王珊珊,喻维嘉,雷智恒,等.甘蓝型油菜耐铝毒胁迫种质资源的鉴定与筛选[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(2):23-31.
Wang S S, Yu W J, Lei Z H,et al.Identification and screening of aluminum toxicity stress germplasm resources in *Brassica napus* L.[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(2):23-31.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202308009

甘蓝型油菜耐铝毒胁迫种质资源的鉴定与筛选

王珊珊,喻维嘉,雷智恒,赵慧霞,吴春红*,万何平*

(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,湖北 武汉,430056)

摘　要:[目的]铝是酸性土壤中抑制植物生长和生产力的关键元素。油菜作为世界三大油料作物之一,在我国主要种植于长江以南区域,该区域铝毒害较为严重,油菜易受铝毒侵害,尤其是根系生长受到严重抑制。铝毒害逐渐成为限制我国油菜生产的重要因素之一,因而对不同基因型油菜种质的铝毒胁迫耐受性进行评价,筛选出耐铝毒油菜种质,不仅可以减少和防止铝毒对油菜的危害,更具有重要社会效益、经济效益和生态效益。[方法]本研究改进了以往油菜种子萌发期铝毒胁迫抗性鉴定的方法,通过精准控制铝离子浓度,并结合根系扫描与分析系统,对210份甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)种质实现高效、快速、精准的鉴定萌发期铝毒胁迫抗性。[结果]铝毒胁迫显著抑制甘蓝型油菜幼苗根系生长,且不同基因型材料间的抑制效果存在较大差异。对铝毒胁迫下的油菜材料的总根长、总表面积和总根体积进行聚类分析,共将210份油菜品种分为耐铝型、铝敏感型和中间型3个等级,其中8个耐铝型品种,118个铝敏感型品种,剩下84个为中间型品种。[结论]耐铝型品种包括漕油2号、浙油17号、湖北白花油菜、黔油4号、盐油2号、WH-38、SWU75、Cubs root。本研究的开展为油菜耐铝毒胁迫能力的遗传改良提供了理论基础和种质资源。

关键词:甘蓝型油菜; 铝毒胁迫; 萌发期; 聚类分析; 抗性资源
中图分类号:S565.4　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1671-8151(2024)02-0023-09

近年来,随着环境酸化问题日益严重,特别是空气污染引起的酸沉降和生理酸性肥料的大规模施用,导致土壤酸化加剧及土壤中可溶性铝含量显著增加[1]。在热带和亚热带地区,铝的毒性已被认为是酸性土壤上作物生产的主要制约因素之一[2]。因此,研究铝对作物的影响具有重要的理论和现实意义。

铝(Aluminum,Al)是土壤中含量最丰富的金属元素。在碱性或中性土壤中,铝主要以氧化物或硅酸盐(pH<5)沉淀的形式存在,对植物和环境无毒。结合的铝变得可溶并进入土壤溶液,从而对植物生长产生危害[3],当土壤中单个铝的活性达到1×10^{-3} mol·L^{-1}水平时,它会影响许多植物的根系[4]。因此,铝的毒性已成为限制酸性土壤中水稻等作物产量的主要障碍因素[5-7]。铝对植物的毒性主要体现在抑制其根系生长进而阻碍整个植株生长,因此,研究铝对植物的毒性主要从根系入手。植物铝中毒最早、最明显的症状主要体现在抑制根系伸长减少侧根形成。除此之外,根尖侧根变粗、短脆、褐色,根毛很少或没有,根冠脱落,整个根系呈珊瑚状。根系的减少和破坏限制了其对水分和矿物质营养的吸收,影响了植物的生长发育[8-9]。目前,铝对根伸长的抑制作用已被广泛用作判断铝毒性的重要指标。植物根尖是植物积累铝的主要部位,也是铝毒性影响的原始部位[10]。种子萌发是植物生活周期中最容易受到土壤中不良环境影响的起始阶段[11],而铝毒是酸性土壤环境中影响种子萌发质量和幼苗形态建成的主要限制因素[6,12],因此,

收稿日期:2023-08-04　　**修回日期:**2023-09-18
基金项目:湖北省教育厅指导性项目(B2021057);江汉大学高层次人才项目(06470001)
作者简介:王珊珊(ORCID:0009-0002-2043-9734),研究方向:油菜抗性种质资源,E-mail:wang_shanshan0044@163.com;喻维嘉(ORCID: 0009-0004-8188-5935),研究方向:油菜抗性种质资源,E-mail:yuweijia2233@163.com
***通信作者:**吴春红(ORCID:0009-0004-1403-6271),研究方向:植物逆境分子遗传学,E-mail:wuchunhong@jhun.edu.cn;万何平(ORCID:0000-0002-0088-3435),研究方向:油菜遗传育种,E-mail:wanheping@jhun.edu.cn

选育萌发期抗铝胁迫的作物种质资源是扩大农作物种植面积,实现高产、提高品种稳定性的关键。

油菜(*Brassica napus* L.;AACC,2n=38)是我国重要的油料作物之一,年种植面积约670万hm^2,产菜籽油约500万t,约占自产植物油总量的45%以上[13-14]。甘蓝型油菜是3种油菜(白菜型油菜、芥菜型油菜、甘蓝型油菜)中种植范围最广的种类,是我国重要的油料作物[14]。油菜易受铝毒害,导致产量下降。因此,稳定油菜种植面积对世界农业的可持续发展具有重要意义。

