of salt resistance

WANG Zhi-jiang, LIU Zi-gang, SUN Wan-cang, FANG Yan, WU Jun-yan, LIU Hai-qing,
ZHAO Yan-ning, PU Yuan-yuan, YUAN Jin-hai, QIAN Wu, CHEN Qi, FANG Yuan, XU Meng-xue
(Rapeseed Engineering Research Center of Gansu Province, Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Sciences/Improvement and Key Laboratory of Crop Genetics and Germplasm Enhancement, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Winter rapeseeds' (*Brassica rapa* L.) seeds from six cultivars was treated by mixed solution of NaCl and Na₂SO₄ (mole ratio of 1:1) to investigate the salt tolerance for screening of salt tolerance winter rapeseed. The concentration of mixed solution included 0 (CK), 45, 90, 135, 180, 240 mmol·L⁻¹. Seed germination and growth parameters were determined. The results showed that salt concentration of 45 mmol·L⁻¹ and 90 mmol·L⁻¹ had little effect on seed germination but 135 mmol·L⁻¹ and 180 mmol·L⁻¹ significantly inhibited the germination of seeds, germination potential, germination rate, germination index, vigor index, length of radicle and plumule, fresh weight and dry weight, indicating that salt concentration of 135 ~ 180 mmol·L⁻¹ could be considered as the appropriate concentration of salt resistance identification. Moreover, the salt stress sensitivity of these indicators differed a lot. Germination index, vigor

收稿日期: 2016-02-15

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-13); 国家自然科学基金(31460356); 国家 863 计划(2011AA10A104); 国家 973 计划(2015CB150206); 国家农业科技成果转化项目(2014G10000317)

作者简介: 王治江(1987—), 男, 甘肃会宁人, 主要从事油菜育种工作。E-mail: wangzjde@163.com

通信作者: 刘自刚(1972—), 男, 甘肃天水人, 副教授, 博士生导师, 主要从事油菜育种及十字花科种质资源研究。E-mail: 1134137111@qq.com

index, plumule length and fresh weight and salt concentration were negatively correlated, suggesting that they were the most sensitive indicators. The salt tolerance critical value of ky - 1, ky - 10 - 191 and ky - NDJ were 133.895, 123.264, 107.399 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, while that of Pingyou 1, 10 - 191 and NDJ were 117.394, 103.947, 93.834 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The former was significantly higher than the latter. Comprehensive evaluation indicated that the salt-tolerance rank of six winter rapeseeds was ky - 1 > ky - 10 - 191 > Pingyou 1 > ky - NDJ > 10 - 191 > NDJ.

Keywords: NaCl; Na_2SO_4 ; salt stress; winter rapeseed (*Brassica rapa* L.); germination; salt Tolerance

由于自然因素和不合理的耕作、栽培等人为因素,我国北方地区土壤盐渍程度日渐恶化,仅西部陕、甘、宁、青、蒙、新 6 省(区)盐渍土地面积占全国盐渍土地面积(9 913 万 hm^2)的 69.03%^[1-2],严重影响作物产量和品质的提高。油菜是我国第一大油料作物,生长能力较强,具有油、饲、肥、观赏等多种用途,种植面积和产量仅次于加拿大,居世界第二^[3]。近年来,随着冬油菜不断向高纬度、高海拔地区北移和西扩,我国北方地区油菜生产格局发生巨大改变,种植面积进一步增加^[4-6],成为我国北方重要的油料作物与生态作物^[7]。因此开展白菜型冬油菜耐盐性研究,选育耐盐高产品种,对保障我国食用植物油供给,合理利用北方盐碱土地资源、发展盐水资源灌溉农业和生态环境建设具有极其重要的意义^[8]。研究发现,西北内陆盐渍土壤盐分组成以氯化物和硫酸盐-氯化物为主^[9-10]。目前,国内外对许多作物种子萌发期的耐盐性进行了研究。Giaveno^[11]等采用 NaCl 对 14 份玉米杂交种进行了耐盐性研究;龙卫华^[12]等对 15 个甘蓝型油菜自交系进行了耐盐性研究,筛选出耐盐性强的油菜品系 2 个,并提出 214 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 为鉴定油菜品系耐盐性的最适浓度;李士磊^[13]等采用 NaCl 和 Na_2SO_4 复合盐对小麦萌发期的胁迫效应进行了研究,结果表明,随着盐浓度的升高,小麦萌发期推迟,发芽率急剧下降;徐小玉等^[14]在波斯菊上研究发现,NaCl 和 Na_2SO_4 胁迫使波斯菊种子发芽率、发芽势、幼苗芽长、根长、鲜重均下降;武路广等^[15]研究了 NaCl 和 Na_2SO_4 两种单盐胁迫对白羊草种子萌发的影响,结果显示,NaCl 具有低盐促进高盐抑制的效应, Na_2SO_4 对种子萌发的抑制作用更加明显。种子萌发阶段对抗逆性的反应较为敏感,是植物生活史中至关重要的发育阶段之一^[16-17]。种子在萌芽期的耐盐程度可以反映该植物的耐盐性强弱,可以作为耐盐性筛选与鉴定的依据之一^[18]。长期以来,氯盐和钠盐被认为是造成植物盐胁迫伤害的主要原因,高浓度的氯盐和钠盐会使植物渗透压升高,吸水困难,从而导致生理干旱。然而对于中性盐复合胁迫对白菜型冬油菜种子萌发的影响及耐盐性分析的报道较少。因此,本试

验以 6 个耐盐性不同的白菜型冬油菜种子为材料,研究 NaCl 和 Na_2SO_4 胁迫对白菜型冬油菜种子萌发和生长参数的影响,综合分析其耐盐性状,旨在阐明白菜型冬油菜的耐盐性响应,并筛选耐盐冬油菜品系,以期为盐土资源的合理开发利用和冬油菜的发展提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 参试材料

