

# 西藏山南市白菜型油菜资源种子萌发期耐盐性研究

江伦娟, 高源, 卓嘎, 巴卓, 旦巴

(西藏农牧大学植物科学学院高原作物分子育种实验室, 西藏 林芝 860000)

**摘要:**以西藏山南市地方白菜型油菜为研究材料,采用 NaCl 模拟盐胁迫,结合主成分分析、隶属函数法及多元线性回归方程等方法综合评价其萌发期耐盐性。结果表明:盐胁迫下各指标变异系数均大于 10%,表明材料存在丰富的变异性;相关性分析显示,发芽势、发芽率与鲜质量显著相关,但与根长、芽长无显著相关性,而根长、芽长与鲜质量存在相关性;主成分分析将 5 个萌发指标(发芽势、发芽率、根长、芽长、鲜质量)降维为 2 个主成分,累计贡献率达 89.561%,有效表征了油菜萌发期的耐盐特性;基于隶属函数法计算的耐盐性综合评价值(D 值)显示,10 份材料中仅材料 2 为低等耐盐,其余均为盐敏感型;通过多元线性回归建立的耐盐性预测模型为: $Y = -0.156 + 0.004X_1 - 0.004X_2 - 0.12X_3 + 0.173X_4 + 6.618X_5$  ( $R^2 = 0.991$ ,  $p < 0.05$ )。

**关键词:**白菜型油菜;地方资源;萌发期;耐盐性;西藏

中图分类号:S565.4

文献标识码:A

## Study on the salt tolerance of *Brassica rapa* L. germplasm resources in Shannan of Xizang during seed germination period

JIANG Lunjuan, GAO Yuan, Zhuoga, Bazhuo, Danba

(Laboratory of Molecular Breeding of Plateau Grops, College of Plant Science, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Nyingri Xizang 860000, China)

**Abstract:** Taking local *Brassica rapa* L. in Shannan City as the research material, NaCl was used to simulate salt stress. A comprehensive evaluation of its salt tolerance during the germination stage was conducted using methods such as principal component analysis, membership function analysis, and multiple linear regression equations. The results showed that the coefficient of variation for all indicators under salt stress exceeded 10%, indicating that the material had rich variability. Correlation analysis showed that germination potential and germination rate were significantly correlated with fresh weight, but not with root length or shoot length. while, root length and shoot length were correlated with fresh weight. Principal component analysis reduced the five germination indices (germination potential, germination rate, root length, shoot length, and fresh weight) into two principal components, with a cumulative contribution rate of 89.561%, effectively characterizing the salt tolerance of rapeseed during the germination stage. The comprehensive salt tolerance evaluation value (D value) calculated using the membership function method, showed that among the 10 materials examined, only Material 2 was categorized as low salt tolerance, while the remaining materials were salt-sensitive. The salt tolerance prediction model established using multiple linear regression is  $Y = -0.156 + 0.004X_1 - 0.004X_2 - 0.12X_3 + 0.173X_4 + 6.618X_5$  ( $R^2 = 0.991$ ,  $p < 0.05$ ).

**Key words:** *Brassica rapa* L.; germplasm resources; germination period; salt resistance; Xizang

土壤盐渍化是农业生产的核心障碍,在自然与人类活动双重作用下,土壤表层盐分富集,严

重制约区域经济发展<sup>[1-2]</sup>。伴随气候变化与不合理灌溉,盐碱化问题日益加剧,高盐环境对植物

收稿日期:2025-05-28

基金项目:2025 年中央财政支持地方高校发展改革专项——高原特色农牧科技小院建设及综合能力提升(YJSXK2025-13)。

作者简介:江伦娟(2001—),女,硕士研究生,研究方向为高原油菜抗逆性研究与种质创新,E-mail:2256060023@qq.com。

通信作者:旦巴(1971—),男,副教授,主要从事油菜遗传育种研究,E-mail:dbtebit@163.com。

产生多重胁迫,威胁作物安全。油菜作为世界四大油料经济作物之一<sup>[3]</sup>,是全球食用油供给体系的重要支柱,我国是最大的生产与消费国。土壤盐渍化严重影响油菜产量与产业发展,在盐渍化土壤中,盐分胁迫会通过多种途径损害油菜生长<sup>[4]</sup>。西藏作为重要的高原农业区,干旱半干旱的地理环境、复杂气候及不当灌溉,导致以硫酸盐或氯化物为主的盐碱地面积不断扩大,严重影响农作物的生长与产量<sup>[5]</sup>。土壤盐碱化不仅会破坏土壤结构、降低养分有效性,还会通过渗透胁迫和离子毒害作用显著抑制植物生长发育,最终造成农作物减产<sup>[6]</sup>。植物面对盐胁迫时,会通过细胞和整体层面的生物化学与分子机制作出响应。细胞层面:植物会选择性吸收或排出离子,将离子转运至中央液泡分隔储存,同时在细胞质中合成积累有机溶质,并调整膜结构组成。整体层面:通过调控根系对离子的吸收、控制离子从根部向地上部分的运输,将离子分配到老叶、叶鞘等不同器官,还会改变光合途径;体内的活性氧(ROS)代谢平衡会被打破,导致丙二醛(MDA)等氧化产物积累,进而对细胞结构和功能造成损害<sup>[7]</sup>;植物体内 CAT 和 SOD 的酶活性呈现先增强后减弱的趋势,表明细胞膜脂过氧化程度不断加深<sup>[8]</sup>;会严重破坏细胞膜的结构完整性,导致其通透性异常增加,引发膜脂过氧化反应,进而影响植物的正常生长发育<sup>[9]</sup>;会出现根系伸长缓慢、侧根数目减少<sup>[10]</sup>。

