第42卷 第6期　　华 中 农 业 大 学 学 报　　Vol.42 No.6
2023年 11月　　Journal of Huazhong Agricultural University　　Nov. 2023,164～174

张鹏超,张雯,黄益丹,等.甘蓝型油菜苗期耐酸性综合评价及耐酸种质筛选[J].华中农业大学学报,2023,42(6):164-174.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.06.020

甘蓝型油菜苗期耐酸性综合评价及耐酸种质筛选

张鹏超,张雯,黄益丹,冉文昊,徐芳森,丁广大

华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心/农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室,武汉 430070

摘要　为探究在酸性土壤环境下油菜苗期耐酸特性,采用盆栽试验对113份油菜品种进行酸胁迫处理和酸性土壤改良处理,在苗期测定根长、株高、地上部鲜质量、根系鲜质量、总鲜质量、地上部干质量、根系干质量、总干质量、根冠比和SPAD共10项性状指标,利用相关性分析、主成分分析、隶属函数法、聚类分析、灰色关联度和逐步回归分析对不同油菜品种进行耐酸综合评价,建立油菜耐酸评价模型并筛选耐酸油菜品种。结果显示:113份油菜品种在2个处理下10个性状均呈现极显著差异;10项指标的变异系数范围为10.09%～78.68%,将10个单项指标转换成4个相互独立的综合指标,代表了原始指标88.688%的信息量;基于113份油菜的耐酸综合评价值(D值)聚类分析,将油菜品种分为5个类群,分别为极耐酸型(2份)、耐酸型(16份)、中间型(41份)、敏感型(50份)、极敏感型(4份);通过D值和10项指标构建最优回归方程:$D=-0.075+0.0403X_{总干质量}+0.100X_{根系鲜质量}+0.188X_{SPAD}+0.099X_{株高}+0.092X_{根系干质量}$($R^2=0.982$,$F=1\,154.562^{***}$),筛选出适宜的油菜苗期耐酸鉴定指标。综上,酸胁迫会严重抑制油菜苗期的生长,不同油菜品种耐酸性存在较大差异,通过测定总干质量、根系鲜质量、SPAD、株高、根系干质量并结合回归方程可评价判断油菜耐酸性。

关键词　甘蓝型油菜; 苗期; 酸性土壤; 耐酸性综合评价; 耐酸品种

中图分类号　S565.4　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1000-2421(2023)06-0164-11

土壤的自然酸化过程本身比较缓慢[1],然而,近几十年来,由于工业化导致的大气酸沉降增加、肥料不合理施用和农作土壤的高强度使用使土壤的酸化进程加剧[2-3]。据统计,全球约有30%～40%的耕地为酸性土壤[4-5]。我国酸性土壤约占全国土壤面积的23%,主要分布在长江中游以及长江以南的广大区域[6]。土壤酸化会增加土壤中重金属毒性、降低土壤肥力、抑制土壤中微生物的活动,不利于农作物根系的发育和养分的吸收,严重阻碍农作物的生长[7-8]。目前对酸性土壤治理的主要措施包括施用石灰等碱性物质以及有机质等,但仅对表层土壤起作用,并且成本高、生态环境风险大[9-10]。

油菜作为我国主要的油料作物之一,其种植面积和总产量均居世界前列[11],然而我国油菜种植区域与酸性土壤分布区域高度重合,土壤酸化已经成为油菜生长和产量增加的重要限制因子[12]。因此,综合评价和筛选耐酸油菜品种,明确油菜苗期耐酸鉴定指标体系,对油菜产业的可持续发展具有重要意义。研究表明,大豆[13]、花生[14]、水稻[15]、小麦[16-17]、玉米[18]等作物不同品种对酸铝胁迫的耐受性存在较大差异,并且已经初步建立耐酸综合评价方法和鉴定指标体系。在油菜研究中,郜欢欢等[19]在种子萌发期设90 μmol/L Al^{3+}处理对148份油菜品种进行耐铝性综合评价,筛选出鲜质量、根长和芽长可作为鉴定油菜萌发期耐铝性的指标;熊洁等[20]采用水培试验在苗期对81个油菜品种进行耐铝性分析,通过测定13个指标并进行聚类分析将81个油菜品种分为3个耐铝等级。

前人的研究结果为耐酸油菜品种筛选奠定了良好的基础,但也存在一些不足。这些研究大多采用水培的方式进行筛选,与土壤环境差异较大,并且主要关注酸性土壤中铝毒这一种胁迫,而酸性土壤对植物生长存在多种障碍因子,因此可能使筛选出来的品种田间适应性不佳。本研究以具有不同遗传背景和地理来源的113份油菜品种为材料,采用盆栽试

