 DOI：10.13430/j.cnki.jpgr.20250901001

79 份芥蓝材料种子萌发期耐盐碱筛选与评价

李素亚，董雪霏，郑林洋，代婉彤，杨雅惠，郑兆博，任喜波，戴希尧
(河北北方学院农林科技学院，张家口　075132)

摘要：为将 79 份芥蓝材料萌发期的耐盐碱性进行评价和分类，测定了对照（去离子水，pH 6.5）、盐胁迫（NaCl，Na^+浓度为 240 mmol/L，pH 6.5）和盐碱胁迫（NaCl+Na_2CO_3，Na^+浓度为 240 mmol/L，pH 9.0）3 个处理的发芽势、发芽率、发芽指数、芽鲜重、活力指数、叶绿素含量、根长和芽长 8 项指标，并进行主成分分析、隶属函数分析、综合耐盐碱指数 D 值和聚类分析。结果表明，与对照相比，盐胁迫及盐碱胁迫对各项萌发指标均表现出抑制作用，其中对根长的抑制幅度最大，分别下降 92.08%和 91.49%，变异系数增加 5.36 倍和 6.36 倍；盐碱胁迫与盐胁迫比，不同萌发指标显著上升和下降的品种占比不同，其中发芽势显著上升和下降的品种分别占 44.30%和 24.05%，根长显著上升和下降的品种各占 11.39%和 5.06%。基于综合耐盐碱指数 D 值进行聚类分析，79 份芥蓝材料分为高度盐（盐碱）敏感型、中度盐（盐碱）敏感型、耐盐（盐碱）型、中度耐盐（盐碱）型和高度耐盐（盐碱）型 5 类，种质份数依次为 13（14）份、19（12）份、21（27）份、19（17）份和 7（9）份。通过极端型材料的维恩图分析，筛选出高度双重盐-盐碱敏感型材料 12 份和高度双重耐盐-盐碱型材料 6 份；随机抽取 4 份高度双重盐-盐碱敏感型和 4 份高度双重耐盐-盐碱型材料的 8 项相对指标比较表明，除相对芽鲜重和相对根长外，高度双重耐盐-盐碱型品种的发芽势、发芽率等 6 项相对指标均显著或极显著高于高度双重盐-盐碱敏感型品种。本研究结果可为芥蓝耐盐碱品种选育及关键抗逆基因挖掘提供重要资源基础。

关键词：芥蓝；萌发期；耐盐碱性；资源评价；D 值；聚类分析

Screening and Evaluation of 79 Chinese Kale Materials for Salt-alkali Tolerance During Seed Germination Period

LI Suya, DONG Xuefei, ZHENG Linyang, DAI Wantong, YANG Yahui, ZHENG Zhaobo, REN Xibo, DAI Xiyao
(*College of Agriculture and Forestry Science，Hebei North University, Zhangjiakou 075132*)

Abstract: To evaluate and classify the salt-alkali tolerance of 79 Chinese kale samples during the germination stage, this study examined eight indicators include germination potential, germination rate, germination index, shoot fresh weight, vigor index, chlorophyll content, root length, and shoot length under three treatments: control check (deionized water, pH 6.5), salt stress (NaCl , Na^+ 240 mmol/L , pH 6.5), and salt and alkali stress (NaCl + Na_2CO_3, Na^+ 240 mmol/L, pH 9.0). Principal component analysis, membership function analysis, comprehensive salt-alkali tolerance index *D*-value, and cluster analysis were conducted. The results showed: Compared with control check , both salt stress and salt-alkali stress inhibited all germination indicators, with the most

[1] **收稿日期：**2025-09-01　　**网络出版日期：**
URL：https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20250901001
第一作者研究方向为蔬菜遗传育种，E-mail : 17320780003@163.com
通信作者:戴希尧, 主要研究方向为蔬菜抗逆育种，E-mail:daixiyao@163.com
基金项目：河北省高等学校科学技术研究项目(Z2020208)；河北省大学生创新训练计划项目（S202510092030）；河北北方学院研究生案例库建设项目（ALK202508）
Foundation projects ：Science and Technology Research Project of Higher Education Institutions in Hebei Province (Z2020208)；Innovation Training Program for College Students in Hebei Province (S202510092030)；Case Database Construction Project for Graduate Students at Hebei North University (ALK202508)

significant suppression observed in root length which decreased by 92.08% and 91.49%, respectively, and the coefficient of variation increasing by 5.36 and 6.36 times. When comparing saline-alkali stress with salt stress, the proportions of varieties showing significant increases and decreases in different germination indicators varied. For germination potential, 44.30% of varieties showed a significant increase, while 24.05% showed a significant decrease. Meanwhile, 11.39% of varieties showed a significant increase, and 5.06% showed a significant decrease for root length. Based on the cluster analysis of the comprehensive salt-alkali tolerance index *D*-value, Chinese kale materials were classified into five categories: highly salt (salt-alkali) sensitive type, moderately salt (salt-alkali) sensitive type, salt (salt-alkali) tolerant type, moderately salt (salt-alkali) tolerant type, and highly salt (salt-alkali) tolerant type, with the number of varieties in sequence is 13 (14), 19 (12), 21 (27), 19 (17), and 7 (9). Venn diagram analysis of extreme-type materials identified 12 highly double salt-salt-alkali sensitive types and 6 highly double salt-salt-alkali tolerant types. A comparison of eight relative indicators of four randomly selected highly double salt-salt-alkali sensitive type and four highly double salt-salt-alkali tolerant type materials showed that, except for relative shoot fresh weight and relative root length, the other six relative indicators of the highly double salt-salt-alkali tolerant type were significantly or extremely significantly higher than those of the highly double salt-salt-alkali sensitive type. The results of this study provide an important resource foundation for the breeding of salt-alkali tolerant Chinese kale varieties and the identification of key stress-resistant genes.

Key words: Chinese kale; germination period; salt-alkali tolerance; resource evaluation; *D*-value; cluster analysis

土壤盐碱化是限制全球农业生产的重要影响因子之一，在高盐环境中，植物的生长发育受到抑制，进而引起产量的降低[1-3]。据统计，世界各地盐碱地的总面积约为 9.5438×10^8 hm^2，并且全球盐碱地面积以每年$(1.0\sim1.5)\times10^6$ km^2 的速度增长[4-5]。其中我国盐碱地面积约为 9.913×10^7 hm^2，约占我国国土面积的 10%[6-7]。河北省是盐碱地面积较大的省份之一，据统计河北省盐碱地面积为 7.747×10^5 hm^2[8]，张家口也有大量的盐碱地。土地盐碱化严重危害着我国的农业生产，制约着我国的粮食生产及农业的可持续发展[9-10]。

研究表明，萌发期是植物生活史中最敏感最重要的阶段，种子能否萌发是幼苗形态建成及后续生长发育的基础[11-12]。目前国内外学者对蔬菜作物的耐盐性做了大量研究，大多集中在番茄[13]、黄瓜[14]、茄子[15]和辣椒[16]等植物上。芥蓝（*Brassica oleracea* var. *alboglabra Bailey*）又叫芥兰、白花芥蓝、芥蓝菜等，是十字花科芸薹属甘蓝变种中一二年生草本植物，具有丰富的营养价值和药用价值，原产于我国华南地区[17]。关于芥蓝耐盐碱方面的研究较少，马蓓蓓[18]建立了一种利用叶绿素荧光技术快速评估芥兰耐盐性的检测体系；杜欢欢等[19-20]指出芥蓝萌发期耐盐性评价的适宜 NaCl 处理浓度为 160～240mmol/L，可对各品种间的耐盐性差异进行有效区分；王建英等[21]研究表明在 280mmol/L NaCl 条件下随着外源 $CaCl_2$ 溶液浓度升高，芥蓝种子发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数以及幼苗鲜重均呈现先上升后下降的趋势。

胡志康等[22]根据含盐量和 pH 值的高低，将盐碱胁迫划分为轻度盐碱（含盐量≤0.3%，pH 为 7.1~8.5）、中度盐碱（含盐量在 0.3%～0.6%，pH 为 8.5~9.5）和重度盐碱（含盐量≥0.6%，pH>9.5）3 个等级。本团队前期采集了张家口 29 份盐碱地土壤样本，含盐量在 0.04%～3.72%，pH 为 6.98~9.88。张家口部分盐碱地