以耐盐性不同的白菜型冬油菜 ky - 1、ky - NDJ、ky - 10 - 191 和平油 1 号、NDJ、10 - 191 为材料,其中 ky - 1、ky - NDJ、ky - 10 - 191 分别是平油 1 号、NDJ、10 - 191 3 个品系中经过两年筛选的耐盐材料,平油 1 号、NDJ、10 - 191 分别在甘肃省油菜工程技术研究中心上川试验基地盐碱圃种植(见 247 页图 1),该盐碱圃土壤含全盐 2.671%,其中含 HCO_3^- 0.482 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cl^- 0.722 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, SO_4^{2-} 1.371 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Ca^{2+} 0.184 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mg^{2+} 0.111 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Na^+ 2.573 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, K^+ 0.075 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 值为 8.9。

1.2 试验设计

取直径为 9 cm 的培养皿,酒精消毒洗净后,于 80℃ 烘箱内烘 12 h 后取出,待其恢复室温后底部铺放两层灭菌滤纸备用。挑选籽粒饱满、大小一致的油菜种子,用 3% H_2O_2 在三角瓶中消毒 5 min,用纱布过滤,蒸馏水冲洗 4~5 次,用滤纸吸干外附水分,将两种中性盐 NaCl 和 Na_2SO_4 按 1:1 的摩尔比例混合,设 0(CK)、45、90、135、180 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 240 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 6 个浓度梯度,将种子分别置于不同浓度盐溶液中浸种 5 h,从中随机取 30 粒种子,均匀排列,再向培养皿中加入相应处理液 8 ml 至滤纸水分饱和,每处理设 3 个重复,并称重记录各处理培养皿和种子的总重量,置于智能人工气候箱中发芽,白/夜温度为 25℃/20℃,时间为 14 h/10 h,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)。

1.3 测定指标与方法

(1) 发芽势(GE) = (3 天内发芽种子数/总种子

数) × 100%;

(2) 发芽率 (GR) = (7 天内发芽种子数/总种子数) × 100%;

(3) 发芽指数 (GI) = $\sum(Gt/Dt)$ (Gt 为第 t 天的发芽率, Dt 为天数);

(4) 活力指数 (VI) = 发芽指数 × 幼苗鲜重(g);

(5) 胚芽、胚根长度和干鲜重的测定: 发芽试验结束后每个处理分别取 10 株长势基本一致的胚苗(指: 种子子叶完全展开到真叶未出现之前), 用蒸馏水洗净, 滤纸吸干水分, 用分析天平称其鲜重, 然后在 105℃ 条件下杀青 15 min 后于 80℃ 烘箱内烘干至恒重, 并称其干重。同时, 每培养皿随机取 10 株胚苗测其芽长、根长;

(6) 耐盐半抑制浓度(临界值): 相应指标降低到对照的 50% 时所对应的盐溶液浓度^[19]。

1.4 综合评价方法

采用模糊数学隶属函数法进行各指标耐盐性综合评价, 公式为: $X(\mu) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, 其中: X 为参试材料某一指标的测定值, X_{\max} 和 X_{\min} 分别为该指标中的最大值和最小值。先求出各个指标在不同盐浓度下的隶属值, 再把每一指标在不同盐浓度下的隶属值累加求平均值, 最后再将每一材料不同指标的隶属值累加求其平均值, 平均值越大则表明其耐盐性越强。

1.5 数据处理

应用 SPSS 19.0 统计软件进行(单)双因素方差分析、Pearson 系数相关分析、线性回归分析, 并用 Excel 2010 制表、绘图。

2 结果与分析

2.1 盐浓度和基因型对种子萌发和生长参数的影响

不同盐浓度、不同油菜基因型对种子发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、胚芽长、胚根长、生物量的影响均为极显著($P < 0.01$), 且盐浓度和油菜基因型间存在极显著的交互作用(表 1)。由此可知, 随着盐浓度的增大, 种子发芽特性受到明显的抑制作用, 但因参试材料本身遗传特性的不同, 其耐盐性也存在明显的差异。因此, 种子在盐胁迫下能否萌发由盐浓度和品种特性两个因素共同决定。

2.2 NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫对白菜型冬油菜种子发芽势的影响

随着盐浓度的增加, 种子发芽势均呈降低趋势(表 2)。与对照相比, 45 mmol·L⁻¹ 盐浓度处理使 ky

-NDJ 和 NDJ 的种子发芽势显著下降, 而 ky-1、ky-10-191、平油 1 号和 10-191 下降不显著; 135 mmol·L⁻¹ 盐浓度处理均使各参试材料种子发芽势显著下降, 且出现较大的转折而基本呈直线降低; 当盐浓度达到 240 mmol·L⁻¹ 时, ky-NDJ 和 NDJ 的种子发芽势被明显推迟, ky-1 和 ky-10-191 的种子发芽势高于其它材料, 其变异系数也相对较小。

2.3 NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫对白菜型冬油菜种子发芽率的影响

种子发芽率对盐胁迫的敏感性存在明显差异(图 2, 表 3), 总体呈现出随着盐浓度的增大, 种子发芽率呈逐渐降低的趋势, 且盐浓度越大种子发芽受到的抑制程度越大。以耐盐冬油菜 ky-1 为例, 45 mmol·L⁻¹ 和 90 mmol·L⁻¹ 盐浓度处理对种子发芽率的影响不明显, 较 CK 未达到显著差异水平; 但 135 mmol·L⁻¹ 盐浓度使种子发芽率明显降低, 较 CK 显著下降 12.22%; 180 mmol·L⁻¹ 和 240 mmol·L⁻¹ 盐浓度处理下, 分别较 CK 下降 20.00% 和 65.56%, 达到显著差异水平。而平油 1 号的种子发芽率受盐胁迫的影响程度较深, 45 mmol·L⁻¹ 和 90 mmol·L⁻¹ 盐浓度处理下, 分别较 CK 下降 5.56% 和 8.89%, 差异达到显著水平; 135、180、240 mmol·L⁻¹ 盐浓度处理, 分别较 CK 显著下降 16.67%、28.89%、71.11%。盐胁迫对其它种子发芽率影响的变化趋势与 ky-1 和平油 1 号基本一致。

