

# 286份甘蓝型油菜种质苗期耐盐碱性综合评价

薛天源<sup>1</sup>, 鲁金春子<sup>1</sup>, 何思晓<sup>1</sup>, 余 忆<sup>1</sup>, 陈敬东<sup>1</sup>, 文 静<sup>2</sup>,  
沈金雄<sup>2</sup>, 傅廷栋<sup>2</sup>, 曾长立<sup>1</sup>, 万何平<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>江汉大学生命科学学院/湖北省汉江流域特色生物资源保护开发与利用工程技术研究中心, 武汉 430056;

<sup>2</sup>华中农业大学植物科学技术学院/国家油菜工程技术研究中心, 武汉 430070)

**摘要:** 对286份甘蓝型油菜品系进行苗期耐盐碱性鉴定, 通过水培试验, 测定盐碱胁迫处理下叶片数、绿叶数、绿叶比、株高、根长、根重等指标, 通过盐碱胁迫综合评价(D值)、极端材料筛选分析、相关性、主成分、隶属函数、频数分析和逐步回归分析法, 对不同基因型的油菜种质建立苗期耐盐碱性综合评价模型并筛选出适宜的评价鉴定指标。盐碱胁迫下, 叶片数与株高呈负相关, 两者的相关系数未达到显著性, 其他性状之间均呈正相关并达到了显著或极显著水平。利用主成分分析法将7个耐盐碱指标综合为4个主成分, 可代表油菜耐盐碱性88.349%的原始数据信息量。依据4个主成分的相对重要性(权重)进行加权, 得到不同基因型的耐盐碱性综合评价(D值)。结合隶属函数分析和极端材料筛选分析, 筛选出4份耐碱盐的甘蓝型油菜种质和4份盐碱敏感种质。逐步回归分析结果表明, 在油菜苗期测定其绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重, 通过回归方程估算其D值, 可以初步判断甘蓝型油菜种质资源耐盐碱性。

**关键词:** 甘蓝型油菜; 苗期; 盐碱胁迫; 种质资源筛选; 综合评价

## Comprehensive Evaluation on Saline-alkali Tolerance of 286 *Brassica napus* Germplasm at Seedling Stage

XUE Tianyuan<sup>1</sup>, LU Jinchunzi<sup>1</sup>, HE Sixiao<sup>1</sup>, YU Yi<sup>1</sup>, CHEN Jingdong<sup>1</sup>, WEN Jing<sup>2</sup>,  
SHEN Jinxiong<sup>2</sup>, FU Tingdong<sup>2</sup>, ZENG Changli<sup>1</sup>, WAN Heping<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Life Sciences, Jianghan University/Hubei Engineering Research Center for Conservation, Development and

Utilization of Characteristic Biological Resources in Hanjiang River Basin, Wuhan 430056; <sup>2</sup>College of

Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University /National Oilseed Rape

Engineering Technology Research Center, Wuhan 430070)

**Abstract:** The salt-alkali tolerance of 286 brassica rapeseed strains at the seedling stage was identified in this study. The indexes of leaves number, green leaves number, green leaves rate, shoot length, root length, and root weight under salt-alkali stress were determined through a hydroponics test. Various methods including comprehensive assessment value (*D*-value), extreme material screening analysis, correlation analysis, principal component analysis, membership function analysis, frequency analysis and stepwise regression analysis were used. A comprehensive evaluation model for saline-alkali tolerance was established for different genotypes of rapeseed germplasm at the seedling stage and appropriate evaluation indexes were selected. Under saline-alkali stress conditions, leaves number showed a negative correlation with plant height but the correlation coefficient between them was not significant; however other traits showed positive correlations that reached a significant or

收稿日期: 2023-08-27 修回日期: 2023-10-02 网络出版日期: 2023-10-31

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230827002>

第一作者主要从事特色植物资源开发与利用研究, E-mail: xty99100911@163.com

通信作者: 曾长立, 主要从事植物逆境生理、珍稀濒危植物保护与利用研究, E-mail: zengchangli@jhun.edu.cn

万何平, 主要从事油菜耐盐碱遗传研究, E-mail: wanheping@jhun.edu.cn

基金项目: 生物育种专项(2022ZD04010); 国家自然科学基金(U22A20469); 国家重点研发计划项目(2016YFD0100202-25)

**Foundation projects:** Biological Breeding Special (2022ZD04010); The National Natural Science Foundation of China (U22A20469); The National Key Research and Development Program (2016YFD0100202-25)

extremely significant level. Principal component analysis was employed to synthesize 7 salt-alkali tolerance indexes into 4 principal components which could represent 88.349% of the original data information on rape's salt-alkali tolerance. Based on the relative importance (weight) of these four principal components, a comprehensive evaluation value (*D*-value) for salt and alkali tolerance among different genotypes was obtained. Four alkali-salt-tolerant *Brassica napus* germplasms and four saline-sensitive germplasms were screened using membership function analysis and extreme material screening analysis respectively. The results from stepwise regression analysis indicated that salinity tolerance in *Brassica napus* germplasm resources could be determined by measuring the green leaves number, green leaves rate, shoot weight as well as root length and root weight at the seedling stage while estimating *D*-value using regression equations.

**Key words:** *Brassica napus*; seedling stage; saline-alkali stress; screening of germplasm resources; comprehensive evaluation

土壤盐碱化是影响农作物栽培和生产的重要因素之一,中国约有 15 亿亩盐碱地,其中约 5 亿亩具有开发利用潜力<sup>[1-2]</sup>。盐碱地是我国耕地“扩容、提质、增效”的重要来源,是农业开发利用的后备土地资源<sup>[3]</sup>。因此,盐碱地亟待整治开发利用<sup>[4]</sup>。盐碱地的开发利用,作为一项技术性难题长期以来备受关注。目前,以利用植被修复为主的生物措施已成为改良盐碱地的重要手段,具有成本低、收益快、对环境友好等优点<sup>[5]</sup>。有研究表明,油菜的苗期对盐分中度敏感,对盐分的抗性相对较差<sup>[6-7]</sup>,其在盐碱胁迫下株高、干物质积累量、根系生长等生长指标受到显著抑制<sup>[8]</sup>,适宜作为油菜耐盐碱研究的重要时期。李琳等<sup>[9]</sup>研究 46 份芸豆品种苗期生长的耐盐碱性,表明 100 mmol/L NaHCO<sub>3</sub> (pH=8.5) 为适宜的胁迫处理浓度;以各项指标的耐盐碱系数为耐盐碱指标,通过主成分分析、隶属函数分析和聚类分析等方法对 42 份芸豆品种苗期的耐盐碱性进行了综合评价。张林等<sup>[10]</sup>研究 50 份玉米自交系苗期表型性状的耐盐碱性,表明 200 mmol/L NaCl+5 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 混合浓度是适宜的耐盐碱性鉴定胁迫浓度。王晓春等<sup>[11]</sup>发现不同浓度的盐碱溶液处理降低紫花苜蓿苗期株高、根长、根粗、地上重、地下重。赵俊香等<sup>[12]</sup>对 16 份菊芋的耐盐碱能力进行评价,经盐碱胁迫后,地上鲜干重、地下鲜干重、全株鲜重和全株干重均受到不同程度的影响。可见盐碱胁迫是苗期形态建成主要限制因素<sup>[13-15]</sup>,因此,选育苗期耐盐碱的作物品种(系)是实现高产、提高品种稳定性的关键。

油菜是全球重要的油料作物之一,主要分布在南方酸性土壤的长江中下游流域,在中国扮演着第五大作物的角色,仅次于水稻、小麦、玉米和大豆。菜籽油产量约占中国自产植物油总量的 45% 以

上<sup>[16-17]</sup>。油菜适种范围广,在我国从南到北都有种植,研究表明油菜是中度耐盐作物<sup>[18]</sup>,无论是中性盐胁迫(主要含 NaCl),还是盐碱混合胁迫(主要含 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)、碱性盐胁迫(主要含 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、NaHCO<sub>3</sub>),油菜均表现出一定程度的耐受性<sup>[19]</sup>。此外,油菜生物学产量高、耐盐碱能力强、适种区域广等优点<sup>[20]</sup>使其成为开发和利用盐碱土地的理想植物材料。因此,为了降低和预防盐碱胁迫对油菜的危害,最有效的方法是筛选和培育耐盐碱油菜种质。耐盐碱种质筛选和评价是耐盐碱育种的基础。目前,盐碱胁迫对油菜生长的影响及耐盐碱种质的筛选鉴定引起广泛重视。多年来,人们对油菜的耐盐碱性进行了大量的研究,张培通等<sup>[21]</sup>将宁杂 21 号在含盐量为 0.2%~0.4% 的盐碱地试验田播种,全生育期收获,以株高、单株产量、叶面积等性状作为耐盐高产栽培的生育指标;杨洋等<sup>[22]</sup>以华油杂 62 号油菜为试材,采用盆栽方法,研究了轻、中、重度复合盐碱胁迫下油菜幼苗叶片生理指标可溶性糖、脯氨酸含量、超氧化物歧化酶(SOD, superoxide dismutase)、过氧化物酶(POD, peroxidase)、过氧化氢酶(CAT, catalase)的活性变化;李班等<sup>[23]</sup>以华油杂 62 号油菜为试验材料,对油菜种子及幼苗进行不同浓度的复合盐、复合碱及复合盐碱溶液处理,测定油菜种子的发芽率以及甘蓝型油菜叶片中叶绿素含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量、抗氧化酶活性等生理指标,用高效液相色谱法测定油菜叶片中甜菜碱积累量。前人的研究都是根据油菜种子萌发期或成熟期的相关指标对油菜耐盐碱性进行鉴定,但根据苗期相关性状进行油菜耐盐碱种质资源筛选的报道却较少。耐盐碱性是一个复杂的性状,不同耐盐碱种质的相同指标对盐碱胁迫的反应不尽相同,不同耐盐碱类型间的耐性机制也不相同。利

用主成分分析法可以准确地确定各指标权重,从多个存在一定相关关系的变量中选出几个新的综合变量。在此基础上,求出所有品种的每一个综合指标值及其相应的隶属函数值,然后进行加权,得到各品种抗逆性的综合评价价值,从而科学地评价各作物品种的抗逆性。吴鹏博等<sup>[8]</sup>采用出苗率、茎粗、植株鲜重、根干重等8个指标对苗期油菜耐盐碱性进行综合评价;李萍等<sup>[24]</sup>以发芽势、发芽率、根长、芽长、相对芽长、相对根长作为耐盐性相关指标,对146份甘蓝型油菜品种进行芽期耐盐性鉴定。因此,由前人研究可知利用单项指标鉴定作物的耐盐碱性局限性很大。本研究以286份甘蓝型油菜品种(系)为材料,采用水培法在苗期进行盐碱胁迫处理,调查7个指标,运用主成分分析、隶属函数、频