样本呈现出高盐分（≥0.6%，20.69%）与高 pH（8.5~9.5，31.03%）的叠加分布，符合重度盐+中度碱的复合盐碱特征。为最大限度了解各品种间耐盐碱性差异及张家口盐碱地的特点，参照杜欢欢等[19-20]指标，以 240mmol/L Na^+为试验条件，比较 240mmol/L Na^+及该 Na^+浓度下不同 pH 值对 79 份芥蓝材料萌发指标的影响，并对各萌发指标进行综合评价，筛选出高度双重盐-盐碱敏感型和高度双重耐盐-盐碱型材料，为芥蓝耐盐碱品种选育、耐盐碱机制研究及盐碱地适种芥蓝品种的选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

79 份芥蓝材料包括地方品种 13 份、育种材料 34 份和栽培品种 32 份（表 1），均由河北北方学院园艺系育种课题组提供。

表 1 79 份芥蓝品种编号及名称

Table 1 79 Chinese Kale Variety Codes and Names

编号 Code	名称 Name	编号 Code	名称 Name	编号 Code	名称 Name	编号 Code	名称 Name
R1	广东粗苔鸡腿芥兰	R21	农研黄花甜脆芥兰	R42	JN44	R62	CY23
R2	YM01	R22	CH12	R43	和利农宝芥兰	R63	CY25
R3	香港白花柳叶芥兰	R23	ZH01	R44	甜脆鸡腿芥蓝	R64	CY05
R4	DX01	R24	科壮芥兰	R45	和利农红脚芥兰	R65	TC27
R5	DS01	R25	义才芥兰王	R46	SJ02	R66	精选粗条玉笋芥兰
R6	DS06	R26	翠肉大芯芥兰种子	R47	和利农农宝芥兰	R67	SJ21
R7	特早四季大笋芥兰	R28	蔡兴利芥兰	R48	阳美皱叶芥兰	R68	广东潮汕芥兰
R8	黄花粗条大苔芥兰	R29	ZJL13	R49	ZHC19	R69	SJ33
R9	KDSI	R30	BB01	R50	正源澄宝芥兰	R70	美国甜脆白花鸡腿芥兰
R10	HN01	R31	台湾帝仙芥兰王	R51	揭农香菇芥兰	R71	捷宝 2 号
R11	美国甜脆四季芥兰王 F2	R32	多丫杂交甜芥兰	R52	正源澄海粗条芥兰	R72	GD31
R12	ZHC01	R33	秋盛芥兰	R53	翠宝芥兰	R74	桃山芥蓝
R13	澳选甜脆黄花芥兰 F2	R34	LB03	R54	红梗香芥蓝	R75	SJ39
R14	DS10	R35	CF01	R55	南星实心粗条芥兰	R76	红美人
R15	红脚尖叶芥兰	R36	SJ01	R56	CT29	R77	港种中花芥兰
R16	台湾四季粗条甜脆芥兰	R37	甜脆绿芥兰	R57	SJ07	R78	大笋甜芥兰
R17	阳美红脚芥兰	R38	潮汕粗条芥兰	R58	SJ06	R79	SJ01
R18	ZHC03	R39	XG07	R59	ZH14	R80	SJ02
R19	改良红芹兰苔	R40	万利芥兰	R60	扑叶多仔飘香芥兰芯	R81	香菇玉笋芥兰
R20	盆景香菇芥兰	R41	改良圆叶芥兰	R61	SJ11		

1.2 试验方法

试验于 2024 年 3 月在河北北方学院园艺系实验室进行。选取籽粒饱满、无损伤、大小一致的芥蓝种子，

采用 288 孔育苗盘进行处理。每孔填充脱脂棉球（0.3 g）并压平，将育苗盘置于 640 cm×420 cm ×115 cm 的塑料方箱中，塑料方箱内倒入 4 L 配好的处理液。试验共设置 3 个处理，处理的代号及具体参数为：对照（CK，control check）：去离子水，pH 为 6.5±0.1，EC 值为 0.01 mS/cm；盐胁迫（S，salt stress）： Na^+浓度 240 mmol/L，pH 6.5±0.1，EC 值 1.20 mS/cm； 盐碱胁迫（SA ，salt and alkali stress）：Na^+浓度 240 mmol/L，使用 120 mmol/L Na_2CO_3 溶液调节 pH，pH 9.0±0.1，EC 值 0.70 mS/cm。

试验采用多品种穴盘萌发法，将育苗盘分成三等份，每份为一次重复，共 3 次重复。每次重复按照 R1 至 R81 的品种顺序摆放，每孔放置用二氧化氯溶液消毒后的种子 20 粒，插上标签并覆膜，防止水分蒸发及处理溶液浓度的改变。以胚根突破种皮露白作为发芽标准，每天 12：00 开始记录发芽数并于第 7 天测量芽长、根长、芽鲜重和叶绿素含量，并计算发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数及各项指标的相对指标。

根长和芽长使用数显游标卡尺（mm）测量；叶绿素含量使用便携式叶绿素仪（SPAD-502Plus）测定。

发芽势（%）=（第 4 天发芽种子数/试验种子总粒数）×100 %

发芽率（%）=（第 7 天发芽种子数/试验种子总粒数）×100%

发芽指数=∑（Gt/Dt），式中：Gt 为第 t 天发芽数，Dt 为相应发芽天数

活力指数=发芽指数×幼苗重

芽鲜重=测量芽总鲜重/测量芽总数

相对发芽势（%）＝处理发芽势 / 对照发芽势×100%

相对发芽率（%）＝处理发芽率 / 对照发芽率×100%

相对发芽指数（%）=处理发芽指数 / 对照发芽指数×100%

相对活力指数（%）=处理活力指数 / 对照活力指数×100%

相对芽鲜重（%）＝处理芽鲜重 / 对照芽鲜重×100%

相对根长（%）＝处理根长 / 对照根长×100%

相对芽长（%）＝处理芽长 / 对照芽长×100%

相对叶绿素含量（%）＝处理叶绿素含量 / 对照叶绿素含量×100%

1.3 数据分析

使用 Microsoft Excel 2021 整理数据，计算均值、标准差及变异系数，SPSS27.0 软件进行方差分析、主成分分析、隶属函数分析，根据 *D* 值采用 R 语言的 ward. D 处理方法进行聚类分析，T 检验用 Prism 方法，利用 Origin 2024 绘制差异柱状图。具体计算公式如下[23]：

应用主成分分析对 79 份芥蓝材料萌发期各相对指标进行分析，确定主成分的个数, 并计算权重，公式如下。

$W_i=P_i/\sum_{i=1}^{n} P_i$（i=1，2，3，…，n） （1）

式中，W_i 表示第 i 个主成分在所有主成分中的重要程度；Pi 为各品种第 i 个指标与耐盐碱系数间的相关

系数，表示各品种第 i 个主成分的贡献率。

进一步对 79 份芥蓝材料蓝萌发期各相对指标主成分的得分计算隶属函数值，公式如下。

$U(X_i)=(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$ （i=1，2，3，…，n）（2）

式中，X_i 为具体数值；X_{min} 和 X_{max} 分别为该因子在数据集中的最小值和最大值。

最后计算综合耐盐碱指数 D 值，对 79 份芥蓝材料种质资源进行耐盐碱综合评价，D 值越大，表明该品种耐盐碱性越强，反之耐盐碱性越差。公式如下。

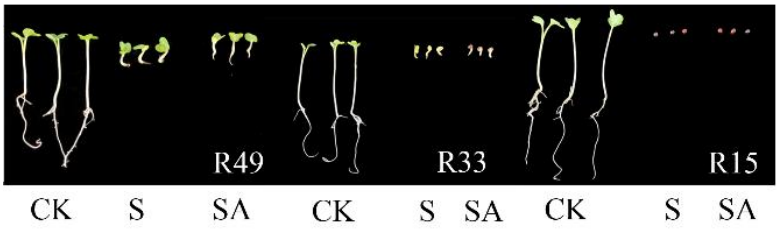
$D=\sum_{i=1}^{n}[U(X_i)\times W_i]$（i=1，2，3，…，n） （3）

2 结果与分析

2.1 盐、盐碱胁迫对芥蓝萌发期性状指标的影响

对照、盐胁迫、盐碱胁迫处理 4d、7d 的芥蓝幼苗表型变化见图 1，萌发期耐盐碱指标统计结果见表 2。由表 2 可知，与对照相比，芥蓝的发芽势、发芽率等 8 项指标在盐胁迫和盐碱胁迫处理下平均值下降范围分别为 34.42%～92.08%和 31.77%～91.49%，其中受盐胁迫、盐碱胁迫影响最大的是根长，分别下降 92.08%和 91.49%，变异系数增加 5.36 倍和 6.36 倍。