2.4 NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫对白菜型冬油菜种子发芽指数的影响

盐胁迫使冬油菜种子发芽指数大幅下降, 但筛选的耐盐冬油菜降低幅度均小于对应的不耐盐种子(表 4)。以 ky-1 为例, 当盐浓度为 45 mmol·L⁻¹ 时, 发芽指数较 CK 降低幅度较小, 为 4.48%, 未达到差异显著水平; 当盐浓度为 90、135、180、240 mmol·L⁻¹ 时, 发芽指数分别较 CK 显著降低 14.29%、46.72%、58.98%、86.02%。而平油 1 号的种子发芽指数随盐浓度的增大, 较 CK 均达到显著差异水平, 降低幅度更为明显, 浓度为 45、90、135、180、240 mmol·L⁻¹ 时, 分别较 CK 降低 20.97%、34.01%、55.36%、64.33%、89.52%。其变异系数明显高于耐盐冬油菜 ky-1。

2.5 NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫对白菜型冬油菜种子活力指数的影响

种子活力指数随盐浓度的降低而急剧上升, 最大活力指数均出现在无盐胁迫生境中(表 5)。如 ky-1 在 240 mmol·L⁻¹ 高盐胁迫下的活力指数为 0, 与

表 1 盐浓度和品种联合方差分析
Table 1 Two-way variance analysis of salt concentration and varieties

双因素方差分析 Two-way variance analysis	差异来源 Source	平方和 SS	均方 MS	F
发芽势 Germination potential	浓度 Concentration	7.33	1.47	492.92 ^{**}
	品系 Lines	0.88	0.18	59.22 ^{**}
	浓度 × 品系 Concentration × Lines	0.42	0.01	5.71 ^{**}
发芽率 Germination ratio	浓度 Concentration	7.99	1.60	566.75 ^{**}
	品系 Lines	0.51	0.10	36.28 ^{**}
	浓度 × 品系 Concentration × Lines	0.45	0.01	6.33 ^{**}
发芽指数 Germination index	浓度 Concentration	4510.56	902.11	1522.32 ^{**}
	品系 Lines	363.11	72.62	122.55 ^{**}
	浓度 × 品系 Concentration × Lines	89.65	3.59	6.05 ^{**}
活力指数 Vitality index	浓度 Concentration	1872.80	374.56	1868.93 ^{**}
	品系 Lines	122.25	24.45	122.00 ^{**}
	浓度 × 品系 Concentration × Lines	55.34	2.21	11.05 ^{**}
胚根长 Radicle length	浓度 Concentration	4319.46	863.89	2271.09 ^{**}
	品系 Lines	15.51	3.10	8.15 ^{**}
	浓度 × 品系 Concentration × Lines	12.91	0.52	1.36
胚芽长 Plumule length	浓度 Concentration	255.05	51.01	1066.49 ^{**}
	品系 Lines	2.01	0.40	8.41 ^{**}
	浓度 × 品系 Concentration × Lines	2.14	0.09	1.79 ^{**}
鲜重 Fresh weight	浓度 Concentration	4.39	0.88	2240.72 ^{**}
	品系 Lines	0.19	0.04	98.57 ^{**}
	浓度 × 品系 Concentration × Lines	0.14	0.01	13.90 ^{**}
干重 Dry weight	浓度 Concentration	0.02	0.00	805.92 ^{**}
	品系 Lines	0.00	0.00	42.37 ^{**}
	浓度 × 品系 Concentration × Lines	0.00	0.00	7.88 ^{**}

注: * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 显著水平, 下同。

Note: * and ** indicate significant level at 5% and 1%, respectively. The same as below.

表 2 NaCl 和 Na₂SO₄ 复合胁迫对白莱型冬油菜种子发芽势的影响

Table 2 The effect of NaCl and Na₂SO₄ stress on germination potential of winter rapeseed (*Brassica rapa* L.)

盐浓度 Salt concentration (mmol·L ⁻¹)	发芽势 Germination potential/%					
	ky-1	平油 1 号 Pingyou 1	ky-10-191	10-191	ky-NDJ	NDJ
CK	92.22 ± 1.92a	90.00 ± 3.33a	82.22 ± 5.09a	85.56 ± 3.85a	84.44 ± 1.92a	83.33 ± 0.00a
45	91.11 ± 1.92a	81.11 ± 11.71a	82.22 ± 1.93a	78.89 ± 5.09ab	78.89 ± 1.92b	68.89 ± 1.92b
90	90.00 ± 3.33a	80.00 ± 3.33ab	80.00 ± 0.00a	74.44 ± 1.92b	73.33 ± 0.00c	60.00 ± 3.33c
135	75.56 ± 1.92b	61.11 ± 15.03bc	68.89 ± 1.93b	51.11 ± 1.92c	54.44 ± 3.85d	44.44 ± 8.38d
180	65.56 ± 1.92c	60.00 ± 15.27c	61.11 ± 1.93c	36.67 ± 10.00d	46.67 ± 3.33e	6.67 ± 3.33e
240	20.00 ± 3.33d	11.11 ± 8.38d	18.89 ± 3.85d	8.89 ± 3.85e	0.00 ± 0.00f	0.00 ± 0.00e
CV	0.361	0.441	0.351	0.502	0.521	0.730

注: 不同小写字母表示 0.05 水平差异显著, CV: 变异系数。下同。

Note: Different lowercases indicate significant difference at $P < 0.05$. CV: Coefficient of variation. The same as below.

240 mmol · L⁻¹ 盐浓度处理相比, 180、135、90 mmol · L⁻¹ 和 45 mmol · L⁻¹ 盐浓度处理下, 其活力指数分别升高 1.91、4.99、8.97 和 11.82, CK 条件下达到最大, 为 12.86。而平油 1 号的升高幅度相对较小, 分别为 1.18、2.70、5.34 和 8.83, CK 条件下为 11.22。

其它材料具有相似的变化趋势, 但因品种(系)本身特性的差异, 不同材料活力指数在同一处理水平下的变化也存在差异, 如盐浓度为 180 mmol · L⁻¹ 时, 活力指数依次表现为 ky - 1 > ky - 10 - 191 > 平油 1 号 > ky - NDJ > 10 - 191 和 NDJ。



图 1 盐碱圃盐渍化特征

Fig.1 Characteristics of salinization soil



图 2 白菜型冬油菜在盐胁迫和正常条件下的种子萌发和生长情况

Fig.2 Seed germination and seedling growth of winter rapeseed (*Brassica rapa* L.) under salt stress or in distilled water

注: A1 - A6: 耐盐冬油菜: ky - 1; B1 - B6: 正常土中收获的平油 1 号; C1 - C6: 耐盐冬油菜 ky - NDJ; D1 - D6: 正常土中收获的 NDJ

Note: A1 - A6: Salt resistant material: ky - 1; B1 - B6: Corresponding normal material: Pingyou 1; C1 - C6: Salt resistant material: ky - NDJ; D1 - D6: Corresponding normal material: NDJ.