收稿日期: 2023-09-29
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1900705)
张鹏超,E-mail:zpc@webmail.hzau.edu.cn
通信作者: 丁广大,E-mail:dgd@mail.hzau.edu.cn

验进行酸胁迫处理和酸性土壤改良处理，以10个性状指标的耐酸系数作为衡量油菜耐酸性的指标，利用相关性分析、主成分分析、隶属函数法、聚类分析、逐步回归分析和灰色关联度分析对不同油菜品种进行耐酸综合评价，鉴定和筛选耐酸油菜品种，明确油菜苗期耐酸性状特征，以期为油菜耐酸机制研究及耐酸油菜品种的培育提供材料基础。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试甘蓝型油菜品种主要来源于我国长江流域油菜主产区（湖北、湖南、四川、安徽、江西、浙江、江苏、重庆、贵州、上海），共113份，具有不同的遗传背景和地理来源（表1）。

表1　供试甘蓝型油菜品种

Table 1　*Brassica napus* varieties used in this study

编号 No.	品种名称 Variety name	来源 Source	编号 No.	品种名称 Variety name	来源 Source
1	丰油730 Fengyou 730*	湖南 Hunan	40	CY12GJ-1	四川 Sichuan
2	沣油306 Fengyou 306	湖南 Hunan	41	秦优1699 Qinyou 1699	陕西 Shaanxi
3	沣油789 Fengyou 789	湖南 Hunan	42	秦优1718 Qinyou 1718*	陕西 Shaanxi
4	沣油823 Fengyou 823	湖南 Hunan	43	秦油5号 Qinyou 5	陕西 Shaanxi
5	湘杂油6号 Xiangzayou 6	湖南 Hunan	44	青油2号 Qingyou 2	青海 Qinghai
6	湘杂油631 Xiangzayou 631	湖南 Hunan	45	德徽油88 Dehuiyou 88	安徽 Anhui
7	湘杂油743 Xiangzayou 743	湖南 Hunan	46	德选518 Dexuan 518	安徽 Anhui
8	华油杂652 Huayouza 652	湖北 Hubei	47	润普丰 Runpufeng	安徽 Anhui
9	中油杂28 Zhongyouza 28	湖北 Hubei	48	天禾油17 Tianheyou 17	安徽 Anhui
10	利油杂3号 Liyouza 3	湖北 Hubei	49	圣灯1号 Shengdeng 1	湖北 Hubei
11	利油杂168 Liyouza 168	湖北 Hubei	50	圣缘1号 Shengyuan 1	湖北 Hubei
12	阳光131 Yangguang 131*	湖北 Hubei	51	大地95 Dadi 95	湖北 Hubei
13	大地199 Dadi 199*	湖北 Hubei	52	GY-5	湖北 Hubei
14	中油杂19 Zhongyouza 19*	湖北 Hubei	53	甲预31棚 Jiayu31peng	湖北 Hubei
15	中油杂39 Zhongyouza 39	湖北 Hubei	54	WH-49	湖北 Hubei
16	华油杂68 Huayouza 68	湖北 Hubei	55	WH-50	湖北 Hubei
17	华油杂82 Huayouza 82	湖北 Hubei	56	WH-59	湖北 Hubei
18	华油杂158 Huayouza 158	湖北 Hubei	57	WH-63	湖北 Hubei
19	华油杂158R Huayouza 158R	湖北 Hubei	58	WH-88	湖北 Hubei
20	鄂垦油629 Ekenyou 629	湖北 Hubei	59	WH-83	湖北 Hubei
21	18LP10	湖北 Hubei	60	WH-85	湖北 Hubei
22	华油杂50 Huayouza 50*	湖北 Hubei	61	WH-58	湖北 Hubei
23	华油杂655R Huayouza 655R	湖北 Hubei	62	WH-19	湖北 Hubei
24	H20-01	湖北 Hubei	63	宁R101 NingR 101	江苏 Jiangsu
25	H21-01	湖北 Hubei	64	宁R201 NingR 201	江苏 Jiangsu
26	川早油12 Chuanzaoyou 12	江西 Jiangxi	65	宁油1号 Ningyou 1	江苏 Jiangsu
27	赣油杂8号 Ganyouza 8*	江西 Jiangxi	66	杨油6号 Yangyou 6	江苏 Jiangsu
28	赣油杂9号 Ganyouza 9	江西 Jiangxi	67	镇油3号 Zhenyou 3	江苏 Jiangsu
29	赣油杂10号 Ganyouza 10	江西 Jiangxi	68	垛油一号 Duoyouyihao	江苏 Jiangsu
30	赣油杂906 Ganyouza 906	江西 Jiangxi	69	浙杂903 Zheza 903	浙江 Zhejiang
31	邡油777 Fangyou 777*	四川 Sichuan	70	浙双8号 Zheshuang 8	浙江 Zhejiang
32	德5油66 De5you 66	四川 Sichuan	71	浙油18 Zheyou 18	浙江 Zhejiang
33	德核杂油9 Dehezayou 9	四川 Sichuan	72	浙双72 Zheshuang 72	浙江 Zhejiang
34	川油18 Chuanyou 18	四川 Sichuan	73	胜利青梗 Shengliqinggeng	上海 Shanghai
35	CY12NY-7	四川 Sichuan	74	沪油12号 Huyou 12	上海 Shanghai
36	CY12QSZ06	四川 Sichuan	75	沪油14号 Huyou 14	上海 Shanghai
37	CY12PXW-4	四川 Sichuan	76	丰油737 Fengyou 737*	湖南 Hunan
38	CY13PXW-17	四川 Sichuan	77	常油杂9号 Changyouza 9	湖南 Hunan
39	CY18PXW-62	四川 Sichuan	78	沣油737 Fengyou 737	湖南 Hunan