次分析、极端材料筛选分析和逐步回归分析等方法综合评价油菜品种(系)苗期耐盐碱性,筛选出苗期耐盐碱性较强的甘蓝型油菜种质,以期建立耐盐碱性筛选、鉴定指标及评价方法,为油菜耐盐碱性品种(系)选择和新品种(系)选育提供参考依据和理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料为286份油菜地方品种、育种材料和栽培品种,由华中农业大学、中国农业科学院油料作物研究所、江苏省农业科学院、西南大学、湖南农业大学、四川省农业科学院、陕西杂交油菜中心和青海大学等多家单位提供(表1)。

表1 286份油菜种质材料

Table 1 286 accessions of rapeseed germplasm

编号 No.	品种(系) Cultivar (line)	来源 Origin	编号 No.	品种(系) Cultivar (line)	来源 Origin	编号 No.	品种(系) Cultivar (line)	来源 Origin	编号 No.	品种(系) Cultivar (line)	来源 Origin
1	宁油6号	中国江苏	29	农林42	中国重庆	57	SWU111	中国重庆	85	1322	中国湖南
2	10-崇23	中国湖北	30	广德761	中国安徽	58	CY14PXW-18	中国四川	86	SWU70	中国重庆
3	santana	中国重庆	31	SWU102	中国重庆	59	CY12GJ-1	中国四川	87	SWU113	中国重庆
4	中双2号	中国湖北	32	P668	中国陕西	60	WX10329	中国湖南	88	滁县白花	中国安徽
5	10-1047	中国湖南	33	SWU71	中国重庆	61	64棚-10	中国湖北	89	沪油三号	中国上海
6	华油6号	中国湖北	34	川油20	中国四川	62	740	中国湖南	90	红油3号	中国江苏
7	WH-58	中国湖北	35	A148	瑞典	63	中双4号	中国湖北	91	湘油11号	中国湖南
8	03I32B	中国甘肃	36	甲920	中国湖北	64	广德8104	中国安徽	92	CY17PXW-58	中国四川
9	非洲油菜乳黄花	中国上海	37	浙油18	中国浙江	65	扬油5号	中国江苏	93	青662A	中国湖北
10	WH-42	中国湖北	38	恩油73-1-2	中国湖北	66	9F087	中国湖北	94	农林43	日本
11	沪油14	中国上海	39	SWU74	中国重庆	67	WH-38	中国湖北	95	扬J6711	中国江苏
12	甲预31棚	中国湖北	40	宁油18号	中国江苏	68	浙双6号	中国浙江	96	沪油19	中国上海
13	甲预17棚	中国湖北	41	SWU97	中国重庆	69	甲904	中国湖北	97	中双10号	中国湖北
14	1252	中国湖南	42	华油3号	中国湖北	70	阳光2009	中国湖北	98	2012-5086	中国湖北
15	宁油16号	中国江苏	43	12-P25	中国湖北	71	B265	中国陕西	99	甲预25棚	中国湖北
16	史力佳	中国江苏	44	浙双3号	中国浙江	72	CY21PXW-84	中国四川	100	A82	中国江西
17	GY282	中国陕西	45	10-崇32	中国湖北	73	希望106	中国湖北	101	阳光198	中国湖北
18	油研2号	中国贵州	46	丰油9号	中国河南	74	沪激早	中国上海	102	甘油5号	中国湖北
19	CY19PXW-65	中国四川	47	苏油4号	中国江苏	75	A117	中国陕西	103	P158	中国陕西
20	WH-83	中国湖北	48	11-9-703	中国湖北	76	皖油29	中国安徽	104	WH-81	中国湖北
21	Nakaee Chousen	日本	49	SWU66	中国重庆	77	Aurora	德国	105	沪油17号	中国上海
22	CY12PXW-6	中国四川	50	10-江棚3	中国湖北	78	2012-9354	中国湖北	106	2354	中国湖北
23	SWU53	中国重庆	51	09-P36	中国湖北	79	RQ011	澳大利亚	107	WH-45	中国湖北
24	宁油12号	中国江苏	52	Cubs root	韩国	80	2012-9478	中国湖北	108	华油4号	中国湖北
25	93210	中国湖北	53	chuosenshu	中国湖北	81	10-江棚2	中国湖北	109	沪油12号	中国上海
26	08-P35	中国湖北	54	08-P36	中国湖北	82	2011-7103	中国湖北	110	10-崇25	中国湖北
27	986	中国甘肃	55	Sophia	中国重庆	83	2012-8355	中国湖北	111	A97	中国陕西
28	SWU63	中国重庆	56	纬隆88	中国湖北	84	2012-3448	中国湖北	112	11-P67东	中国湖北

表 1 (续)

编号 No.	品种(系) Cultivar (line)	来源 Origin	编号 No.	品种(系) Cultivar (line)	来源 Origin	编号 No.	品种(系) Cultivar (line)	来源 Origin	编号 No.	品种(系) Cultivar (line)	来源 Origin
113	10-崇33	中国湖北	157	880101	中国重庆	201	699	中国湖北	245	7016	中国湖北
114	甲预05棚	中国湖北	158	湖北白花油菜	中国湖北	202	P113	中国陕西	246	甲951棚	中国湖北
115	11-9-705	中国湖北	159	SWU64	中国湖北	203	华油13号	中国湖北	247	B285	中国陕西
116	P18父本-保持系	中国湖北	160	WH-43	中国湖北	204	RR002	澳大利亚	248	2012-8380	中国湖北
117	漕泾胜利	中国上海	161	漕油2号	中国江苏	205	WH-50	中国湖北	249	CY12Q21535-N3	中国四川
118	Wesreo	澳大利亚	162	淮油6号	日本	206	WH-60	中国湖北	250	B250	中国陕西
119	10-1061	中国湖南	163	全紫油菜	中国江苏	207	浙双8号	中国浙江	251	荣选	中国江苏
120	1281	中国湖南	164	SWU46	中国重庆	208	11-P30	中国湖北	252	COBRA	中国湖北
121	10-崇29	中国湖北	165	WH-49	中国湖北	209	R2	中国湖北	253	浙油17号	中国浙江
122	HX0352	中国江苏	166	783	中国湖南	210	甲915	中国湖北	254	WH-41	中国湖北
123	加拿大2号	加拿大	167	B262	中国河南	211	Wase Chousen	日本	255	镇2609	中国湖北
124	P310	中国陕西	168	盐油2号	中国江苏	212	沪油18	中国上海	256	C052	中国陕西
125	SWU65	中国重庆	169	铜陵花叶	中国安徽	213	2012-5113	中国湖北	257	2012-8327	中国湖北
126	黔油331	中国贵州	170	SWU71	中国重庆	214	CY12QSZ06	中国四川	258	SWU88	中国重庆
127	11-P74-8父本	中国湖北	171	SWU90	中国重庆	215	华航901	中国湖北	259	AGREV012	中国青海
128	CY12Q8-7	中国四川	172	10-P10	中国湖北	216	阳光198	中国湖北	260	广德138	中国江苏
129	WH-59	中国湖北	173	1570	中国湖北	217	中双6号	中国湖北	261	CY20PXW-66	中国四川
130	AGREV019	德国	174	浙油758	中国浙江	218	中油821	中国湖北	262	2012-9380	中国湖北
131	Oscar	中国重庆	175	06H7	中国甘肃	219	黔油4号	中国贵州	263	2012-11526	中国湖北
132	SWU47	中国重庆	176	SWU96	中国重庆	220	SWU52	中国重庆	264	11-504	中国青海
133	AGREV021	德国	177	GY270	中国陕西	221	沪油18	中国上海	265	11-1184	中国青海
134	扬油4号	中国江苏	178	Daichousen	中国湖北	222	WH-30	中国湖北	266	大花球	中国江苏
135	SWU77	中国重庆	179	沛选170	中国江苏	223	华油12	中国湖北	267	苏油1号	中国江苏
136	皖油16号	中国安徽	180	SWU54	中国重庆	224	勺叶青	中国上海	268	782	中国湖南
137	CY13PXW-17	中国四川	181	SWU80	中国重庆	225	甲预16棚	中国湖北	269	沪油15	中国上海
138	CY16PXW-35	中国四川	182	P312	中国陕西	226	7-7766-74套帐	中国湖北	270	563	中国湖南
139	WH-61	中国湖北	183	沪油21	中国上海	227	WH-88	中国湖北	271	浙油21	中国浙江
140	CY12PXW-4	中国四川	184	中双10号	中国湖北	228	SWU57	中国重庆	272	gl302-1	中国甘肃
141	SWU49	中国重庆	185	Qu	中国青海	229	P685	中国陕西	273	WH-33	中国湖北
142	YB3	中国湖南	186	Niklas	中国湖北	230	WESBROOK	中国青海	274	中油821Q	中国湖北
143	SWU85	中国重庆	187	申黄1号	中国上海	231	华双128	中国湖北	275	SWU84	中国重庆
144	中双7号	中国湖北	188	SWU60	中国重庆	232	密角多头油菜	中国上海	276	中双6号	中国湖北
145	甲PF190棚	中国湖北	189	淮油12号	日本	233	中油589	中国湖北	277	SWU104	中国湖北
146	WH-55	中国湖北	190	WH-20	中国湖北	234	SWU69	中国重庆	278	CY12NY-7	中国四川
147	A98	中国陕西	191	皖油15号	中国安徽	235	华双2号	中国湖北	279	7191	中国湖北
148	WH-28	中国武汉	192	华油10	中国湖北	236	豫油1号	中国河南	280	WH-17	中国湖北
149	major	法国	193	1111	中国湖北	237	三高油菜	中国江苏	281	皖油早	中国安徽
150	28887	中国重庆	194	垛油一号	中国江苏	238	宁油8号	中国江苏	282	SWU75	中国重庆
151	滁610	中国安徽	195	97096	中国湖北	239	SWU103	中国重庆	283	1360	中国湖南
152	2359	中国湖北	196	10-1043	中国湖南	240	A109	中国陕西	284	DD1	中国甘肃
153	秦油1号	中国陕西	197	杨油6号	中国江苏	241	芥65-1	中国浙江	285	浙油21	中国浙江
154	胜利油菜	中国山东	198	CY18PXW-62	中国四川	242	当油早1号	中国安徽	286	封顶240	中国江苏
155	SWU76	中国重庆	199	1472	中国湖南	243	rucabo	德国			
156	10-崇24	中国湖北	200	SWU100	中国重庆	244	GY284	中国陕西			