表 3 NaCl 和 Na₂SO₄ 复合胁迫对白菜型冬油菜种子发芽率的影响Table 3 The effect of NaCl and Na₂SO₄ stress on germination percentage of winter rapeseed (*Brassica rapa* L.)

盐浓度 Salt concentration /(mmol·L ⁻¹)	发芽率 Germination percentage/%					
	ky-1	平油 1 号 Pingyou 1	ky-10-191	10-191	ky-NDJ	NDJ
CK	100.00 ± 0.00a	100.00 ± 0.00a	100.00 ± 0.00a	100.00 ± 0.00a	100.00 ± 0.00a	100.00 ± 0.00a
45	100.00 ± 0.00a	94.44 ± 5.09ab	96.67 ± 0.00a	93.33 ± 5.77a	93.33 ± 3.33ab	92.22 ± 5.77ab
90	97.78 ± 1.92a	91.11 ± 8.39ab	93.33 ± 3.33a	91.11 ± 5.09a	90.00 ± 5.77b	87.78 ± 5.09b
135	87.78 ± 1.92b	83.33 ± 3.33bc	81.11 ± 1.92b	74.44 ± 5.09b	71.11 ± 1.92c	63.33 ± 10.00c
180	80.00 ± 3.33c	71.11 ± 11.71c	74.44 ± 11.71b	54.44 ± 5.09c	62.22 ± 5.09d	31.11 ± 6.94d
240	34.44 ± 5.09d	28.89 ± 11.71d	31.11 ± 5.09c	25.56 ± 5.09d	3.33 ± 3.33e	0.00 ± 0.00e
CV	0.286	0.326	0.308	0.370	0.480	0.600

表 4 NaCl 和 Na₂SO₄ 复合胁迫对白菜型冬油菜种子发芽指数的影响Table 4 The effect of NaCl and Na₂SO₄ stress on germination index of winter rapeseed (*Brassica rapa* L.)

盐浓度 Salt concentration /(mmol·L ⁻¹)	发芽指数 Germination index					
	ky-1	平油 1 号 Pingyou 1	ky-10-191	10-191	ky-NDJ	NDJ
CK	22.11 ± 0.50a	21.08 ± 0.76a	21.03 ± 0.80a	20.66 ± 0.64a	20.54 ± 0.13a	19.58 ± 0.39a
45	21.12 ± 0.51a	16.66 ± 0.25b	18.14 ± 0.90b	14.92 ± 0.57b	16.82 ± 0.67b	13.20 ± 1.79b
90	18.95 ± 1.18b	13.91 ± 0.07c	16.46 ± 1.76b	11.61 ± 0.03c	12.43 ± 0.62c	10.60 ± 0.32c
135	11.78 ± 0.62c	9.41 ± 0.40d	10.74 ± 0.19c	8.44 ± 0.81d	7.56 ± 0.42d	6.07 ± 1.21d
180	9.07 ± 0.49d	7.52 ± 1.51e	7.73 ± 1.24d	5.12 ± 0.48e	6.18 ± 0.67e	2.17 ± 0.34e
240	3.09 ± 0.35e	2.21 ± 0.96f	2.76 ± 0.42e	2.03 ± 0.45f	0.16 ± 0.17f	0.00 ± 0.00f
CV	0.499	0.543	0.513	0.609	0.662	0.803

表 5 NaCl 和 Na₂SO₄ 复合胁迫对白菜型冬油菜种子活力指数的影响Table 5 The effect of NaCl and Na₂SO₄ stress on vitality index of winter rapeseed (*Brassica rapa* L.)

盐浓度 Salt concentration /(mmol·L ⁻¹)	活力指数 Vitality index					
	ky-1	平油 1 号 Pingyou 1	ky-10-191	10-191	ky-NDJ	NDJ
CK	12.86 ± 0.59a	11.22 ± 0.94a	12.02 ± 0.17a	11.04 ± 0.69a	10.86 ± 0.69a	10.56 ± 1.06a
45	11.82 ± 0.05b	8.83 ± 0.19b	9.74 ± 0.95b	7.76 ± 0.52b	8.58 ± 0.30b	6.71 ± 1.14b
90	8.97 ± 0.45c	5.34 ± 0.15c	6.95 ± 0.59c	3.75 ± 0.42c	3.54 ± 0.23c	2.80 ± 0.19c
135	4.99 ± 0.23d	2.70 ± 0.05d	3.45 ± 0.42d	2.17 ± 0.16d	1.80 ± 0.08d	1.18 ± 0.19d
180	1.91 ± 0.17e	1.18 ± 0.19e	1.28 ± 0.18e	0.00 ± 0.00e	0.66 ± 0.09e	0.00 ± 0.00d
240	0.00 ± 0.00f	0.00 ± 0.00f	0.00 ± 0.00f	0.00 ± 0.00e	0.00 ± 0.00f	0.00 ± 0.00d
CV	0.737	0.856	0.811	1.018	0.992	1.139

2.6 NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫对白菜型冬油菜胚苗生长的影响

盐胁迫明显抑制胚根和胚芽生长(表 6)。45 mmol·L⁻¹盐浓度处理下,耐盐冬油菜 ky-1、ky-10-191 和 ky-NDJ 的胚芽长较 CK 均未达到显著差异水平,而平油 1 号、10-191 和 NDJ 的胚芽长较 CK 均达到显著差异水平。同时,ky-1、ky-10-191、ky-NDJ 和平油 1 号、10-191、NDJ 的胚根长较 CK 均