为了高效、精准的对大规模油菜资源铝胁迫抗性进行评价,本研究改进了油菜种子萌发期铝胁迫抗性鉴定的方法,采用发芽试验精准控制铝离子浓度,对210份甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)种质的萌发期耐铝毒能力进行精准鉴定,并筛选获得耐铝毒能力强的优质资源,以期为油菜铝毒胁迫耐受能力的遗传改良提供理论基础和种质资源。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为国内外收集的甘蓝型油菜自交系品种210份,所有材料由华中农业大学国家油菜工程中心提供(表1)。于2022年5月收获种子用于本研究。

1.2 试验设计及表型鉴定

用纯水配置不同浓度的$AlCl_3·6H_2O$溶液(0、5×10^{-5}、1×10^{-4}、5×10^{-4}、1×10^{-3} mol·L^{-1}),在直径为9 cm的培养皿中放入2层滤纸,并添加10 mL的不同的溶液。选取健康无病害的华油杂62油菜品种的种子,每处理30个健康种子,将其均匀播种到对应的培养皿中。发芽的种子在播种后的第7 d进行观察。种子发芽试验在温室中进行(光照强度4000 Lux,25 ℃,16 h昼/8 h夜)。以此试验结果评估油菜种子萌发期铝胁迫浓度,进行后续试验。

为了进一步控制盐浓度的均匀性,对油菜籽发芽苗床进行了改良。将8 L的5×10^{-4} mol·L^{-1} Al^{3+}($AlCl_3·6H_2O$)溶液(铝胁迫,T)或纯水(对照,C)加入到1个盒子(60 cm×40 cm×8 cm)中,该盒子通过120孔塞托盘分成120个部分,托盘顶部有2片医用纱布。从每个甘蓝型油菜品种中选择30个健康的种子,然后均匀地放入托盘部分。第8 d,从每个切片中选择5株生长一致的油菜幼苗。将完整的根系浸入并分散在透明塑料托盘中,用扫描仪(EPSON V700,日本)进行扫描,并使用WinRHIZO软件分析总根长(TRL)、总根表面积(TSA)和总根体积(TRV)。种子发芽试验在温室中进行3次重复(光照强度4000 Lux,25 ℃,16 h昼/8 h夜)。