盐胁迫与对照相比，发芽势、发芽率等 8 项指标显著下降的品种占比范围为 93.67%～100.00%，其中芽鲜重、活力指数、根长和芽长均为 100.00%。盐碱胁迫与对照相比，仅 R20 的发芽率显著上升，占 1.27%，发芽率显著下降的品种为 70 份，占比为 88.61%；其余指标显著下降的品种占比范围为 94.94%～100.00%，其中活力指数、根长和芽长均为 100.00%。盐碱胁迫与盐胁迫相比，各项指标显著上升和显著下降的品种占比范围分别为 10.13%～44.30%和 5.06%～27.85%，其中发芽势呈显著上升和显著下降的品种分别占 44.30%和 24.05%，根长呈显著上升和显著下降的品种各占 11.39%和 5.06%，表明 240 mmol/L Na^+浓度下，碱胁迫对不同芥蓝材料萌发指标影响不同。



CK、S 和 SA 分别表示对照、盐胁迫和盐碱胁迫；材料编号同表 1

CK,S and SA respectively represent control check, salt stress and salt and alkali stress; Material codes are the same as table 1

图 1 处理 7d 后芥蓝幼苗表型

Fig. 1 Phenotype of Chinese kale seedlings after 7 days of treatment

表 2　三种处理条件下芥蓝耐盐碱指标统计分析

Table 2 Statistical analysis of salt and alkali tolerance indicators of Chinese kale under three stress conditions

处理	参数	发芽势（%）	发芽率（%）	发芽指数	芽鲜重（mg）	活力指数	叶绿素含量	根长（mm）	芽长
Treatment	Parameter	GP	GR	GI	BFW	VI	CC	RL	（mm）
对照	最小值	11.67	18.33	1.4	17.4	23.86	30.23	7.65	11.48

	最大值	100	100	13.31	52.4	719.5	55.92	49.91	33.68
	均值	82.16	87.54	8.25	32.40	278.57	40.90	30.44	22.62
	标准差	1.48	1.23	0.44	0.17	0.36	2.15	0.23	0.24
	变异系数	1.81	1.4	5.35	0.53	0.13	5.26	0.75	1.04
盐胁迫	最小值	0	0	0	0	0	0	0	0
S	最大值	98.33	98.33	8.58	21.3	170.43	34.58	4.32	10
	均值	44.85	57.41	3.47	12.89	51.58	18.85	2.41	5.96
	标准差	0.64	1.15	0.28	0.13	0.26	1.36	0.12	0.14
	变异系数	1.43	2	7.94	1.01	0.5	7.19	4.77	2.33
盐碱胁迫	最小值	0	0	0	0	0	0	0	0
SA	最大值	96.67	98.33	8.21	23.5	191.92	39.08	6.89	10.49
	均值	47.68	59.73	3.71	12.79	55.71	16.99	2.59	6.69
	标准差	0.76	1.18	0.28	0.12	0.23	1.41	0.14	0.12
	变异系数	1.59	1.98	7.56	0.98	0.41	8.31	5.52	1.8
盐胁迫 vs	品种数	78↓	75↓	78↓	79↓	79↓	74↓	79↓	79↓
对照	占比（%）	98.73	94.94	98.73	100	100	93.67	100	100
S vs CK									
盐碱胁迫	品种数	75↓	1↑，70↓	77↓	77↓	79↓	78↓	79↓	79↓
vs 对照	占比（%）	94.94	1.27，88.61	97.47	97.47	100	98.73	100	100
SA vs CK									
盐碱胁迫	品种数	35↑，19↓	31↑，15↓	8↑，8↓	20↑，14↓	32↑，22↓	8↑，20↓	9↑，4↓	26↑，4↓
vs 盐胁迫	占比（%）	44.30，	39.24，	10.13，	25.32，	40.51，	10.13，	11.39，	32.91，
SA vs S		24.05	18.99	10.13	17.72	27.85	25.32	5.06	5.06

↓和↑表示在 $P<0.05$ 水平显著下降和上升

GP: Germination potential; GR: Germination rate; GI: Germination index; BFW: Buds fresh weight; VI: Vigor index; CC: Chlorophyll content; RL: Root length; SL: Shoot length; ↓ and ↑ indicate decreased and increased significantly at $P < 0.05$ level

2.2 萌发期相对耐盐碱指标主成分、综合耐盐指数及聚类分析

对 79 份芥蓝萌发期各相对指标进行主成分分析，盐胁迫和盐碱胁迫处理均提取到 2 个主成分，累计贡献率分别为 88.03%和 88.56%（表 3）。盐胁迫和盐碱胁迫处理下决定主成分 1 的指标均为相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数、相对芽鲜重、相对活力指数、相对叶绿素含量和相对芽长，决定主成分 2 的指标均是相对根长，表明提取到的 2 个主成分能够较全面地反映盐碱处理下芥蓝种子萌发情况。

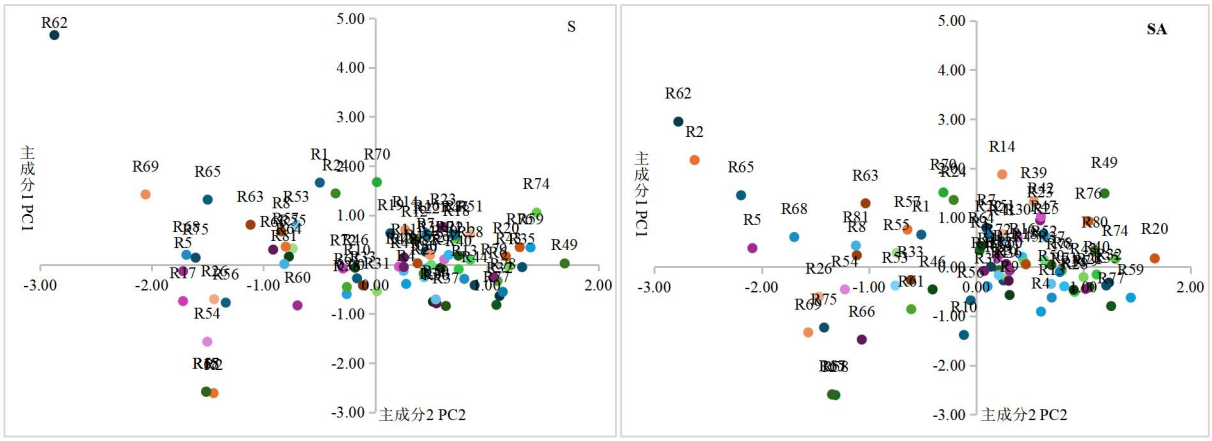
表 3 盐碱胁迫下各相对指标的特征向量及总方差解释

Table3 Characteristic vectors and total variance explained of various relative indicators under salt-alkali stress

指标	盐胁迫 S		盐碱胁迫 SA	
Index	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2
相对发芽势 Relative Germination Potential	0.935	-0.274	0.945	-0.254
相对发芽率 Relative Germination Rate	0.943	-0.206	0.952	-0.194
相对发芽指数 Relative Germination Index	0.946	-0.245	0.955	-0.233
相对芽鲜重 Relative Buds Fresh Weight	0.743	0.575	0.834	0.392

相对活力指数 Relative Vigor Index	0.936	-0.102	0.953	-0.101
相对叶绿素含量 Relative Chlorophyll Content	0.826	-0.190	0.826	-0.232
相对芽长 Relative Shoot Length	0.888	0.233	0.901	0.214
相对根长 Relative Root Length	0.345	0.871	0.554	0.751
特征值 Eigenvalue	5.68	1.37	6.11	0.98
贡献率（%）Contribution rate	62.59	25.43	61.50	27.06
累计贡献率（%）Cumulative contribution rate	62.59	88.03	61.50	88.56
占比（%）Proportion	0.71	0.29	0.69	0.31

