

甘蓝型油菜种子萌发期耐盐碱性鉴定与筛选

高桂珍¹, 黄慧琪¹, 张璐¹, 郭树豪¹, 张裕诗¹, 郭姝含¹, 闫贵欣²

(¹嘉应学院生命科学学院/广东省山区特色农业资源保护与精准利用重点实验室, 梅州 514015; ²中国农业科学院油料作物研究所/

农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室, 武汉 430062)

摘要: 土壤盐碱化问题在世界范围内普遍存在, 种植耐盐碱植物是修复和治理盐碱地的重要途径之一。以 12 份甘蓝型油菜 (*Brassica napus* L.) 种质为材料, 将 2 种碱性盐 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 按 9:1 的摩尔比例混合, 设 0 (CK)、10、20、30、40、50、60 mmol/L 共 7 个浓度, 对油菜种子萌发期进行盐碱胁迫处理。结果发现, 油菜种子的发芽势和发芽率在 10~40 mmol/L 浓度下与对照差异不显著, 在 50~60 mmol/L 浓度时明显下降, 差异显著。发芽指数、根长、下胚轴长和活力指数均随着盐碱胁迫浓度升高而呈下降趋势。在 10~40 mmol/L 浓度下过氧化物酶和过氧化氢酶活性均随着浓度增加而升高, 在 40 mmol/L 浓度时达到最高值, 50 mmol/L 浓度时出现下降; 丙二醛含量在不同浓度胁迫下与对照差异均不显著。通过差异显著性分析, 发现 40 mmol/L 可作为大规模鉴定耐盐碱油菜种质的适宜浓度。利用 40 mmol/L 盐碱浓度对 87 份甘蓝型油菜核心群体进行耐盐碱性鉴定, 发现相对发芽势、相对发芽率、相对根长、相对鲜重和相对下胚轴长均呈正态分布, 可见甘蓝型油菜耐盐碱性存在丰富变异。相关性分析发现, 发芽势和发芽率呈极显著正相关, 二者均与下胚轴长呈正相关, 与根长呈极显著负相关。主成分分析发现, 前 3 个主成分累计方差贡献率达到 84.16%, 其中相对发芽势、相对发芽率和相对鲜重解释了 43.30% 的变异。通过 D 值进行聚类分析, 87 份群体材料可分为 5 类, 筛选出 1 份高耐盐碱、5 份耐盐碱和 3 份盐碱敏感种质资源。本研究建立了甘蓝型油菜耐盐碱鉴定方法, 并筛选出耐盐碱优异种质, 为甘蓝型油菜耐盐碱性鉴定和品种培育提供方法和材料, 为油菜耐盐碱性分子机制研究奠定基础。

关键词: 油菜; 耐盐碱性; 种子萌发; 鉴定

Identification and Screening of Salt-Alkali Tolerance in *Brassica napus* During Seed Germination Stage

GAO Guizhen¹, HUANG Huiqi¹, ZHANG Lu¹, GUO Shuhao¹, ZHANG Yushi¹, GUO Shuhan¹, YAN Guixin²

(¹School of Life Science, Jiaying University/Guangdong Provincial Key Laboratory of Conservation and Precision Utilization of Characteristic Agricultural Resources in Mountainous Areas, Meizhou 514015; ²Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Oil Crops,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062)

Abstract: Soil salinization-alkalization are widespread global issues. Cultivating salt-alkali tolerant plants is a crucial strategy for the remediation and management of saline-alkali lands. In this study, twelve accessions of *Brassica napus* were used to investigate the effects of saline-alkali stress during seed germination. Stress was imposed using a mixture of NaHCO_3 and Na_2CO_3 at a molar ratio of 9:1, with seven concentrations including the control (0, CK), 10, 20, 30, 40, 50, and 60 mmol/L. The results showed that the germination potential and germination rate of rapeseed did not differ significantly from the control under 10-40 mmol/L saline-alkali stress, but decreased significantly at 50-60 mmol/L. Compared with the control, germination speed, root length,

收稿日期: 2025-10-18 网络出版日期: 2026-01-29

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20251018004>

第一作者研究方向为油菜种质资源, E-mail: gaogui20610@163.com

通信作者: 闫贵欣, 研究方向为油料作物种质资源, E-mail: ygx_928@126.com

基金项目: 广东省普通高校重点领域专项(2024ZDZX4028); 嘉应学院科研项目(2023KJY04)

Foundation projects: Key Area Special Project of Guangdong Provincial Colleges and Universities (2024ZDZX4028); Research Projects of Jiaying University (2023KJY04)

hypocotyl length, and vigor index all decreased significantly with increasing stress concentration. Under 10–40 mmol/L stress, the activities of peroxidase (POD) and catalase (CAT) increased with rising concentrations, peaking at 40 mmol/L, and declined at 50 mmol/L. Malondialdehyde (MDA) content showed no significant difference compared to the control under any of the concentration stresses. Through significance analysis, 40 mmol/L was identified as a suitable concentration for large-scale screening of saline-alkali tolerant rapeseed germplasm. Using this concentration, 87 core accessions of *Brassica napus* were evaluated for saline-alkali tolerance. The relative germination potential, relative germination rate, relative root length, relative fresh weight, and relative hypocotyl length all exhibited normal distributions, indicating abundant genetic variation in saline-alkali tolerance among the materials. Correlation analysis revealed a highly significant positive correlation between germination potential and germination rate. Both traits were positively correlated with hypocotyl length but showed a highly significant negative correlation with root length. Principal component analysis showed that the first three principal components cumulatively explained 84.16% of the total variance, with relative germination potential, relative germination rate, and relative fresh weight accounting for 43.30% of the variation. Based on D-values from cluster analysis, the 87 accessions were classified into five groups, from which one highly tolerant, five tolerant, and three sensitive germplasms were identified. This study established a reliable method for evaluating salt-alkali tolerance of *B. napus* and identified tolerant germplasms, which provides methods and materials for the identification of salt-alkali tolerance and variety breeding of *B. napus*, and lays a foundation for elucidating the molecular mechanism underlying salt-alkali tolerance in *B. napus*.

Key words: *Brassica napus* L.; salt-alkali tolerance; seed germination; identification

盐碱地在世界范围内分布广泛,据粮农组织(FAO)的数据显示,全球盐碱化土地占总面积的6%以上^[1]。我国是全球范围内盐碱地分布较广的国家之一,这些盐碱地资源主要分布于东北松嫩平原、黄淮海平原、西北干旱与半干旱区域以及沿海滨海地区,并且其面积仍在持续扩大^[2-3]。土壤盐碱化严重威胁着土地使用率,影响作物产量,显著降低了作物的生产力^[4],是当前农业生产中面临的重大难题。土壤的盐化和碱化成分复杂,程度也不相同,实际上盐化以盐度升高为主,碱化以pH值升高为主,两者常常同时发生,因此习惯统称为盐碱地。通常将中性盐(NaCl和Na₂SO₄)胁迫称为盐胁迫,碱性盐(NaHCO₃和Na₂CO₃)胁迫称为碱胁迫^[5]。盐胁迫通常引发植物的渗透胁迫、离子毒害和氧化损伤,而碱胁迫除上述影响外,还叠加了高pH环境带来的胁迫,进一步抑制植物对水分和养分的吸收,对植物造成的危害更为严重和复杂^[6-7]。由此可见,与中性盐胁迫相比,碱性盐胁迫对土壤的危害更甚,造成的生态破坏也更强^[8]。我国盐碱地尤其是内陆盐碱地多是盐胁迫和碱胁迫混合。面对人口增长和城市化进程的推进,耕地面积持续减少,盐碱地成为农业开发利用的后备土地资源,开发利用盐渍化土壤成为我国农业生产和改善生态环境中十分迫切和重要的任务。