1.3 表型数据分析

所有表型数据使用SPSS 18.0(IBM Corpora-

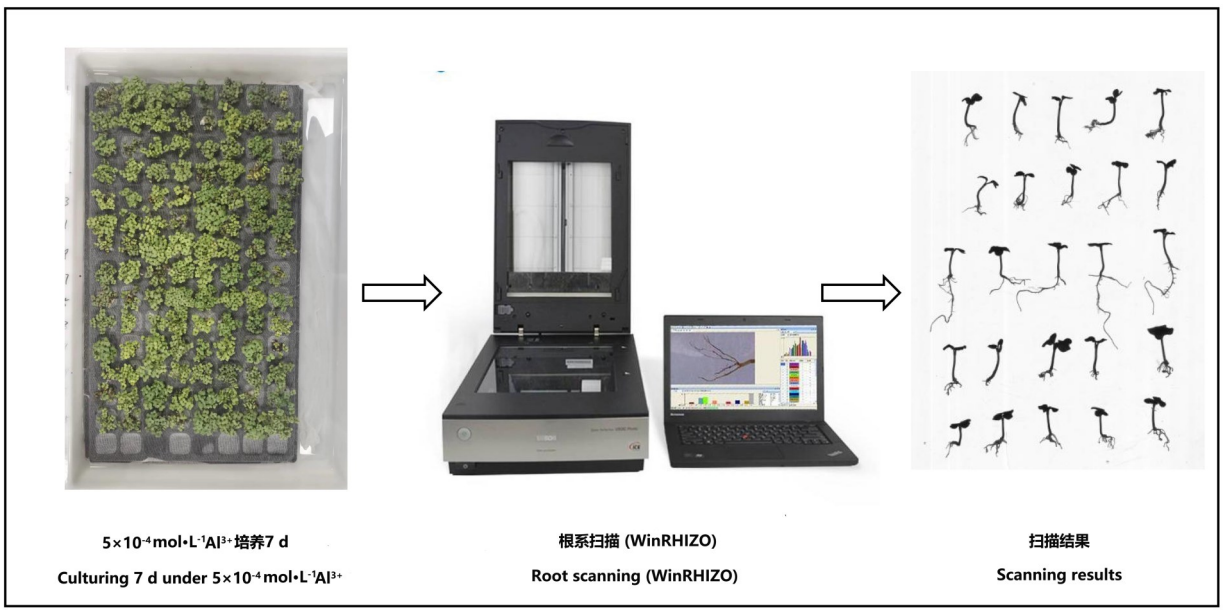


图1 铝毒胁迫抗性鉴定流程

Fig. 1 Identification process of aluminum toxicity stress resistance

表1　210份油菜种质名称

Table 1　Names of 210 rapeseed germplasm

编号 Number	材料名称 Material name	编号 Number	材料名称 Material name	编号 Number	材料名称 Material name	编号 Number	材料名称 Material name	编号 Number	材料名称 Material name
1	甘油5号	43	2012－11526	85	沪油12号	127	农林43	169	中双2号
2	农林42	44	2012－3448	86	宁油18号	128	油研2号	170	WH－17
3	淮油6号	45	2012－5086	87	宁油12号	129	SWU54	171	WH－28
4	黔油4号	46	2012－8327	88	史力佳	130	SWU57	172	WH－30
5	牛耳朵	47	2012－8380	89	杨油6号	131	SWU63	173	WH－33
6	880101	48	2012－9478	90	扬油5号	132	SWU64	174	WH－38
7	SWU46	49	R2	91	红油3号	133	SWU66	175	WH－41
8	SWU47	50	阳光198	92	苏油1号	134	SWU69	176	WH－42
9	SWU52	51	中双10号	93	浙油18	135	SWU70	177	WH－43
10	SWU53	52	中双6号	94	浙双8号	136	SWU71	178	WH－49
11	SWU65	53	中双7号	95	浙油758	137	SWU74	179	WH－50
12	川油20	54	中油589	96	沪油18	138	SWU75	180	WH－55
13	CY12NY－7	55	中油821Q	97	沪油19	139	SWU76	181	WH－58
14	CY12Q8－7	56	Major	98	浙双6号	140	SWU77	182	WH－59
15	CY12QSZ06	57	华双2号	99	皖油16号	141	SWU80	183	WH－60
16	CY12PXW－4	58	Aurora	100	AGREV021	142	SWU97	184	WH－83
17	CY13PXW－17	59	华油13号	101	11－504	143	SWU88	185	WH－93
18	CY14PXW－18	60	Rucabo	102	11－1184	144	SWU96	186	豫油1号
19	CY16PXW－35	61	11－9－703	103	P310	145	SWU100	187	华油6号
20	CY19PXW－65	62	11－9－705	104	P312	146	SWU102	188	Cubs root
21	CY21PXW－84	63	11－P67东	105	P668	147	SWU103	189	华油10
22	10－1047	64	10－崇23	106	P685	148	SWU104	190	chuosenshu
23	10－1061	65	10－崇24	107	A117	149	SWU111	191	漕泾胜利
24	1472	66	10－崇25	108	B250	150	SWU113	192	沪油三号
25	湘油11号	67	10－崇29	109	B265	151	中双10号	193	勺叶青
26	740	68	10－崇32	110	B285	152	中双6号	194	沪激早
27	783	69	10－崇33	111	GY270	153	镇2609	195	漕油2号
28	782	70	10－江棚3	112	GY282	154	沪油21	196	封顶240
29	YB3	71	11－P74－8父本	113	B262	155	浙双3号	197	大花球
30	1360	72	7－7766－74套帐	114	A148	156	扬油4号	198	荣选
31	563	73	P18父本－保持系	115	08－P35	157	沪油15	199	宁油6号
32	WX10329	74	64棚－10	116	08－P36	158	中双4号	200	垛油一号
33	Santana	75	甲920	117	09－P36	159	阳光198	201	淮油12号
34	1252	76	甲预25棚	118	10－P10	160	华航901	202	沛选170
35	9F087	77	甲预16棚	119	12－P25	161	扬J6711	203	广德8104
36	7191	78	甲预31棚	120	DD1	162	希望106	204	当油早1号
37	RQ011	79	华双128	121	gl302－1	163	浙油17号	205	广德761
38	1111	80	甲904	122	986	164	中油821	206	滁610
39	1570	81	甲PF190棚	123	06H7	165	秦油1号	207	皖油早
40	2354	82	甲915	124	湖北白花油菜	166	盐油2号	208	滁县白花
41	2359	83	甲951棚	125	Sophia	167	苏油4号	209	芥65－1
42	2011－7103	84	沪油17号	126	Nakaee Chousen	168	699	210	三高油菜

tion,美国)进行统计分析。利用210份油菜材料的所有表型数据的平均值进行性状间的描述性统计和Pearson相关性分析。聚类分析使用R软件,采用系统聚类。

2 结果与分析

2.1 不同浓度铝胁迫下油菜幼苗长势

为确定合适的浓度,设置0、5×10^{-5}、1×10^{-4}、5×10^{-4}和1×10^{-3} mol·L^{-1}的Al^{3+}浓度。结果表明,在5×10^{-5} mol·L^{-1} Al^{3+}浓度(pH 6.04)下,根系长度存在显著差异;当浓度为5×10^{-4} mol·L^{-1}(pH 4.32)时,根和下胚轴的生长发育受到严重抑制(图2)。因此,5×10^{-4} mol·L^{-1}的Al^{3+}浓度可以作为评估油菜发芽期抗铝性的合适浓度。

2.2 铝毒胁迫下油菜根系形态特征的表型变异

铝毒胁迫可显著抑制油菜根系形态,不同基因型背景下,铝毒胁迫对油菜生长抑制程度有较大的表型变异(表2)。在正常条件下,210份油菜材料的总根长(TRL)为12.250~84.530 cm,平均值为33.090 mm,变异系数(CV)为34.91%;在铝胁迫下,TRL为0.810~7.810 cm,平均值为3.441 cm,CV为36.45%。在正常条件下,210份油菜材料的总表面积(TSA)为0.930~9.750 cm^2,平均值为3.185 cm^2,变异系数(CV)为54.60%;在铝胁迫作用下,TSA为0.140~1.090 cm^2,平均值为0.514 cm^2,CV为31.95%。在正常条件下,210份油菜材料的总根体积(TRV)为0.010~0.090 cm^3,平均值为0.027 cm^3,CV为79.74%;在铝胁迫作用下,TRV为0.000~0.010 cm^3,平均值为0.006 cm^3,CV为32.70%。