续表 1 **Continued Table** 1

编号 No.	品种名称 Variety name	来源 Source	编号 No.	品种名称 Variety name	来源 Source
79	圣光50 Shengguang 50	湖南 Hunan	97	华油10号 Huayou 10	湖北 Hubei
80	圣光165R Shengguang 165R	湖南 Hunan	98	中双11号 Zhongshuang 11*	湖北 Hubei
81	圣光168 Shengguang 168	湖南 Hunan	99	11-P74-13	湖北 Hubei
82	湘农油3号 Xiangnongyou 3	湖南 Hunan	100	09-P37	湖北 Hubei
83	华油12 Huayou 12	湖北 Hubei	101	12-P24	湖北 Hubei
84	08-P35	湖北 Hubei	102	庆油3号 Qingyou 3	重庆 Chongqing
85	08-P36	湖北 Hubei	103	庆油8号 Qingyou 8	重庆 Chongqing
86	09-P32	湖北 Hubei	104	庆油11号 Qingyou 11	重庆 Chongqing
87	09-P36	湖北 Hubei	105	SWU49	重庆 Chongqing
88	09-P37	湖北 Hubei	106	金油杂6号 Jinyouza 6	贵州 Guizhou
89	10-P10	湖北 Hubei	107	金油杂8号 Jinyouza 8	贵州 Guizhou
90	10-P29	湖北 Hubei	108	金油杂8号 Jinyouza 9	贵州 Guizhou
91	11-P30	湖北 Hubei	109	金油杂8号 Jinyouza 10	贵州 Guizhou
92	12-P24	湖北 Hubei	110	金油杂8号 Jinyouza 11	贵州 Guizhou
93	12-P25	湖北 Hubei	111	金油杂8号 Jinyouza 12	贵州 Guizhou
94	中双2号 Zhongshuang 2	湖北 Hubei	112	黔选6 Qianxuan 6	贵州 Guizhou
95	轮选1427-1 Lunxuan 1427-1	湖北 Hubei	113	黔油4号 Qianyou 4	贵州 Guizhou
96	农林22 Nonglin 22	湖北 Hubei			

注:*表示国家农作物优良品种推广目录(2023)中的油菜品种。Note: * indicates the rapeseed varieties in the National Promotion Directory of Crop Varieties (2023).

1.2 试验设计

试验于2022-2023年在华中农业大学盆栽场进行。供试土壤为红壤,取自湖北咸宁贺胜桥,土壤基础理化性质为pH 4.82、有机质含量4.84 g/kg、全氮含量0.31 g/kg、速效磷含量1.33 mg/kg、速效钾含量84.13 mg/kg、铝离子含量503.01 mg/kg。试验设置2个处理,分别为酸胁迫处理(pH 4.82,原始土壤)和酸性土壤改良处理(pH 6.24,适宜油菜生长的正常土壤pH),酸性土壤改良参考闫志浩等[12]的方法,通过向原始土壤中添加0.3% $Ca(OH)_2$调节土壤pH至6.24,添加量为15 g/盆,每盆装土5 kg。每盆氮($(NH_4)_2SO_4$)、磷(KH_2PO_4)、钾(KCl)施用量分别为4.7、1.5、0.8 g。

挑选113份油菜品种中饱满均匀的种子,分别播种在2个pH水平的土壤中,设3个重复,每个品种播种15粒,间苗后留4株长势均匀一致的油菜。将盆栽放置于防雨棚下,大棚仅起到防雨的作用,其余条件与外界环境相同。定期浇水,油菜生长38 d后收样。

1.3 测定项目及方法

收样前,用SPAD-502型便捷式叶绿素测定仪测定各植株叶片的SPAD。收样后,将根系清洗干净后用吸水纸吸干水分,分别测定株高、根长、地上部鲜质量和根鲜质量。之后将地上部和根系分别烘干至恒质量后测定其干质量。