在传统的盐碱地改良方法中,通常会运用物理、化学和生物措施,其中生物改良措施因成本低、经济效益高而具有显著优势。油菜(*Brassica napus* L.)属于十字花科芸薹属一年或两年生草本植物,是全球主要油料作物。我国油菜种植面积和产量均居世界前列,对保障国家食用油供给安全具有举足轻重的战略意义^[9]。油菜在我国的种植范围极广,覆盖南北多个地区,中度耐盐碱,是少数可用于盐碱地开发利用的作物之一^[10-11]。盐碱地种植油菜属于生物改良措施,梅勇^[12]研究显示,在中度重度盐碱地种植耐盐油菜能显著改善土壤的理化性质;张培通等^[13]在含盐量为0.3%左右的盐碱地种植宁杂21号,出苗较好且生长发育正常,可获得较高产量;刘东洋等^[14]研究发现种植油菜对降低盐碱地土壤pH值、提高碱解氮、速效磷、有机质含量有显著效果。为了筛选适宜盐碱地高产及机械化作业的品种,朱孔志等^[15]在江苏沿海滩涂的中低产盐碱地进行了5个双低油菜品种的栽培试验,最终沪油39、苏油6号和浙油51被证实为综合性状优良的适宜品种。由此可见,在盐碱地上种植油菜可以降低土壤pH,提高土壤肥力,对土壤有一定的改良效果。选育耐盐碱油菜品种,不仅能直接扩大油菜种植面积、保障国产食用油供给,还能有效遏制土壤的盐碱化与沙化趋势,实现对生态环境的积极修复。综

上所述,在盐碱地种植作物是改良盐碱地的有效生物措施,可以产生较好的生态和经济效益,促进农业的可持续发展。

植物生长过程包括种子萌发期、幼苗营养生长期和生殖生长期。其中种子萌发期和幼苗期较脆弱,种子能否在盐碱胁迫下萌发成苗,是植物在盐碱条件下得以正常生长发育的先决条件。研究盐碱胁迫下种子的萌发具有非常重要的意义,不仅可以筛选萌发期耐盐碱的优异资源,还可以为培育耐盐碱品种、提高耐盐碱能力奠定基础。植物生长发育评价体系通常由种子萌发指标(如发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数等)、幼苗生长指标(如根长、苗高、鲜重、干重、存活率、生物量等)以及产量指标共同构成。本研究首先以随机选取的12份甘

蓝型油菜资源为材料,在油菜萌发期进行盐碱胁迫处理,通过综合评价种子萌发期的形态和生理指标,筛选油菜萌发期盐碱胁迫鉴定的适宜浓度,并以此浓度对87份甘蓝型油菜资源进行耐盐碱性评价与鉴定,以期筛选出优异种质,为优异资源发掘和新品种培育提供理论依据和材料基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为87份甘蓝型油菜,种子来自中国农业科学院油料作物种质中期库。该群体遗传变异丰富,地理来源广泛,亲缘关系较远。其中,国内种质53份,包括地方品种和育成品种;国外种质34份(表1)。

表1 材料名称及来源地

Table 1 Materials name and origin

编号 No.	材料名称 Material name	来源 Origin	编号 No.	材料名称 Material name	来源 Origin
1	胜利青梗	中国上海	26	6024-2	中国湖南
2	胜利52	中国上海	27	4050-4149	中国湖南
3	23号油菜	中国上海	28	4092	中国湖南
4	沪油三号	中国上海	29	岳阳84-8	中国湖南
5	早丰1号	中国	30	滨油1号	中国江西
6	363	中国湖北	31	83008	中国江西
7	华油八号	中国湖北	32	金油15号	中国四川
8	华油九号	中国湖北	33	云油11号	中国云南
9	华油13号	中国湖北	34	云油12号	中国云南
10	川油二号	中国四川	35	Ganpol	日本
11	农林20号	日本	36	AB448	澳大利亚
12	米达斯	加拿大	37	R V 3	澳大利亚
13	欧洲油菜	欧洲	38	DH 9-2	澳大利亚
14	漕油2号	中国上海	39	Ru6	澳大利亚
15	82-2524	中国上海	40	HJa 82470	芬兰
16	油光叶	中国上海	41	Tripol	波兰
17	浙优油1号杂选84-1	中国浙江	42	77-258	英国
18	广德741	中国安徽	43	P20	英国
19	跃进油菜	意大利	44	H56	英国
20	宁强玉泉坝油菜	中国陕西	45	Line	法国
21	开07	中国河南	46	LINGOT	法国
22	郑油1号	中国河南	47	H25	法国
23	利戈勒-1	中国湖北	48	啊沃尔	法国
24	华黄1号	中国湖北	49	Koolzaad-2	荷兰
25	78007	中国湖南	50	WW 1307	瑞典

表 1 (续)

编号 No.	材料名称 Material name	来源 Origin	编号 No.	材料名称 Material name	来源 Origin
51	SV.Global	瑞典	70	GSB615	中国
52	SV.02312	瑞典	71	940171	中国
53	Target	瑞典	72	951061	中国
54	P3	瑞典	73	96786	中国
55	Dac chosen	美国	74	96628	中国
56	早丰5号	中国陕西	75	97选	中国
57	中双1号	中国湖北	76	I-Y-14 油菜	中国
58	蓬莱1号	中国湖南	77	川油96II-19	中国四川
59	88-2	中国四川	78	川油H-53	中国四川
60	870921-4	中国四川	79	川油933059	中国四川
61	油研一号	中国贵州	80	宠马	瑞典
62	青油12号	中国青海	81	Casion	瑞典
63	Annick	韩国	82	Puma-SV.8627102	瑞典
64	Yic Kaden	澳大利亚	83	伊沃市罗纳坦	日本
65	7306	西德	84	P6036-1	中国
66	28669	西德	85	希望106	中国
67	Ew-2	英国	86	苏J209	中国
68	6084	中国	87	8M2280	中国
69	GSB611	中国			

1.2 试验方法

1.2.1 盐碱胁迫浓度筛选 将2种碱性盐 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 按 9:1 的摩尔比例混合,配制成 10、20、30、40、50、60 mmol/L 的 6 个浓度梯度,依次用 T1、T2、T3、T4、T5、T6 代替。从 87 份甘蓝型油菜中随机挑选 12 份材料,选取颗粒饱满、无破损且大小均匀一致的油菜种子,置于铺有 2 层滤纸的培养皿中进行发芽试验。每个培养皿中分别加入上述不同浓度的混合溶液 5 mL 至滤纸水分饱和,以等量蒸馏水处理作为对照(CK),每个处理设置 3 个重复,每个重复使用 50 粒种子。将培养皿放在生长室中进行培养(25℃,光照/黑暗 16 h/8 h)。培养期间,每天定时记载发芽的种子数,第 7 天结束萌发试验,统计发芽率,测量下胚轴长和根长,称量鲜重。

发芽指标测定。发芽势=(2 d 内发芽种子数/供试总种子数)×100%;发芽率=(7 d 内所有萌发种子数/供试总种子数)×100%;发芽指数= $\sum(Gt/Dt)$ 。式中,Gt 为相应每天的发芽数,Dt 为相应的发芽天数。

生长指标的测定。发芽第 7 天,从每个处理中

分别取 10 株长势均匀、基本一致的幼苗,分别测其根长、下胚轴长,以其平均值作为根长和下胚轴长,并用天平称取 10 株幼苗的鲜重。

活力指数=发芽指数×S(S 为第 7 天发芽油菜的平均根长)