由主成分散点图（图 2）可知，盐胁迫下 R74 离正方向原点最远，排名第 1，R49 排名第 2，R15、R58、R67 耐盐性最差；盐碱胁迫下 R49 为第 1，R20 排名第 2，R15、R17、R67 耐盐性最差。根据 2 个主成分贡献率大小，计算出所有品种的隶属函数值和 *D* 值（表 4）并进行聚类分析（图 3）。从表 4 可见，S、SA 处理下对应的 *D* 值范围分别为 0.21～0.82 和 0.22～0.85，79 份芥蓝材料可分为 5 类，其中，高度盐（盐碱）敏感型、中度盐（盐碱）敏感型、耐盐（盐碱）型、中度耐盐（盐碱）型、高度耐盐（盐碱）型份数分别为 13（14）、19（12）、21（27）、19（17）、7（9），各占 24.05%（17.72%）、16.46%（15.19%）、26.58%（34.18%）、24.05%（21.52%）、8.86%（11.39%），表明芥蓝品种的数量随耐盐碱等级的提升而减少。



材料编号同表 1；下同

Material codes are the same as table 1; The same as below

图 2 盐胁迫、盐碱胁迫下不同芥蓝品种主成分散点图

Fig. 2 Scatter plot of main components of different Chinese kale varieties under S and SA stress

表 4 79 份芥蓝隶属函数值、*D* 值、排名及耐盐（碱）类型

Table 4 Membership function values, *D* values, rankings, and salt (alkali) resistant type of 79 Chinese kale samples

编号 Code	盐胁迫 S						盐碱胁迫 SA					
	U1	*U2*	*D* 值 *D* values	排名 Ranking	类型 Type	类群 Group	U1	U2	*D* 值 *D* values	排名 Ranking	类型 Type	类群 Group
R1	0.52	0.59	0.54	49	中度盐敏感型	II	0.51	0.59	0.53	54	中度盐碱敏感型	II
R2	0.31	0.00	0.22	76	高度盐敏感型	I	0.03	0.86	0.29	72	高度盐碱敏感型	I
R3	0.78	0.44	0.68	17	中度耐盐型	IV	0.63	0.53	0.60	48	耐盐碱型	III
R4	0.69	0.30	0.58	47	耐盐型	III	0.76	0.31	0.62	40	耐盐碱型	III
R5	0.25	0.34	0.28	73	高度盐敏感型	I	0.16	0.54	0.27	74	高度盐碱敏感型	I
R6	0.87	0.31	0.71	8	中度耐盐型	IV	0.80	0.46	0.70	20	中度耐盐碱型	IV

R7	0.73	0.39	0.63	29	耐盐型	III		0.65	0.61	0.64	35	耐盐碱型	III
R8	0.44	0.45	0.45	59	中度盐敏感型	II		0.37	0.51	0.42	65	中度盐碱敏感型	II
R9	0.76	0.35	0.64	27	耐盐型	III		0.70	0.37	0.59	51	耐盐碱型	III
R10	0.59	0.32	0.51	53	中度盐敏感型	II		0.60	0.22	0.48	59	中度盐碱敏感型	II
R11	0.69	0.38	0.60	43	耐盐型	III		0.69	0.48	0.62	37	耐盐碱型	III
R12	0.71	0.43	0.63	31	耐盐型	III		0.67	0.46	0.61	46	耐盐碱型	III
R13	0.80	0.32	0.66	22	中度耐盐型	IV		0.78	0.36	0.65	33	耐盐碱型	III
R14	0.69	0.46	0.62	32	耐盐型	III		0.68	0.81	0.72	15	中度耐盐碱型	IV
R15	0.30	0.00	0.21	77	高度盐敏感型	I		0.32	0.00	0.22	77	高度盐碱敏感型	I
R16	0.73	0.45	0.65	25	中度耐盐型	IV		0.72	0.50	0.65	29	耐盐碱型	III
R17	0.25	0.26	0.25	75	高度盐敏感型	I		0.32	0.00	0.22	77	高度盐碱敏感型	I
R18	0.79	0.43	0.68	16	中度耐盐型	IV		0.73	0.49	0.65	30	耐盐碱型	III
R19	0.66	0.45	0.60	42	耐盐型	III		0.68	0.42	0.60	47	耐盐碱型	III
R20	0.88	0.38	0.74	6	高度耐盐型	V		1.00	0.50	0.84	2	高度耐盐碱型	V
R21	0.79	0.38	0.67	19	中度耐盐型	IV		0.86	0.40	0.72	16	中度耐盐碱型	IV
R22	0.73	0.44	0.65	26	中度耐盐型	IV		0.65	0.59	0.63	36	耐盐碱型	III
R23	0.76	0.46	0.68	18	中度耐盐型	IV		0.76	0.64	0.72	13	中度耐盐碱型	IV
R24	0.55	0.56	0.55	48	中度盐敏感型	II		0.58	0.71	0.62	39	耐盐碱型	III
R25	0.73	0.35	0.62	34	耐盐型	III		0.77	0.58	0.71	17	中度耐盐碱型	IV
R26	0.31	0.26	0.30	69	高度盐敏感型	I		0.30	0.36	0.32	70	高度盐碱敏感型	I
R28	0.82	0.37	0.69	13	中度耐盐型	IV		0.83	0.38	0.69	23	中度耐盐碱型	IV
R29	0.72	0.32	0.61	38	耐盐型	III		0.67	0.44	0.60	49	耐盐碱型	III
R30	0.76	0.37	0.65	24	中度耐盐型	IV		0.71	0.58	0.67	27	耐盐碱型	III
R31	0.63	0.28	0.53	50	中度盐敏感型	II		0.69	0.43	0.61	43	耐盐碱型	III
R32	0.87	0.27	0.70	12	中度耐盐型	IV		0.90	0.41	0.75	7	高度耐盐碱型	V
R33	0.60	0.30	0.52	52	中度盐敏感型	II		0.49	0.42	0.47	61	中度盐碱敏感型	II
R34	0.74	0.26	0.60	41	耐盐型	III		0.83	0.39	0.69	21	中度耐盐碱型	IV
R35	0.92	0.35	0.75	5	高度耐盐型	V		0.90	0.40	0.74	8	高度耐盐碱型	V
R36	0.75	0.25	0.60	40	耐盐型	III		0.69	0.42	0.61	44	耐盐碱型	III
R37	0.77	0.24	0.62	35	耐盐型	III		0.78	0.48	0.69	24	中度耐盐碱型	IV
R38	0.57	0.28	0.49	56	中度盐敏感型	II		0.65	0.40	0.57	53	耐盐碱型	III
R39	0.74	0.39	0.63	28	耐盐型	III		0.75	0.71	0.73	10	中度耐盐碱型	IV
R40	0.79	0.35	0.66	21	中度耐盐型	IV		0.88	0.44	0.74	9	高度耐盐碱型	V
R41	0.68	0.34	0.58	45	耐盐型	III		0.68	0.57	0.65	34	耐盐碱型	III
R42	0.68	0.35	0.58	46	耐盐型	III		0.76	0.65	0.73	12	中度耐盐碱型	IV
R43	0.89	0.35	0.73	7	高度耐盐型	V		0.85	0.43	0.72	14	中度耐盐碱型	IV
R44	0.82	0.30	0.67	20	中度耐盐型	IV		0.66	0.47	0.60	50	耐盐碱型	III
R45	0.71	0.36	0.61	37	耐盐型	III		0.73	0.48	0.65	32	耐盐碱型	III
R46	0.59	0.35	0.52	51	中度盐敏感型	II		0.53	0.39	0.49	58	中度盐碱敏感型	II
R47	0.78	0.44	0.68	15	中度耐盐型	IV		0.77	0.59	0.71	18	中度耐盐碱型	IV
R48	0.68	0.35	0.59	44	耐盐型	III		0.64	0.45	0.58	52	耐盐碱型	III
R49	1.00	0.36	0.82	2	高度耐盐型	V		0.89	0.74	0.85	1	高度耐盐碱型	V
R50	0.75	0.26	0.61	39	耐盐型	III		0.78	0.41	0.67	28	耐盐碱型	III
R51	0.81	0.44	0.71	9	中度耐盐型	IV		0.68	0.59	0.65	31	耐盐碱型	III
R52	0.74	0.36	0.63	30	耐盐型	III		0.77	0.50	0.68	25	中度耐盐碱型	IV
R53	0.47	0.47	0.47	57	中度盐敏感型	II		0.46	0.40	0.44	62	中度盐碱敏感型	II