由地上部鲜质量和根系鲜质量相加计算出总鲜质量;地上部干质量和根系干质量相加计算出总干质量;根冠比为根系干质量与地上部干质量的比值。

1.4 数据处理与分析

利用Microsoft Excel 2016统计和整理原始数据;采用Graphpad Prism制作相关分析图。采用SPSS 22.0进行方差分析、相关性分析、主成分分析,R语言进行聚类分析。采用隶属函数法进行耐酸综合评价,相关指标计算参照文献[21-25]。

$$耐酸系数=酸胁迫处理下的指标值/酸性土壤改良处理下的指标值 \quad (1)$$

运用公式(1)计算各油菜品种每项指标的耐酸系数。

$$\mu(X_{ij})=(X_{ij}-X_{j\min})/(X_{j\max}-X_{j\min})$$
$$i=1,2\cdots\cdots m;\ j=1,2\cdots\cdots n \quad (2)$$

运用公式(2)计算各品种每个综合指标的隶属函数值,式(2)中$\mu(X_{ij})$表示第j个综合指标的隶属函数值,X_{ij}表示第i个品种的第j个综合指标,$X_{j\max}$、$X_{j\min}$分别表示第j个综合指标的最大值和最小值,m、n分别表示品种数和综合指标个数。

$$\omega_j=P_j/\sum_{j=1}^{n}P_j \quad j=1,2\cdots\cdots n \quad (3)$$

运用公式(3)计算每个综合指标的权重,式(3)中ω_j表示第j个综合指标在所有综合指标中的重要

程度即权重，P_j表示第j个综合指标的贡献率。

$$D=\sum_{j=1}^{n}[\mu(X_j)\times\omega_j]\qquad j=1,2\cdots\cdots n\qquad(4)$$

运用公式(4)计算酸胁迫处理下各品种的耐酸综合评价值，式(4)中D表示耐酸综合评价值。

$$\varepsilon_{ij}=(\mathrm{Min}_i\mathrm{Min}_j\Delta_{ij}+\rho\mathrm{Max}_i\mathrm{Max}_j\Delta_{ij})/(\Delta_{ij}+\rho\mathrm{Max}_i\mathrm{Max}_j\Delta_{ij})$$
$$i=1,2\cdots\cdots m;\ j=1,2\cdots\cdots k\qquad(5)$$

运用公式(5)计算各品种每项指标耐酸系数与D值的关联系数，式(5)中，ε_{ij}表示第i个品种第j项指标耐酸系数与D值的关联系数，Δ_{ij}表示第i个品种第j项指标耐酸系数与D值的差值，$\mathrm{Min}_i\mathrm{Min}_j$表示最小二级绝对差值，$\mathrm{Max}_i\mathrm{Max}_j$表示最大二级绝对差值，$\rho$表示分辨系数(在此取0.5)，$m$、$k$分别表示品种数和性状指标数。

$$\gamma_j=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{k}\varepsilon_{ij}\qquad j=1,2\cdots\cdots k\qquad(6)$$

运用公式(6)计算每项指标耐酸系数与D值的关联度，式(6)中，γ_j表示第j项指标耐酸系数与D值的关联度。

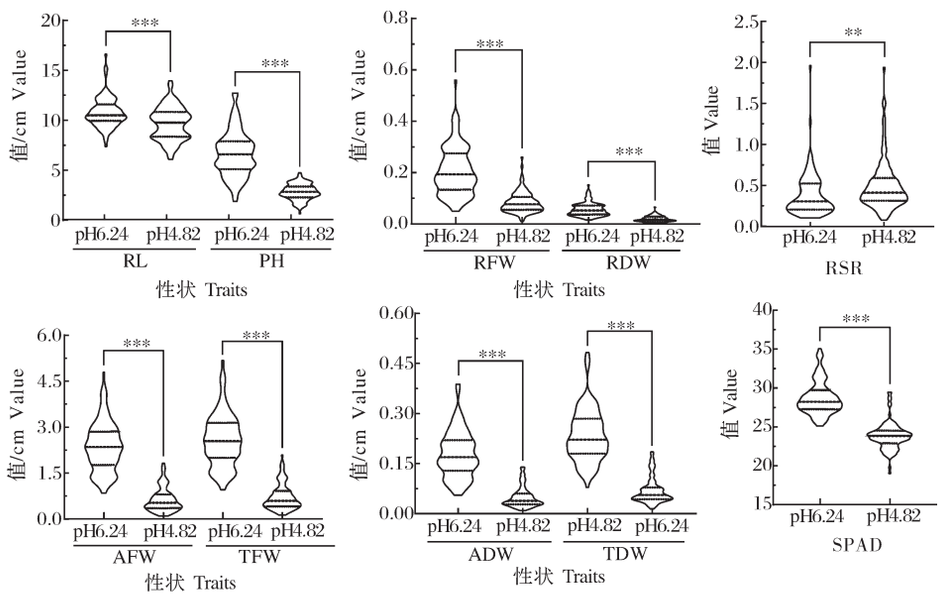
$$\omega_j(\gamma)=\gamma_j\div\sum_{j=1}^{k}\gamma_j\ \ j=1,2\cdots\cdots k\qquad(7)$$