发芽第 7 天,将各浓度培养皿中的油菜幼苗准确称取 0.20 g,迅速置于液氮中预冷,冻存于-80℃超低温冰箱,用于后续相关生理指标的测定。

生理指标的测定。称取约 0.20 g 组织,加入 1 mL 提取液进行冰浴匀浆;8000 g 4℃离心 10 min,取上清液,置于冰上待测。丙二醛(MDA, malondialdehyde)含量采用硫代巴比妥酸(TBA, thiobarbituric acid)法测定;过氧化氢酶(CAT, catalase)活性采用紫外比色法测定;过氧化物酶(POD, peroxidase)活性采用愈创木酚法测定^[16],均使用北京索莱宝科技有限公司的试剂盒检测。

1.2.2 油菜耐盐碱种质的鉴定 对群体材料进行耐盐碱鉴定,以处理组预试验筛选出的盐碱胁迫浓度作为筛选浓度,对照组采用蒸馏水,设置 3 个重复,每个重复 50 粒种子,每天记录调查,计算相对发

芽势、相对根长、相对下胚轴长、相对鲜重,方法同1.2.1,相对值=处理组值/对照组值。

1.3 数据分析

采用Microsoft Excel和SPSS进行数据处理、描述性统计分析、聚类分析;使用Origin进行图表绘制,用R4.2.1软件进行指标间的差异显著性分析。按照参考文献[17-19]的方法进行主成分分析,计算耐盐碱性综合评价D值,通过D值排名综合评价群体材料的耐盐碱性强弱,并以D值为变量进行聚类分析。



CK表示对照; T1~T6分别表示10、20、30、40、50、60 mmol/L的盐碱浓度;下同

CK indicates the control group; T1-T6 indicate salt-alkali concentrations of 10, 20, 30, 40, 50 and 60 mmol/L, respectively; The same as below

图1 盐碱胁迫下油菜子叶期的生长状况

Fig. 1 Growth performance of rapeseed cotyledons stage under salt-alkali stress

与对照相比,盐碱胁迫为10~40 mmol/L时对种子发芽势和发芽率影响较小,差异均不显著;盐碱胁迫为50~60 mmol/L时具有明显影响,种子发芽势和发芽率均呈显著下降趋势(表2),其中早丰1号的发芽率降到44%。发芽指数随着盐碱胁迫的浓度升高而降低,说明盐碱胁迫降低种子的发芽速度。分析幼苗生长指标,发现盐碱胁迫对根长影响明显,根长随胁迫浓度升高而明显降低,且不同胁迫

2 结果与分析

2.1 筛选油菜耐盐碱鉴定的适宜浓度

2.1.1 不同浓度盐碱胁迫对油菜种子萌发的影响

12份甘蓝型油菜种子在0(CK)、10、20、30、40、50、60 mmol/L的7个浓度下萌发,第7天时种子的发芽率和幼苗的生长在低浓度(10~30 mmol/L)下变化不明显,随着浓度升高均呈下降趋势,高浓度(50~60 mmol/L)不仅抑制了种子萌发,且根长和下胚轴长度均变短(图1)。

浓度下的根长均与对照差异显著。与对照相比,10 mmol/L的低浓度盐碱胁迫对下胚轴长的影响不显著,其余浓度胁迫下下胚轴长均显著缩短。随着处理浓度的升高,种子的根长、下胚轴长和活力指数均呈下降趋势,与对照相比,在20 mmol/L浓度下开始受到显著抑制,而种子发芽势和发芽率在50 mmol/L时才显著降低(表2)。

表2 12份油菜种质在不同盐碱浓度下的种子萌发情况

Table 2 Seed germination of 12 rapeseed accessions under different salt-alkali stress concentrations

浓度(mmol/L) Concentration	发芽势(%) GE	发芽率(%) GR	发芽指数 GI	根长(cm) RL	下胚轴长(cm) HL	活力指数 VI
0	93.83±8.75a	98.67±1.83a	31.03±4.76ab	1.90±0.37a	2.10±0.29a	56.62±17.67a
10	95.17±9.73a	98.50±3.19a	31.76±6.66a	1.51±0.41b	2.05±0.41ab	47.75±15.60a
20	95.00±8.19a	98.50±2.38a	29.42±4.62ab	1.11±0.36c	1.81±0.28b	32.37±10.03b
30	94.33±7.61a	97.83±3.06a	28.28±4.92abc	0.76±0.25d	1.55±0.28c	21.02±6.78c
40	89.75±12.49ab	96.58±5.16ab	26.42±4.26bc	0.42±0.17e	1.19±0.27d	11.12±4.42d
50	82.33±16.36b	91.67±9.00b	24.13±5.24c	0.23±0.06ef	0.90±0.20e	5.55±1.90d
60	64.75±17.87c	77.33±12.30c	18.97±4.30d	0.17±0.05f	0.81±0.17e	3.32±1.17d

小写字母表示不同盐碱浓度间在 $P<0.05$ 水平上差异显著;下同

Lowercase letters indicate the significant differences between different salt-alkali concentrations at $P<0.05$ level; GE: Germination energy; GR: Germination rate; GI: Germination index; RL: Root length; HL: Hypocotyl length; VI: Vigor index; The same as below

2.1.2 不同浓度的盐碱胁迫对油菜种子萌发期生理指标的影响 从12份材料中挑选1份代表种质沪油三号进行盐碱胁迫下生理指标检测。由图2可以看出,与对照相比,在10~20 mmol/L处理浓度下,

油菜幼苗过氧化物酶活性变化不明显,差异不显著,说明低浓度盐碱胁迫对过氧化物酶活性影响不大;在30~40 mmol/L处理浓度时,过氧化物酶活性呈现上升趋势,与对照相比差异显著;在50 mmol/L

处理浓度时呈现轻微下降趋势。在 10~50 mmol/L 处理浓度范围内,过氧化氢酶活性与对照相比均达到显著升高。其中,在 0~40 mmol/L 处理浓度下,随着胁迫浓度的升高,过氧化氢酶活性呈现上升趋势;在 50 mmol/L 处理浓度下,油菜幼苗过氧化氢酶活性呈现下降趋势。在 0~30 mmol/L 处理浓度下,

丙二醛含量相对稳定;在 40 mmol/L 处理浓度时,丙二醛含量上升;在 50 mmol/L 处理浓度时,丙二醛含量呈下降趋势,不同处理浓度间差异均未达到显著水平。结合盐碱胁迫下油菜种子萌发期的发芽指标、幼苗生长指标和酶活性分析,筛选出 40 mmol/L 为油菜耐盐碱鉴定的适宜浓度。