## 1.2 苗期水培处理

依托江汉大学汉江流域生物资源保护开发与利用工程中心构建的油菜水培系统,温度控制在 $20\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,水培处理方法参考万何平等<sup>[25]</sup>,主要包括:播种(每个材料播种约30粒)—移栽—培养—盐碱胁迫处理—观察取样及数据测定。每个材料取15株幼苗,移栽到3个培养板上,每个培养板移栽5株。选取用1.0%的NaCl和0.10%的 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 混合溶液作为最后的胁迫处理浓度(pH为10.47)。胁迫后第14天,将不同材料在3个培养板上全部取下,将其分为3个批次,依次对油菜苗进行指标测定,指标有叶片数、绿叶数、绿叶比、株高、地上重、根长、根重。

材料收获后,取地下部根系,用爱普生图像扫描仪(Epson Perfection V850Pro)对甘蓝型油菜根系进行扫描,获得根长。地上重和根重使用电子天平称其鲜重,株高使用直尺测量,记录油菜叶片数;将只有绿色性状的完全展开叶片视为绿叶,绿叶数和叶片数的比值为绿叶比。

## 1.3 数据处理与分析

利用Microsoft Excel 2010处理原始数据并作相关图表,运用SPSS 19.0对处理后的286份油菜种质数据进行方差分析、相关性分析、频数分析、主成分分析和回归分析等,利用Origin软件处理后的数据进行频数分析、正态曲线图绘制。参考朱宗河等<sup>[26]</sup>、李丰先等<sup>[27]</sup>方法,按照公式(1)计算各单项指标性状的隶属函数值 $U(X_{ij})$ ,计算各单项指标间的相关性、统计频数分布并进行主成分分析;公式(2)和(3)分别计算各综合指标的权重( $W_i$ )和耐盐碱性综合评价D值;公式(4)根据总载荷值越大排名越高的计算方法,对油菜耐盐碱性最优指标进行排名。

$$U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{ij, \min}) / (X_{ij, \max} - X_{ij, \min}) \quad j=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

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

$$D_i = \sum_{i=1}^n [U(X_{ij}) \times W_i] \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$TL_i = VCR1 \times L_{1i} + VCR2 \times L_{2i} + VCR3 \times L_{3i} + VCR4 \times L_{4i} \quad (4)$$

式(1)中, $X_{ij}$ 表示第*j*个品种(系)经主成分分析所得第*i*个综合指标在盐碱胁迫得分值; $X_{ij, \max}$ 和 $X_{ij, \min}$ 分别表示所有参试材料某综合指标测定值

的最大值和最小值; $U(X_{ij})$ 代表第*j*个品种(系)第*i*个综合指标的隶属函数值。式(2)中, $W_i$ 表示第*i*个综合指标在所有综合指标中的重要程度即权重; $P_i$ 为经主成分分析所得各品种(系)第*i*个综合指标的贡献率。式(3)中, $D_i$ 值为第*i*个品种(系)在盐碱胁迫条件下的综合评价值, $U(X_{ij})$ 代表第*j*个品种(系)第*i*个综合指标的单项指标隶属函数值;其中*i*为选取的主成分个数; $W_i$ 表示第*i*个综合指标在所有综合指标中的重要程度即权重。式(4)中, $TL_i$ 表示第*i*个综合指标的总载荷数, $VCR1 \sim VCR4$ 表示主成分1~4对应的方差贡献率, $L_{1i} \sim L_{4i}$ 表示第*i*个综合指标主成分1~4对应的载荷数。

## 2 结果与分析

### 2.1 甘蓝型油菜苗期耐盐碱指标的变异分析

在相同生长环境,即1.0% NaCl + 0.10%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (pH = 10.47)的盐碱胁迫培养条件下,3个批次的286份甘蓝型油菜种质的表观性状均表现出广泛的遗传变异(表2)。在3个批次的平均值中,根重和地上重变异系数较大,分别为28.97%和27.25%,表明不同品种(系)应对盐碱胁迫时其根部和地上部发生较大变化,而绿叶比、根长和株高变异系数较小,分别为12.00%、13.76%和13.80%,表明这些性状受盐碱胁迫影响较小。利用3个批次的表型指标平均值分析,叶片数、绿叶数、绿叶比、株高、地上重、根长和根重均显示出连续的正态分布(图1);其标准差分别为0.73、0.56、0.09、2.42、0.94、1.98、0.31(表2);表明株高和根长应对盐碱胁迫差异较大。

### 2.2 盐碱胁迫下油菜种质材料各性状指标相关性分析

利用双变量简单相关系数法对286份油菜种质材料受到盐碱胁迫后的7个指标进行相关性分析(表3),除叶片数与株高相关系数未达到显著性,叶片数与株高呈负相关外,其他性状之间均呈正相关并达到了显著或极显著水平,其中绿叶数与叶片数相关系数最大为0.746,根长与绿叶比相关系数最小为0.098( $P < 0.05$ ),由于各性状间均存在或大或小的相关性,使得它们所提供的信息发生重叠,并且各性状在油菜耐盐碱胁迫中所起的作用也不尽相同,因此,直接利用这些性状指标不能准确评价各油菜品种的耐盐碱性,需要通过进一步分析来综合评价油菜的耐盐碱性。

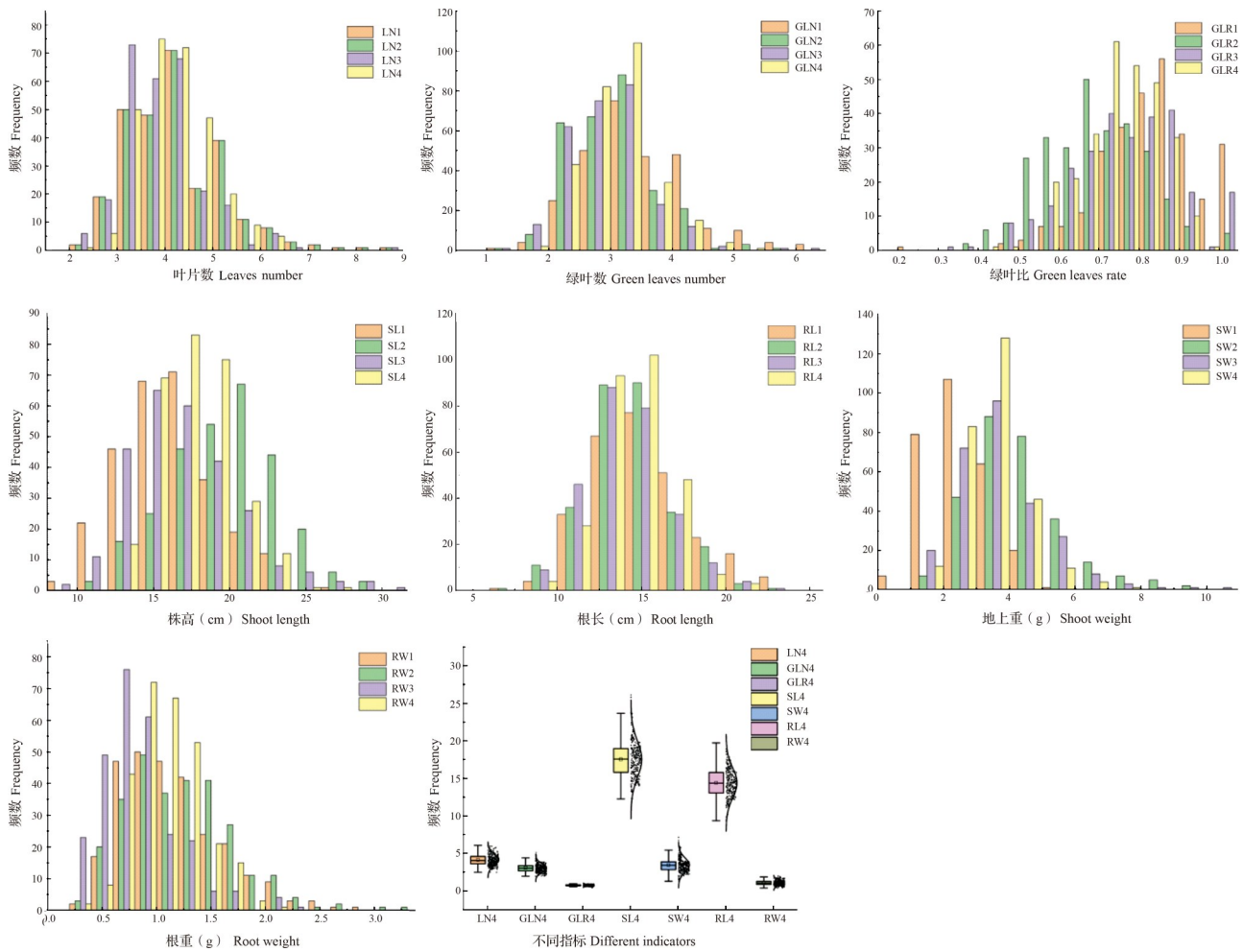
表 2 不同时期盐碱胁迫下甘蓝型油菜各表型指标的变异分析

Table 2 Analysis of variation in phenotypic indicators of *Brassica napus* L. under different periods of salinity stress

性状 Traits	处理(批次) Handle	平均数 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	范围 Range	标准差 Standard deviation	变异系数 (%)CV
叶片数 Leaves number	LN1	4.16	2.40	8.50	2.40~8.50	1.02	24.42
	LN2	4.42	2.00	10.67	2.00~10.67	1.15	25.90
	LN3	3.80	2.00	8.75	2.00~8.75	0.83	21.91
	LN4	4.13	2.47	6.20	2.47~6.20	0.73	17.68
绿叶数 Green leaves number	GLN1	3.41	1.00	6.00	1.00~6.00	0.85	24.98
	GLN2	2.95	1.40	5.60	1.40~5.60	0.69	23.34
	GLN3	2.84	1.20	6.00	1.20~6.00	0.66	23.05
	GLN4	3.06	1.93	5.08	1.93~5.08	0.56	18.30
绿叶比 Green leaves rate	GLR1	0.83	0.20	1.00	0.20~1.00	0.12	14.74
	GLR2	0.68	0.37	1.00	0.37~1.00	0.13	18.66
	GLR3	0.76	0.34	1.00	0.34~1.00	0.13	17.66
	GLR4	0.75	0.42	0.95	0.42~0.95	0.09	12.00
株高(cm) Shoot length	SL1	16.10	8.90	26.58	8.90~26.58	3.06	19.02
	SL2	19.61	11.18	29.46	11.18~29.46	3.51	17.89
	SL3	16.93	9.67	32.00	9.67~32.00	3.76	22.19
	SL4	17.53	12.26	26.11	12.26~26.11	2.42	13.80
地上重(g) Shoot weight	SW1	2.53	0.30	5.53	0.30~5.53	0.90	35.59
	SW2	4.18	1.20	9.79	1.20~9.79	1.42	33.97
	SW3	3.67	1.27	10.71	1.27~10.71	1.38	37.61
	SW4	3.45	1.29	7.15	1.29~7.15	0.94	27.25
根长(cm) Root length	RL1	15.11	7.45	23.95	7.45~23.95	2.98	19.74
	RL2	14.21	6.07	22.40	6.07~22.40	2.54	17.85
	RL3	13.94	8.00	22.20	8.00~22.20	2.46	17.62
	RL4	14.39	8.73	20.56	8.73~20.56	1.98	13.76
根重(g) Root weight	RW1	1.16	0.24	2.85	0.24~2.85	0.46	39.94
	RW2	1.22	0.35	3.27	0.35~3.27	0.50	41.23
	RW3	0.83	0.20	2.37	0.20~2.37	0.37	44.86
	RW4	1.07	0.38	2.01	0.38~2.01	0.31	28.97