达到显著差异水平。盐浓度为 90 mmol·L⁻¹时,胚根长和胚芽长降低更加明显,与 CK 相比,ky-1、ky-10-191、ky-NDJ 和平油 1 号、10-191、NDJ 种子胚根长分别下降 79.62%、82.69%、89.77%、85.95%、88.17%、90.80%,而种子胚芽长分别下降 46.12%、58.87%、66.36%、54.46%、63.76%、73.58%。240 mmol·L⁻¹盐浓度则完全抑制了胚苗生长。

2.7 NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫对白菜型冬油菜胚苗生物量的影响

鲜重和干重可以综合体现盐胁迫对植物的受害程度,是评价植物耐盐性强弱的可靠指标^[20]。表 7 为 NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫对白菜型冬油菜种子生物量的胁迫效应。各参试材料经过 7 d 的胁迫处理后,种子鲜重和干重基本表现逐步下降的趋势。在 45 mmol·L⁻¹ 的低盐胁迫下,鲜重和干重较 CK 未达到显著差异水平;90 mmol·L⁻¹ 时,鲜重和干重较 CK 均达到显著差异水平,同时,鲜重下降幅度大于干重。盐浓度高于 180 mmol·L⁻¹ 时,鲜重和干重大幅下降,其中 10-191 和 NDJ 种子萌发几乎完全受到抑制,盐浓度高于 240 mmol·L⁻¹ 时,因胚芽和胚根过于短

小而无法统计生物量。

2.8 白菜型冬油菜种子发芽期各项指标与盐浓度的相关性分析

相关性分析表明,各参试材料种子发芽指数、活力指数、胚芽长和鲜重与盐浓度均为极显著负相关($P < 0.01$),从而表明发芽指数、活力指数、胚芽长和鲜重对盐胁迫最为敏感(表 8)。对其分别与盐浓度进行线性回归统计分析,建立回归方程,以准确估计其耐盐临界值,然后对耐盐临界值进行方差分析(表 9)。ky-1 的发芽指数、活力指数、胚芽长和鲜重的耐盐临界值明显高于平油 1 号,其均值分别为 133.895 mmol·L⁻¹ 和 117.394 mmol·L⁻¹,达到显著性差异;ky-10-91 的发芽指数、活力指数、胚芽长和

表 6 NaCl 和 Na₂SO₄ 复合胁迫对白菜型冬油菜胚苗根长和芽长的影响

Table 6 The effect of NaCl and Na₂SO₄ stress on radicle and plumule length of winter rapeseed (*Brassica rapa* L.)

参数 Parameter	材料 Material	NaCl 浓度 NaCl Concentration/(mmol·L ⁻¹)						CV
		CK	45	90	135	180	240	
胚根长 Radicle length /cm	ky-1	9.57 ± 1.29a	5.77 ± 0.43b	1.95 ± 0.31c	1.08 ± 0.32d	0.40 ± 0.11e	0.00 ± 0.00e	1.126
	平油 1 号 Pingyou 1	9.54 ± 0.75a	5.24 ± 1.08b	1.34 ± 0.37c	0.82 ± 0.23d	0.32 ± 0.11de	0.00 ± 0.00e	1.224
	ky-10-191	9.59 ± 1.97a	5.67 ± 0.70b	1.66 ± 0.32c	0.88 ± 0.27cd	0.35 ± 0.11de	0.00 ± 0.00e	1.194
	10-191	9.55 ± 0.86a	5.19 ± 0.78b	1.13 ± 0.33c	0.64 ± 0.22d	0.05 ± 0.11e	0.00 ± 0.00e	1.296
	ky-NDJ	9.58 ± 1.27a	4.54 ± 0.78b	0.98 ± 0.27c	0.52 ± 0.13cd	0.19 ± 0.07d	0.00 ± 0.00d	1.345
	NDJ	9.46 ± 0.91a	4.44 ± 0.65b	0.87 ± 0.23c	0.45 ± 0.11d	0.00 ± 0.00e	0.00 ± 0.00e	1.384
胚芽长 Plumule length /cm	ky-1	2.19 ± 0.26a	2.01 ± 0.32a	1.18 ± 0.39b	0.62 ± 0.15c	0.37 ± 0.08d	0.00 ± 0.00e	0.804
	平油 1 号 Pingyou 1	2.24 ± 0.31a	1.91 ± 0.28b	1.02 ± 0.20c	0.57 ± 0.13d	0.21 ± 0.06e	0.00 ± 0.00f	0.869
	ky-10-191	2.16 ± 0.44a	2.06 ± 0.29a	0.91 ± 0.33b	0.57 ± 0.16c	0.27 ± 0.07d	0.00 ± 0.00e	0.885
	10-191	2.18 ± 0.26a	1.93 ± 0.37b	0.79 ± 0.14c	0.50 ± 0.09d	0.00 ± 0.00e	0.00 ± 0.00e	0.991
	ky-NDJ	2.17 ± 0.33a	2.05 ± 0.35a	0.73 ± 0.13b	0.49 ± 0.10c	0.14 ± 0.05d	0.00 ± 0.00d	0.965
	NDJ	2.12 ± 0.28a	1.87 ± 0.34b	0.56 ± 0.13c	0.43 ± 0.11c	0.00 ± 0.00d	0.00 ± 0.00d	1.059

表 7 NaCl 和 Na₂SO₄ 复合盐胁迫对白菜型冬油菜胚苗鲜重和干重的影响

Table 7 The effect of NaCl and Na₂SO₄ stress on fresh and dry weight of winter rapeseed (*Brassica rapa* L.) germ-seedings