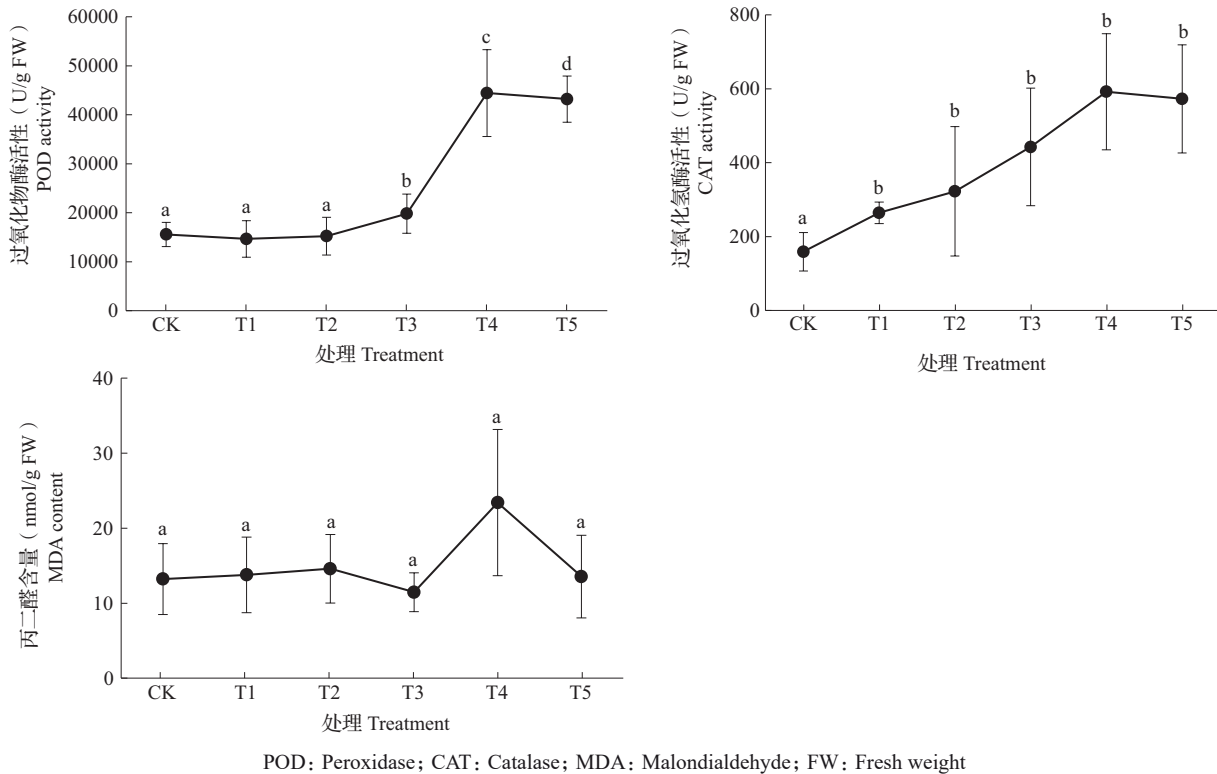


图2 不同浓度盐碱胁迫对油菜过氧化物酶活性、过氧化氢酶活性和丙二醛含量的影响

Fig. 2 Effect of salt-alkali stress on POD activity, CAT activity and MDA content in rapeseed

2.2 87份油菜群体耐盐碱性综合评价及筛选

2.2.1 油菜群体材料的耐盐碱变异情况

在盐碱胁迫浓度为 40 mmol/L 时,油菜种子平均发芽势和发芽率分别为 88% 和 95%,均低于对照的 94% 和 99%,而变异系数均高于对照。盐碱胁迫下的平均下胚轴长和平均根长分别为 2.12 cm 和 0.80 cm,低

于对照的 3.14 cm 和 6.30 cm,变异系数也均高于对照。盐碱胁迫下的鲜重为 0.30 g,对照为 0.33 g,变异系数相差不明显(表3)。结果表明,不同油菜种质在种子萌发期对盐碱胁迫的响应不同,存在较大变异,可以在种子萌发期筛选耐盐碱油菜优异种质。

表3 盐碱胁迫下种子萌发的表型变异分析

Table 3 Phenotypic variation analysis of seed germination under salt-alkali stress

指标 Index	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数(%) CV
对照组发芽势(%)GE of CK	10	100	94	10.91	11.57
处理组发芽势(%)GE of T	2	100	88	15.05	17.10
相对发芽势 Relative GE	0.20	1.00	0.92	0.12	13.04
对照组发芽率(%)GR of CK	92	100	99	1.80	1.82
处理组发芽率(%)GR of T	2	100	95	11.69	12.25
相对发芽率 Relative GR	0.72	1.00	0.97	0.05	5.15
对照组下胚轴长(cm)HL of CK	1.78	7.90	3.14	1.04	33.05

表3 (续)

指标 Index	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数(%) CV
处理组下胚轴长(cm)HL of T	0.64	4.02	2.12	0.75	35.60
相对下胚轴长 Relative HL	0.09	0.97	0.70	0.21	30.00
对照组根长(cm)RL of CK	1.25	10.46	6.30	2.54	40.31
处理组根长(cm)RL of T	0.22	2.81	0.80	0.52	64.08
相对根长 Relative RL	0.04	0.93	0.16	0.16	100
对照组鲜重(g)FW of CK	0.17	0.65	0.33	0.08	22.57
处理组鲜重(g)FW of T	0.14	0.67	0.30	0.07	21.52
相对鲜重 Relative FW	0.40	1.00	0.84	0.11	13.10

CK表示对照,T表示40 mmol/L的盐碱浓度

CK indicates the control group, T indicate salt-alkali concentrations of 40 mmol/L

对盐碱胁迫下的发芽势、发芽率、下胚轴长、根长和鲜重的相对值进行分析,发现40 mmol/L浓度的盐碱胁迫下,87份群体材料种子的平均发芽势和发芽率分别是88%和95%,大部分油菜种子都能正常发芽。相对鲜重呈现正态分布,峰值靠后,大部分材料集中在0.8~1.0,说明萌发期幼苗鲜重受盐碱胁迫影响较小

(图3)。盐碱胁迫后相对根长主要集中在0.1~0.2范围内,说明胁迫后的根长与对照相比,大部分材料根长下降明显,盐碱胁迫对根长的影响较突出。相对下胚轴长呈连续性分布,不同油菜品种在胁迫后下胚轴长表现出广泛的遗传变异(图4)。可见利用根长和下胚轴长更容易筛选出耐盐碱性强的优异材料。

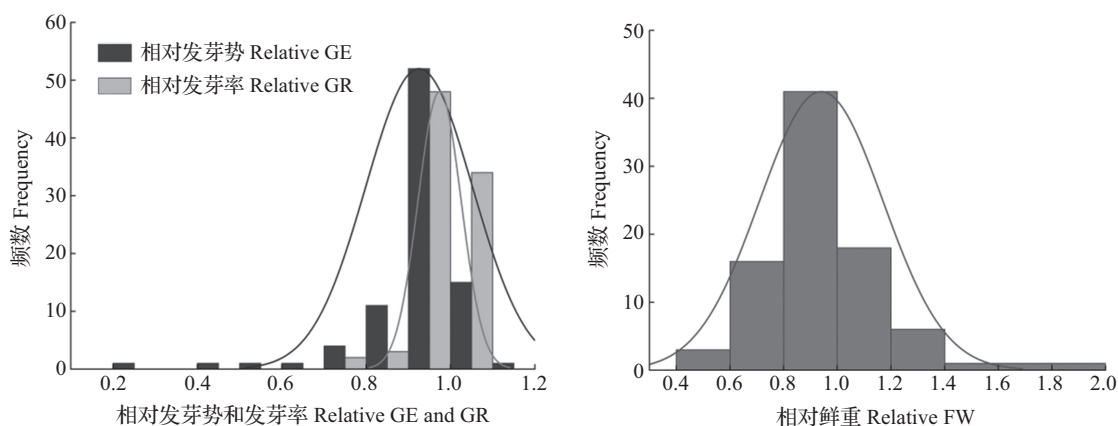


图3 盐碱胁迫下相对发芽势、发芽率和鲜重的频数分布

Fig. 3 Frequency distribution of relative germination energy, germination rate and fresh weight under salt-alkali stress