LN: 甘蓝型油菜叶片数; GLN: 甘蓝型油菜绿叶数; GLR: 甘蓝型油菜绿叶比; SL: 甘蓝型油菜株高; SW: 甘蓝型油菜地上重; RL: 甘蓝型油菜根长; RW: 甘蓝型油菜根重; 1~4 分别代表批次一、二、三平均值及 3 个批次的平均值; 下同

LN: The number of leaves of *Brassica napus*; GLN: The number of green leaves of *Brassica napus*; GLR: The ratio of green leaves of *Brassica napus*; SL: The plant height of *Brassica napus*; SW: The ground weight of *Brassica napus*; RL: The root length of *Brassica napus*; RW: The root weight of *Brassica napus*; 1-4 respectively represent the average values of batches 1, 2 and 3 and the average values of the three batches; The same as below



箱型图: 分别代表7个表型指标所对应的标准误; 正态分布曲线: 油菜不同品种(系)在所对应表型指标中的数值绘制成的正态分布曲线  
 Box diagram: Representing the standard error corresponding to 7 phenotypic indicators; Normal distribution curve: The normal distribution curve drawn by the values of the corresponding phenotypic indicators of different varieties (lines) of rapeseed

图1 三批甘蓝型油菜表型指标分布直方图及均值分布正态曲线

Fig. 1 Histograms of the distribution of phenotypic indicators and means for three batches of *Brassica napus*

表3 盐碱胁迫下甘蓝型油菜种质材料指标参数的相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient of index parameters of *Brassica napus* L. germplasm under saline-alkali stress

指标 Index	叶片数 Leaves number	绿叶数 Green leaves number	绿叶比 Green leaves rate	株高 Shoot length	地上重 Shoot weight	根长 Root length	根重 Root weight
叶片数 Leaves number	1.000						
绿叶数 Green leaves number	0.746**	1.000					
绿叶比 Green leaves rate	0.315**	0.386**	1.000				
株高 Shoot length	-0.051	0.132*	0.248**	1.000			
地上重 Shoot weight	0.334**	0.485**	0.204**	0.642**	1.000		
根长 Root length	0.227**	0.294**	0.098*	0.290*	0.362**	1.000	
根重 Root weight	0.132*	0.237**	0.143**	0.347**	0.575*	0.393**	1.000

\*\*表示在 1% 水平差异极显著, \*表示在 5% 水平差异显著

\*\* indicates extremely significant differences at the 1% level and \* indicates significant differences at the 5% level

### 2.3 286 份甘蓝型油菜种质材料的主成分分析

为筛选油菜苗期耐盐碱性的主要指标,对 286 份油菜种质材料的 7 个性状指标进行主成分分析(表 4)。根据各主成分的特征值和方差贡献率进行主成分的提取。特征值大于 0.7 的主成分有 4 个,第 1 主成分的特征值为 2.836,方差贡献率达到了 40.515%;第 2 主成分的特征值为 1.535,方差贡献率达到了 21.928%;第 3 主成分的特征值为 1.070,

方差贡献率达到了 21.928%;第 4 主成分的特征值为 0.744,方差贡献率达到了 10.623%(表 4),这 4 个主成分的累计贡献率达到了 88.349%,当主成分的累积贡献率 > 80% 时,可代替 7 个性状指标的绝大部分信息,综合反映盐碱胁迫下油菜苗期的特性,因此可以作为油菜耐盐碱种质评价的综合指标。

表 4 前 4 个主成分的特征值及特征向量描述和油菜各因子总载荷数及最优指标排名

Table 4 The eigenvalues and eigenvectors of the first 4 principal components were described, as well as the total load number of each factor in rape and the ranking of the optimal index

性状 Traits	主成分 Principal components				总载荷数 Total load	最优指标排名 Best indicators ranking
	1	2	3	4		
叶片数 Leaves number	0.504	-0.849	-0.025	-0.119	-9.6E-05	7
绿叶数 Green leaves number	0.731	-0.452	0.504	-0.022	0.305	3
绿叶比 Green leaves rate	0.331	0.525	0.769	0.142	0.433	1
株高 Shoot length	0.609	0.519	-0.203	-0.376	0.276	4
地上重 Shoot weight	0.865	0.129	-0.140	-0.305	0.377	2
根长 Root length	0.608	0.016	-0.248	0.666	0.266	6
根重 Root weight	0.672	0.219	-0.319	0.174	0.269	5
特征值 Eigenvalue	2.836	1.535	1.070	0.744	-	-
方差贡献率(%) Variance contribution rate	40.515	21.928	21.928	10.623	-	-
累计贡献率(%) Cumulative variance contribution rate	40.515	62.443	77.725	88.349	-	-

-: 表示总载荷数和最优指标排名无对应的特征值、方差贡献率和累计贡献率

- : It means that the total load number and the ranking of the optimal index have no corresponding eigenvalue, variance contribution rate and cumulative contribution rate

由表 4 可知,对第 1 主成分产生正向影响的指标有叶片数、绿叶数、绿叶比、株高、地上重、根长、根重,其中绿叶数、株高、地上重、根长和根重载荷数比较高,都在 0.60 以上。对第 2 主成分产生负向影响的指标有叶片数、绿叶数,载荷数分别为 -0.849 和 -0.452,绿叶比和株高为较高的正载荷指标,载荷在 0.5 以上。对第 3 主成分产生正向影响的指标有绿叶数、绿叶比,其载荷数分别为 0.504、0.769;叶片数、株高、地上重、根长、根重是产生负向影响的指

标。对第 4 主成分产生负向影响的指标有叶片数、绿叶数、株高、地上重,载荷数都比较低,在 -0.376 ~ -0.022 之间,根长为较高的正载荷指标,载荷为 0.666。将 7 种表型指标所对应的载荷数与其在 4 种主成分中所对应方差贡献率相乘,最后相加并计算。计算所得结果越大,表明对油菜耐盐碱性产生的正影响越强,进而说明评价油菜耐盐碱性指标越优,即可将评价油菜耐盐碱性指标排名。经计算评价油菜耐盐碱性最优指标排名为绿叶比、地上重、



绿叶数、株高、根重、根长、叶片数(表4)。

#### 2.4 286份甘蓝型油菜耐盐碱性的综合评价分析及极端材料筛选

用公式(2)计算出4个综合指标的权重,根据各品种综合指标的 $U$ 值和权重,利用公式(3),获得各品种的耐盐碱综合评价 $D$ 值,并对286份甘蓝型油菜种质进行排序(表5)。其中 $D$ 值为0.153~0.739,综合排名前十的( $D$ 值从大到小)种质编号依次为8、275、56、105、258、143、282、2、57和285,综合排名后十的( $D$ 值从小到大)种质编号依次为148、129、232、184、122、64、155、74、236和123。根据7个指标对应载荷数和4个主成分方差贡献率,计算出评价油菜耐盐碱性最优

指标排名前三的分别是:绿叶比、地上重、绿叶数(表4)。选取286份油菜种质中绿叶比和地上重数据做四象限图,选取综合排名前十和后十的品种(系),筛选在第二象限和第四象限最边缘的点所对应的基因型为极端材料,第二象限边缘点表示地上鲜重和绿叶数值都较大的材料,第四象限边缘点表示鲜重和绿叶数值都较小的材料,选中的材料在图中用异色标出(图2)。共选出耐盐碱材料(编号为56、105、275和285,详见表6)和盐碱敏感材料(编号为64、129、184和232)各4份。筛选出的耐盐碱极端材料和盐碱敏感材料既在综合排名前十和后十的种质中,又是四象限图中筛选出的极端材料,表明筛选出的材料是可靠的。

表5 油菜种质材料的综合指标值、 $U(X)$ 值、 $D$ 值

Table 5 Comprehensive index value,  $U(X)$  value,  $D$  value of rapeseed germplasm material

编号 No.	$U(X_{1j})$	$U(X_{2j})$	$U(X_{3j})$	$U(X_{4j})$	$D$	编号 No.	$U(X_{1j})$	$U(X_{2j})$	$U(X_{3j})$	$U(X_{4j})$	$D$
1	0.426	0.304	0.674	0.302	0.426	27	0.439	0.520	0.505	0.188	0.439
2	0.642	0.909	0.798	0.052	0.642	28	0.495	0.457	0.521	0.414	0.495
3	0.449	0.258	0.784	0.418	0.449	29	0.485	0.582	0.326	0.476	0.485
4	0.482	0.459	0.643	0.299	0.482	30	0.326	0.172	0.451	0.372	0.326
5	0.548	0.390	0.854	0.491	0.548	31	0.419	0.374	0.402	0.482	0.419
6	0.513	0.558	0.612	0.425	0.513	32	0.344	0.149	0.555	0.315	0.344
7	0.611	0.571	0.907	0.339	0.611	33	0.491	0.593	0.492	0.280	0.491
8	0.739	1.000	0.564	0.436	0.739	34	0.448	0.318	0.623	0.399	0.448
9	0.525	0.456	0.610	0.486	0.525	35	0.346	0.175	0.614	0.343	0.346
10	0.431	0.294	0.704	0.221	0.431	36	0.435	0.442	0.549	0.194	0.435
11	0.614	0.773	0.428	0.652	0.614	37	0.570	0.658	0.559	0.401	0.570
12	0.625	0.560	0.918	0.237	0.625	38	0.470	0.345	0.795	0.236	0.470
13	0.578	0.536	0.705	0.540	0.578	39	0.414	0.418	0.557	0.160	0.414
14	0.366	0.313	0.289	0.484	0.366	40	0.495	0.539	0.628	0.161	0.495
15	0.418	0.493	0.431	0.312	0.418	41	0.385	0.418	0.437	0.256	0.385
16	0.378	0.411	0.547	0.060	0.378	42	0.474	0.361	0.614	0.403	0.474
17	0.592	0.559	0.808	0.470	0.592	43	0.502	0.452	0.507	0.574	0.502
18	0.501	0.324	0.849	0.438	0.501	44	0.338	0.295	0.379	0.290	0.338
19	0.507	0.369	0.792	0.473	0.507	45	0.393	0.288	0.454	0.442	0.393
20	0.574	0.486	0.769	0.419	0.574	46	0.482	0.521	0.509	0.342	0.482
21	0.543	0.448	0.837	0.635	0.543	47	0.454	0.460	0.487	0.358	0.454
22	0.598	0.606	0.758	0.532	0.598	48	0.443	0.365	0.650	0.256	0.443
23	0.530	0.578	0.415	0.297	0.530	49	0.376	0.298	0.497	0.448	0.376
24	0.506	0.571	0.698	0.124	0.506	50	0.442	0.438	0.539	0.249	0.442
25	0.509	0.542	0.421	0.398	0.509	51	0.334	0.359	0.328	0.218	0.334
26	0.573	0.715	0.484	0.289	0.573	52	0.566	0.602	0.688	0.320	0.566