参数 Parameter	材料 Material	NaCl 浓度 NaCl concentration/(mmol·L ⁻¹)						CV
		CK	45	90	135	180	240	
鲜重 Fresh weight (g·plants ⁻¹)	ky-1	0.582a	0.560a	0.474b	0.424c	0.211d	0.000e	0.569
	平油 1 号 Pingyou 1	0.533a	0.530a	0.384b	0.287c	0.159d	0.000e	0.631
	ky-10-191	0.572a	0.536a	0.423b	0.321c	0.166d	0.000e	0.621
	10-191	0.534a	0.520a	0.323b	0.258c	0.000d	0.000d	0.819
	ky-NDJ	0.529a	0.511a	0.285b	0.238c	0.107d	0.000e	0.719
	NDJ	0.539a	0.507a	0.264b	0.195c	0.000d	0.000d	0.886
干重 Dry weight (g·plants ⁻¹)	ky-1	0.035a	0.033ab	0.031bc	0.028c	0.020d	0.000e	0.504
	平油 1 号 Pingyou 1	0.033a	0.031ab	0.029b	0.024c	0.015d	0.000e	0.545
	ky-10-191	0.035a	0.032ab	0.029b	0.025c	0.016d	0.000e	0.537
	10-191	0.031a	0.031a	0.025b	0.023b	0.000c	0.000c	0.756
	ky-NDJ	0.031a	0.029ab	0.025b	0.020c	0.011d	0.000e	0.581
	NDJ	0.031a	0.029a	0.023b	0.019c	0.000d	0.000d	0.769

鲜重的耐盐临界值明显高于 10 - 191, 其均值分别为 123.264 mmol·L⁻¹ 和 103.947 mmol·L⁻¹, 达到显著性差异; ky - NDJ 的发芽指数、活力指数、胚芽长

和鲜重的耐盐临界值明显高于 NDJ, 其均值分别为 107.399 mmol·L⁻¹ 和 93.834 mmol·L⁻¹, 达到显著性差异。

表 8 不同冬油菜种子发芽各项指标与盐浓度的相关系数

Table 8 Correlation coefficient between germination indexes and salt concentrations of different winter rapeseed (*Brassica rapa* L.)

材料 Material	发芽势 GE	发芽率 GR	发芽指数 GI	活力指数 VI	胚芽长 PL	胚根长 RL	鲜重 FW	干重 DW
ky - 1	-0.894*	-0.869*	-0.979**	-0.987**	-0.978**	-0.903*	-0.957**	-0.902*
平油 1 号 Pingyou 1	-0.913*	-0.909*	-0.996**	-0.976**	-0.971**	-0.875*	-0.986**	-0.946**
ky - 10 - 191	-0.882*	-0.907*	-0.992**	-0.986**	-0.955**	-0.890*	-0.988**	-0.946**
10 - 191	-0.975**	-0.960**	-0.989**	-0.948**	-0.945**	-0.867*	-0.962**	-0.922**
ky - NDJ	-0.940**	-0.915*	-0.994**	-0.942**	-0.935**	-0.848*	-0.981**	-0.973**
NDJ	-0.974**	-0.965**	-0.984**	-0.921**	-0.922**	-0.845*	-0.962**	-0.945**

注: GE, GR, GI, VI, PL, RL, FW, DW 分别表示发芽势, 发芽率, 发芽指数, 活力指数, 胚芽长, 胚根长, 鲜重, 干重, 下同。

Note: GE, GR, GI, VI, PL, RL, FW and DW indicate germination potential, germination percentage, germination index, vitality index, radicle length, plumule length, fresh weight and dry weight, respectively. The same as below.

表 9 不同冬油菜盐敏感指标与盐浓度的相关性及其耐盐临界值

Table 8 The correlation coefficient between the salt - sensitive indicators and salt concentrations and their critical salt concentration of different winter rapeseed (*Brassica rapa* L.) seeds

材料 Material	指标 Index	回归方程 Regression equation	R ²	耐盐临界值 Critical value	均值 Mean
ky - 1	发芽指数 GI	$y = -0.084x + 24.032$	0.958**	154.210	133.895a
	活力指数 VI	$y = -0.059x + 13.564$	0.974**	120.550	
	胚芽长 PL	$y = -0.010x + 2.199$	0.956**	111.629	
	鲜重 FW	$y = -0.002x + 0.658$	0.916**	149.192	
平油 1 号 Pingyou 1	发芽指数 GI	$y = -0.077x + 20.600$	0.992**	131.478	117.394abc
	活力指数 VI	$y = -0.049x + 10.513$	0.953**	100.078	
	胚芽长 PL	$y = -0.010x + 2.147$	0.943**	102.224	
	鲜重 FW	$y = -0.002x + 0.586$	0.972**	135.795	
ky - 10 - 191	发芽指数 GI	$y = -0.078x + 21.765$	0.984**	144.525	123.264ab
	活力指数 VI	$y = -0.053x + 11.722$	0.971**	106.832	
	胚芽长 PL	$y = -0.010x + 2.134$	0.913**	106.421	
	鲜重 FW	$y = -0.002x + 0.621$	0.977**	135.277	
10 - 191	发芽指数 GI	$y = -0.076x + 19.173$	0.978**	116.771	103.947bc
	活力指数 VI	$y = -0.048x + 9.617$	0.899**	85.687	
	胚芽长 PL	$y = -0.010x + 2.066$	0.893**	96.267	
	鲜重 FW	$y = -0.003x + 0.570$	0.926**	117.065	
ky - NDJ	发芽指数 GI	$y = -0.084x + 20.280$	0.989**	119.089	107.399abc
	活力指数 VI	$y = -0.048x + 9.725$	0.887**	90.047	
	胚芽长 PL	$y = -0.010x + 2.087$	0.875**	99.595	
	鲜重 FW	$y = -0.002x + 0.549$	0.963**	120.866	
NDJ	发芽指数 GI	$y = -0.081x + 17.976$	0.969**	100.468	93.834 c
	活力指数 VI	$y = -0.044x + 8.643$	0.848**	75.800	
	胚芽长 PL	$y = -0.010x + 1.951$	0.850**	91.401	
	鲜重 FW	$y = -0.003x + 0.546$	0.926**	107.667	

注: x 和 y 分别表示盐溶液浓度和种子发芽率。* 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 显著水平。

Note: x and y indicate salt concentration and germination percentage of seeds. * and ** indicate significant level at 5% and 1%, respectively.