R54	0.30	0.14	0.25	74	高度盐敏感型	I	0.35	0.39	0.36	66	高度盐碱敏感型	I
R55	0.47	0.40	0.45	58	中度盐敏感型	II	0.46	0.52	0.48	60	中度盐碱敏感型	II
R56	0.34	0.25	0.31	67	高度盐敏感型	I	0.61	0.35	0.53	55	中度盐碱敏感型	II
R57	0.45	0.41	0.44	60	中度盐敏感型	II	0.48	0.61	0.52	56	中度盐碱敏感型	II
R58	0.30	0.00	0.21	77	高度盐敏感型	I	0.33	0.00	0.23	76	高度盐碱敏感型	I
R59	0.93	0.41	0.78	3	高度耐盐型	V	0.95	0.36	0.77	6	高度耐盐碱型	V
R60	0.48	0.24	0.41	65	中度盐敏感型	II	0.70	0.46	0.62	38	耐盐碱型	III
R61	0.57	0.30	0.49	55	中度盐敏感型	II	0.49	0.31	0.43	63	中度盐碱敏感型	II
R62	0.00	1.00	0.29	71	高度盐敏感型	I	0.00	1.00	0.31	71	高度盐碱敏感型	I
R63	0.38	0.47	0.41	64	中度盐敏感型	II	0.39	0.70	0.49	57	中度盐碱敏感型	II
R64	0.46	0.38	0.44	61	中度盐敏感型	II	0.64	0.55	0.61	45	耐盐碱型	III
R65	0.30	0.54	0.37	66	中度盐敏感型	II	0.13	0.73	0.32	69	高度盐碱敏感型	I
R66	0.43	0.40	0.42	63	中度盐敏感型	II	0.38	0.20	0.33	68	高度盐碱敏感型	I
R67	0.30	0.00	0.21	77	高度盐敏感型	I	0.32	0.00	0.22	77	高度盐碱敏感型	I
R68	0.26	0.39	0.30	70	高度盐敏感型	I	0.24	0.58	0.35	67	高度盐碱敏感型	I
R69	0.18	0.55	0.29	72	高度盐敏感型	I	0.27	0.23	0.26	75	高度盐碱敏感型	I
R70	0.63	0.59	0.62	33	耐盐型	III	0.56	0.74	0.61	42	耐盐碱型	III
R71	0.77	0.39	0.66	23	中度耐盐型	IV	0.81	0.40	0.68	26	中度耐盐碱型	IV
R72	0.57	0.35	0.50	54	中度盐敏感型	II	0.67	0.50	0.62	41	耐盐碱型	III
R74	0.94	0.50	0.82	1	高度耐盐型	V	0.92	0.50	0.79	4	高度耐盐碱型	V
R75	0.28	0.38	0.31	68	高度盐敏感型	I	0.31	0.25	0.29	73	高度盐碱敏感型	I
R76	0.91	0.41	0.77	4	高度耐盐型	V	0.86	0.64	0.79	3	高度耐盐碱型	V
R77	0.87	0.25	0.69	14	中度耐盐型	IV	0.91	0.33	0.73	11	中度耐盐碱型	IV
R78	0.88	0.28	0.71	10	中度耐盐型	IV	0.80	0.45	0.69	22	中度耐盐碱型	IV
R79	0.86	0.32	0.71	11	中度耐盐型	IV	0.85	0.39	0.71	19	中度耐盐碱型	IV
R80	0.72	0.33	0.61	36	耐盐型	III	0.87	0.53	0.77	5	高度耐盐碱型	V
R81	0.45	0.36	0.42	62	中度盐敏感型	II	0.37	0.55	0.43	64	中度盐碱敏感型	II

D 值相同排名相同

The same *D* value leads to the same ranking

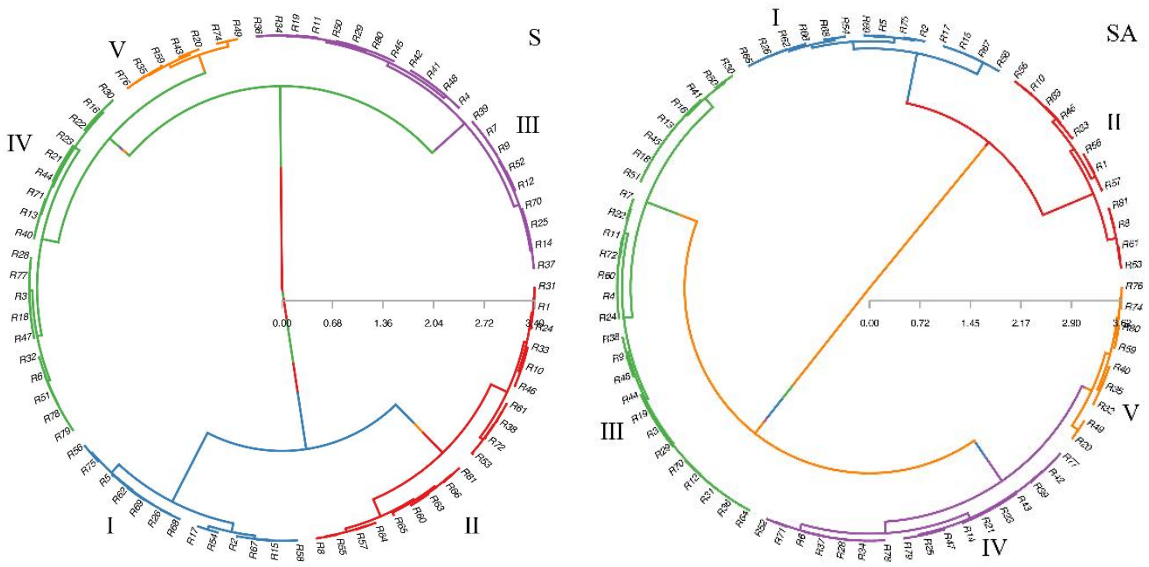


图 3 79 份芥蓝萌发期耐盐碱能力聚类分析

Fig. 3 Clustering analysis of 79 Chinese kale varieties based on their salt-alkali tolerance during germination period

 DOI：10.13430/j.cnki.jpgr.20250901001

2.3 极端型芥蓝萌发期数据比较

对 4 种极端型芥蓝材料进行维恩图分析（图 4），筛选出 12 份高度双重盐-盐碱敏感型和 6 份高度双重耐盐-盐碱型芥蓝，从中各随机选取 4 份，对其相对萌发指标进一步比较（图 5）。除相对芽鲜重和相对根长外，高度双重耐盐-盐碱型品种的相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数、相对活力指数、相对叶绿素含量和相对芽长均显著或极显著高于高度双重盐-盐碱敏感型品种。盐（盐碱）胁迫下，高度双重盐-盐碱敏感型与高度双重耐盐-盐碱型比，相对根长的平均值增加了 19.36%（38.61%），相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数、相对芽鲜重、相对活力指数、相对叶绿素含量和相对芽长的平均值降低了 97.22%（96.11%）、90.86%（88.58%）、91.66%（89.71%）、32.52%（28.80%）、93.27%（90.09%）、100.00%（100%）和 75.85%（57.79%）。