运用公式(7)计算每个关联度的权重，式(7)中ω_j表示第j个关联度在所有关联度中的重要程度即权重。

2　结果与分析

2.1　酸胁迫对油菜苗期生长的影响

对2个处理下113份油菜品种苗期的10项性状指标，包括根长、株高、地上部鲜质量、根系鲜质量、总鲜质量、地上部干质量、根系干质量、总干质量、根冠比和SPAD进行统计分析。结果显示，根冠比在酸胁迫处理下的平均值与酸性土壤改良处理下相比呈现上升趋势，其余9项指标均呈现下降趋势，并且10项指标在2个处理下均达到极显著差异(图1)，说明酸胁迫对油菜苗期生长具有较强的抑制作用。2个处理下油菜苗期各项指标均表现出不同程度的变异，改良处理和酸胁迫处理下各性状变异系数范围分别为7.39%～57.03%、7.16%～61.67%，除株高和SPAD外，酸胁迫处理下其余各指标的变异系数均高于改良处理(表2)，说明113份油菜品种间具有较广泛的遗传变异，同时也说明酸胁迫对各项指标的影响程度不同，直接用单项指标对油菜耐酸性进行评价具有片面性。



pH 6.24：酸性土壤改良处理；pH 4.82：酸胁迫处理。**表示在0.01水平差异显著，***表示在0.001水平上差异显著。RL：根长；PH：株高；RFW：根系鲜质量；AFW：地上部鲜质量；TFW：总鲜质量；RDW：根系干质量；ADW：地上部干质量；TDW：总干质量；RSR：根冠比；SPAD值表示叶绿素相对含量。下同。pH 6.24: Acid soil improvement treatment; pH 4.82: Acid stress treatment. ** represents significance at the 0.01 level, *** represents significance at the 0.001 level. RL: Root length; PH: Plant height; RFW: Root fresh weight; AFW: Aboveground fresh weight; TFW: Total fresh weight; RDW: Root dry weight; ADW: Aboveground dry weight; TDW: Total dry weight; RSR: Root shoot ratio; SPAD shows chlorophyll relative content. The same as below.

图1　酸胁迫下油菜苗期各性状的变化

Fig. 1　Changes of each trait in rapeseed seedlings stage under acid stress

表2 2个处理下油菜苗期各性状的变异幅度

Table 2 Variation amplitude of each trait in rapeseed seedling stage under 2 treatments

性状 Traits	酸性土壤改良处理 Acid soil improvement treatment			酸胁迫处理 Acid stress treatment		
	变化范围 Variation range	平均值 Mean	变异系数/% CV	变化范围 Variation range	平均值 Mean	变异系数/% CV
RL/cm	7.38～16.61	10.77	13.65	6.10～13.95	9.67	16.93
PH/cm	1.88～12.72	6.62	33.93	0.65～4.74	2.82	28.25
RFW/g	0.05～0.56	0.21	45.41	0.01～0.26	0.083	48.32
AFW/g	0.85～4.79	2.37	33.73	0.10～1.83	0.63	60.77
TFW/g	0.96～5.18	2.57	32.74	0.13～2.09	0.72	57.74
RDW/g	0.02～0.15	0.06	45.26	0.01～0.07	0.02	55.08
ADW/g	0.06～0.39	0.18	39.07	0.01～0.14	0.05	61.67
TDW/g	0.08～0.48	0.23	33.09	0.02～0.19	0.07	55.19
RSR	0.10～1.96	0.38	57.03	0.08～1.94	0.50	61.01
SPAD	25.10～35.07	28.72	7.39	19.00～29.47	23.83	7.16