2.9 白菜型冬油菜种子耐盐性综合评价

相同指标不同材料对盐浓度的敏感性不同,相同材料不同指标对盐浓度的敏感性也不同。通过模糊隶属函数对6个耐盐性不同的冬油菜种子的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、胚根长、胚芽长、鲜重和干重的隶属函数值的总平均值进行综合评价,

从而评价不同材料的耐盐性(表10)。可见,6个耐盐性不同的冬油菜种子的耐盐性强弱排序为 ky-1 > ky-10-191 > 平油1号 > ky-NDJ > 10-191 > NDJ。ky-1、ky-10-191 和 ky-NDJ 的耐盐性较平油1号、10-191 和 NDJ 均有所提高。

表10 白菜型冬油菜种子在盐胁迫条件下萌发指标综合评定及排序

Table 10 The comprehensive appraisal index of salt tolerant ability of different winter rapeseed (*Brassica rapa* L.) and its rank

材料 Material	耐盐指标隶属值 Subordinate function values of salt tolerant ability									排序 Order
	发芽势 GE	发芽率 GR	发芽指数 GI	活力指数 VI	胚芽长 PL	胚根长 RL	鲜重 FW	干重 DW	平均 Average	
ky-1	0.726	0.746	0.592	0.526	0.485	0.327	0.644	0.705	0.594	1
平油1号 Pingyou 1	0.669	0.693	0.508	0.435	0.443	0.302	0.592	0.663	0.538	3
ky-10-191	0.737	0.702	0.550	0.464	0.461	0.315	0.588	0.662	0.560	2
10-191	0.614	0.639	0.453	0.373	0.413	0.289	0.510	0.589	0.485	5
ky-NDJ	0.667	0.690	0.513	0.390	0.429	0.275	0.526	0.624	0.514	4
NDJ	0.527	0.624	0.440	0.335	0.392	0.268	0.465	0.552	0.450	6

3 讨论与结论

3.1 北方白菜型冬油菜种子萌发期的耐盐性响应

种子萌发期是植物生活史中对盐胁迫十分敏感的时期之一,植物能否在盐碱环境中生存,首先取决于它能否发芽、发芽率的高低以及发芽速度的快慢^[21]。同时,盐胁迫对植物种子萌发的影响与盐的浓度、种类以及植物本身的遗传特性有关,其作用方式主要有两个方面:一是土壤中盐分含量增加,导致渗透压升高而水势降低,使种子吸水困难,造成生理干旱,从而影响种子萌发^[22-24]。二是离子浓度过高产生离子毒害^[25-26]。本研究表明,NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫明显抑制了冬油菜种子萌发,且这种抑制作用随盐浓度的增加而加剧;同时,因材料本身遗传特性的不同,种子耐盐性存在明显的差异。由此说明,种子在盐胁迫下能否萌发由盐浓度和品种耐盐性两个因素共同决定。这与孙西红^[21]等在高羊茅和张向前^[27]等在燕麦以及史伟^[28]等在甘蓝型油菜中的研究结果类似。

有研究表明,低盐能促进种子萌发和幼苗生长;也有研究表明,不管盐浓度高低,均会抑制种子萌发和幼苗生长^[29]。本研究发现,45 mmol·L⁻¹的低盐胁迫对种子萌发和生长参数的抑制作用不明显,这与金美芳^[30]等采用 NaCl 胁迫研究油菜种子萌发的结果基本一致,但与白小明^[31]等针对野生早熟禾种子萌发的研究结果相反。盐浓度为 90 mmol·L⁻¹时,种子发芽势和发芽率并未受到明显的抑制作用,但

发芽指数、活力指数、胚根、胚芽和鲜干重已受到明显的抑制作用。盐浓度为 135 mmol·L⁻¹和 180 mmol·L⁻¹时,对种子萌发和生长参数的抑制作用均呈显著性增加,并且不同材料间耐盐性差异表现较大,耐盐冬油菜 ky-1 和 ky-10-191 的胚苗生长虽受到明显的抑制作用,但具有成苗能力,而平油1号、10-191、ky-NDJ 和 NDJ 种子发芽后胚根过于短小而倒伏于培养皿中,无法成苗,甚至盐溶液对种子造成腐烂。其原因可能是,该浓度范围内种子萌发可能从渗透失水胁迫过度到盐分离子的毒害作用,种子萌发后,胚根吸收水分和营养困难,易导致直接的萌发受阻,所以胁迫程度较深。因此,135~180 mmol·L⁻¹的 NaCl 和 Na₂SO₄ 复合浓度可认为是白菜型冬油菜耐盐性鉴定的适宜范围。本研究进一步发现,6个材料种子的发芽指数、活力指数、胚芽长和鲜重对胁迫的敏感程度最大。同时,3个耐盐冬油菜 ky-1、ky-10-191 和 ky-NDJ 的种子发芽指数、活力指数、胚芽长和鲜重的耐盐临界值显著高于原有品系平油1号、10-191、ky-NDJ。

3.2 耐盐冬油菜种子的耐盐性及与非耐盐对照的差异及原因

植物经过逆境胁迫的不断诱导会发生一系列形态和生理生化方面的适应性,甚至会诱导启动相关基因的超量表达,而获得突变型植株,进而增强植物的抗逆性^[32]。Filck^[33]认为,表型变异选择出的变异体在离开选择压力后,突变体应是稳定的,植株再生后,突变细胞系应当保持稳定。本试验中,3个耐

盐冬油菜是从盐碱圃中栽培的 3 个品系中筛选得到的耐盐株系,并通过种子发芽期耐盐性鉴定方法对其耐盐性进行比较。结果表明,耐盐冬油菜 ky-1、ky-10-191 和 ky-NDJ 种子的前期发芽进程、发芽整齐程度、发芽率和胚苗生长受盐胁迫的影响明显小于原有非耐盐品系平油 1 号、10-191 和 NDJ,其耐盐性均有不同程度的提高。这说明筛选的耐盐冬油菜的耐盐性是由遗传改变而引起,其原因可能是原有品系群体中存在耐盐潜在基因,经过盐碱地种植进而不断诱导启动该潜在基因的表达而产生耐盐突变型植株;也有可能是原有群体中并无耐盐基因,而是在受到盐碱胁迫环境的压力下,诱导的一些分子会引起表观遗传变异,从而获得耐盐新性状,其耐盐性提高可能是表观遗传调节效应的结果,具体是哪一种耐盐机制还需有待进一步深入研究。