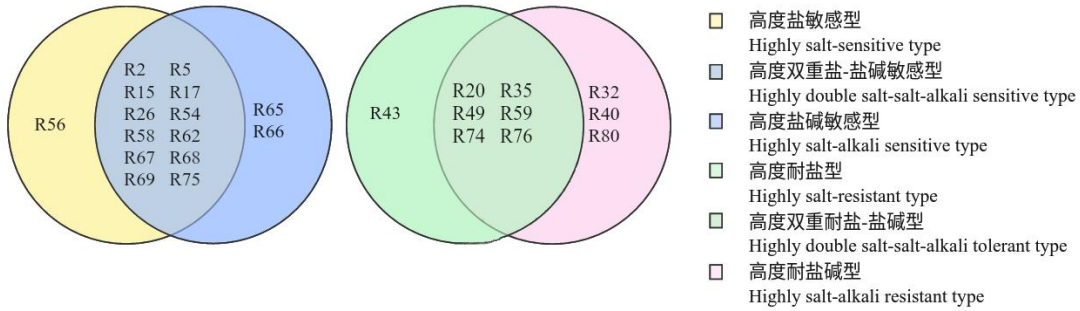
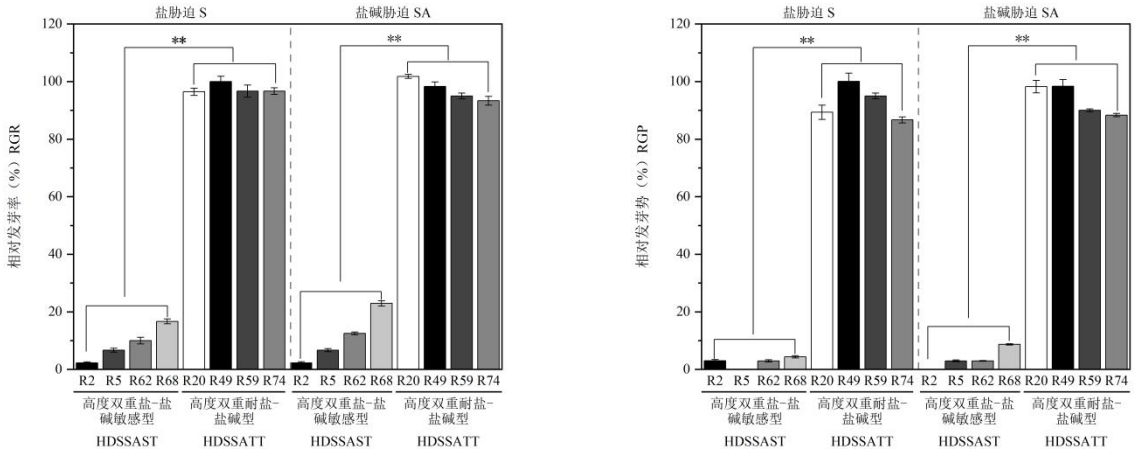
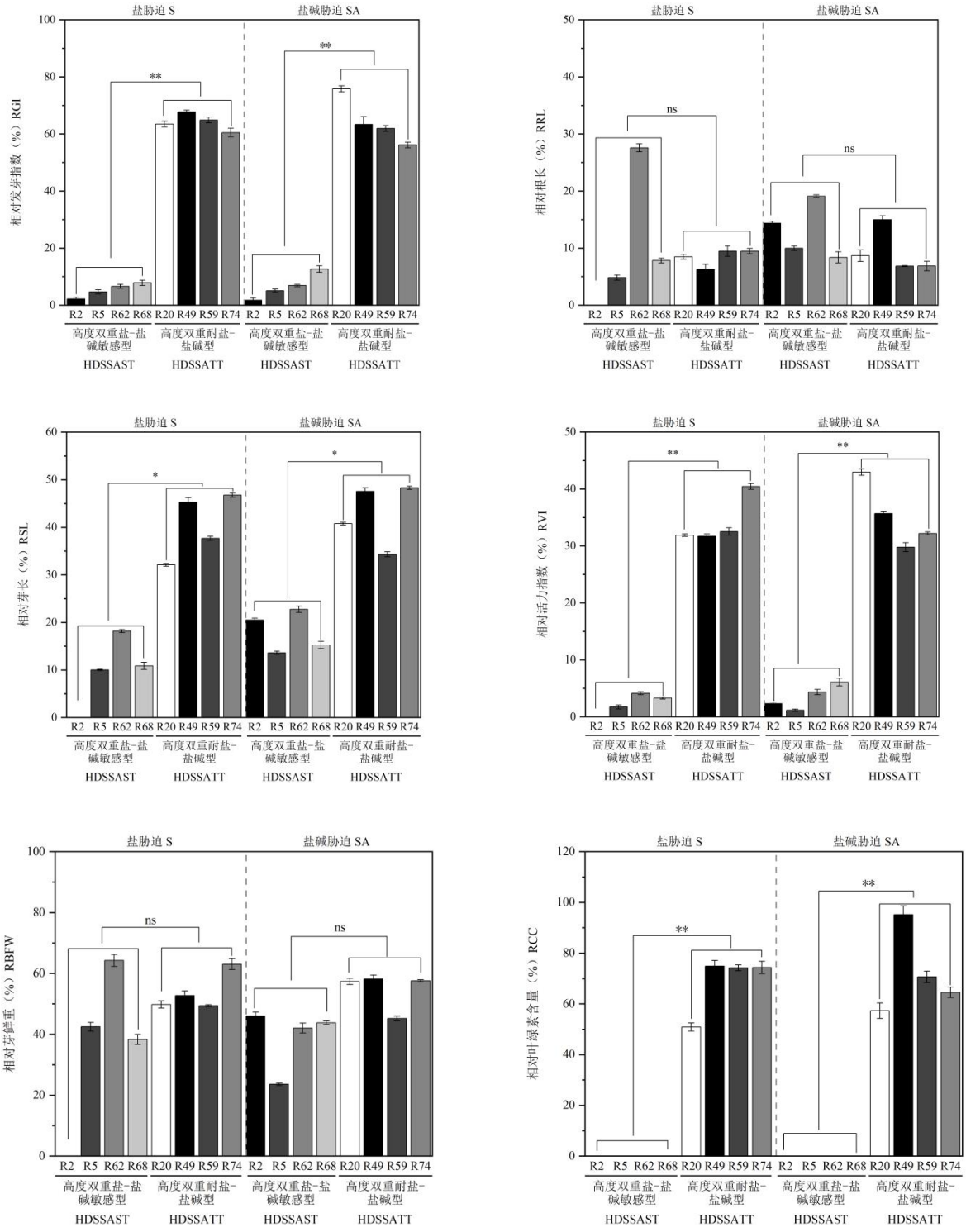


图 4 极端型芥蓝萌发期耐盐碱能力维恩图

Fig. 4 Venn diagram of salt-alkali tolerance during the germination period of extreme-type Chinese kale





*、** 分别表示在 $P<0.05$、$P<0.01$ 水平差异显著；ns：无显著性差异

*, ** indicate significant differences at $P < 0.05$, $P < 0.01$ levels, respectively; ns: No significant difference; HDSSAAT: Highly double salt-salt-alkali sensitive type; HDSSATT: Hhighly double salt-salt-alkali tolerant type

图 5 盐胁迫、盐碱胁迫下高度双重盐-盐碱敏感型和高度双重耐盐-盐碱型芥蓝不同指标相对值的比较

Fig. 5 Comparison of the relative values of different indicators of highly double salt-salt-alkali sensitive type and highly double salt-salt-alkali tolerant type Chinese kale under salt stress, salt and alkali stress

3 讨论

目前，土壤盐碱化是一个全球性问题，灌溉方式不合理，化肥施用过量，植被破坏，极端气候等原因

导致土壤盐碱化日益严重[24]。种子萌发是植物生长发育的重要阶段，这一时期的耐盐能力直接影响种子的出苗质量及植株后续的生长发育情况[25]。前人多使用培养皿进行萌发期耐盐性鉴定[26-27]，由于培养皿的开放结构易导致蒸发过快，蒸发量不一致，且需频繁补水，难以保证品种数量多的情况下胁迫环境的一致性。本研究设计了多品种穴盘萌发法，该方法采用 288 孔穴盘，对于小粒种子而言，每孔可处理 1 个品种，1 个穴盘可处理大量品种，且处理溶液通过脱脂棉吸水，有效保障了胁迫环境的一致性，不仅提高了试验效率、降低了试验成本，同时成功解决了传统培养皿发芽法处理环境均一性差的问题。

现阶段关于芥蓝的耐盐碱性的研究多以单一盐胁迫条件为主，本研究通过混合盐碱胁迫在一定程度上对芥蓝耐盐碱性研究做了补充。结果表明，与对照相比，240mmol/L Na^+ 条件下不同 pH 值处理的 79 份芥蓝材料各萌发指标在品种间存在显著差异，其中影响最大的指标为根长，这与田振东等[28]、Güngör 等[29]、Riaz 等[30]研究结果一致，说明盐碱胁迫抑制了根的伸长。植物吸收水分和矿质养分的主要器官是根系，根系生长受显著抑制后，其养分与水分吸收功能也随之减弱，导致芽鲜重降低，这与谷娇娇[31]等在水稻中的研究结论相符。现有研究表明，pH 值的变化对种子萌发的影响存在显著差异。在酸性环境中，随着 pH 值的降低，星星草种子的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数指标均随之降低[32]，而贯叶连翘及贵州小连翘种子的发芽势、发芽率和活力指数却表现出增加趋势[33]；何海洋等[34]揭示了光皮桦种子对 pH 变化的双向响应，在酸性条件下，发芽势和发芽率随 pH 降低明显下降，在碱性环境中，发芽指标随 pH 增加而降低。而本研究结果表明 240mmol/L Na^+条件下 pH 值的增加对不同品种芥蓝的耐盐性影响不同，以发芽势为例，44.30%的品种显著增加，24.05%的品种显著降低，31.65%的品种无显著变化。可见 pH 值的变化对不同作物萌发期耐盐碱性的影响不同，可产生显著的缓解或协同加剧作用。