对照组和铝胁迫下的根系形态特征均呈连续

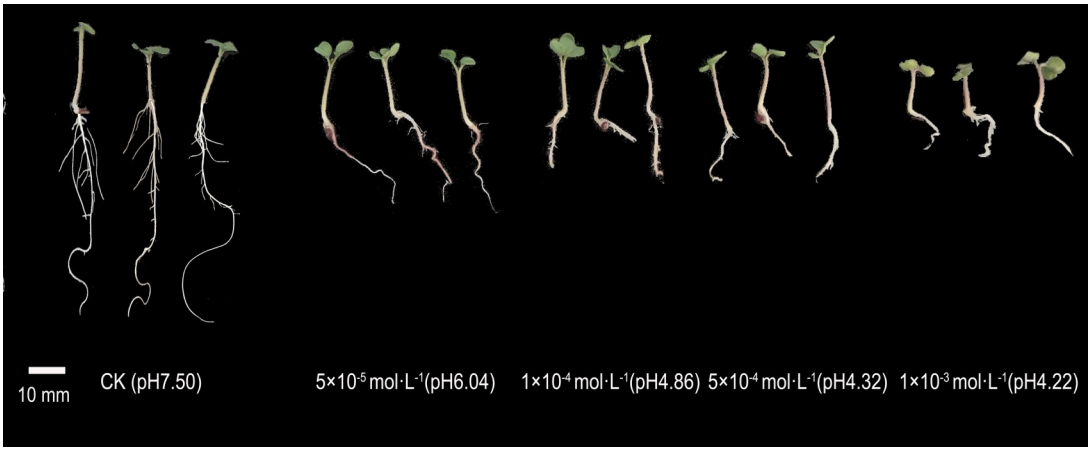


图2 不同浓度铝胁毒迫下油菜种子第7天的发芽形态

Fig.2 Germination morphology of rapeseed seeds on the 7th day under different concentrations of aluminum toxicity stress

表2 不同基因型在铝毒胁迫和对照条件下的根系形态性状的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics on root morphology characteristics of different genotypes under aluminum toxicity stress and control conditions

性状 Traits	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准偏差 SD	变异系数/% CV
总根长-铝胁迫/cm	0.810	7.810	3.441**	1.254	36.453
总根长-对照/cm	12.250	84.530	33.090	11.552	34.910
总根表面积-铝胁迫/cm^2	0.140	1.090	0.514**	0.164	31.945
总根表面积-对照/cm^2	0.930	9.750	3.185	1.739	54.600
总根体积-铝胁迫/cm^3	0.000	0.010	0.006**	0.002	32.698
总根体积-对照/cm^3	0.010	0.090	0.027	0.021	79.738

注:**表示相同性状在铝胁迫组和对照组间差异显著($P<0.01$)

Note:** indicates the level of difference between the treatment group and the stress group ($P<0.01$)

正态分布,表明对照组和铝胁迫下的根系形态学特征受多基因控制,符合数量性状的遗传特征(图3)。

2.3　210份油菜材料根系形态性状相关性分析

为了解对照(C)和铝胁迫(T)下油菜籽所有根系形态特征之间的关系,本文分析了这些性状之间的相关性(表3)。结果表明,在铝胁迫或对照条件下,所有根系形态性状均呈极显著的正相关($P<0.01$)。但除TRL-C与TRL-T和TSA-T间显著相关外,胁迫条件下其它油菜根系形态性状与对照条件下无显著相关性。以上结果表明,在铝胁迫和对照条件下,油菜根系形态性状存在不同的遗传调控机制。

2.4　210份甘蓝型油菜铝毒胁迫耐受能力的分级

根据铝毒胁迫下的3个根系形态性状TRL-T、TSA-T和TRV-T性状对210份甘蓝型油菜进行聚类分析,结果如图4所示,104份材料被分成了3大类,其中8个材料被划分为耐铝型材料,118个材料被划分为铝胁迫敏感型材料,剩下84份材料则被划分为中间型材料。抗性材料包括漕油2号、浙油17号、湖北白花油菜、黔油4号、盐油2号、WH-38、SWU75、Cubs root,其在铝胁迫下的TRL均超过了6.0 cm,TSA均超过了0.80 cm^2,TRV均超过0.007 cm^3(表4)。

表3　不同根系形态特征相关性

Table 3　Correlation analysis between different root morphology characters

性状 Trait	TSA−T	TRV−T	TRL−C	TSA−C	TRV−C
TRL−T	0.931**	0.689**	0.167*	0.043	−0.039
TSA−T		0.903**	0.155*	0.017	−0.063
TRV−T			0.124	−0.002	−0.066
TRL−C				0.856**	0.694**
TSA−C					0.962**

注:TRL−T:总根长−铝胁迫;TSA−T:总根表面积−铝胁迫;TRV−T:总根体积−铝胁迫;TRL−C:总根长−对照;TSA−C:总根表面积−对照;TRV−C:总根体积−对照。*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)

Note:TRL−T: total root length−aluminum stress; TSA−T: total surface area−aluminum stress; TRV−T: total root volume−aluminum stress; TRL−C: the total root length−control; TSA−C: total surface area− control; TRV−C: total root volume−control; * indicated significant correlation at $P<0.05$ level, ** indicated significant correlation at $P<0.01$ level