综上所述,45 mmol·L⁻¹和 90 mmol·L⁻¹盐浓度对种子萌发的影响不明显,135 mmol·L⁻¹和 180 mmol·L⁻¹盐浓度明显抑制了种子萌发和胚苗生长,其中发芽指数、活力指数、胚芽长和鲜重对盐胁迫最为敏感。用隶属函数法综合评价,耐盐性强弱依次为 ky-1 > ky-10-191 > 平油 1 号 > ky-NDJ > 10-191 > NDJ。可见,筛选的耐盐冬油菜 ky-1、ky-10-191 和 ky-NDJ 的耐盐性较原有品系平油 1 号、10-191 和 NDJ 均有所提高。

参考文献:

[1] 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):14-19.

[2] 穆延召,彭云玲,李玥,等.NaCl 胁迫对玉米杂交种子萌发的影响[J].甘肃农业大学学报,2013,48(6):40-44.

[3] 张云珍.加拿大转基因油菜商业化进展及现状分析[J].世界农业,2011,(10):74-76.

[4] 杨晓光,刘志娟,陈阜.全球气候变暖对中国种植制度可能影响. I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析[J].中国农业科学,2010,43(2):329-336.

[5] 张强,邓振镛,赵映东,等.全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J].生态学报,2008,28(3):1210-1218.

[6] 刘彦随,刘玉,郭丽英.气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J].中国生态农业学报,2010,18(4):905-910.

[7] 孙万仓,马卫国,雷建民,等.冬油菜在西北旱寒区的适应性和北移的可行性研究[J].中国农业科学,2007,40(12):2716-2726.

[8] McKersie B D, Leshem Y Y. Stress and stress coping in cultivated plants[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994, 256.

[9] 何文寿,刘阳春,何进宇.宁夏不同类型盐渍化土壤水溶盐含量与其电导率的关系[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):112-116.

[10] 杨思存,逢焕成,王成宝,等.基于典范对应分析的甘肃引黄灌

区土壤盐渍化特征研究[J].中国农业科学,2014,47(1):100-110.

[11] Giaveno C D, Ribeiro R V, Souza G M, et al. Screening of tropical maize for salt stress tolerance [J]. Crop Breeding and Applied Biotechnology, 2007, 7(3):304-313.

[12] 龙卫华,浦惠明,张洁夫,等.甘蓝型油菜发芽期的耐盐性筛选[J].中国油料作物学报,2013,35(3):271-275.

[13] 李士磊,霍鹏,高欢欢,等.复合盐胁迫对小麦萌发的影响及耐盐阈值的筛选[J].麦类作物学报,2012,32(2):260-264.

[14] 徐小玉,张凤银,曾庆微.NaCl 和 Na₂SO₄ 盐胁迫对波斯菊种子萌发的影响[J].东北农业大学学报,2014,45(4):55-59.

[15] 武路广,方志红,董宽虎.NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫对白羊草种子萌发的影响[J].山西农业科学,2011,39(10):1115-1118.

[16] 姜珊,张文辉,刘新成.3 种园林树木种子萌发期耐盐性研究[J].西北植物学报,2009,29(4):0733-0741.

[17] Ashraf M, Meneilly T. Salinity tolerance in brassica oilseeds [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2011, 23(2):157-174.

[18] 乔佩,卢存福,李红梅,等.盐胁迫对诱变小麦种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(6):720-727. (in Chinese)

[19] 刘宝玉,张文辉,刘新成,等.沙枣和柠条种子萌发期耐盐性研究[J].植物研究,2007,27(6):721-728.

[20] 孙璐,周宇飞,汪澈,等.高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定[J].中国农业科学,2012,45(9):1714-1722.

[21] 孙西红,赵凌平,王占彬,等.Na₂CO₃ 胁迫对高羊茅种子萌发的影响[J].草业科学,2014,31(4):677-682.

[22] Zhao K F, Song J, Fan H, et al. Growth response to ionic and osmotic stress of NaCl in salt-tolerant and salt-sensitive maize [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2010, 52(5):468-475.

[23] Dodd G L, Donovan L A. Water potential and ionic effects on germination and seedling growth of two cold desert shrubs [J]. Am J Bot, 1999, 86:1146-1153.

[24] Chinnusamy V, Jagendorf A, Zhu J K. Understanding and improving salt tolerance in plants [J]. Crop Science, 2005, 45:437-448.

[25] Li X H, Jiang D M, Li X L, et al. Effects of salinity and desalination on seed germination of six annual weed species [J]. Journal of Forestry Research, 2011, 22(3):475-479.

[26] Gao Z W, Zhu H, Gao J C, et al. Eco-physiological characteristics of alfalfa seedlings in response to various mixed salt-alkaline stresses [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2008, 50(1):29-39.

[27] 张向前,刘景辉,齐冰洁,等.复盐胁迫对几种燕麦种子萌发指数的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):233-238.

[28] 史伟,黄江.盐胁迫对 2 个油菜品种种子萌发及幼苗生长的影响[J].种子,2010,29(10):96-97.

[29] 聂江力,裴毅,冯丹丹.NaCl 和 NaHCO₃ 胁迫对车前种子萌发的影响[J].北方园艺,2015,(5):25-28.

[30] 金美芳,朱晓清.NaCl 胁迫对油菜种子萌发和幼苗生长的影响[J].种子,2009,28(9):76-79.

[31] 白小明,王靖婷,贺佳园,等.8 个野生早熟禾种子萌发期耐盐性研究[J].草地学报,2013,21(3):546-555.

[32] 翟大勇,沈黎明.逆境胁迫诱导基因的结构、功能与表达调控[J].生物化学与生物物理进展,1998,25(3):216-221.

[33] Flick C E. Techniques for propagation and breeding [C]//Evans D A, et al. Handbook of Plant Cell Culture Vol.1, 1983:303.