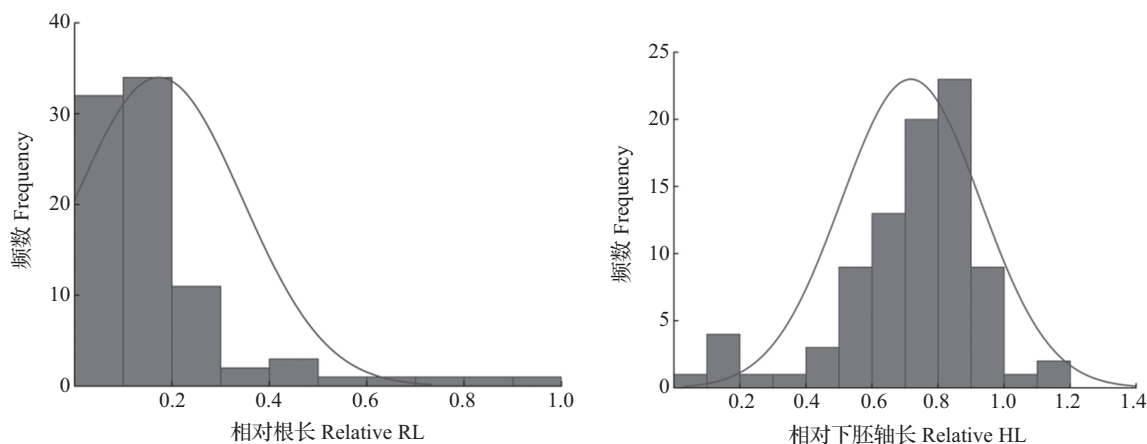


图4 盐碱胁迫下相对根长和相对下胚轴长的频数分布

Fig. 4 Frequency distribution of relative root length and hypocotyl length under salt-alkali stress

2.2.2 盐碱胁迫下各指标的相关性和主成分分析
对发芽指标和生长指标进行相关性分析,发现发芽势与发芽率呈极显著正相关,相关系数为0.70,与下胚轴长呈显著正相关,相关系数为0.23,与根长呈极显著负相关,相关系数为-0.30。发芽率与下胚轴长

和鲜重均呈极显著正相关,相关系数分别为0.36和0.30,与根长呈极显著负相关,相关系数为-0.33。下胚轴长与根长呈极显著负相关,相关系数为-0.64,与鲜重呈极显著正相关,相关系数为0.43。根长与其他指标均呈极显著负相关(表4)。

表4 盐胁迫下各指标的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of various indices under salt-alkali stress

指标 Index	发芽势 GE	发芽率 GR	下胚轴长 HL	根长 RL	鲜重 FW
发芽势 GE	1				
发芽率 GR	0.70**	1			
下胚轴长 HL	0.23*	0.36**	1		
根长 RL	-0.30**	-0.33**	-0.64**	1	
鲜重 FW	0.20	0.30**	0.43**	-0.22*	1

*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显著相关

* and ** indicate significant correlation at the $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively

主成分分析(表5)发现,第1主成分的特征值为2.17,方差贡献率达到了43.30%,表明它解释了原始数据中相当大的一部分变异。随着特征值和方差贡献率逐渐减小,说明后面的主成分对原始数据变异性的解释能力越来越弱。第3主成分的特征值

仅为0.86,方差贡献率为17.22%。当所选取主成分的累计方差贡献率介于80%~88%之间时,则表明这些成分足以代表原始数据的信息。本研究前3个主成分的累计方差贡献率为84.16%,可解释原始数据约80%以上的变异性。

表5 前3个主成分特征值、特征向量和各指标的总载荷数

Table 5 The eigenvalues and eigenvectors of the first three principal components and total load of each index

指标 Index	主成分 Principal components			总载荷数 Total load
	1	2	3	
相对发芽势 Relative GE	0.48	-0.24	0.14	0.31
相对发芽率 Relative GR	0.48	-0.22	0.15	0.30
相对下胚轴长 Relative HL	0.37	0.58	-0.60	0.83
相对根长 Relative RL	-0.21	0.67	0.67	0.94
相对鲜重 Relative FW	0.55	0.32	0.37	0.54
特征值 Eigenvalue	2.17	1.18	0.86	
方差贡献率(%) Variance contribution rate	43.30	23.64	17.22	
累计方差贡献率(%) Cumulative variance contribution rate	43.30	66.94	84.16	

从表5中可以看出,第1主成分的主要指标是相对发芽势、相对发芽率和相对鲜重,其特征向量分别为0.48、0.48和0.55,综合反映了种子的发芽活力和幼苗的生物量积累。第2主成分与相对下胚轴长和相对根长相关性较大,特征向量分别为0.58和0.67,主要代表了幼苗根部及下胚轴伸长生长。第3主成分主要与相对根长和相对鲜重相关,特征向量达到0.67和0.37。

2.2.3 油菜种质耐盐碱性的综合评价和优异材料

筛选 在主成分分析的基础上,计算所有参试材料的D值,依据D值对87份材料的耐盐碱性进行综合评价(表6)。群体材料的D值最大为2.40,综合排名前10的材料为郑油1号、希望106、HJa 82470、363、97选、88-2、华油九号、H56、华油13号、川油H-53。按照D值的大小,并结合盐碱条件下的各项指标,筛选出1份高耐盐碱种质:郑油1号;5份耐盐碱种质:97选、88-2、363、希望106、HJa 82470;3份盐碱敏感种质:早丰1号、云油12号、华黄1号(表7)。

表6 油菜种质的耐盐碱性综合评价D值及排序

Table 6 D value and ranking of saline-alkaline resistance of materials

材料名称 Material name	D值 D value	排名 Ranking	材料名称 Material name	D值 D value	排名 Ranking	材料名称 Material name	D值 D value	排名 Ranking
郑油1号	2.40	1	Yic Kaden	0.50	30	岳阳84-8	-0.13	59
希望106	1.85	2	广德741	0.45	31	Ew-2	-0.14	60
HJa 82470	1.79	3	油研一号	0.44	32	Annick	-0.15	61
363	1.64	4	Dac chosen	0.44	33	青油12号	-0.16	62
97选	1.55	5	开07	0.43	34	LINGOT	-0.20	63
88-2	1.54	6	川油96II-19本地油菜	0.43	35	4092	-0.21	64
华油九号	1.45	7	川油93305(野油菜)	0.42	36	漕油2号	-0.22	65
H56	1.44	8	78007	0.42	37	R V 3	-0.23	66
华油13号	1.40	9	951061	0.42	38	77-258	-0.24	67
川油H-53	1.37	10	870921-4	0.41	39	Line	-0.25	68
7306	1.36	11	跃进油菜	0.41	40	Casion	-0.26	69
胜利青梗	1.35	12	浙优油1号杂选84-1	0.40	41	23号油菜	-0.27	70
Puma-SV.8627102	1.33	13	宠马	0.39	42	96628	-0.28	71
农林20号	1.32	14	P6036-1	0.39	43	胜利52	-0.29	72
川油二号	1.30	15	4050-4149	0.39	44	DH 9-2	-0.30	73
苏J209	1.29	16	华油八号	0.38	45	啊沃尔	-0.31	74
8M2280	1.28	17	利戈勒-1	0.38	46	云油11号	-0.32	75
蓬莱1号	1.27	18	28669	0.37	47	宁强玉泉坝油菜	-0.34	76
I-Y-14油菜	1.26	19	940171	0.36	48	中双1号	-0.35	77
6024-2	1.25	20	83008	0.36	49	Target	-0.37	78
沪油三号	1.24	21	滨油1号	0.35	50	欧洲油菜	-0.38	79
Koolzaad-2	1.23	22	96786	0.34	51	米达斯	-0.39	80
WW 1307	1.23	23	早丰5号	0.33	52	金油15号	-1.40	81
Tripol	1.22	24	AB448	0.32	53	GSB615	-1.50	82
6084	1.02	25	82-2524	0.31	54	GSB611	-1.53	83
P20	1.21	26	Ru6	0.29	55	Ganpol	-1.72	84
SV.Global	1.20	27	P3	0.27	56	早丰1号	-1.95	85
H25	1.19	28	油光叶	-0.06	57	云油12号	-2.03	86
伊沃市罗纳坦	0.47	29	SV.02312	-0.13	58	华黄1号	-2.12	87