在油菜领域,相关研究已明确了盐胁迫下种质资源鉴定的有效指标,为油菜耐盐性种质资源的筛选鉴定工作提供了重要依据。许耀照等通过发芽率、胚根长、胚芽长、干重、鲜质量这几个耐盐指标对油菜进行了耐盐性鉴定<sup>[11]</sup>;李萍等通过发芽势、发芽率、相对根长、相对芽长这几个

耐盐性指标对 146 份甘蓝型油菜进行了耐盐等级分类<sup>[12]</sup>。油菜作为中等耐盐作物<sup>[13]</sup>,不同浓度盐胁迫下,我国三大主栽类型油菜的发芽率呈现出差异,由高到低依次为芥菜型油菜、甘蓝型油菜和白菜型油菜<sup>[14]</sup>。油菜对盐碱地土壤有改良作用,其在盐胁迫下的部分耐盐性鉴定指标为种质资源筛选提供了依据。目前,作物耐盐性综合评价有多种方法,可区分材料耐盐等级<sup>[15]</sup>。汪波等研究表明油菜是修复利用盐碱地最有优势的大田作物<sup>[16]</sup>。然而,西藏主栽的白菜型油菜耐盐性评价体系不完善,杨广环等对 13 份西藏白菜型黄籽油菜发芽率、发芽指数、发芽势、活力指数、胚根长、胚轴长、总鲜质量进行了耐盐性鉴定<sup>[17]</sup>;刘森通过发芽率、根长、株高和单株鲜质量对 42 份西藏油菜进行了耐盐性鉴定<sup>[18]</sup>。国内对西藏白菜型油菜耐盐性研究较少,所以在白菜型油菜耐盐指标筛选、综合评价和鉴定方面亟待深入研究。建立适用于西藏白菜型油菜的耐盐性评价体系,筛选耐盐种质资源,对当地农业可持续发展意义重大。

本研究以西藏山南市收集的 10 份白菜型油菜农家资源为材料,采用模拟盐胁迫方法,研究油菜萌发期耐盐性指标,结合主成分分析和隶属函数法,系统评价材料的耐盐等级,意在筛选耐盐性优异的种质资源,为白菜型油菜耐盐育种及盐碱地改良提供理论依据和亲本材料,同时为高原地区作物抗逆栽培提供技术参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

10 份参试油菜种子均由西藏农牧大学高原作物分子育种实验室提供,各油菜名称来源详见表 1。

表 1 西藏山南市白菜型油菜地方资源

序号	名称	来源	序号	名称	来源
1	错那油菜	错那市	6	松卡油菜	扎囊县桑耶镇松卡村
2	加玉乡油菜	隆子县加玉乡胖村	7	扎日油菜	洛扎县扎日乡扎日村
3	三林油菜	隆子县三林县三林乡	8	扎巴油菜	桑日县绒乡扎巴村
4	加瓦油菜	浪卡子县卡龙乡加瓦村	9	通巴油菜	桑日县绒乡通巴村
5	查布油菜	乃东区吉巴乡查布村	10	罗堆油菜	错那市罗堆乡罗堆村

### 1.2 试验设计及方法

铺 2 张滤纸于直径为 9 cm 的一次性培养皿内,设置 4 个浓度梯度,每个培养皿中分别加入

各 10 mL,分别放置 50 粒种子,种子要求挑大小均一、饱满、无破损且成熟的油菜种子,用 75%酒精泡 1 min,1%的次氯酸钠消毒 3 min,蒸馏水冲

洗3~4遍,各3次重复。光照培养箱内设置12 h光照/12 h黑暗,温度为25℃,相对湿度60%,光照强度7 000 Lx进行耐盐实验。在萌发期每个品种挑选10棵幼苗进行根长、芽长、鲜质量的测定。参考刘自刚等人的实验方法。

### 1.3 测量指标

$$\text{发芽势}(\%) = (\text{第3d发芽数} / \text{种子数}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽率}(\%) = (\text{第7d发芽数} / \text{种子数}) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{相对盐害指数} = [(\text{对照指标} - \text{盐胁迫指标}) / \text{对照指标}] \times 100\% \quad (3)$$