表 5 (续)

编号 No.	$U(X_{1j})$	$U(X_{2j})$	$U(X_{3j})$	$U(X_{4j})$	$D$	编号 No.	$U(X_{1j})$	$U(X_{2j})$	$U(X_{3j})$	$U(X_{4j})$	$D$
53	0.493	0.512	0.490	0.494	0.493	92	0.514	0.500	0.646	0.294	0.514
54	0.510	0.433	0.730	0.392	0.510	93	0.481	0.458	0.589	0.244	0.481
55	0.514	0.458	0.638	0.431	0.514	94	0.491	0.492	0.624	0.389	0.491
56	0.682	0.725	0.792	0.505	0.682	95	0.416	0.402	0.433	0.417	0.416
57	0.641	0.628	0.843	0.297	0.641	96	0.555	0.552	0.690	96.000	0.555
58	0.460	0.441	0.637	0.187	0.460	97	0.547	0.547	0.622	97.000	0.547
59	0.561	0.502	0.629	0.775	0.561	98	0.441	0.173	0.677	98.000	0.441
60	0.480	0.312	0.712	0.461	0.480	99	0.398	0.283	0.561	99.000	0.398
61	0.396	0.535	0.200	0.379	0.396	100	0.445	0.518	0.378	100.000	0.445
62	0.539	0.416	0.553	0.740	0.539	101	0.500	0.370	0.672	0.498	0.500
63	0.319	0.197	0.595	0.246	0.319	102	0.476	0.501	0.628	0.200	0.476
64	0.258	0.005	0.648	0.420	0.258	103	0.493	0.406	0.609	0.553	0.493
65	0.631	0.677	0.674	0.368	0.631	104	0.503	0.517	0.564	0.266	0.503
66	0.510	0.653	0.272	0.469	0.510	105	0.660	0.911	0.714	0.319	0.660
67	0.478	0.456	0.372	0.586	0.478	106	0.383	0.348	0.488	0.302	0.383
68	0.566	0.446	0.702	0.723	0.566	107	0.454	0.508	0.501	0.109	0.454
69	0.391	0.229	0.575	0.381	0.391	108	0.489	0.512	0.632	0.205	0.489
70	0.452	0.509	0.374	0.437	0.452	109	0.510	0.467	0.688	0.303	0.510
71	0.424	0.226	0.675	0.547	0.424	110	0.455	0.422	0.666	0.140	0.455
72	0.429	0.391	0.427	0.581	0.429	111	0.442	0.595	0.189	0.263	0.442
73	0.451	0.590	0.196	0.488	0.451	112	0.409	0.377	0.631	0.114	0.409
74	0.260	0.209	0.255	0.246	0.260	113	0.367	0.325	0.501	0.216	0.367
75	0.533	0.619	0.610	0.123	0.533	114	0.403	0.414	0.418	0.306	0.403
76	0.431	0.408	0.365	0.420	0.431	115	0.313	0.164	0.553	0.223	0.313
77	0.404	0.440	0.262	0.381	0.404	116	0.326	0.272	0.388	0.249	0.326
78	0.563	0.702	0.406	0.471	0.563	117	0.459	0.492	0.510	0.313	0.459
79	0.567	0.574	0.564	0.452	0.567	118	0.516	0.514	0.654	0.306	0.516
80	0.573	0.644	0.597	0.298	0.573	119	0.446	0.229	0.728	0.428	0.446
81	0.432	0.362	0.491	0.407	0.432	120	0.407	0.495	0.293	0.323	0.407
82	0.475	0.341	0.593	0.501	0.475	121	0.557	0.498	0.658	0.572	0.557
83	0.448	0.471	0.258	0.440	0.448	122	0.256	0.159	0.321	0.235	0.256
84	0.576	0.813	0.285	0.354	0.576	123	0.274	0.169	0.446	0.176	0.274
85	0.467	0.413	0.439	0.401	0.467	124	0.463	0.407	0.541	0.351	0.463
86	0.412	0.337	0.485	0.362	0.412	125	0.335	0.431	0.203	0.186	0.335
87	0.471	0.399	0.469	0.577	0.471	126	0.282	0.201	0.336	0.205	0.282
88	0.478	0.464	0.570	0.396	0.478	127	0.352	0.204	0.669	0.223	0.352
89	0.586	0.619	0.733	0.262	0.586	128	0.380	0.420	0.283	0.237	0.380
90	0.583	0.592	0.610	0.232	0.583	129	0.220	0.230	0.216	0.024	0.220
91	0.393	0.215	0.655	0.364	0.393	130	0.376	0.426	0.364	0.186	0.376

表5(续)

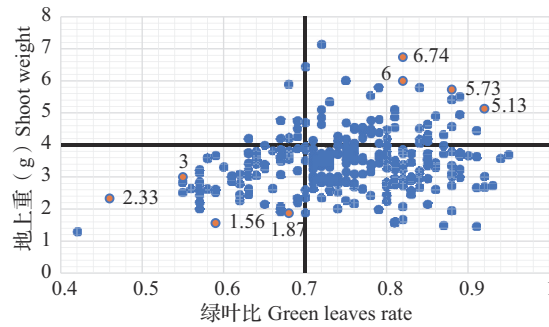
编号 No.	$U(X_{1j})$	$U(X_{2j})$	$U(X_{3j})$	$U(X_{4j})$	$D$	编号 No.	$U(X_{1j})$	$U(X_{2j})$	$U(X_{3j})$	$U(X_{4j})$	$D$
131	0.419	0.408	0.322	0.536	0.419	170	0.470	0.568	0.459	0.297	0.470
132	0.585	0.683	0.473	0.599	0.585	171	0.412	0.319	0.547	0.519	0.412
133	0.424	0.216	0.482	0.712	0.424	172	0.525	0.456	0.788	0.237	0.525
134	0.315	0.198	0.402	0.287	0.315	173	0.490	0.411	0.623	0.408	0.490
135	0.382	0.461	0.089	0.757	0.382	174	0.430	0.299	0.746	0.361	0.430
136	0.528	0.550	0.629	0.285	0.528	175	0.297	0.170	0.621	0.109	0.297
137	0.350	0.308	0.334	0.328	0.350	176	0.439	0.289	0.769	0.213	0.439
138	0.383	0.411	0.389	0.330	0.383	177	0.582	0.635	0.827	0.301	0.582
139	0.462	0.377	0.673	0.372	0.462	178	0.290	0.234	0.565	0.177	0.290
140	0.351	0.331	0.311	0.442	0.351	179	0.377	0.157	0.760	0.374	0.377
141	0.429	0.421	0.439	0.258	0.429	180	0.396	0.388	0.582	0.025	0.396
142	0.498	0.631	0.347	0.378	0.498	181	0.398	0.307	0.440	0.547	0.398
143	0.647	0.764	0.585	0.536	0.647	182	0.285	0.143	0.593	0.126	0.285
144	0.455	0.368	0.560	0.580	0.455	183	0.388	0.283	0.645	0.224	0.388
145	0.484	0.420	0.328	0.608	0.484	184	0.241	0.288	0.127	0.298	0.241
146	0.409	0.261	0.511	0.464	0.409	185	0.332	0.212	0.587	0.464	0.332
147	0.322	0.274	0.403	0.247	0.322	186	0.463	0.368	0.691	0.408	0.463
148	0.153	0.051	0.198	0.000	0.153	187	0.473	0.474	0.648	0.220	0.473
149	0.522	0.516	0.632	0.295	0.522	188	0.554	0.725	0.524	0.343	0.554
150	0.403	0.442	0.216	0.590	0.403	189	0.425	0.316	0.441	0.744	0.425
151	0.385	0.293	0.429	0.433	0.385	190	0.381	0.215	0.664	0.422	0.381
152	0.330	0.358	0.000	0.561	0.330	191	0.510	0.453	0.750	0.542	0.510
153	0.438	0.377	0.512	0.363	0.438	192	0.517	0.573	0.576	0.362	0.517
154	0.413	0.263	0.502	0.482	0.413	193	0.376	0.214	0.529	0.372	0.376
155	0.260	0.296	0.123	0.265	0.260	194	0.438	0.404	0.556	0.412	0.438
156	0.416	0.498	0.407	0.188	0.416	195	0.403	0.391	0.472	0.506	0.403
157	0.475	0.662	0.249	0.346	0.475	196	0.391	0.369	0.658	0.286	0.391
158	0.501	0.672	0.159	0.507	0.501	197	0.372	0.265	0.595	0.208	0.372
159	0.512	0.480	0.676	0.430	0.512	198	0.526	0.352	0.702	0.731	0.526
160	0.399	0.233	0.525	0.552	0.399	199	0.588	0.568	0.463	0.623	0.588
161	0.430	0.278	0.645	0.370	0.430	200	0.334	0.332	0.320	0.365	0.334
162	0.499	0.265	0.682	0.696	0.499	201	0.561	0.652	0.535	0.356	0.561
163	0.473	0.245	1.000	0.462	0.473	202	0.374	0.318	0.406	0.416	0.374
164	0.470	0.410	0.580	0.476	0.470	203	0.418	0.214	0.645	0.525	0.418
165	0.418	0.320	0.741	0.174	0.418	204	0.461	0.225	0.583	0.700	0.461
166	0.399	0.311	0.701	0.210	0.399	205	0.377	0.116	0.581	0.621	0.377
167	0.491	0.481	0.171	1.000	0.491	206	0.513	0.359	0.845	0.471	0.513
168	0.429	0.334	0.695	0.367	0.429	207	0.403	0.174	0.786	0.553	0.403
169	0.441	0.366	0.655	0.374	0.441	208	0.553	0.509	0.686	0.477	0.553