表7 筛选出的耐盐碱、盐碱敏感的甘蓝型油菜种质

Table 7 Screening of salt-alkali tolerant and sensitivity rapeseed germplasm

编号 No.	材料名称 Material name	发芽势(%) GE	发芽率(%) GR	下胚轴长(cm) HL	根长(cm) RL	鲜重(g) FW
22	郑油1号	96	99	2.40	0.87	0.84
85	希望106	97	99	1.95	0.56	0.29
40	HJa 82470	96	96	2.51	0.57	0.38
6	363	99	100	1.96	0.82	0.30
75	97选	97	100	2.20	0.81	0.33
59	88-2	100	100	3.12	1.12	0.34
5	早丰1号	60	83	0.56	0.29	0.40
34	云油12号	93	99	0.94	0.11	0.90
24	华黄1号	97	98	0.83	0.24	0.75

2.2.4 油菜种质耐盐碱性的聚类分析 对87份油菜种质进行聚类分析,可将其分为5类(图5),强耐盐碱型、耐盐碱型、中间型、盐碱敏感型和盐碱极敏感型。第I类包括6份材料(D值为1.54~2.40),占群体的6.90%,其中郑油1号D值最高,为极强耐盐碱性材料;第II类由22份材料组成(D值为1.02~1.45),为耐盐碱性类型,占群体的25.29%;第III类为中间型材料,由24份种质组成(D值为0.33~0.47),占比27.58%;第IV类包括28份材料(D值为-0.40~0.32),占群体的32.18%,为盐碱敏感性材料;第V类包括7份材料(D值为-2.12~0.31),为盐碱极敏感材料,占比8.05%。

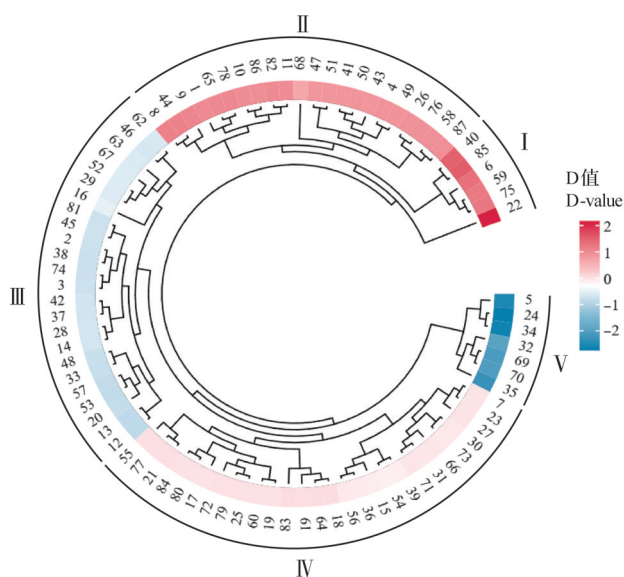


图5 87份油菜种质基于D值的聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of 87 rapeseed germplasm accessions based on D-value

3 讨论

种子萌发作为植物生命周期的开端,是植物首次经受盐碱逆境的关键环节^[20]。普遍认为,种子萌发期和幼苗的生长期是植物对盐碱胁迫反应最为敏感的两个阶段^[21]。本研究发现油菜种子发芽势、发芽率、发芽指数以及根长、下胚轴长和活力指数在低浓度盐碱胁迫下变化不明显,在高浓度盐碱胁迫下随浓度升高而降低,说明低浓度的盐碱胁迫在一定程度上可以促进油菜种子的萌发,高浓度盐碱胁迫抑制或减缓种子发芽。丁富功等^[22]研究表明油菜幼苗苗高和根长均存在低浓度盐碱混合溶液促进生长,而高浓度盐碱混合溶液抑制生长的现象;张瑀茜等^[23]研究发现低浓度处理对油菜萌发期各性状生长具有促进作用。张妙娟等^[24]结果显示

NaCl胁迫在一定浓度范围内,对油菜种子的萌发有抑制作用,对幼苗的株高、根长、地上和地下鲜重以及叶绿素含量均有一定的影响。

相较于单纯的盐胁迫,盐碱胁迫还额外增加了高pH胁迫,因此其对油菜造成的伤害更为严重,机理也更为复杂^[25]。前期种子萌发阶段高pH值影响较弱,但会成为后续幼苗生长的关键限制因子^[26]。有研究报道,植物根系作为盐碱胁迫的最初感知部位,其生长受抑制会引发连锁生理反应,进而影响地上部生长。在低浓度盐碱胁迫下,油菜幼苗通过增加根长以增强水分获取;随着胁迫强度加剧,根长与下胚轴生长转为受抑制,且盐碱胁迫的抑制作用明显强于盐胁迫^[26]。高pH值环境不仅阻碍根系对矿质营养及氧气的正常吸收,还会直接破坏根细胞结构与功能,干扰细胞正常分裂,甚至诱发染色体畸变、微核等异常现象^[26]。

当遭受盐碱胁迫时,油菜幼苗体内会产生大量积累活性氧,进而引发细胞膜脂过氧化^[27]。与此同时,植物体内一套完整的活性氧清除系统会被启动,该系统能有效清除盐碱胁迫产生的大量活性氧,从而增强植物对逆境的适应性,维持其正常的生命活动。邱璐^[28]研究表明,在一定盐碱胁迫下,藜麦可通过抗氧化酶活性的提高清除体内多余的活性氧。路旭平等^[29]研究表明,在盐碱胁迫条件下,水稻耐碱品种合成更多的超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶,清除多余的活性氧,增强植株的耐碱性。本研究发现盐碱胁迫下幼苗的过氧化物酶和过氧化氢酶活性以及丙二醛含量均随着盐碱浓度增加而升高,浓度达到50 mmol/L时酶活力均下降,说明在低浓度或中性盐碱环境下,过氧化物酶和过氧化氢酶的活性通常升高,能够有效清除胁迫产生的超氧阴离子自由基和过氧化氢,从而缓解氧化损伤。然而,在高浓度盐碱胁迫下,由于环境pH值较高,再加上高浓度的Na⁺,可能会直接抑制酶活性,其清除活性氧的能力随之下降^[30-31]。

盐碱胁迫下,油菜种子萌发期的发芽势、发芽率、根长、下胚轴长等指标均低于对照,从各指标的相对值的分布区间可以看出,不同品种间差异很大,其中相对根长主要集中在0.1~0.2范围内,低于发芽势、发芽率、发芽指数和鲜重的相对值,说明根长受盐碱胁迫的影响最大。刘自刚等^[32]认为盐胁迫下冬油菜种子发芽率、发芽势比对照显著下降,胚根、胚芽伸长被显著抑制,表明盐胁迫对胚根的伸长抑制更为明显,保持较高的根系量是植物对盐