2.2 油菜苗期各性状耐酸系数及相关性分析

根据公式(1)计算出113份油菜品种各单项指标的相对值,即耐酸系数。总体上,不同油菜品种在经受酸胁迫后,除根冠比的耐酸系数平均值大于1外,其余各项指标的耐酸系数平均值均小于1,10项指标的变异系数范围为10.089%～78.681%,具体表现为根冠比>根系干质量>根系鲜质量>地上部鲜质量>总鲜质量>地上部干质量>总干质量>株高>根长>SPAD,不同油菜品种各项指标的耐酸系数变化幅度较大(表3),说明在酸胁迫下这些指标在不同品种间的变化趋势不同。由10项指标耐酸系数的相关分析矩阵(图2)可见各项指标间相关关系的方向和强弱,如根长与总干质量、株高与地上部干质量、地上部鲜质量与总干质量存在极显著正相关,各项指标之间的相关性导致它们提供的信息相互重叠,说明各项指标在油菜耐酸胁迫中所起的作用不完全相同,直接利用这些指标的耐酸系数难以全面准确地对油菜耐酸性进行评价,综合各项指标才能更有效地筛选耐酸油菜品种。

2.3 油菜苗期各性状耐酸系数的主成分分析

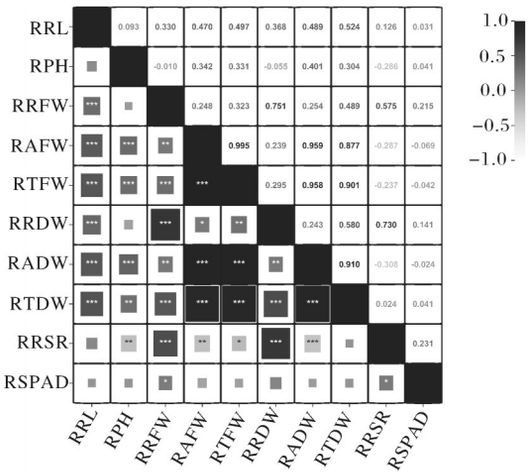
对113份油菜品种10项指标的耐酸系数进行主成分分析,把多个变量转化为少数几个综合指标从而达到浓缩数据的目的。前4个主成分的贡献率分别为46.246%、25.033%、10.077%、7.332%,累积贡献率达到88.688%(表4),基本代表了原始10项指标所携带的绝大部分信息,其余贡献率较小的主成分

表3 油菜苗期各单项指标的耐酸系数

Table 3 Acid resistance coefficient of each single indicator in rapeseed seedling stage

指标 Index	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数/% CV
RRL	1.309	0.507	0.907	0.159	17.580
RPH	1.513	0.232	0.460	0.198	43.031
RRFW	2.333	0.050	0.484	0.319	65.933
RAFW	0.791	0.052	0.272	0.150	55.172
RTFW	0.774	0.057	0.283	0.146	51.418
RRDW	1.641	0.071	0.426	0.318	74.535
RADW	0.834	0.066	0.282	0.142	50.443
RTDW	0.777	0.071	0.300	0.137	45.575
RRSR	7.730	0.188	1.715	1.349	78.681
RSPAD	1.121	0.634	0.834	0.084	10.089

注:RRL:相对根长;RPH:相对株高;RRFW:相对根系鲜质量;RAFW:相对地上部鲜质量;RTFW:相对总鲜质量;RRDW:相对根系干质量;RADW:相对地上部干质量;RTDW:相对总干质量;RRSR:相对根冠比;RSPAD:相对叶绿素相对含量。下同。Note: RRL: Relative root length; RPH: Relative plant height; RRFW: Relative root fresh weight; RAFW: Relative aboveground fresh weight; RTFW: Relative total fresh weight; RRDW: Relative root dry weight; RADW: Relative aboveground dry weight; RTDW: Relative total dry weight; RSR: Relative root shoot ratio; RSPAD: Relative chlorophyll relative content. The same as below.



*表示在0.05水平上显著相关；**表示在0.01水平上显著相关；***表示在0.001水平上显著相关。* represents significant correlation at the 0.05 level; ** represents significant correlation at the 0.01 level; *** represents significant correlation at the 0.001 level.

图2　油菜苗期各单项指标耐酸系数的相关性分析

Fig. 2　Correlation analysis of acid resistance coefficients of each single indicator in rapeseed seedling stage

表4　各单项指标耐酸系数的主成分分析

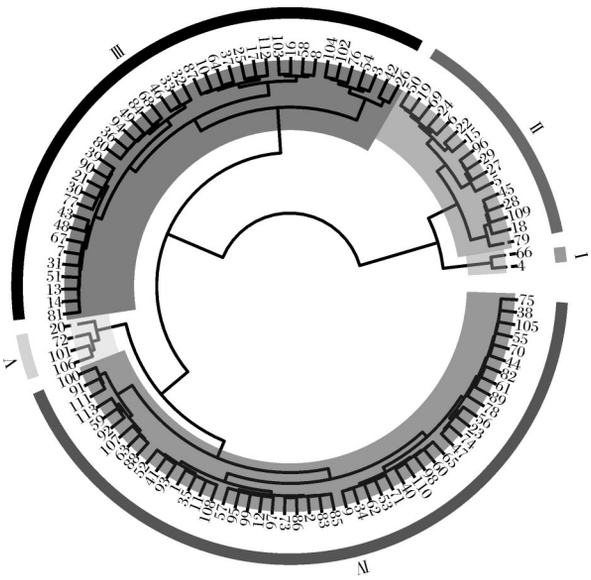
Table 4　Principal component analysis of the acid resistance coefficient of each single trait