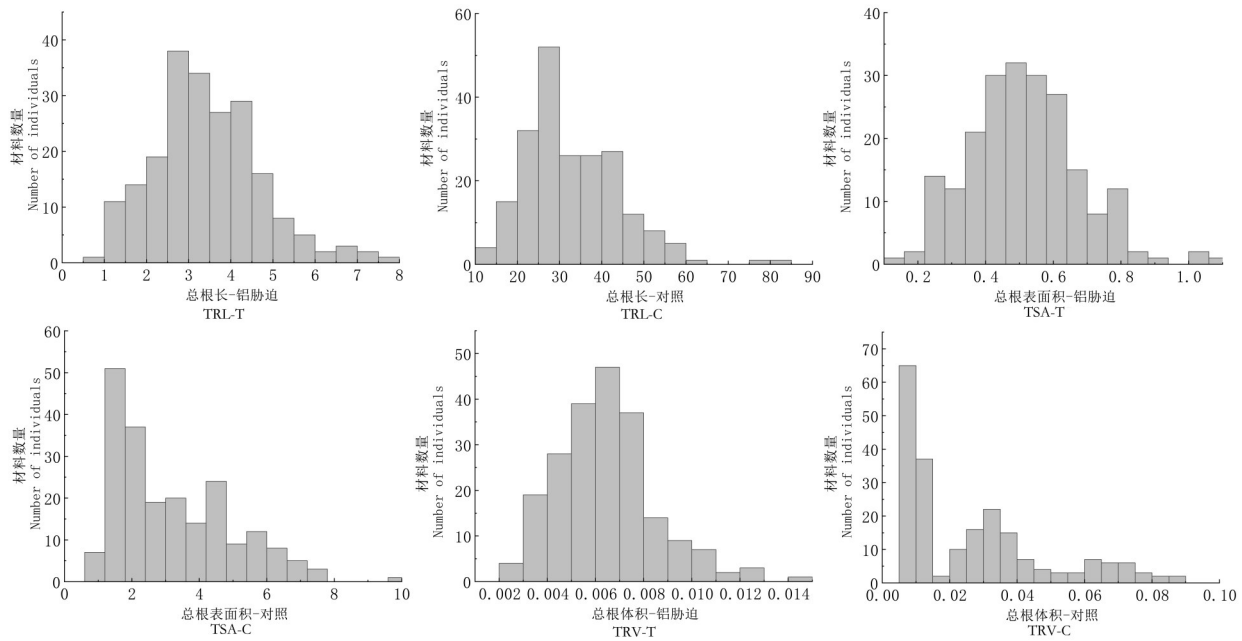
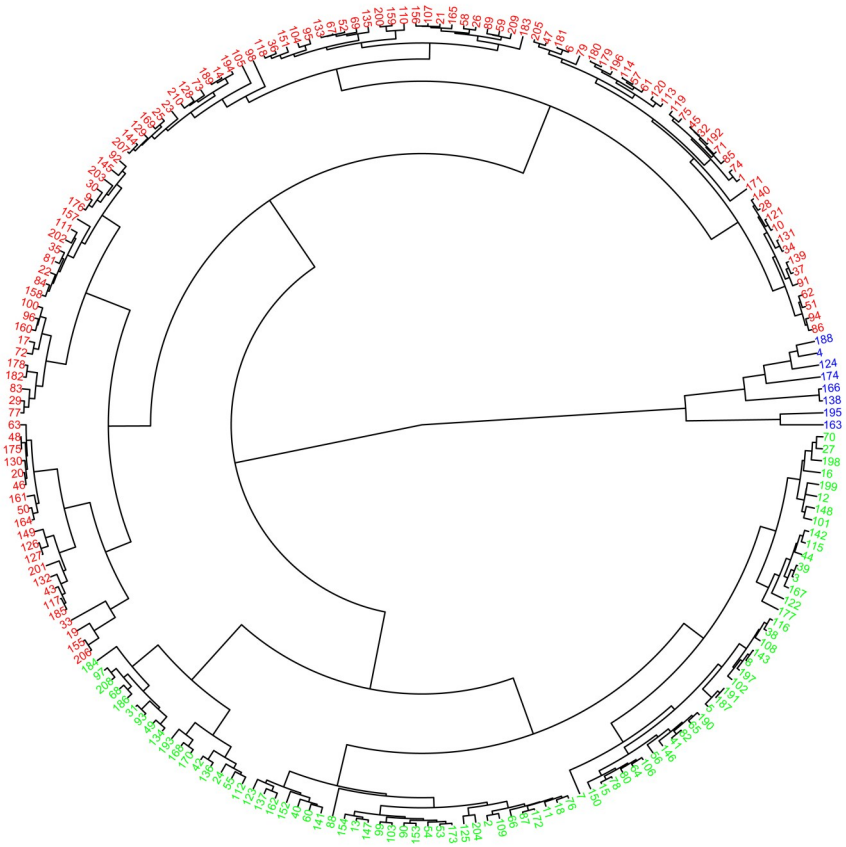


图3　不同基因型在铝胁迫和对照条件下的根系形态性状的直方图

Fig.3　Histograms of root morphological traits of different genotypes under aluminum stress and control conditions



不同数字为供试材料编号,见表1;蓝色的8份种质为耐铝型,红色的118份种质为铝敏感型,绿色的84份种质为中间型

Different number indicated different experimental materials shown in table 1. Blue numbers indicated aluminum-tolerant varieties; Red numbers indicated aluminum-sensitive varieties , and green numbers indicated intermediate varieties

图4 210份油菜种质铝毒胁迫耐受能力聚类图

Fig.4 Cluster diagram of aluminum tolerance in 210 rapeseed germplasm

表4 耐铝毒能力强的优质油菜种质

Table 4 Excellent rapeseed germplasm with strong aluminum stress resistance

编号 Number	材料名称 Material name	总根长/cm TRL-T	总根表面积/cm^2 TSA-T	总根体积/cm^3 TRV-T
195	漕油2号	7.81	1.04	0.011
163	浙油17号	7.44	1.04	0.012
174	WH-38	7.00	0.80	0.007
188	Cubs root	6.60	0.80	0.008
124	湖北白花油菜	6.59	1.09	0.014
4	黔油4号	6.51	0.93	0.011
138	SWU75	6.03	0.83	0.009
166	盐油2号	6.03	0.85	0.010

3 讨论

铝毒胁迫是影响作物产量最重要的因素之一[15]。土壤中积累过多的离子态铝对油菜的生长发育具有显著影响,尤其对植物根部损害极大[16]。近年来我国油菜种植大部分集中在南方酸性土壤,铝毒害问题较为严重[17]。因此研究铝毒害对油菜作物生长发育的影响具有重要意义及参考价值。目前,对油菜铝毒害及抗铝毒机制的研究较多集中在外源有机酸缓解油菜铝毒的作用机理[18]、抗逆生理指标[19]、叶片光合特性[20]等方面,有关铝毒胁迫对油菜种子萌发的影响报道较少。