胁迫的重要适应机制; Mansoori 等^[33]通过对 300 份油菜种质进行早期耐盐性筛选, 发现种子发芽率、出苗率以及地上部和根的长度及质量是评价油菜耐盐性的关键指标。本研究综合筛选出 1 份高耐盐碱种质, 5 份耐盐碱种质和 3 份盐碱敏感种质。鉴于植物在不同生育阶段对盐碱胁迫的适应性可能不同, 种子萌发期耐盐碱性鉴定结果不能代表油菜全生育期。同时, 实验室模拟鉴定和田间鉴定是相辅相成的, 本研究建立的实验室模拟盐碱鉴定体系, 优势在于在可控环境下高效、精准地评估不同油菜种质的耐性和生理响应, 是进行大规模种质资源初筛和耐性机理探讨的有效方式; 田间鉴定优势在于真实性和综合性, 在复杂的自然环境中检验材料的综合适应能力和最终产量表现。因此, 要全面评价种质的适应性, 仍需结合田间复杂的盐碱环境下的最终产量进行综合验证, 后续将结合大田试验, 继续开展油菜生育期如苗期、成熟期的鉴定, 并与产量性状进行综合验证, 筛选出适合大田种植的耐盐碱优异种质。同时, 后续将整合 87 份核心群体材料的基因型数据, 结合耐盐碱的表型性状和生理指标开展全基因组关联分析, 并利用转录组测序等技术, 进一步解析油菜耐盐碱性的生理和分子机制。

4 结论

通过不同浓度的盐碱胁迫处理, 结合种子萌发的发芽势、发芽率、发芽指数、下胚轴长、根长和活力指数等指标进行综合评价, 筛选出甘蓝型油菜种子萌发期耐盐碱胁迫的适宜浓度为 40 mmol/L, 并用该浓度对 87 份甘蓝型油菜种子萌发期进行鉴定, 发现甘蓝型油菜群体材料的耐盐碱性存在丰富的变异, 筛选出 1 份高耐盐碱种质, 5 份耐盐碱种质和 3 份盐碱敏感种质。本研究结果为甘蓝型油菜的耐盐碱性综合评价及新品种选育工作提供了重要的理论依据与种质材料。

参考文献

- [1] Parihar P, Singh S, Singh R, Singh V P, Prasad S M. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(6): 4056-4075
- [2] Wang S J, Chen Q, Li Y, Zhuo Y Q, Xu L Z. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum. *Resources, Conservation & Recycling*, 2016, 121: 82-92
- [3] 杨真, 王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策. *山东农业科学*, 2015, 47(4): 125-130
Yang Z, Wang B S. Present status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China. *Shandong Agriculture Sciences*, 2015, 47(4): 125-130
- [4] Wang J H, Yao L R, Li B C, Meng Y X, Ma X L, Lai Y, Si E J, Ren P R, Yang K, Shang X W, Wang H J. Comparative proteomic analysis of cultured suspension cells of the halophyte *Halogeton glomeratus* by iTRAQ provides insights into response mechanisms to salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7(30): 110
- [5] 麻莹, 曲冰冰, 郭立泉, 石德成, 王德利. 盐碱混合胁迫下抗碱盐生植物碱地肤的生长及其茎叶中溶质积累特点. *草业学报*, 2007, 16(4): 25-33
Ma Y, Qu B B, Guo L Q, Shi D C, Wang D L. A characteristic of the growth and solute accumulation in shoots of an alkali-tolerant *Kochia sieversiana* under salt-alkaline mixed stress. *Acta Prataculture Sinica*, 2007, 16(4): 25-33
- [6] 刘建新, 刘瑞瑞, 贾海燕, 卜婷, 李娜. 外源 H₂S 对盐碱胁迫下裸燕麦幼苗叶片渗透胁迫的调节作用. *生态学杂志*, 2020, 39(12): 3989-3997
Liu J X, Liu R R, Jia H Y, Bu T, Li N. Regulation of exogenous hydrogen sulfide on osmotic stress in leaves of naked oat seedlings under saline-alkali mixed stress. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(12): 3989-3997
- [7] 许耀照, 孙万仓, 曾秀存, 李彩霞, 周喜旺. 盐碱胁迫油菜的主导因素分析. *草业科学*, 2013, 30(3): 423-429
Xu Y Z, Sun W C, Zeng X C, Li C X, Zhou X W. Analysis of the key stress factors in winter rape under simulated salinity-alkalinity mixed condition. *Pratacultural Science*, 2013, 30(3): 423-429
- [8] 刘杰, 张美丽, 张义, 石德成. 人工模拟盐、碱环境对向日葵种子萌发及幼苗生长的影响. *作物学报*, 2008, 34(10): 1818-1825
Liu J, Zhang M L, Zhang Y, Shi D C. Effect of simulated salt and alkali conditions on seed germination and seedling growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(10): 1818-1825
- [9] 沈金雄, 傅廷栋. 我国油菜生产、改良与食用油供给安全. *中国农业科技导报*, 2011, 13(1): 1-8
Shen J X, Fu T D. Rapeseed production, improvement and edible oil supply in China. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(1): 1-8
- [10] Banaci-Asl F, Bandehagh A, Uliaei E D, Farajzadeh D, Sakata K, Mustafa G, Komatsu S. Proteomic analysis of canola root inoculated with bacteria under salt stress. *Journal of Proteomics*, 2015, 124: 88-111
- [11] 汪波, 文静, 张风华, 李立军, 来永才, 任长忠, 鲁剑巍, 沈金雄, 郭亮, 周广生, 傅廷栋. 耐盐碱油菜品种选育及修复利用盐碱地研究进展. *科技导报*, 2021, 39(23): 59-64
Wang B, Wen J, Zhang F H, Li L J, Lai Y C, Ren C Z, Lu J W, Shen J X, Guo L, Zhou G S, Fu T D. Research progress in breeding of saline-alkaline tolerant rapeseed and restoring the salinate land. *Science and Technology Review*, 2021, 39(23): 59-64