项目 Item		主成分 Principle factors			
		1	2	3	4
特征值 Eigenvalue		4.625	2.503	1.008	0.733
贡献率/% Contributive ratio		46.246	25.033	10.077	7.332
累积贡献率/% Cumulative contributive ratio		46.246	71.279	81.357	88.688
特征向量值 Eigenvector value	RRL	0.135	0.067	−0.156	−0.434
	RPH	0.080	−0.150	0.512	0.827
	RRFW	0.201	−0.116	−0.052	−0.105
	RAFW	0.109	0.283	0.035	0.203
	RTFW	0.206	−0.090	−0.045	−0.102
	RRDW	0.203	−0.117	0.016	−0.079
	RADW	0.111	0.312	−0.091	0.249
	RTDW	0.209	0.022	−0.016	0.030
	RRSR	−0.007	0.375	−0.038	0.171
	RSPAD	0.007	0.135	0.831	−0.575

可忽略不计。对第一主成分正向贡献率较高的指标是根长、根系鲜质量、总鲜质量、根系干质量和总干质量，对第二主成分正向贡献率较高的是地上部鲜质量、地上部干质量和根冠比，对第三主成分正向贡献率较高的是SPAD和地上部鲜质量，对第四主成分正向贡献率较高的是株高和地上部干质量。基于此，将10个单项指标转换为4个新的相互独立的综合指标，作为油菜苗期耐酸评价的主要筛选指标，对不同油菜品种耐酸性进行更为客观的分析。

2.4　不同油菜品种耐酸性综合评价

根据不同油菜品种各综合指标值和贡献率，利用隶属函数法计算各综合指标的隶属函数值，再结合各综合指标的权重计算出不同油菜品种的耐酸综合评价值（*D*值）。113份油菜品种*D*值的范围为0.115～0.705，*D*值越小表明耐酸性越弱，*D*值越大表明耐酸性越强（图3）。基于113份油菜品种的*D*值大小采用欧式距离平均联接方法进行聚类分析，将113份油菜品种分为5个类群。



第Ⅰ类属于极耐酸型，第Ⅱ类属于耐酸型，第Ⅲ类属于中间型，第Ⅳ类属于敏感型，第Ⅴ类属于极敏感型。Class Ⅰ belongs to the extremely acid-resistant type, class Ⅱ belongs to the acid-resistant type, class Ⅲ belongs to the intermediate type, class Ⅳ belongs to the sensitive type, class Ⅴ belongs to the extremely sensitive type.

图3　基于*D*值的113份油菜品种耐酸性聚类分析

Fig. 3　Cluster analysis of acid tolerance of 113 rapeseed varieties based on *D* values

第Ⅰ类属于极耐酸型油菜品种，包括杨油6、沣油823共2份种质，*D*值范围为0.670～0.705，占供试品种的1.77%；第Ⅱ类属于耐酸型油菜品种，包括赣油杂9号、华油杂50、中油杂39、浙杂903、湘杂油631等16份种质，*D*值范围为0.462～0.568，占供试品种的14.16%；第Ⅲ类属于中间型油菜品种，包括丰油737、川早油12、庆油8号、华油杂82、常油杂9号等41份种质，*D*值范围为0.309～0.449，占供试品种的36.28%；第Ⅳ类属于敏感型油菜品种，包括金油杂9号、沣油306、润普丰、华油杂655R、金油杂12号等

50份种质，D值范围为0.193～0.300，占供试品种的44.25%；第Ⅴ类属于极敏感型油菜品种，包括浙双8号、12-P24、金油杂6号、鄂垦油629共4份种质，D值范围为0.115～0.172，占供试品种的3.54%。统计5个类群各单项指标的耐酸系数和耐酸综合评价值（D值）（表5），结果显示除根长的耐酸系数在第Ⅰ类群有所降低外，其余各单项指标的的耐酸系数和D值均随着类群级别的降低而减小，其中，各类群间根系干质量、总干质量和D值均存在显著差异。

表5 不同类群的各项指标耐酸系数及综合评价值

Table 5 Acid resistance coefficient of each indicator and comprehensive evaluation values in different groups