表 5 (续)

编号 No.	$U(X_{1j})$	$U(X_{2j})$	$U(X_{3j})$	$U(X_{4j})$	$D$	编号 No.	$U(X_{1j})$	$U(X_{2j})$	$U(X_{3j})$	$U(X_{4j})$	$D$
209	0.421	0.207	0.742	0.562	0.421	248	0.619	0.774	0.542	0.333	0.619
210	0.429	0.262	0.615	0.519	0.429	249	0.431	0.353	0.334	0.762	0.431
211	0.360	0.260	0.452	0.193	0.360	250	0.367	0.141	0.706	0.409	0.367
212	0.452	0.306	0.615	0.566	0.452	251	0.425	0.335	0.679	0.432	0.425
213	0.522	0.480	0.592	0.456	0.522	252	0.495	0.472	0.740	0.343	0.495
214	0.299	0.259	0.448	0.169	0.299	253	0.523	0.586	0.534	0.525	0.523
215	0.428	0.347	0.657	0.317	0.428	254	0.276	0.181	0.551	0.115	0.276
216	0.383	0.273	0.548	0.444	0.383	255	0.562	0.466	0.685	0.605	0.562
217	0.313	0.261	0.407	0.192	0.313	256	0.590	0.707	0.658	0.309	0.590
218	0.572	0.531	0.783	0.437	0.572	257	0.519	0.638	0.665	0.250	0.519
219	0.444	0.316	0.707	0.299	0.444	258	0.652	0.806	0.735	0.378	0.652
220	0.513	0.369	0.771	0.538	0.513	259	0.524	0.500	0.782	0.396	0.524
221	0.545	0.349	0.902	0.466	0.545	260	0.429	0.299	0.610	0.548	0.429
222	0.383	0.188	0.569	0.659	0.383	261	0.410	0.421	0.516	0.301	0.410
223	0.543	0.464	0.772	0.535	0.543	262	0.586	0.660	0.466	0.678	0.586
224	0.303	0.182	0.660	0.084	0.303	263	0.491	0.376	0.619	0.614	0.491
225	0.409	0.064	0.716	0.770	0.409	264	0.472	0.343	0.777	0.427	0.472
226	0.347	0.129	0.703	0.295	0.347	265	0.460	0.409	0.647	0.209	0.460
227	0.515	0.573	0.394	0.555	0.515	266	0.368	0.259	0.590	0.416	0.368
228	0.558	0.487	0.861	0.292	0.558	267	0.595	0.535	0.750	0.359	0.595
229	0.454	0.258	0.879	0.351	0.454	268	0.474	0.414	0.898	0.353	0.474
230	0.576	0.471	0.787	0.512	0.576	269	0.511	0.538	0.645	0.407	0.511
231	0.516	0.347	0.874	0.544	0.516	270	0.421	0.289	0.707	0.319	0.421
232	0.221	0.130	0.263	0.358	0.221	271	0.484	0.522	0.616	0.280	0.484
233	0.421	0.292	0.755	0.350	0.421	272	0.516	0.497	0.719	0.277	0.516
234	0.450	0.512	0.487	0.308	0.450	273	0.396	0.199	0.609	0.349	0.396
235	0.316	0.274	0.548	0.099	0.316	274	0.376	0.000	0.774	0.662	0.376
236	0.264	0.114	0.586	0.160	0.264	275	0.706	0.855	0.798	0.217	0.706
237	0.416	0.214	0.750	0.488	0.416	276	0.552	0.445	0.759	0.478	0.552
238	0.487	0.369	0.915	0.284	0.487	277	0.499	0.454	0.586	0.551	0.499
239	0.482	0.350	0.896	0.299	0.482	278	0.579	0.460	0.831	0.497	0.579
240	0.427	0.240	0.781	0.303	0.427	279	0.614	0.590	0.803	0.375	0.614
241	0.428	0.267	0.804	0.328	0.428	280	0.566	0.610	0.576	0.167	0.566
242	0.525	0.546	0.678	0.150	0.525	281	0.337	0.197	0.633	0.197	0.337
243	0.541	0.787	0.461	0.173	0.541	282	0.645	0.678	0.692	0.432	0.645
244	0.545	0.784	0.464	0.224	0.545	283	0.542	0.495	0.706	0.483	0.542
245	0.487	0.408	0.707	0.406	0.487	284	0.629	0.628	0.798	0.445	0.629
246	0.357	0.170	0.603	0.354	0.357	285	0.639	0.656	0.844	0.437	0.639
247	0.495	0.492	0.691	0.325	0.495	286	0.623	0.598	0.738	0.559	0.623

编号同表 1; 下同

The numbers are the same as in table 1; The same as below



蓝色点代表从油菜种质绿叶比和地上重数据所筛选出的非极端材料;红色点代表从油菜种质绿叶比和地上重数据所筛选出的极端材料;图中数据代表筛选出绿叶比和地上重最边缘的点对应的根长数值

The blue dots represent the non-extreme materials selected from the data of green leaves rate and shoot weight in rape germplasm;

Red points represent the extreme materials selected from the data of green leaves rate and shoot weight in rape germplasm.

Data in the figure represents the root length value corresponding to the point at the edge of the green leaves rate and shoot weight

图2 286份甘蓝型油菜地上重与绿叶比性状的四象限图

Fig.2 Four-quadrant plots of shoot weight and green leaves rate traits in 286 *Brassica napus*

表6 筛选出的4份耐盐碱的甘蓝型油菜种质

Table 6 Four germplasm of *Brassica napus* that are tolerant to alkali salts were selected

编号 No.	品种(系) Cultivar (line)	叶片数 Leaves number	绿叶数 Green leaves number	绿叶比 Green leaves rate	株高(cm) Shoot length	地上重(g) Shoot weight	根长(cm) Root length	根重(g) Root weight
56	纬隆88	4.00	3.67	0.92	21.59	5.13	17.43	1.23
105	沪油17号	4.88	4.00	0.82	23.60	6.74	13.28	2.01
275	SWU84	4.20	3.44	0.82	23.07	6.00	20.40	1.51
285	浙油21	3.65	3.25	0.89	20.44	5.50	15.57	1.35

## 2.5 甘蓝型油菜耐盐碱性鉴定指标的筛选

为了预测甘蓝型油菜苗期的耐盐能力,以耐盐碱性综合评价值 $D$ 值作因变量,根据7个指标的得分情况,筛选出的5个指标(绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重),建立综合数学评价模型,建立最优回归方程: $D = -0.425 - 0.001X_2 + 0.657X_3 + 0.031X_5 + 0.015X_6 + 0.064X_7$  ( $F=3775.866^{**}$ ,  $R^2=0.985$ )。式中 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 分别代表绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重。由方程可知,除叶片数和株高外,上述5个指标对油菜苗期盐碱性有极显著影响,在甘蓝型油菜耐盐碱筛选上,可以参考这5个指标。286个甘蓝型油菜种质上述5个指标与耐盐碱性综合评价值( $D$ 值)极显著相关,表明用此方程对甘蓝型油菜种质的耐盐碱性进行预测准确性高,效果好。因此,在油菜苗期测定其绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重,并通过回归方程估算其 $D$ 值,可以初步判断种质的耐盐碱性。

## 3 讨论

目前,在中国土壤盐碱化问题愈发严重,中国的盐碱地总面积不断增加,而通过种植作物可以降

低盐碱地的土壤盐分,改善土壤生态环境,提高盐碱地的生产力<sup>[28-30]</sup>。有研究表明油菜适应性强,是可用于盐碱地开发利用的作物<sup>[18]</sup>。油菜耐盐碱性鉴定主要在萌发期、苗期、成熟期。其中苗期被认为是植物对盐、碱胁迫较为敏感的时期,也是耐盐碱性鉴定的常见时期<sup>[31-32]</sup>。因此,油菜种质资源苗期耐盐碱性的综合评价和利用,对选育耐盐碱油菜品种具有极大的现实意义。万何平<sup>[33]</sup>研究发现油菜的耐盐碱能力相对较强,能耐受1.3%~1.5%的NaCl或0.10%的 $Na_2CO_3$ ,本研究使用的盐碱浓度与之相符。本研究以1.0% NaCl + 0.12%  $Na_2CO_3$  ( $pH = 10.47$ )的盐碱浓度对286份甘蓝型油菜种质进行苗期耐盐性综合评价,研究发现,3个批次的平均变异系数依次为叶片数17.68%,绿叶数18.30%,绿叶比12.00%,株高13.80%,地上重27.25%,根长13.76%,根重28.97%,表明甘蓝型油菜种质中绿叶比、株高和根长的耐盐碱性变异范围较小。

耐盐碱性是指作物在盐碱胁迫时所表现出的忍耐能力。在盐碱胁迫下,油菜的株高变矮、株鲜重下降、叶色变深、叶片皱缩、根系生长受阻<sup>[31-32]</sup>。基于油菜在盐碱胁迫条件下的表型变化,本研究合