隶属函数值公式:

$$X(\mu) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (4)$$

$$X(\mu) = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (5)$$

$X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 代表10份品种中对应指标其最大值和小值, $X$ 对应指标的测量值。相关性分析中相关性为正就用(4),为负就用(5)。

主成分权重:

$$W_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$W_i$ 表示第*i*个综合指标在主成分所占的权重, $S_i$ 表示该指标的贡献率。

综合评价值:

$$D = \sum_{i=1}^n [X(\mu) \times W_i], i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

### 1.4 数据分析

用Excel 2010整合数据,SPSS 22.0进行相关性和主成分分析,基于隶属函数和主成分权重计算耐盐性综合评价值( $D$ 值),初步评估西藏山南白菜型油菜种质的耐盐性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同盐胁迫下的变异系数分析

10份白菜型油菜地方品种的发芽势、发芽率、根长、芽长、鲜质量几个指标均随着盐浓度的升高表现出明显的抑制趋势,10份白菜型油菜的最适盐浓度为150 mmol/L,与对照组相比,在该胁迫下发芽势、发芽率、根长、芽长、鲜质量这5个指标的平均值分别降低了47.37%、60.22%、52.36%、45.85%、63.64%。5个指标的变异系数分别为发芽势( $CV = 69.76\%$ )、发芽率( $CV =$

60.21%)、根长( $CV = 55.72\%$ )、芽长( $CV = 42.45\%$ )、鲜质量( $CV = 34.50\%$ )。在不同浓度盐胁迫下,其发芽势、发芽率和芽长的变异系数高于对照组,且均超过10%,表明逆境胁迫下,参试材料存在丰富的变异性(图1,图2)。

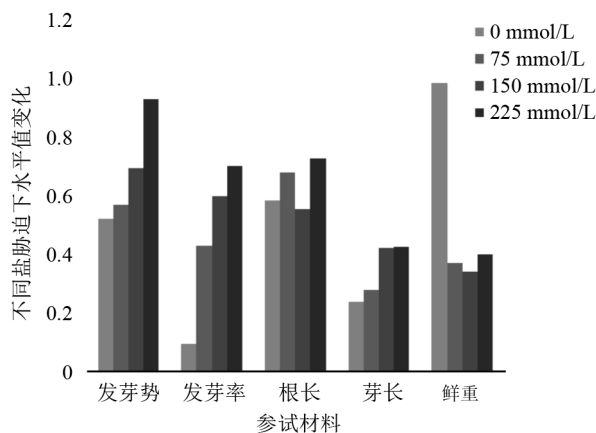


图1 不同盐胁迫下的平均值变化分析

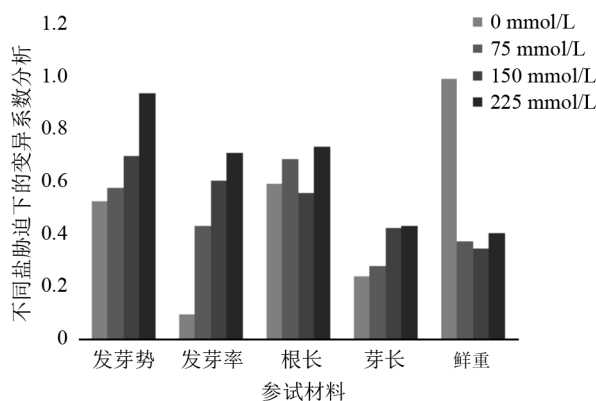


图2 不同盐胁迫下的变异系数分析

### 2.2 不同盐浓度下对油菜萌发期指标的方差分析

随着盐浓度升高所有参试材料的发芽势均值整体下降。如材料1在CK处理时发芽势为0.76%,而在225 mmol/L时降至34%,降幅达55.3%;材料10的发芽势从0.18%(CK)降至0(225 mmol/L),表明高盐胁迫抑制其萌发。材料1和6,在各浓度下均保持相对较高的发芽势,尤其在75 mmol/L时材料1与对照组无显著差异,显示出较强的耐盐性。高浓度(225 mmol/L)时,材料1与材料3、4、5等差异显著,说明耐盐性强的个体在极端环境下仍能部分萌发(表2)。

所有参试油菜发芽率随着NaCl浓度的增加呈下降趋势,在150 mmol/L胁迫下仅样本1(74%)、2(68%)、6(48%)保持相对较高发芽率,多数样本低于34%。样本1、2在各浓度下均

为同组最高发芽率,尤其在 225 mmol/L 时仍维持 48%~50%,显著高于其他样本,表现出耐盐稳定性。与后续主成分分析较为一致(表 3)。

由表 4 可知,低浓度 NaCl(75 mmol/L)处理下,部分材料根长有所增加(如材料 2 和 4),可能低盐胁迫对根长有短时间的促进作用。这与杨广环等的研究结果较为一致<sup>[17]</sup>。但多数材料根长下降,表明低浓度盐胁迫对根系生长的影响存在个体差异。在 225 mmol/L 时,多数材料根长不足 1 cm(如材料 5,0.16±0.07 cm),较对照组(0 mmol/L)下降超 80%,根系生长基本停滞。