种子萌发期作为作物生长发育重要的起始阶段,会直接影响作物的收获及其经济效益。郜欢欢等[21]研究表明,不同品种(系)油菜萌发期对铝毒的耐性具有显著性差异。因此适宜的铝毒胁迫浓度是筛选油菜萌发期耐性资源的关键。本研究发现,随着铝浓度的增加,油菜幼苗主根相对伸长率显著降低,这与熊洁[22]和崔雪梅等[23]研究铝毒胁迫下油菜主根相对根长逐渐减小的结论相一致。铝毒胁

迫抑制了油菜根系生长,且随着铝毒胁迫浓度的增加抑制效果增强,这与周楠等[24]的研究结果相一致。多项研究发现,铝毒害会导致植物主根变粗变短,根尖膨大变褐,侧根和根毛减少甚至消失[25-28],这与本试验结果相似。此外,前人对油菜种子萌发铝胁迫的Al^{3+}浓度一般为3×10^{-4}～6.5×10^{-4} mol·L^{-1}范围内[21,29-30],与本研究所选取的5×10^{-4} mol·L^{-1}浓度相近。

油菜是一种非常适宜与小麦、水稻和大麦轮作的作物,对后续谷物产量增加产生了积极的影响[31-32]。油菜种植在中性土壤上含油量最高,在酸性或碱性土壤上含油量降低[33]。有研究指出,油菜适宜生长的土壤pH范围为6.0～7.0[34]。一般酸性土壤铝浓度为1×10^{-5}～4×10^{-4} mol·L^{-1},微摩尔级的铝就会抑制植物根系的生长以及吸收氮、磷等营养物质的效率[35-36],从而影响植物的生长及产量。Lofton等[37]研究表明,当土壤pH值小于5.8,铝浓度大于15 mg·kg^{-1}时油菜就会受到铝毒胁迫,导致产量明显下降。当土壤pH值低于5.5时,铝会以有毒Al^{3+}的状态释放进土壤溶液中,对植物产生毒害[38]。目前,酸性土壤中的铝毒害已经成为中国油菜产量的重要限制因子[39]。据调查,浙江省的湖州、嘉兴和温州等油菜产地,近年来由于酸铝的影响,导致油菜产量减少、品质明显下降,给当地农户带来了巨大的经济损失,也严重制约了浙江省油菜生产的可持续发展[40]。

目前,油菜萌发期耐铝毒能力的鉴定主要采用培养皿加铝离子溶液的方法进行。该方法对少量油菜材料的鉴定较为精准,但面对大规模种质资源的抗性鉴定时,则存在工作量大、溶液体积过小,其浓度易因水分蒸发而增大等方面的影响,极大限制了鉴定的效率和精准度,无法满足对大量油菜种质资源萌发期耐铝胁迫鉴定与评价的要求。因此急需一套更加高效、便捷、精准的油菜萌发期耐铝胁迫能力的鉴定分级方法。为此,本研究利用塑料托盘+穴盘+无菌纱布组合为萌发苗床,开发了一套高效、精准、可控的油菜萌发期耐铝毒能力的鉴定体系。结合根系扫描系统可实现高效筛选耐铝毒能力强的优质资源。利用该方法将210份油菜品种分为耐铝型、铝敏感型和中间型3个等级,其中筛选获得8个耐铝毒性强的优质资源。

4　结论

本研究改进了油菜种子萌发期铝毒胁迫抗性鉴定的方法,采用发芽试验精准控制铝离子浓度,对210份甘蓝型油菜种质的萌发期耐铝毒能力进行精准鉴定。筛选获得8个耐铝毒性强的优质资源,包括漕油2号、浙油17号、湖北白花油菜、黔油4号、盐油2号、WH-38、SWU75、Cubs root,为油菜耐铝毒胁迫能力的遗传改良提供了技术手段和种质资源。

参　考　文　献

[1]金路路,齐华,衣莹,等. CO_2浓度增加对燕麦光合特性的影响[J]. 杂粮作物,2007,27(1):33-36.
Jin L L, Qi H, Yi Y, et al. Effects of CO_2 concentration enrichment on oats photosynthetic characteristics[J]. Rain Fed Crops,2007,27(1):33-36.

[2]李春,齐华,江和文,等. 辽宁发展燕麦生产的气候适应性研究[J]. 气象与环境学报,2007,23(1):64-67.
Li C, Qi H, Jiang H W, et al. Climate adaptability analysis of oat planting in Liaoning Province[J]. Journal of Meteorology and Environment,2007,23(1):64-67.

[3]Kinraide T B. Identity of the rhizotoxic aluminium species[J]. Plant and Soil,1991,134(1):167-178.

[4]Foy C D, Chaney R L, White M C. The physiology of metal toxicity in plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1978,29:511-566.

[5]Ma J F, Ryan P R, Delhaize E. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids[J]. Trends in Plant Science,2001,6(6):273-278.

[6]Kochian L V, Piñeros M A, Hoekenga O A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity[J]. Plant and Soil,2005,274(1):175-195.

[7]Kochian L V, Hoekenga O A, Piñeros M A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency [J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55: 459-493.

[8]Jones D L, Kochian L V. Aluminum inhibition of the inositol 1, 4, 5-trisphosphate signal transduction pathway in wheat roots: a role in aluminum toxicity?[J]. The Plant Cell, 1995, 7(11): 1913-1922.