植物的耐盐碱性受多基因控制，单一指标无法全面客观地评价植物的耐盐碱能力，采用多指标综合评价才能全面准确地评估其耐盐碱能力[35]。本研究依据主成分分析、隶属函数分析及 D 值，进行聚类分析，对芥蓝种质资源的耐盐碱性进行全面评估，该方法不仅弥补了单一指标评价的缺陷，还成功解决了植物耐盐性评价中多指标难以统一比较的问题[36]。本研究所采用的方法与前人在大豆[37]、甜高粱[38]等植物耐盐性评价中所使用的方法相同，这种综合评价体系可为耐盐性作物的选育提供有力的参考依据。

79 份芥蓝材料包括多年选育自交系、地方品种及生产上广泛栽培的商业品种，筛选出的高度双重耐盐-盐碱型芥蓝材料共 6 份，其中自交系材料 3 份，为 R35（CF01）、R49（ZHC19）和 R59（ZH14），可用作耐盐碱品种的选育及耐盐碱机制的研究；其余 3 份材料为商业品种，分别是 R20（盆景香菇芥兰）、R74（桃山芥蓝）和 R76（红美人），为盐碱地适种品种选择提供依据。商业品种通常不作为种质资源长期保存的对象，其亲本材料才是种质资源库中适合长期保存的种质资源。基于此，拟在后续研究中优先从国家种质资源库中规范引种，确保材料来源的典型性与遗传多样性，以推动种质资源研究走向标准化和高效化。

参考文献

[1] 刘欣玥,郭潇阳,王欣茹,辛大伟,关荣霞,邱丽娟.大豆萌发期耐盐性鉴定方法建立及耐盐大豆资源筛选.作物学报,2024,50(8):2122-2130

Liu X Y, Guo X Y, Wang X R, Xin D W, Guan R X, Qiu L J. Establishment of screening method for salt tolerance at germination stage and identification of

salt-tolerant germplasms in soybean. Acta Agronomica Sinica, 2024,50(8):2122-2130

[2] Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. Ecotoxicology and environmental safety, 2005, 60(3): 324-349

[3] 王露欢,张晓吉,刘齐妹,张晓宇,张鑫,薛云云,张蕙琪,田跃霞,李娜,王鹏冬,白冬梅.花生品种萌芽期耐盐性综合评价及 QTL 定位.植物遗传资源学报,2025,26(9):1796-1808

Wang L H, Zhang X J, Liu Q M, Zhang X Y, Zhang X, Xue Y Y, Zhang H Q, Tian Y X, Li N, Wang P D, Bai D M. Comprehensive evaluation of salt tolerance and QTL mapping of peanut varieties at the germination stage. Journal of Plant Genetic Resources, 2025,26(9):1796-1808

[4] 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 Agricultural Sciences,2015,47(4):125-130.

[5] Kovda V A. Loss of productive land due to salinization. Ambio, 1983, 12(2): 91-93

[6] 郝熠镭,姚有华,姚晓华,马宏, 吴昆仑, 崔永梅. 青稞种质资源萌发期耐盐碱性的鉴定评价.植物遗传资源学报, 2025, 26(10):995-2007

Hao Y L, Yao Y H, Yao X H, Ma H, Wu K L, Cui Y M. Evaluating the variation of the saline-alkaline resistance in hulless barley germplasm resources at germination stage. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 2025, 26(10): 1995-2007

[7] 彭泽,杨春苗,耿广东,杨锐,冯周,张军,张庆勤,张素勤.小麦及远缘杂交后代苗期耐盐性综合评价.植物遗传资源学报,2020,21(3):597-604

Peng Z, Yang C M, Geng G D, Yang R, Feng Z, Zhang J, Zhang Q Q, Zhang S Q. Comprehensive evaluation of salt-tolerance at the seedling stage in progeny of wheat and the wild relatives. Journal of Plant Genetic Resources, 2020,21(3):597-604

[8] 王磊.河北省盐碱土防治与综合利用.水科学与工程技术,2015(5):93-94

Wang L. The control and comprehensive utilization of saline alkali soil in Hebei province. Water Science and Engineering Technology,2015(5):93-94

[9] 韩毅强,高亚梅,杜艳丽,张玉先,杜吉到,张文慧,潘绍玉.大豆耐盐碱种质资源鉴定.中国油料作物学报,2021,43(6):1016-1024

Han Y Q, Gao Y M, Du Y L, Zhang Y X, Du J D, Zhang W H, Pan S Y. Identification of saline-alkali tolerant germplasm resources of soybean during the whole growth stage. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2021,43(6):1016-1024

[10] 高倩,卢楠.盐碱地综合治理开发研究现状及展望.南方农机,2021,52(16):153-155

Gao Q, Lu N. Current status and prospect of research on comprehensive management and development of saline-alkali land. Southern Agricultural Machinery,2021,52(16):153-155

[11] 高战武.紫花苜蓿和燕麦抗盐碱机制研究.长春：东北师范大学,2011

Gao Z W. Research on the salt-alkali resistance mechanism of alfalfa and oat. Changchun: Northeast Normal University,2011

[12] 焦茹玉,朱羿霖,谢其均,谭文清,曲亮,刘新红,邓力超,刘丽莉,严明理.186 份甘蓝型油菜种子萌发期耐盐性鉴定.植物遗传资源学报,2024,25(12):2081-2093

Jiao R Y, Zhu Y L, Xie Q J, Tan W Q, Qu L , Liu X H, Deng L C, Liu L L, Yan M L. Identification of salt-tolerant during seed germination period in 186 accession of *Brassica napus*. Journal of Plant Genetic Resources, 2024,25(12):2081-2093

[13] 孙明明,郭冉博,李鑫,刘磊,朱璨,黄泽军,王孝宣,国艳梅,杜永臣,朱文莹,李君明.64 份醋栗番茄核心种质萌发期耐盐碱评价.植物生理学报,2024,60(7):1145-1156

Sun M M, Guo R B, Li X, Liu L, Zhu C, Huang Z J, Wang X X, Guo Y M, Du Y C, Zhu W Y, Li J M. Evaluation of saline-alkali tolerance of 64 core germplasms of Solanum pimpinellifolium at germination stage. Plant Physiology Journal, 24,60(7):1145-1156

[14] 魏磊,段忠山,吴佳雨,冯娜.外源钙离子对 NaCl 胁迫下不同品种黄瓜种子萌发的影响.榆林学院学报,2025,35(2):41-45

Wei L, Duan Z S, Wu J Y, Feng N. Effects of Ca^{2+} on seeds germination of different varieties of cucumber under NaCl stress. Journal of Yulin University, 2020,35(2):41-45

[15] 邹敏,陶涛,田时炳,周珊珊,刘富中,王益奎,杨洋,王永清.139 份砧用茄子种质资源苗期耐盐性评价.干旱地区农业研究,2025,43(2):22-31

Zou M, Tao T, Tian S B, Zhou S S, Liu F Z, Wang Y K, Yang Y, Wang Y Q. Evaluation of salt tolerance in the seedling stage of 139 eggplant germplasm resources for root stock. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020,43(2):22-31

[16] 吴嘉垲,杨晨,欧立军. 盐胁迫对不同辣椒品种种子萌发特性的影响.辣椒杂志, 2023, 21 (3): 20-23

Wu J K, Yang C, Ou L J. Effects of salt stress on seed germination characteristics of different pepper cultivars. Journal of China Capsicum, 2023, 21 (3): 20-23

[17] 张德双,赵泓,辛晓云,张凤兰,余阳俊,于拴仓,苏同兵,赵岫云,汪维红,李佩荣,王姣,卢桂香.芥蓝游离小孢子培养技术优化及其在育种中的应用.中国蔬菜,2024(5):75-83

Zhang D S, Zhao H, Xin X Y, Zhang F L, Yu Y J, Yu S C, Su T B, Zhao X Y, Wang W L, Li P R, Wang J, Lu G X. Optimization and application in breeding of isolated microspore culture technology in Chinese kale. China Vegetables,2024(5):75-83

[18] 马蓓蓓.利用叶绿素荧光参数鉴定芥兰耐盐性及其相关机理.南京:南京农业大学,2020
Ma B B.Identification of salt tolerance of kale and related mechanism using chlorophyll fluorescence parameters.Nanjing:Nanjing Agricultural University,2020.