理地选取了叶片数、绿叶数、绿叶比、地上重、根长、根重和株高作为评价油菜耐盐碱性的指标。但目前,油菜耐盐碱性筛选指标并没有统一的标准。油菜种子萌发期耐盐碱评价指标包括发芽势、发芽率、发芽指数、胚芽长、胚根长等相关性状;油菜苗期主要评价指标为茎长、苗长、根长、根鲜重、根干重、叶面积等相关性状<sup>[34-36]</sup>。人们对油菜的耐盐碱性进行了大量的研究,万何平等<sup>[25]</sup>等测定油菜苗的地上鲜重、地上长、绿叶数、根鲜重、地下长度,采用油菜水培系统,对 87 份甘蓝型油菜品种/品系(自交系)苗期进行耐盐碱性鉴定与评价,油菜绿叶数和绿叶比是油菜耐盐碱鉴定的最优指标,并以绿叶数为指标划分其耐盐碱性等级,此方法的优点是快速准确、简便高效,而本研究鉴定方法虽较为繁琐,但筛选结果更加精准。李萍等<sup>[24]</sup>将发芽势、发芽率、芽长、根长、相对芽长、相对根长等作为评价指标,对 146 份甘蓝型油菜萌发期进行耐盐性筛选和评价,筛选出 6 份强耐盐的甘蓝型油菜种质,此研究中存在空白对照,使用了相对芽长和相对根长等评价指标,鉴定出的耐盐碱种质与其空白对照相比,生长能力强,而本研究鉴定出的耐盐碱种质是根据 7 种生长指标,选取综合评价值高的种质,与李萍等<sup>[24]</sup>研究中耐盐碱种质鉴定方法不同;在应对盐碱条件时,鉴定出的 4 份耐盐碱种质比剩余的 282 份种质生长能力强。朱孔志等<sup>[37]</sup>比较 5 种油菜品种生长期间的叶片长宽以及叶柄长、株高、角果长度、有效分枝点高度、主轴长度、分枝水平生长长度等性状,并考察成熟时有效分枝数、二次有效分枝数、单株有效角果数、每荚粒数和千粒重等性状,其鉴定方法可使甘蓝型油菜的生长与产量相关联,而本研究使用水培的方法模拟盐碱地,能精准地控制营养液成分及盐浓度、pH 等环境,但也存在一些不足,即无法完全模拟土壤中变化复杂的环境胁迫因子,如盐碱水平易受光照、雨水和温度等因素的影响,因此还需将筛选的耐盐碱油菜种质在盐碱地实地种植,验证其耐盐碱能力。本研究对 286 份甘蓝型油菜种质苗期阶段的叶片数、绿叶数、绿叶比、株高、地上重、根长、根重进行相关性分析,发现除叶片数与株高呈负相关且未达到显著性,其他性状之间均呈正相关并达到了显著或极显著水平,其中部分相关系数达 0.6 以上,各指标相关性较为明显。这些指标对耐盐碱综合评价指标的贡献率不同,因此,在准确评价某一油菜材料的耐盐碱性,应当尽可能多指标进行综合评价分析,才能全方位反映油

菜苗期的耐盐碱性。

采用主成分分析法和隶属函数法筛选重要鉴定指标,进行作物抗逆性鉴定的综合评价较为可靠,近年来已在多个作物中得到初步应用,如大麦耐湿性<sup>[38]</sup>、胡麻抗旱性<sup>[39]</sup>、马铃薯抗旱性<sup>[40]</sup>、油菜耐铝性<sup>[41]</sup>、大豆耐氮性<sup>[42]</sup>、杜梨耐盐碱性<sup>[43]</sup>等作物的抗逆性筛选鉴定。本研究通过主成分分析法,将 7 个指标转化为 4 个更具代表性的综合指标,这 4 个综合指标可以集中体现差异不明显的原指标的信息<sup>[44]</sup>。利用模糊数学中的隶属函数值法,计算了不同种质的耐盐碱性综合评价值( $D$ 值), $D$ 值能够反映不同种质之间的耐盐碱性差异。经过盐碱胁迫处理,油菜表现出叶片皱缩、发黄脱落、株鲜重下降等表型特征。本研究评价油菜耐盐碱性的最佳指标为绿叶比、地上重和绿叶数,这一结果证明了研究的可靠性。通过耐盐碱综合评价体系和四象限图筛选的极端材料,综合共筛选出耐盐碱材料(编号为 8、56、57 和 275)和盐碱敏感材料(编号为 64、129、184 和 232)各 4 份。编号 8(03I32B)的  $D$  值为 0.739,排名第 1;编号 275(SWU84)的  $D$  值为 0.706,排名第 2;编号 56(纬隆 88)的  $D$  值为 0.682,排名第 3;编号 57(SWU111)的  $D$  值为 0.641,排名第 9;编号 64(广德 8104)的  $D$  值为 0.258,排名第 81;编号 129(WH-59)的  $D$  值为 0.22,排名第 285;编号 184(中双 10 号)的  $D$  值为 0.241,排名第 283;编号 232(密角多头油菜)的  $D$  值 0.221,排名第 284;证明了筛选出极端材料的可靠性。但由于作物在不同生长发育阶段所表现的耐盐碱性可能存在一定差异,在苗期筛选出的耐盐性较好的油菜种质是否在油菜花期和成熟期表现出相同的特性还有待于进一步验证。为了预测甘蓝型油菜苗期的耐盐能力,以耐盐碱性综合评价值( $D$ 值)作因变量,根据 7 个指标的得分情况,筛选出绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重 5 个指标,建立综合性数学评价模型, $D = -0.425 - 0.001X_2 + 0.657X_3 + 0.031X_5 - 0.015X_6 + 0.064X_7$  ( $F = 3775.866^{**}$ ,  $R^2 = 0.985$ )。式中  $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$  分别代表绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重,可以作为大规模筛选油菜耐盐碱性的可靠指标。

## 4 结论

本研究在 1.0% NaCl + 0.10% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (pH = 10.47) 盐碱浓度处理下测定了 286 份甘蓝型油菜苗期耐盐碱相关形态指标,利用相关性分析、主成分分析、频数分析、极端材料筛选分析、隶属函数法对

286份甘蓝型油菜的耐盐性进行综合评价,筛选出4份耐碱盐的甘蓝型油菜种质和4份盐碱敏感种质。通过逐步回归分析,建立了最优回归方程: $D = -0.425 - 0.001X_2 + 0.657X_3 + 0.031X_5 + 0.015X_6 + 0.064X_7$  ( $F=3775.866^{**}$ ,  $R^2=0.985$ ),认为测定绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重可快速有效鉴定甘蓝型油菜种质资源苗期耐盐碱性。

#### 参考文献

- [1] Yamaguchi T, Blumwald E. Developing salt-tolerant croplants: Challenges and opportunities. *Trends in Plant Science*, 2005, 10(12): 615-620
- [2] 毛庆莲,王胜.国内盐碱地治理趋势探究浅析.湖北农业科学, 2020, 59(S1): 302-306  
Mao Q L, Wang S. Analysis on the trend of saline-alkali land management in China. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(S1): 302-306
- [3] 万林生,孙红芹,倪正斌,严国红,周汝琴.油菜盐杂3号耐盐性试验及沿海滩涂全程机械化栽培技术.浙江农业科学, 2017, 58(6): 959-961  
Wan L S, Sun H Q, Ni Z B, Yan G H, Zhou R Q. Experimental study on salt tolerance of Salt-Youza-3 in rape and mechanized cultivation technology in coastal shoals. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2017, 58(6): 959-961
- [4] 王雷,郭岩,杨淑华.非生物胁迫与环境适应性育种的现状及对策.中国科学:生命科学, 2021, 51(10): 1424-1434  
Wang L, Guo Y, Yang S H. Current situation and countermeasures of abiotic stress and environmental adaptive breeding. *Scientia Sinica Vitae*, 2021, 51(10): 1424-1434
- [5] 万何平,张浩,余忆,陈敬东,曾长立,赵伦,文静,沈金雄,傅廷栋.油菜耐盐碱研究与应用.中国农业科技导报, 2022, 24(12): 59-67  
Wan H P, Zhang H, Yu Y, Chen J D, Zeng C L, Zhao L, Wen J, Shen J X, Fu T D. Research and application of salt-alkali tolerance in rapeseed. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(12): 59-67
- [6] 马波.氮肥、密度对寒地超级稻‘龙粳31’产量的互作效应研究.中国农学通报, 2018, 34(6): 8-13  
Ma B. Study on interaction effect of nitrogen fertilizer and density on yield of super rice 'Longjing 31' in cold region. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(6): 8-13
- [7] 李霞,曹昆,阎丽娜,王超,孙志伟,周月兰.盐碱胁迫对不同水稻材料苗期生长特性的影响.中国农学通报, 2008, 170(8): 252-256  
Li X, Cao K, Yan L N, Wang C, Sun Z W, Zhou Y L. Effects of saline-alkali stress on growth characteristics of different rice materials at seedling stage. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 170(8): 252-256
- [8] 吴鹏博,李立军,张艳丽.油菜苗期耐盐碱性综合评价与根际土壤有机酸含量比较.作物杂志, 2022(1): 110-115  
Wu P B, Li L J, Zhang Y L. Comprehensive evaluation of saline-alkali tolerance and comparison of rhizosphere soil organic acid content at rapeseed seedling stage. *Crops*, 2022(1): 110-115
- [9] 李琳,于崧,蒋永超,张婷婷,邹春雷,金珊珊,郭建华,梁海芸,段君君,于立河.芸豆苗期耐盐碱性鉴定及品种筛选研究.植物生理学报, 2016, 52(1): 62-72  
Li L, Yu S, Jiang Y C, Zhang T T, Zou C L, Jin S S, Guo J H, Liang H Y, Duan J J, Yu L H. Identification of saline-alkali tolerance and variety screening of kidney bean at seedling stage. *Journal of Plant Physiology*, 2016, 52(1): 62-72
- [10] 张林,杨剑飞,于立伟,于晶,王军军,王振华,刘显军.玉米苗期耐盐碱鉴定体系优化及50份美国自交系耐盐碱性鉴定.种子, 2016, 35(5): 94-98  
Zhang L, Yang J F, Yu L W, Yu J, Wang J J, Wang Z H, Liu X J. Optimization of salt-alkali tolerance identification system for maize seedlings and identification of salt-alkali tolerance of 50 American inbred lines. *Seed*, 2016, 35(5): 94-98
- [11] 王晓春,杨天辉,王川,杨炜迪,高婷.混合盐碱胁迫对紫花苜蓿的生长和生理指标的影响.中国农学通报, 2022, 38(19): 139-145  
Wang X C, Yang T H, Wang C, Yang W D, Gao T. Effects of mixed salt and alkali stress on growth and physiological indexes of alfalfa. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(19): 139-145
- [12] 赵俊香,任翠梅,吴凤芝,刘守伟,王殿奎.16份菊芋种质苗期耐盐碱性筛选与综合鉴定.中国生态农业学报, 2015, 23(5): 620-626  
Zhao J X, Ren C M, Wu F Z, Liu S W, Wang D K. Screening and comprehensive identification of saline-alkali tolerance of 16 Jerusalem artichoke germplasm at seedling stage. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(5): 620-626
- [13] Gomesfilho E, Lima C R, Costa J H, Silva A C, Lima M D, Lacerda C F. Cowpea ribonuclease: Properties and effect of NaCl-salinity on its activation during seed germination and seedling establishment. *Plant Cell Reports*, 2008, 27(1): 147-157
- [14] 杨少辉,季静,王罡,宋英今.盐胁迫对植物影响的研究进展.分子植物育种, 2006(S1): 139-142  
Yang S H, Ji J, Wang G, Song Y J. Research progress on effects of salt stress on plants. *Molecular Breeding*, 2006(S1): 139-142
- [15] Wang Y, Nii N. Changes in chlorophyll, ribulose biphosphate carboxylase-oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in *Amaranthus tricolor* leaves during salt stress. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2000, (75): 623-627
- [16] 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. Rape production improves and edible oil supply safety. *Journal of Agricultural Science and Technology*,