[9]Barceló J, Poschenrieder C. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review [J]. Environmental and Experimental Botany, 2002, 48(1): 75-92.

[10]Delhaize E, Craig S, Beaton C D, et al. Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) (I. uptake and distribution of aluminum in root apices)[J]. Plant Physiology, 1993, 103(3): 685-693.

[11]Rajjou L, Duval M, Gallardo K, et al. Seed germination and

vigor[J]. Annual Review of Plant Biology,2012,63:507-533.

[12]Ma J F. Plant root responses to three abundant soil minerals: silicon, aluminum and iron[J]. Critical Reviews in Plant Sciences,2005,24(4):267-281.

[13]王汉中. 我国油菜产需形势分析及产业发展对策[J]. 中国油料作物学报,2007,29(1):101-105.
Wang H Z. Strategy for rapeseed industry development based on the analysis of rapeseed production and demand in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(1): 101-105.

[14]沈金雄,傅廷栋. 我国油菜生产、改良与食用油供给安全[J]. 中国农业科技导报,2011,13(1):1-8.
Shen J X, Fu T D. Rapeseed production, improvement and edible oil supply in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2011,13(1):1-8.

[15]赵天龙,解光宁,张晓霞,等. 酸性土壤上植物应对铝胁迫的过程与机制[J]. 应用生态学报,2013,24(10):3003-3011.
Zhao T L,Xie G N,Zhang X X,et al. Process and mechanism of plants in overcoming acid soil aluminum stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2013,24(10):3003-3011.

[16]Siecińska J, Nosalewicz A. Aluminium toxicity to plants as influenced by the properties of the root growth environment affected by other Co-stressors: a review[M]//de Voogt P, Ed. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. Cham:Springer International Publishing,2016:1-26.

[17]赵世锋,田长叶,王志刚,等. 我国燕麦生产和科研现状及未来发展方向[J]. 园艺与种苗,2007,27(6):428-431.
Zhao S F,Tian C Y,Wang Z G,et al. Production and science research status and future development direction of oats in China[J]. Horticulture & Seed,2007,27(6):428-431.

[18]王月平. 有机酸对铝胁迫下油菜生长生理及缓解机制研究[D]. 金华:浙江师范大学,2013.
Wang Y P. Study on the physiology and alleviation mechanism of organic acids on the growth of rapeseed under aluminum stress[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University. 2013.

[19]赵秀芳,戎郁萍,赵来喜. 我国燕麦种质资源的收集和评价[J]. 草业科学,2007,24(3):36-40.
Zhao X F,Rong Y P,Zhao L X. The collection and evaluation of oat (*Avena sative*) in China[J]. Pratacultural Science, 2007,24(3):36-40.

[20]张玉梅,林琪,姜雯,等. 渗透胁迫条件下不同抗旱性小麦品种萌发期生理生化指标的变化[J]. 麦类作物学报,2006,26(6):125-130.
Zhang Y M,Lin Q,Jiang W,et al. Effect of osmotic stress on physiological and biochemical indices at germination stage of different drought-resistant wheat[J]. Journal of Triticeae Crops,2006,26(6):125-130.

[21]郜欢欢,叶桑,王倩,等. 甘蓝型油菜种子萌发期耐铝毒特性综合评价及其种质筛选[J]. 作物学报,2019,45(9):1416-1430.
Gao H H,Ye S,Wang Q,et al. Screening and comprehensive evaluation of aluminum-toxicity tolerance during seed germination in Brassca napus[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019,45(9):1416-1430.

[22]熊洁,邹小云,陈伦林,等. 油菜苗期耐铝基因型筛选和鉴定指标的研究[J]. 中国农业科学,2015,48(16):3112-3120.
Xiong J, Zou X Y, Chen L L, et al. Screening of rapeseed genotypes with aluminum tolerance at seedling stage and evaluation of selecting indices[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015,48(16):3112-3120.

[23]崔雪梅,简君萌,李春生. 铝胁迫对油菜根系及叶片生理生化指标的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(12):107-109.
Cui X M, Jian J M, Li C S. Effects of aluminum stress on physiological and biochemical indexes of rape roots and leaves[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2015,43(12):107-109.

[24]周楠,韦冬萍,刘鹏,等. 铝毒胁迫对两种基因型油菜苗期根系形态及生理特性的影响[J]. 中国油料作物学报,2008,30(4):443-449.
Zhou N, Wei D P, Liu P, et al. Effects of aluminum stress on the morphological and physiological characteristics in roots of two genotype rape seedlings[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2008,30(4):443-449.

[25]韩德鹏,刘星月,王馨悦,等. 铝胁迫对油菜根系形态和生理指标的影响[J]. 核农学报,2019,33(9):1824-1832.
Han D P, Liu X Y, Wang X Y, et al. Effects of aluminum stress on morphology parameters of roots and physiological indexes in *Brassica napus* L[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2019,33(9):1824-1832.

[26]陈泰林,钱春梅,张建军,等. 植物铝胁迫响应机制的研究进展[J]. 热带农业科学,2010,30(2):37-48,86.
Chen T L, Qian C M, Zhang J J, et al. Advances of mechanism of plant response to aluminum stress[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture,2010,30(2):37-48,86.

[27]Silva I R, Smyth T J, Moxley D F, et al. Aluminum accumulation at nuclei of cells in the root tip. Fluorescence detection using lumogallion and confocal laser scanning microscopy[J]. Plant Physiology,2000,123(2):543-552.

[28]Schmohl N, Horst W J. Cell-wall composition modulates aluminium toxicity[M]//Plant Nutrition. Dordrecht: Springer Netherlands,2001:262-263.