随着盐浓度的升高,芽长普遍显著被抑制,225 mmol/L 时多数样本不足 1 cm(如材料 5,

0.07±0.02 cm),较对照组下降超 90%,表明地上部分对高盐更敏感(表 5)。

表 6 表明,低浓度 NaCl(75 mmol/L)处理下,参试油菜材料的鲜质量呈现“部分促进、部分抑制”,是植物盐胁迫响应的典型非线性剂量效应<sup>[21]</sup>。如材料 5 鲜质量从 0.070±0.004 g 增至 0.110±0.010 g(+57.1%),但材料 1 的鲜质量从 0.06±0.005 g 降至 0.042±0.004 g(-30%),可能与根系吸收功能的个体差异有关。在 150~225 mmol/L 盐胁迫下参试材料鲜质量整体下降,225 mmol/L 时多数样本低于 0.05 g(如材料 1,0.016±0.003 g),较对照组下降超 70%,反映植株整体生长受抑。

表 2 盐胁迫对油菜种子发芽势的影响

NaCl 浓度 /mmol·L <sup>-1</sup>	发芽势/%									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	76±0.02a	32±0.02c	22±0.02f	20±0.02g	32±0.02c	74±0.02b	32±0.02c	27±0.02e	28±0.02d	18±0.02h
75	68±0.02a	36±0.02b	28±0.02d	24±0.02e	24±0.02e	68±0.02a	30±0.02c	24±0.02e	16±0.02f	4±0.02g
150	44±0.02a	20±0.02c	16±0.02e	12±0.02h	14±0.02f	40±0.02b	18±0.02d	8±0.02gh	11±0.02g	1±0.01j
225	34±0.02a	18±0.02b	1±0.01d	4±0.02d	2±0.02d	31±0.02a	16±0.02b	1±0.01d	1±0.02c	1±0d

注:不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

表 3 盐胁迫对油菜种子发芽率的影响

NaCl 浓度 /mmol·L <sup>-1</sup>	发芽率/%									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	98±0.02a	98±0.02a	8±0.02	82±0.02b	98±0.02a	98±0.02a	98±0.02b	98±0.02c	78±0.02d	80±0.02c
75	92±0.02a	86±0.02b	68±0.02d	32±0.02f	24±0.02g	82±0.02b	58±0.02e	34±0.02f	22±0.02g	74±0.02c
150	74±0.02a	68±0.02b	34±0.02e	12±0.02j	16±0.02g	40±0.02cd	43±0.02c	14±0.02h	18±0.02f	10±0.02i
225	48±0.02a	5±0.02a	14±0.02cd	4±0.02f	6±0.02ef	14±0.02cd	22±0.02b	12±0.02d	18±0.02bc	10±0.02de

表 4 盐胁迫对油菜根长的影响

NaCl 浓度 /mmol·L <sup>-1</sup>	根长/cm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	4.99±0.19a	1.62±0.13f	3.82±0.23c	4.32±0.23b	0.81±0.12i	2.42±0.23e	2.60±0.20d	1.12±0.13g	0.90±0.10hi	1.03±0.15gh
75	2.00±0.11d	2.41±0.11c	3.32±0.23b	4.82±0.24a	0.51±0.12gh	2.30±0.20c	1.49±0.18e	0.90±0.10f	0.40±0.10h	0.60±0.10g
150	1.90±0.10b	2.11±0.12a	1.31±0.22e	1.41±0.21c	0.45±0.10g	1.47±0.12c	1.39±0.18cd	0.81±0.12f	0.40±0.10h	0.38±0.10i
225	1.40±0.11a	0.90±0.10b	0.52±0.13c	0.52±0.13c	0.16±0.07ef	0.21±0.06e	0.21±0.07e	0.32±0.13d	0.20±0.10e	0.10±0.05f

表 5 盐胁迫对油菜芽长的影响

NaCl 浓度 /mmol·L <sup>-1</sup>	芽长/cm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1.93±0a	2.27±0.16a	2.3±0.20a	1.78±0.17a	1.18±0.17a	1.97±0.15a	1.48±0.18a	1.57±0.15a	1.57±0.15a	1.87±0.16a
75	1.80±0.20b	1.08±0.17g	1.41±0.22d	1.17±0.16f	1.18±0.18f	2.70±0.21a	1.39±0.19d	1.28±0.17e	1.28±0.18e	1.50±0.20c
150	1.71±0.22b	1.90±0.20a	1.42±0.23c	1.01±0.21e	0.97±0.21f	1.00±0.20ef	1.20±0.20d	0.96±0.15g	1.07±0.15e	0.80±0.20h
225	1.09±0.91a	0.80±0.20bc	0.92±0.23ab	0.71±0.21c	0.07±0.02d	0.69±0.18c	0.81±0.21b	0.16±0.07d	0.80±0.20bc	0.70±0.20c