[19] 杜欢欢,孙亚楠,魏世锦,盛明磊,王建英,戴希尧,任喜波.不同品种芥蓝发芽期和苗期耐盐性鉴定及综合评价.安徽农业科学,2022,50(15):47-50
Du H H, Sun Y N, Wei S J, Sheng M L, Wang J Y, Dai X Y, Ren X B. Identification and comprehensive evaluation of salt tolerance of different varieties of Chinese kale at germination and seedling stage. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2022,50(15):47-50

[20] 杜欢欢,李盼超,盛明磊,王少翠,任喜波,戴希尧.NaCl 胁迫下不同芥蓝品种种子萌发特性的比较.河北北方学院学报: 自然科学版,2025,41(1):54-58
Du H H, Li P C, Sheng M L, Wang S C, Ren X B, Dai X Y. Comparison of seed germination characteristics of different varieties of Chinese kale under NaCl stress. Journal of Hebei North University: Natural Science Edition, 2020,41(1):54-58

[21] 王建英,李素亚,孙笑寒,董雪霏,戴希尧,任喜波. NaCl 胁迫下氯化钙对芥蓝种子萌发特性的影响.安徽农业科学, 2025,53(17):48-51
Wang J Y, Li S Y, Sun X H, Dong X F, Dai X Y, Ren X B. Effect of Calcium Chloride on seed germination characteristics of Chinese kale under NaCl stress. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2025,53(17):48-51

[22] 胡志康,舒雨,王会,杨莹莹,廖俊宇,刘佳,成洪涛,郭晨,张园园,刘胜毅,胡琼,梅德圣,李超.甘蓝型油菜苗期耐碱性种质综合鉴定与评价.作物学报, 2025,51(10):2681-2692
Hu Z K, Shu Y, Wang H, Yang Y Y, Liao J Y, Liu J, Cheng H T, Guo C, Zhang Y Y, Liu S Y, Hu Q, Mei D S, Li C. Comprehensive evaluation of alkaline tolerance in *Brassica napus* at the seedling stage. Acta Agronomica Sinica, 2025,51(10):2681-2692

[23] 刘倩倩,李冉,周婷芳,张泽,上官小川,潘越,张德贵,雍洪军,李明顺,韩洁楠.211 份玉米自交系萌发期耐盐性鉴定.作物杂志,2024(4):62-70
Liu Q Q, Li R, Zhou T F, Zhang Z, Shangguan X C, Pan Y, Zhang D G, Yong H J, Li M S, Han J N. Identification of salt tolerance of 211 maize inbred lines at germination stage. Crops,2024(4):62-70

[24] 李明阳,任若然,邓斯夫,高亚梅.耐盐碱放线菌对盐碱胁迫条件下苗期大豆生长的促生作用研究.黑龙江八一农垦大学学报,2025,37(3):79-87
Li M Y, Ren R Y, Deng S F, Gao Y M. Promoting Effect of salt alkali tolerant actinomycetes on the growth of soybean seedlings under alkaline stress conditions. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020,37(3):79-87

[25] 曾怡,袁嘉苗,杨静,王玉祥.23 份紫花苜蓿材料萌发期的耐盐性综合评价.草地学报,2025,33(7):2249-2261
Zeng Y, Yuan J M, Yang J, Wang Y X. Comprehensive evaluation of salt tolerance of 23 alfalfa materials during seeds germination stage. Acta Agrestia Sinica, 2020,33(7):2249-2261

[26] 高霞,石凤翎,高翠萍,王国阳,刘思博.NaCl 模拟盐胁迫对 7 种黄芪属种子萌发的影响.黑龙江畜牧兽医,2025(7):132-139,145
Gao X, Shi F L, Gao C P, Wang G Y, Liu S B. Effect of NaCl stress on the germination of seven Astragalus seeds. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine,2025(7):132-139,145

[27] 王明笛,张妍楚,李兴远,王彬权,黄战,刘金宝,张云玲,由守昌,张锐敏.西瓜萌发期耐盐种质材料筛选.中国瓜菜,2025,38(7):62-71
Wang M D, Zhang Y C, Li X Y, Wang B Q, Huang Z, Liu J B, Zhang Y L, You S C, Zhang R M. Screening of salt-tolerant watermelon germplasm at germination stage. China Cucurbits and Vegetables, 2020,38(7):62-71

[28] 田振东,段嘉蕾,张跃华,刘长涛,雷瀚,高若凡,王召明,石凤翎.82 份燕麦种质萌发期耐盐碱评价与筛选.种子, 2025,44(4):143-151,164
Tian Z D, Duan J L, Zhang Y H, Liu C T, Lei H, Gao R F, Wang Z M, Shi F L. Evaluation and screening of salt and alkali tolerance of 82 avena sativa germplasms at germination stage. Seed, 2025,44(4):143-151,164

[29] Güngör H, Çıkılı Y, Dumlupınar Z. Screening of oat varieties and landraces at early vegetative stage under salt stress conditions: Morpho-physiological and PCA biplot analysis. Cereal Research Communications, 2021, 49(4): 587-597

[30] Riaz F, Abbas G, Saqib M, Amjad M, Farooq A, Ahmad S, Naeem M A, Umer M, Khalid M S, Ahmed K, Ahmad N. Comparative effect of salinity on growth, ionic and physiological attributes of two quinoa genotypes. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2020, 57(1).115-122

[31] 谷娇娇,胡博文,贾琰,沙汉景,李经纬,马超,赵宏伟.盐胁迫对水稻根系相关性状及产量的影响.作物杂志,2019(4):176-182
Gu J J, Hu B W, Jia Y, Sha H J, Li J W, Ma C, Zhao H W. Effects of salt stress on root related traits and yield of rice. Crops,2019(4):176-182

[32] 张硕,张婉婷,时东方,倪秀珍.不同 pH 对星星草种子萌发特性的影响研究.长春师范大学学报,2019,38(2):184-187
Zhang S, Zhang W T, Shi D F, Ni X Z. Effects of pH on seed germination of puccinellia tenuiflora. Journal of Changchun Normal University,2019,38(2):184-187.

[33] 谢文洁,陈训.不同 pH 值处理对贯叶连翘及贵州小连翘种子萌发的影响.贵州科学,2012,30(3):76-79
Xie W J, Chen X. Seed germination characteristics of hypericum guizhouense and hypericum perfoeatum in different pH values. Guizhou Science,2012,30(3):76-79

[34] 何海洋,胡春芹,丁强强,万志兵.不同 pH 对光皮桦种子萌发及幼苗生长的影响.西南林业大学学报: 自然科学,2013,33(5):29-33, 39

He H Y, Hu C Q, Ding Q Q, Wan Z B. Effect of pH value on seed germination and seedling growth of betula iuminifera. Journal of Southwest Forestry University: Natural Science,2013,33(5):29-33, 39

[35] 刘兴彩,杭嘉慧,宋婷,石晓彤,刘晓霞,麻冬梅. 40 份燕麦种质资源萌发期耐盐性评价与筛选.草地学报, 2025, https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20250619.1603.002

Liu X C, Hang J H, Song T, Shi X T, Liu X X, Ma D M. Screening and evaluation of 40 forage oat germplasm resources for germination salt tolerance. Acta Agrestia Sinica, 2025, https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20250619.1603.002

[36] 王利群,南丽丽,马香香,郭佳雨,田戈,何蓉.30 份苜蓿种质苗期耐盐性综合评价.中国草地学报,2025,47(7):70-82

Wang L Q, Nan L L, Ma X X, Guo J Y, Tian G, He R. Comprehensive evaluation of salt tolerance of 30 alfalfa germplasms at seedling stage. Chinese Journal of Grassland, 2020,47(7):70-82

[37] 张东超,申奥,雷永琦,关小丽,邹丽颖,杨宇明.15 份大豆品种耐盐性筛选及鉴定.河南科技学院学报: 自然科学版,2025,53(3):9-16

Zhang D C, Shen A, Lei Y Q, Guan X L, Zou L Y, Yang Y M. Screening and identification of 15 soybean varieties for salt tolerance. Journal of Henan Institute of Science and Technology: Natural Science Edition, 2020,53(3):9-16

[38] 鲍飞燕,梁凯莉,刘想,高中斗,谢光辉,刘惠惠.甜高粱萌发期耐盐性鉴定与综合评价指标筛选.安徽农业大学学报,2025,52(3):434-440

Bao F Y, Liang K L, Liu X, Gao Z D, Xie G H, Liu H H. Evaluation of salt tolerance and screening of comprehensive indicators at germination stage in sweet sorghum. Journal of Anhui Agricultural University, 2020,52(3):434-440