[29]王瑞莉,王刘艳,雷维,等. 结合RNA-seq分析和QTL定位筛选甘蓝型油菜萌发期与铝毒胁迫相关的候选基因[J]. 作物学报,2021,47(12):2407-2422.
Wang R L, Wang L Y, Lei W, et al. Screening candidate genes related to aluminum toxicity stress at germination stage via RNA-seq and QTL mapping in *Brassica napus* L[J]. Acta Agronomica Sinica,2021,47(12):2407-2422.

[30]王瑞莉,王刘艳,叶桑,等. 铝毒胁迫下甘蓝型油菜种子萌发期相关性状的QTL定位[J]. 作物学报,2020,46(6):832-843.
Wang R L, Wang L Y, Ye S, et al. QTL mapping of seed germination-related traits in *Brassica napus* L. under aluminum toxicity stress[J]. Acta Agronomica Sinica,2020, 46(6):832-843.

[31]Christen O, Sieling K. The effect of different preceding crops

on the development, growth and yield of winter barley[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 1993, 171(2): 114-123.

[32]Christen O, Sieling K, Hanus H. The effect of different preceding crops on the development, growth and yield of winter wheat[J]. European Journal of Agronomy, 1992, 1(1): 21-28.

[33]李朝苏,刘鹏,蔡妙珍,等. 荞麦对酸铝胁迫生理响应的研究[J]. 水土保持学报,2005,19(3):105-109.
Li C S, Liu P, Cai M Z, et al. Physiological response of buckwheat to acid-aluminum stress in growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 105-109.

[34]王保义,李朝苏,刘鹏,等. 荞麦叶内抗氧化系统对铝胁迫的响应[J]. 生态环境,2006,15(4):816-821.
Wang B Y, Li C S, Liu P, et al. The antioxidant response to Al-stress in buckwheat[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(4): 816-821.

[35]Liu J P, Piñeros M A, Kochian L V. The role of aluminum sensing and signaling in plant aluminum resistance[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2014, 56(3): 221-230.

[36]Zhou X H, Gu Z H, Xu H N, et al. The effects of exogenous ascorbic acid on the mechanism of physiological and biochemical responses to nitrate uptake in two rice cultivars (*Oryza sativa* L.) under aluminum stress[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2016, 35(4): 1013-1024.

[37]Lofton J, Godsey C B, Zhang H. Determining aluminum tolerance and critical soil pH for winter canola production for acidic soils in temperate regions[J]. Agronomy Journal, 2010, 102(1): 327-332.

[38]Kochian L V, Piñeros M A, Liu J P, et al. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2015, 66: 571-598.

[39]肖春玲,陈龙,王安萍,等. 铝胁迫对油茶根际与非根际土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2011,39(4):415-417.
Xiao C L, Chen L, Wang A P, et al. Effects of aluminum stress on enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Camellia oleifera*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2011, 39(4): 415-417.

[40]王志颖,刘鹏. 柠檬酸抑制剂对铝胁迫下油菜抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业学报,2013,29(5):957-966.
Wang Z Y, Liu P. Effect of citric acid inhibitor Mersal on antioxidant enzymes activities in oilseed rape leaves under aluminum stress[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2013, 29(5): 957-966.

Identification and screening of aluminum toxicity stress germplasm resources in *Brassica napus* L.

Wang Shanshan, Yu Weijia, Lei Zhiheng, Zhao Huixia, Wu Chunhong*, Wan Heping*

(*1.Hubei Engineering Research Center for Protection and Utilization of Special Biological Resources in the Hanjiang River Basin / School of Life Science, Jianghan University, Wuhan 430056, China*)

Abstract: [Objective] Aluminum is a key element that inhibits plant growth and productivity in acidic soil. As one of the three major oil crops in the world, Rapeseed is mainly planted in the southern region of the Yangtze River in China, where aluminum toxicity is relatively severe. Rapeseed is particularly vulnerable to aluminum toxicity, especially in terms of root system growth inhibition. Aluminum toxicity has become one of the important factors limiting rapeseed production in China. Therefore, evaluating aluminum toxicity tolerance of different genotypic rapeseed germplasms and selecting aluminum tolerant rapeseed germplasm can not only reduce and prevent the damage caused by aluminum toxicity to rapeseed but also has important social, economic, and ecological benefits. [Method] This study improved the method previously used for identifying the resistance to aluminum toxicity stress during the seed germination stage of rapeseed. By precisely controlling the concentration of aluminum ions and combining with a root scanning and analysis system, efficient, rapid, and accurate identification of the resistance to aluminum toxicity stress during the germination stage was achieved for 210 genotypes of *Brassica napus*. [Results] The results showed that aluminum toxicity stress significantly inhibited the root growth of *Brassica napus* seedlings, with considerable variations in inhibition effects among different genotypic materials. Cluster analysis of total root length (TRL), total surface area (TSA), and total root volume (TRV) of rapeseed materials under aluminum toxicity stress classified the 210 rapeseed varieties into three categories: aluminum-tolerant, aluminum-sensitive, and intermediate types, with 8 aluminum-tolerant varieties, 118 aluminum-sensitive varieties, and the remaining 84 as intermediate types. [Conclusion] The aluminum-tolerant varieties include Caoyou 2, Zheyou 17, Hubei Baihua rapeseed, Qianyou 4, Yanyou 2, WH-38、SWU75, Cubs root, etc. The study provided a theoretical basis and germplasm resources for the genetic improvement of rapeseed's tolerance to aluminum toxicity stress.

Keywords: *Brassica napus*, Aluminum toxicity stress, Germination period, Cluster analysis, Resistance resources

(编辑:马荣博)