表6 盐胁迫对油菜鲜质量的影响

NaCl 浓度 /mmol·L <sup>-1</sup>	鲜质量/g									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.06±0.005e	0.401±0.011a	0.042±0.003f	0.054±0.004e	0.070±0.004d	0.100±0.005c	0.054±0.004e	0.136±0.006b	0.060±0.004e	0.040±0.003f
75	0.042±0.004f	0.090±0.010c	0.058±0.005d	0.042±0.004f	0.110±0.010a	0.100±0.006b	0.049±0.004e	0.088±0.005c	0.049±0.004e	0.043±0.004ef
150	0.066±0.005b	0.08±0.005a	0.045±0.005e	0.040±0.004f	0.020±0.003i	0.047±0.005d	0.049±0.004c	0.033±0.004e	0.042±0.003h	0.023±0.003i
225	0.016±0.003g	0.055±0.005a	0.024±0.003cd	0.040±0.005b	0.020±0.003ef	0.018±0.003fg	0.039±0.004b	0.020±0.003ef	0.026±0.003c	0.022±0.003de

2.3 半致死盐浓度的确定

通过测定 10 份白菜型油菜在 0、75、150、225 mmol/L NaCl 梯度盐胁迫下的发芽势、发芽率、根长、芽长、鲜质量的相对盐害指数,确定种子的萌发期半致死盐浓度。基于半致死浓度分析,相对发芽势、相对发芽率、相对根长、相对芽长和相对鲜质量的半致死盐浓度分别为 114.56、115.78、153.33、163.33 和 194.61 mmol/L。以上 5 个指标的盐害阈值集中分布于 150 mmol/L 附近。因此,本研究的 10 份油菜其半致死浓度为 150 mmol/L NaCl,后续以 150 mmol/L NaCl 盐胁迫下测定的耐盐性指标,进行方差分析相关性、主成分、隶属函数分析(图 3—图 7)。

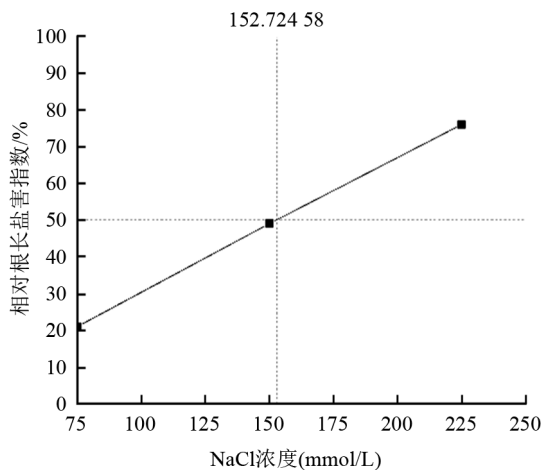


图5 相对根长盐害指数(%)

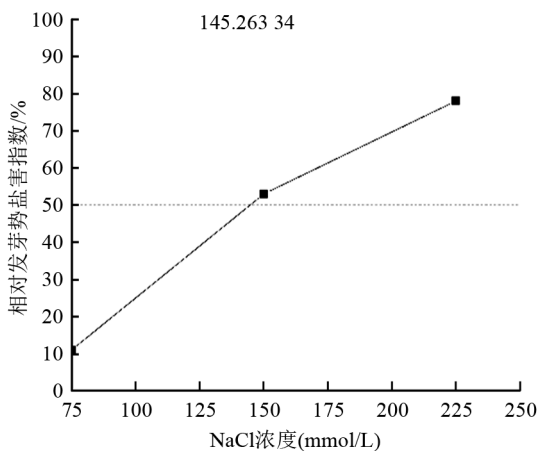


图3 相对发芽势盐害指数(%)

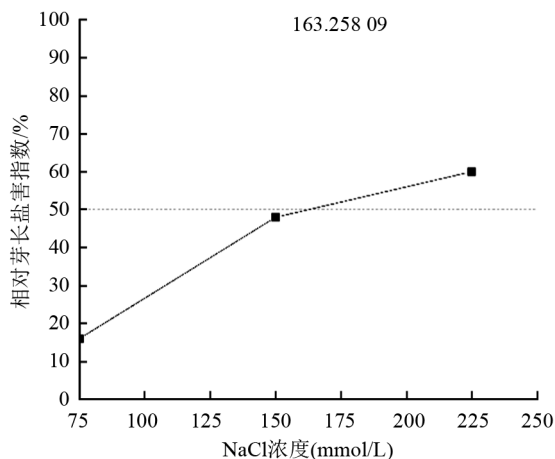


图6 相对芽长盐害指数(%)