- 2011, 13(1): 1-8
- [17] 王汉中, 殷艳. 我国油料产业形势分析与对策建议. 中国油料作物学报, 2014, 36(3): 414-421  
Wang H Z, Yin Y. Situation analysis and development countermeasure of oil industry of our country. Chinese Journal of Oil Crops Sciences, 2014, 36(3): 414-421
- [18] Banaei-asl F, Bandehagh A, Uliaei E D, Farajzaden 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
- [19] 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 on breeding and restoration of saline-alkali soil for saline-alkali resistant rapeseed varieties. Science and Technology Review, 2021, 39(23): 59-64
- [20] 万何平, 戴希刚, 陈敬东, 戢强强, 曾长立. 甘蓝型油菜对盐胁迫的响应及耐盐相关性状 QTL 研究进展. 中国油料作物学报, 2020, 42(4): 536-544  
Wan H P, Dai X G, Chen J D, Ji Q Q, Zeng C L. Research progress on salt stress effect on *Brassica napus* and QTL reaserch of salt tolerance related traits. Chinese Journal of Oil Crops Sciences, 2020, 42(4): 536-544
- [21] 张培通, 张萼, 郭文琦, 陈建平, 李春宏, 王永慧, 胡茂龙. 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. Planting performance of rapeseed Ningza 21 in saline-alkali land of Jiangsu coastal flat and key points of high-yield cultivation techniques. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(6): 84-85
- [22] 杨洋, 王亚娟, 阴法庭, 张风华. 盐碱胁迫对油菜苗期生理及光合特性的影响. 北方园艺, 2020, 462(15): 1-8  
Yang Y, Wang Y J, Yin F T, Zhang F H. Effects of saline-alkali stress on physiological and photosynthetic characteristics of rape seedlings. Northern Horticulture, 2020, 462(15): 1-8
- [23] 李班, 吕莹, 杨明焯, 宋婷, 于放, 刘志文. 盐碱胁迫对甘蓝型油菜生理及分子机制的影响. 华北农学报, 2022, 37(3): 86-93  
Li B, Lv Y, Yang M X, Song T, Yu F, Liu Z W. Effects of saline-alkali stress on physiological and molecular mechanisms of *Brassica napus* L.. Journal of North China Agronomy, 2022, 37(3): 86-93
- [24] 李萍, 燕佳琦, 张鹤, 张燕, 陶顺仙, 张琪. 146 份甘蓝型油菜种质芽期耐盐性筛选及评价. 西北农业学报, 2021, 30(6): 848-859  
Li P, Yan J Q, Zhang H, Zhang Y, Tao S X, Zhang Q. Screening and evaluation of salt tolerance in 146 *Brassica napus* germplasm at bud stage. Northwest Agricultural Journal, 2021, 30(6): 848-859
- [25] 万何平, 余忆, 陈敬东, 鲁金春子, 冉景鸿, 戴希刚, 文静, 傅廷栋, 沈金雄, 曾长立. 甘蓝型油菜耐盐碱性快速鉴定方法与应用. 中国油料作物学报, 2023, 45(4): 776-784  
Wan H P, Yu Y, Chen J D, Lu J C Z, Ran J H, Dai X G, Wen J, Fu T D, Shen J X, Zeng C L. Rapid identification method and application of salt-alkali tolerance in *Brassica napus*. Chinese Journal of Oil Crops, 2023, 45(4): 776-784
- [26] 朱宗河, 郑文寅, 张学昆. 甘蓝型油菜耐旱相关性状的主成分分析及综合评价. 中国农业科学, 2011, 44(9): 1775-1787  
Zhu Z H, Zheng W Y, Zhang X K. Principal component analysis and comprehensive evaluation on morphological and agronomic traits of drought tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.). Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(9): 1775-1787
- [27] 李丰先, 周宇飞, 王艺陶, 孙璐, 白薇, 闫彤, 许文娟, 黄瑞冬. 高粱品种萌发期耐碱性筛选与综合鉴定. 中国农业科学, 2013, 46(9): 1762-1771  
Li F X, Zhou Y F, Wan Y T, Sun L, Bai W, Yan T, Xu W J, Huang R D. Screening and comprehensive identification of alkaline resistance of sorghum varieties at germination stage. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(9): 1762-1771
- [28] 杨阳. 盐碱地中国潜在的耕地资源. 中国农村科技, 2018(11): 8-13  
Yang Y. Saline-alkali land is the potential cultivated land resources in China. Chinese Rural Science and Technology, 2018(11): 8-13
- [29] 刘东洋, 徐接亮, 张风华. 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 Y, Xu J L, Zhang F H. Effects of different rapeseed varieties on physicochemical properties and microbial diversity of saline-alkali soil. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(2): 246-257
- [30] 万林生, 孙红芹, 倪正斌, 严国红, 周汝琴. 油菜盐油杂 3 号耐盐性试验及沿海滩涂全程机械化栽培技术. 浙江农业科学, 2017, 58(6): 959-961  
Wan L S, Sun H Q, Ni Z B, Yan G H, Zhou R Q. Salt-tolerance test of rape Salt-oil zaza No. 3 and mechanized cultivation technology of coastal shoals. Zhejiang Agricultural Sciences, 2017, 58(6): 959-961
- [31] 高建明, 夏卜贤, 袁庆华, 罗峰, 韩芸, 桂枝, 裴忠有, 孙守钧. 高粱种质材料幼苗期耐盐碱性评价. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1303-1310  
Gao J M, Xia B X, Yuan Q H, Luo F, Han Y, Gui Z, Pei Z Y, Sun S J. Sorghum seedling period and salt-tolerant germplasm materials evaluation. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1303-1310
- [32] 张春宵, 袁英, 刘文国, 李文华, 王丹, 李万军, 李晓辉. 玉米杂交种苗期耐盐碱筛选与大田鉴定的比较分析. 玉米科学, 2010, 18(5): 14-18  
Zhang C X, Yuan Y, Liu W G, Li W H, Wang D, Li W J, Li X H. Comparative analysis of salt-alkali tolerance screening



- and field identification of maize hybrids at seedling stage. *Maize Science*, 2010, 18 (5) : 14-18
- [33] 万何平. 甘蓝型油菜苗期耐盐相关性状的全基因组关联分析. 武汉: 华中农业大学, 2017  
Wan H P. Genome-wide association analysis of salt-tolerant traits in *Brassica napus* seedlings. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017
- [34] Wani A S, Ahmad A, Hayat S, Fariduddin Q. Salt-induced modulation in growth, photosynthesis and antioxidant system in two varieties of *Brassica juncea*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2013, 20(2) : 183-193
- [35] Hayat S, Maheshwari P, Wani A S, Irfan M, Alyemeni M N, Ahmad A. Comparative effect of 28 homobrassinolide and salicylic acid in the amelioration of NaCl stress in *Brassica juncea* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 53: 61-68
- [36] Kaur H, Sirhindi G, Bhardwaj R, Alyemeni M N, Siddique K H, Ahmad P. 28-homobrassinolide regulates antioxidant enzyme activities and gene expression in response to salt-and temperature-induced oxidative stress in *Brassica juncea*. *Scientific Reports*, 2018, 8(1) : 1-13
- [37] 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  
Zhu K Z, Wu M H, Shen Y X, Li H S, Yang S C, Du X K, Ding S F. Identification and screening of salt tolerance of different rape varieties in saline-alkali soil. *Zhejiang Agricultural Science*, 2018, 59(8) : 1354-1356
- [38] 王军, 周美学, 许如根, 吕超, 黄祖六. 大麦耐湿性鉴定指标和评价方法研究. *中国农业科学*, 2007, 40(10) : 2145-2152  
Wang J, Zhou M X, Xu R G, Lv C, Huang Z L. Study on indexes and evaluation methods of moisture resistance of barley. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(10) : 2145-2152
- [39] 祁旭升, 王兴荣, 许军, 张建平, 米君. 胡麻种质资源成株期抗旱性评价. *中国农业科学*, 2010, 43(15) : 3076-3087  
Qi X S, Wang X R, Xu J, Zhang J P, Mi J. Evaluation of drought resistance of flax germplasm resources at adult stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15) : 3076-3087
- [40] 李丰先, 罗磊, 李亚杰, 姚彦红, 范奕, 李德明. 基于PCA和隶属函数法分析的马铃薯创新种质抗旱性鉴定与分类. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(11) : 141-147  
Li F X, Luo L, Li Y J, Yao Y H, Fan Y, Li D M. Identification and classification of drought resistance of potato germplasm based on PCA and membership function analysis. *Arid Area Resources and Environment*, 2022, 36 (11) : 141-147
- [41] 熊洁, 邹小云, 陈伦林, 李书宇, 邹晓芬, 宋来强. 油菜苗期耐铝基因型筛选和鉴定指标的研究. *中国农业科学*, 2015, 48(16) : 3112-3120  
Xiong J, Zou X Y, Chen L L, Li S Y, Zou X F, Song L Q. Study on screening and identification indexes of Aluminum tolerance genotypes in rape seedling stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(16) : 3112-3120
- [42] 刘芯欣, 侯云龙, 杜楠琳, 李健琳, 陈亮, 崔正果, 姬文秀, 邱红梅, 王跃强. 大豆耐低氮资源的苗期鉴定与筛选. *植物遗传资源学报*, 2023, 24(2) : 408-418  
Liu X X, Hou Y L, Du N L, Li J L, Chen L, Cui Z G, Ji W X, Qiu H M, Wang Y Q. Identification and screening of low nitrogen tolerance resources of soybean at seedling stage. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(2) : 408-418
- [43] 霍宏亮, 王超, 杨祥, 曹玉芬, 田路明, 董星光, 张莹, 齐丹, 徐家玉, 刘超. 杜梨对盐碱胁迫的生理响应及耐盐碱性评价. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(2) : 480-492  
Huo H L, Wang C, Yang X, Cao Y F, Tian L M, Dong X G, Zhang Y, Qi D, Xu J Y, Liu C. Physiological response and salt-alkali tolerance evaluation of *Fructus pyri* to salt-alkali stress. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23 (2) : 480-492
- [44] Nielsen D C, Nelson N O. Black bean sensitivity to water stress at various growth stages. *Crop Science*, 1998, 38(2) : 422-427