- [12] 梅勇. 利用耐盐植物欧洲油菜修复盐碱荒地//Intelligent Information Technology Application Association. Proceedings of 2011 International Conference on Energy and Environment. Shenzhen: International Conference on Energy and Environment, 2011: 360-367
Mei Y. Remediation of saline-alkaline land in semiarid region with salt tolerant plant: Sheiaralle//Intelligent Information Technology Application Association. Proceedings of 2011 International Conference on Energy and Environment. Shenzhen: International Conference on Energy and Environment, 2011: 360-367
- [13] 张培通, 张萼, 郭文琦, 陈建平, 李春宏, 王永慧, 胡茂龙, 蔡立旺, 施庆华. 油菜宁杂21号在江苏沿海滩涂盐碱地的种植表现及高产栽培技术要点. 江苏农业科学, 2014, 42(6): 84-85
Zhang P T, Zhang E, Guo W Q, Chen J P, Li C H, Wang Y H, Hu M L, Cai L W, Shi Q H. Planting performance and key high-yield cultivation techniques of rapeseed variety 'Ningza 21' in coastal saline-alkali soils of Jiangsu province. Jiangsu Agricultural Science, 2014, 42(6): 84-85
- [14] 刘东洋, 徐接亮, 张凤华. 不同油菜品种对盐碱土壤理化性质与微生物多样性的影响. 新疆农业科学, 2019, 56(2): 246-257
Liu D X, Xu J L, Zhang F H. Effect of rape varieties soil physicochemical properties and microbial diversity in saline-alkali land in Xinjiang. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(2): 246-257
- [15] 朱孔志, 吴明昊, 申玉香, 李洪山, 杨世才, 杜希宽, 丁世峰. 不同油菜品种在盐碱地的耐盐性鉴定及筛选. 浙江农业科学, 2018, 59(8): 1354-1356, 1364
Zhu K Z, Wu M H, Shen Y X, Li H S, Yang S C, Du X K, Ding S F. Screening and identification of salt tolerance in different rapeseed varieties in saline-alkali soils. Zhejiang Agricultural Sciences, 2018, 59(8): 1354-1356, 1364
- [16] 王学奎. 植物生理生化试验原理和技术. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2006
Wang X K. Principle and technology of plant physiological and biochemical experiments. 2nd edn. Beijing: Higher Education Press, 2006
- [17] 范惠玲, 白生文, 路妍, 彭小星, 周仙莉, 张红岩, 滕长才, 武学霞, 刘玉皎. 155份蚕豆种质资源全生育期耐盐碱性鉴定与综合评价. 作物学报, 2024, 50(12): 3035-3045
Fan H L, Bai S W, Lu Y, Peng X X, Zhou X L, Zhang H Y, Teng C C, Wu X X, Liu Y J. Identification and comprehensive evaluation of salt-alkali tolerance throughout the growth period of 155 faba bean germplasms. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(12): 3035-3045
- [18] 乔钰岩, 于淼, 唐玉劼, 石贵山, 刘新宇, 刘晓涵, 王新鼎, 李扬, 王翊, 陈冰嫻. 粒用高粱幼苗期耐苏打盐碱综合评价与指标鉴定. 中国农业科学, 2025, 58(1): 30-49
Qiao Z Y, Yu M, Tang Y J, Shi G S, Liu X Y, Liu X H, Wang X D, Li Y, Wang N, Chen B R. Comprehensive evaluation for soda salinity and alkalinity in sorghum seedling stage and selection of indicators. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(1): 30-49
- [19] 薛天源, 鲁金春子, 何思晓, 余忆, 陈敬东, 文静, 沈金雄, 傅廷栋, 曾长立, 万何平. 286份甘蓝型油菜种质苗期耐盐碱性综合评价. 植物遗传资源学报, 2024, 25(3): 356-372
Xue T Y, Lu J C Z, He S X, Yu Y, Chen J D, Wen J, Shen J X, Fu T D, Zeng C L, Wan H P. Comprehensive evaluation of saline-alkali tolerance of 286 *Brassica naups* germplasm at seedling stage. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(3): 356-372
- [20] 刘斌, 周延, 龚伟, 屈芮茵, 曾萌. 盐碱胁迫对不同苦瓜品种种子萌发的影响. 安徽农业科学, 2009, 37(34): 16806-16808
Liu B, Zhou Y, Gong W, Qu R Y, Zeng M. The effect of neutral salt and alkali saline stress on the germination of *Bitter Gourd* seeds. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(34): 16806-16808
- [21] 陆婷, 李英霜, 康健. 混合盐碱胁迫对橡胶草种子萌发的影响. 种子, 2019, 38(2): 12-15, 19
Lu T, Li Y S, Kang J. Effects of salt-alkali mixed stresses on seed germination of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin. Seed, 2019, 38(2): 12-15, 19
- [22] 丁富功, 卢奕霏, 康珍, 侯泽豪, 张迎新, 方正武, 王书平. 混合盐碱胁迫对油菜种子萌发和幼苗生长的影响. 长江大学学报: 自然科学版, 2020, 17(3): 73-80, 90
Ding F G, Lu Y F, Kang Z, Hou Z H, Zhang Y X, Fang Z W, Wang S P. Effects of mixed saline-alkali stress on seed germination and seedling growth of different rape varieties. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2020, 17(3): 73-80, 90
- [23] 张瑀茜, 高山, 张锐, 解科星, 王杰. 盐胁迫对不同油菜种子萌发的影响. 种子, 2021, 40(1): 94-98
Zhang Y X, Gao S, Zhang R, Xie K X, Wang J. Effects if salt stress on seed germination and morphology of different rapeseeds. Seed, 2021, 40(1): 94-98
- [24] 张妙娟, 吴琼, 张引弟. NaCl胁迫对油菜幼苗生长的影响研究. 种子科技, 2020, 38(23): 11-14
Zhang M J, Wu Q, Zhang Y D. Study on the effects of NaCl stress on growth of rapeseed seedlings. Seed Technology, 2020, 38(23): 11-14
- [25] 毛恋, 芦建国, 江海燕. 植物响应盐碱胁迫的机制. 分子植物育种, 2020, 18(10): 3441-3448
Mao L, Lu J G, Jiang H Y. Mechanisms of plant responses to salt-alkali stress. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(10): 3441-3448
- [26] 许耀照, 曾秀存, 方彦, 孙万仓. 盐碱胁迫对油菜种子萌发和根尖细胞有丝分裂的影响. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 14-19
Xu Y Z, Zeng X C, Fang Y, Sun W C. Effects of salt and alkali stress on seed germination and mitosis of root apical cells of *Brassica campestris* L.. Agricultural Research in the Arid

- Areas, 2014, 32(4): 14-19
- [27] 徐田军, 董志强, 兰洪亮, 裴志超, 高娇, 谢振兴. 低温胁迫下聚糠萘合剂对玉米幼苗光合作用和抗氧化酶活性的影响. 作物学报, 2012, 38(2): 352-359
- Xu T J, Dong Z Q, Lan H L, Pei Z C, Gao J, Xie Z X. Effects of PASP-KT-NAA on photosynthesis and antioxidant enzyme activities of maize seedling under low temperature stress. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(2): 352-359
- [28] 邱璐. 藜麦生长初期对盐碱胁迫的生理响应. 长春: 东北师范大学, 2018
- Qiu L. The physiological response of *Chenopodium quinoa* Willd. to saline alkaline stress in the early stage of growth. Changchun: Northeast Normal University, 2018
- [29] 路旭平, 李芳兰, 石亚飞, 张娟伟, 杨文伟, 罗成科, 田蕾, 李培富. 不同水稻品种幼苗响应碱胁迫的生理差异及胁迫等级构建. 生态环境学报, 2021, 30(8): 1757-1768
- Lu X P, Li F L, Shi Y F, Zhang J W, Yang W W, Luo C K, Tian L, Li P F. Physiological differences of seedlings of different rice varieties in response to alkali stress and construction of stress levels. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(8): 1757-1768
- [30] 刘铎, 丛日春, 高卫东, 党红忠, 李庆梅, 刘德玺, 杨庆山. 盐碱胁迫对柳树抗氧化酶的影响. 水土保持通报, 2017, 37(5): 53-57
- Liu D, Cong R C, Gao W D, Dang H Z, Li Q M, Liu D X, Yang Q S. Effects of salt and alkali stresses on antioxidases of willow. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(5): 53-57
- [31] 高桂珍, 翟云孤, 张鲁斌, 常金梅, 罗海华, 伍晓明. 油菜耐盐碱种质鉴定与品种选育研究进展. 生物技术进展, 2022, 12(5): 647-654
- Gao G Z, Zhai Y G, Zhang L B, Chang J M, Luo H H, Wu X M. Advances on germplasm identification and variety breeding to saline-alkali stress of rapeseed. *Current Biotechnology*, 2022, 12(5): 647-654
- [32] 刘自刚, 王志江, 方圆, 孙万仓, 袁金海, 米超, 方彦, 武军艳, 李学才. NaCl胁迫对白菜型冬油菜种子萌发和幼苗生理的影响. 中国油料作物学报, 2017, 39(3): 351-359
- Liu Z G, Wang Z J, Fang Y, Sun W C, Yuan J H, Mi C, Fang Y, Wu J Y, Li X C. Effect of salt stress on seed germination and seedling physiology of winter rapeseed (*Brassica rapa* L.). *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2017, 39(3): 351-359
- [33] Mansoori I, Najafe-Zarrini H, Jelodar N B, Pakdin A. Screening of canola (*Brassica napus* L.) genotypes for salt tolerance based on early growth stage. *Biological Forum*, 2017, 9(2): 208-216