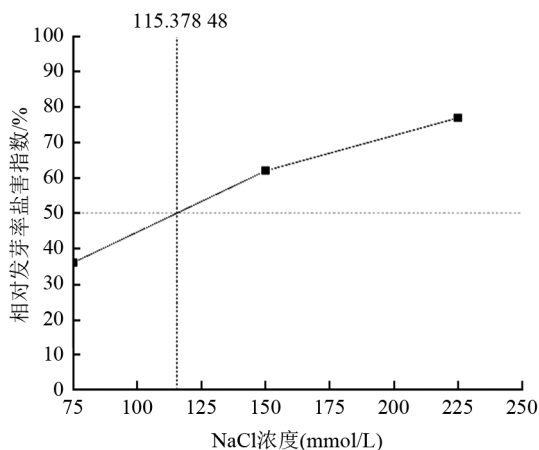


图4 相对发芽率盐害指数(%)

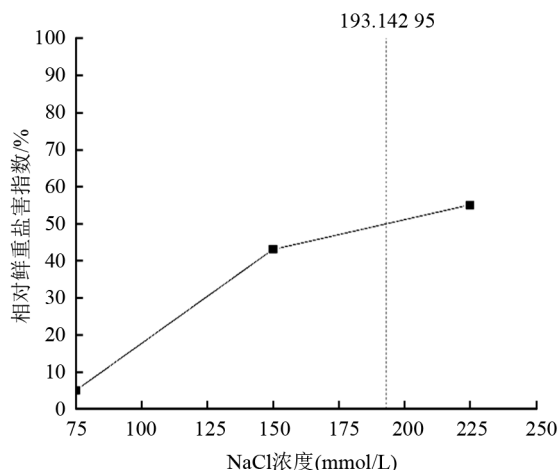


图7 相对鲜质量盐害指数(%)

### 2.4 半致死盐浓度下油菜萌发期指标的相关性分析

由表 7 可知,发芽势和根长、芽长,发芽率和根长、芽长相关性不显著,其他指标的任意 2 个指标均存在显著及极显著相关。其中,发芽势与发芽率、鲜质量极显著正相关,相关系数分别为 0.789、0.779,鲜质量与发芽率、根长、芽长呈显著正相关,相关系数为 0.700、0.637、0.745。发芽势和根长、芽长,发芽率和根长、芽长相关性不显著,其原因可能是种子本身发芽活力高,但生长发育相对滞后。因此,盐胁迫下油菜各指标之间存在不同程度的相关性。

表 7 盐胁迫下各指标的相关性分析

指标	发芽势	发芽率	根长	芽长	鲜质量
发芽势	1				
发芽率	0.789**	1			
根长	0.137	0.182	1		
芽长	0.332	0.380	0.732*	1	
鲜质量	0.779**	0.700*	0.637*	0.745*	1

注:\*\* 在 0.01 级别(双尾),相关性显著。\* 在 0.05 级别(单尾),相关性显著。

### 2.5 半致死盐浓度下油菜各指标的主成分分析

通过对 10 份种子的 5 个指标进行主成分分析,确定白菜型油菜种子萌发期耐盐性鉴定的主要指标。由表 8 可得,第 1 主成分的特征值为 3.215,方差贡献率达到 64.291%;第 2 主成分方差贡献率为 25.270%,特征值为 1.264。前 2 个主成分累积贡献率分别为 64.291%和 89.561%,该结果体现 5 个萌发指标大半信息被有效反映,更为具体地表明了油菜在盐胁迫下萌发期的特性,所以这 5 个萌发指标可作为西藏特殊生态区白菜型油菜耐盐种质评价的综合指标。发芽率、发芽势、根长、芽长、鲜质量均对第一主成分产生正向影响,载荷数分别为 0.778、0.775、0.655、0.794、0.974,这 5 个指标的载荷数较高,均在 0.655 以上(表 9)。根长、芽长和鲜质量对第二主成分产生正向影响,载荷数分别为 0.685、0.475、0.002,发芽势和发芽率对第二主成分产生负向影响,其载荷数为-0.558、-0.507。说明 5 个萌发指标能有效反映油菜盐胁迫下的萌发特性,因此这 5 个萌发指标可作为西藏白菜型油菜耐盐种质评价的特征指标。

表 8 盐胁迫下油菜各指标主成分分析

指标	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.215	64.291	64.291	3.215	64.291	64.291
2	1.264	25.270	89.561	1.264	25.27	89.561
3	0.250	5.002	94.563			
4	0.226	4.528	99.091			
5	0.045	0.909	100			

表 9 油菜耐盐指标主成分载荷矩阵

主成分	发芽势	发芽率	根长	芽长	鲜质量
1	0.778	0.775	0.655	0.794	0.974
2	-0.558	-0.507	0.685	0.475	0.002

表 10 10 份白菜型油菜的耐盐评价

材料	隶属函数值 (ASF 值)	综合评价值 (D 值)	抗性等级
1	0.093	0.117	盐敏感
2	0.309	0.286	低等耐盐
3	0.179	0.170	盐敏感
4	0.145	0.110	盐敏感
5	0.003	0.047	盐敏感
6	0.204	0.177	盐敏感
7	0.186	0.197	盐敏感
8	0.060	0.040	盐敏感
9	0.189	0.142	盐敏感
10	0.099	0.021	盐敏感

### 2.6 白菜型油菜种质萌发期耐盐性的隶属函数分析

基于主成分的贡献率及 2 个主成分权重和隶属函数分析,计算分析 10 份白菜型油菜的耐盐性综合评价值(D 值)。I 级耐盐材料(0.75 < D ≤ 1), II 级中度耐盐材料(0.5 < D ≤ 0.75), III 级低度耐盐材料(0.25 < D ≤ 0.5), IV 级盐敏感型(0 < D ≤ 0.25)。由表 10 可知,10 份白菜型油菜种质的 D 值范围为 0.286~0.021。其中材料 2 的 D 值大于 0.25,为低度耐盐材料,而材料 1、3、4、5、6、7、8、9、10 的 D 值均小于 0.25,属于盐敏感型材料。

### 2.7 多元线性回归方程的建立

为进一步加快西藏白菜型油菜种质资源的鉴定和筛选,建立多元线性回归方程用于评估其

萌发期耐盐性。通过  $D$  值建立多元线性回归方程为:

$$Y = -0.156 + 0.004X_1 - 0.004X_2 - 0.12X_3 + 0.173X_4 + 6.618X_5, R^2 = 0.991, p < 0.05.$$

自变量  $X$  是 5 个耐盐性指标, 因变量  $Y$  是  $D$  值。其方程中的  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  分别代表发芽势、发芽率、根长、芽长、鲜质量。运用该回归方程计算检测组  $D$  值, 并与已有  $D$  值进行相关性分析, 显示其相关性系数为 0.991。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

我国土地盐碱化类型多样且严重, 选育耐盐作物是土壤改良最经济、最有效的途径<sup>[22]</sup>。西藏盐碱地类型多样且严重, 山南地区是西藏盐碱地分布较广的地区, 其中乃东区、贡嘎县、桑日县分布有盐碱地<sup>[5]</sup>, 乃东区盐碱地面积 1 420 hm<sup>2</sup>, 贡嘎县有 13 595.85 hm<sup>2</sup>, 桑日县有 1 435 hm<sup>2</sup>, 对当地作物的耐盐性构成了严峻挑战。本研究 10 份参试材料来自山南市的不同县区, 实验结果表明, 除材料 2 属低等耐盐材料 ( $0.25 < D \leq 0.5$ ) 外, 其他 9 份材料均属盐敏感型材料 ( $0 < D \leq 0.25$ )。其中材料 8 和 9 来源于桑日县油菜但其耐盐等级并不高, 因此耐盐性与品种来源地无直接关系, 耐盐性品种主要由自身遗传特性所决定。

油菜耐盐性综合评价受多种因素的交互作用影响, 单一评价指标难以全面且精准地量化油菜的耐盐水平。因此, 要构建统一且完善的油菜耐盐性鉴定标准体系需运用多元统计分析手段并构建数学模型, 以精准筛选关键鉴定指标。在耐盐性综合评价中, 常用分析方法包括相关性分析、主成分分析、隶属函数分析。王伟伟、王晓歌、姚琳等在耐盐作物研究中均采用上述方法<sup>[23-25]</sup>。李源龙以 3 种油菜栽培种为试验材料, 分析盐胁迫下油菜发芽期的发芽率、芽高和根长, 发现同一种类油菜的不同品种间存在显著的耐盐性差异<sup>[26]</sup>。其中, 芥菜型油菜和甘蓝型油菜的种内差异较大, 而白菜型油菜种内耐盐性差异最小, 因白菜型油菜主要是自花授粉, 且其原生于青藏高原边缘, 长期面对稳定中等盐胁迫。这与本研究中 10 份山南白菜型油菜的耐盐性评价结果较一致, 参试材料的萌发期耐盐性指标, 其耐盐性等级以敏感型为主。

本研究在不同盐浓度胁迫处理下, 确定了 150 mmol/L NaCl 为白菜型油菜萌发期耐盐性评价的半致死盐胁迫浓度。基于该浓度下的发芽势、发芽率、根长、芽长及鲜质量等指标, 采用综合性耐盐评价的多种分析方法, 对 10 份西藏当地农家白菜型油菜品种进行了初步耐盐性实验, 为西藏山南白菜型油菜耐盐性提供了数据参考。筛选出的低度耐盐材料可作为耐盐育种材料。但目前研究仅局限于油菜萌发期, 后续研究将进行盐碱地种植, 开展苗期、花期及拓展至全生育期测定生理生化 and 形态指标, 更深入地探究其耐盐机制。同时, 结合分子生物学技术挖掘关键耐盐基因, 开展基因工程育种, 有望培育出更优质、高产的耐盐白菜型油菜品种, 为高原地区盐碱地农业的可持续发展提供有力支持, 缓解土壤盐渍化对农业生产造成的压力, 保障地区的油料供应和农业经济稳定增长。

#### 3.2 结论

本研究基于主成分分析法和隶属函数分析法, 以 10 份西藏山南市当地白菜型油菜地方种质资源为对象, 对其种子在萌发期的耐盐性进行分析。从遗传多样性角度来看, 参试材料的变异系数大于 10%, 表明该地区白菜型油菜种质资源具有较高的遗传多样性; 通过主成分权重和隶属函数构建综合评价的初步评价体系; 通过  $D$  值建立多元线性回归方程为  $Y = -0.156 + 0.004X_1 - 0.004X_2 - 0.12X_3 + 0.173X_4 + 6.618X_5, R^2 = 0.991, p < 0.05$ 。从耐盐性综合评价来看, 在 150 mmol/L 盐胁迫下, 材料 2 隶属函数值 ( $D$  值) 为 0.286, 属于低等耐盐材料, 在 10 个参试材料中耐盐性较强, 在研究中并未发现显著耐盐级材料。因此, 后续研究有必要扩大样本选取范围, 或者引入外源种质, 以丰富遗传基础, 进一步优化耐盐性评价体系。

#### 参考文献:

- [1] 强欣欣, 高文文, 王博, 等. 基于遥感的土壤盐渍化风险评估及其演变规律[J]. 干旱区研究, 2025, 42(3): 431-444.
- [2] 冯旭涛, 王世磊. 耐盐碱植物在滨海城市园林绿化中的应用[J]. 现代园艺, 2025, 48(8): 167-168, 171.
- [3] 马金鸽, 王进英, 冶梓琴, 等. 油菜籽蛋白青裸饼干的制备及其品质评价[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(12): 122-127.

- [4] 李婷婷. NaCl胁迫对香榧幼苗生长和生理生化特性的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [5] 高美荣, 施建平, 潘恺. 西藏土种志——基于全国第二次土壤普查的数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2017, 2(1): 85-94, 218-229.
- [6] 芦朋飞, 蓝明明, 徐亚茹, 等. 韩国假单胞菌 YBZ2 缓解核桃盐胁迫作用效果研究[J]. 林业科学研究, 2025, 38(1): 39-49.
- [7] 赵颖, 魏小红, 赫亚龙, 等. 混合盐碱胁迫对藜麦种子萌发和幼苗抗氧化特性的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(2): 156-167.
- [8] 金美芳, 连阳梅, 林炎鸿. NaCl胁迫对油菜幼苗膜脂过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. 福建师大福清分校学报, 2009(2): 16-20.
- [9] 段永波, 钮力亚, 付晶, 等. 植物对盐胁迫生理反应的研究综述[J]. 安徽农学通报, 2014, 20(9): 28-30.
- [10] 胡慕兰. 不同 NaCl 浓度持续胁迫下油菜幼苗的生理响应[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [11] 许耀照, 曾秀存, 王振朝, 等. NaCl 胁迫对冬油菜种子萌发和生理特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(3): 499-508.
- [12] 李萍, 燕佳琦, 张鹤, 等. 146 份甘蓝型油菜种质芽期耐盐性筛选及评价[J]. 西北农业学报, 2021, 30(6): 848-859.
- [13] 李燕辉. 氧化铈纳米颗粒提升油菜耐盐性的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- [14] 范惠玲, 白生文, 朱雪峰, 等. 油菜及其近缘种种子萌发期耐盐碱性差异[J]. 作物杂志, 2019(3): 178-184.
- [15] 熊韬. 不同甜瓜品种耐盐性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020.
- [16] 汪波, 文静, 张凤华, 等. 耐盐碱油菜品种选育及修复利用盐碱地研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(23): 59-64.
- [17] 杨广环, 南吉斌, 袁燕, 等. 西藏地区白菜型黄子油菜种子耐盐性初探[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(16): 15-19.
- [18] 刘森. 西藏油菜种质资源耐盐性比较与分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [19] 刘自刚, 王志江, 方圆, 等. 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.
- [20] 杨广环, 唐琳, 李施蒙, 等. 西藏 4 个品种油菜种子萌发及耐盐性差异研究[J]. 种子, 2024, 43(2): 104-110.
- [21] 王俭珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5565-5577.
- [22] 徐鹏程, 冷翔鹏, 刘更森, 等. 盐碱土改良利用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(5): 293-298.
- [23] 王伟伟, 王伟, 邹景伟, 等. 小麦耐盐性综合评价方法的研究进展[J]. 现代农业研究, 2022, 28(7): 111-113.
- [24] 王晓歌, 高利英, 邓永胜, 等. 棉花萌发出苗期耐盐性鉴定和评价[J]. 山东农业科学, 2025, 57(2): 29-37.
- [25] 姚琳, 孙璇, 张高杨, 等. 甘蓝型油菜耐盐性评价研究[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(1): 103-109.
- [26] 李源龙. 油菜耐盐性的基因型差异[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.