指标 Index		类群 Group				
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
耐酸系数 Acid resistance coefficient	RRL	1.009a	1.053a	0.955ab	0.839b	0.628c
	RPH	0.989a	0.498b	0.464bc	0.438bc	0.280c
	RRFW	1.520a	0.834b	0.556c	0.303d	0.099d
	RAFW	0.507a	0.435a	0.301b	0.202bc	0.081c
	RTFW	0.528a	0.452a	0.316b	0.209b	0.083c
	RRDW	1.143a	0.902b	0.474c	0.233d	0.102e
	RADW	0.537a	0.451a	0.303b	0.217b	0.098c
	RTDW	0.590a	0.510b	0.331c	0.211d	0.099e
	RRSR	3.688a	2.533ab	1.913b	1.255b	1.163b
	SPAD	0.879a	0.858a	0.847a	0.817a	0.786a
D值 D value		0.688a	0.506b	0.365c	0.257d	0.147e

注：同行中不同小写字母表示差异达0.05显著水平。Note: Different lowercase letters in same line indicate significant difference at 0.05 level.

2.5 油菜苗期耐酸鉴定指标筛选

不同油菜品种10项指标耐酸系数与D值的灰色关联度、权重和排序如表6所示，关联度和权重从大到小依次为总干质量、根长、SPAD、株高、地上部干质量、总鲜质量、地上部鲜质量、根系干质量、根系鲜质量、根冠比。总体上，各关联度间的差值较小，总干质量、根长和SPAD排序相对靠前，可作为油菜耐酸性初步鉴定的指标。为了进一步分析各项指标耐酸系数与油菜耐酸性之间的关系，建立油菜苗期耐酸评价数字模型，有选择地测定与耐酸综合评价值相关程度高的指标，减少筛选耐酸型油菜品种的工作量。以D值为因变量、各项指标的耐酸系数为自变量，进行逐步回归分析，构建最优回归方程：$D=-0.075+0.0403X_{总干质量}+0.100X_{根系鲜质量}+0.188X_{SPAD}+0.099X_{株高}+0.092X_{根系干质量}$（$R^2=0.982, F=1\,154.562^{***}$）。根据$D$值的最优回归方程可知，总干质量、根系鲜质量、SPAD、株高和根系干质量的耐酸系数可作为鉴定油菜苗期耐酸性的主要指标，此回归方程预测准确度高、效果较好。以上结果表明，在油菜苗期测定总干质量、根系鲜质量、SPAD、株高和根系干质量，利用回归方程计算耐酸综合评价值，可用于评价油菜苗期耐酸性，筛选耐酸油菜品种。

表6 不同油菜品种各项指标耐酸系数与D值的灰色关联度

Table 6 Grey correlation between acid resistance coefficient of each indicator and D value of different rapeseed varieties

指标 Index	关联度 Correlation degree	权重 Weight	排序 Rank
TDW	0.971	0.106	1
RL	0.969	0.105	2
SPAD	0.965	0.104	3
PH	0.956	0.104	4
ADW	0.954	0.103	5
TFW	0.950	0.103	6
AFW	0.944	0.102	7
RDW	0.871	0.094	8
RFW	0.857	0.093	9
RSR	0.785	0.086	10

3 讨 论

土壤酸化已经成为影响作物生长、产量和品质的重要障碍因子之一。研究表明，土壤酸化会导致土壤中Al、Mn等元素毒害加重，以及P、K、Ca、Mg、Mo、B等养分元素缺乏[26]，对作物的生长发育产生复合因素危害，并且其危害程度要远大于单一因素胁迫[27]，因此，仅通过单一的铝毒胁迫试验筛选出的

耐酸作物品种不一定能完全适应酸性土壤。本研究采用盆栽试验设置酸胁迫处理和酸性土壤改良处理对113份油菜品种苗期耐酸性进行了综合评价。与仅通过营养液培养进行的铝毒胁迫处理相比，盆栽试验环境与田间生长环境更接近，筛选出的油菜耐酸品种更适合于田间生产应用。

苗期是油菜养分积累的关键时期，影响着后期的生长发育[28]。在苗期进行酸胁迫处理能够快速有效地鉴定和筛选耐酸油菜品种，还可以减少筛选的工作量和成本。酸胁迫会对油菜的生长产生多方面、多层次的影响，不仅导致其内部多种生理生化特性发生变化，还会影响外部形态和产量品质。前人的研究多采用单项指标评价油菜耐酸铝性[29-33]，但不同品种各单项指标对酸铝胁迫的响应不同，使用单项指标评价油菜耐酸性比较片面。结合主成分分析、隶属函数法和聚类分析的综合评价法能综合多项指标提高评价的可靠性，因而已经广泛应用于小麦[34]、棉花[35]、谷子[36]、燕麦[37]等作物耐瘠抗逆品种的筛选和鉴定。运用综合评价方法既减少了指标间所代表信息的重复，同时考虑到了综合指标的代表性和独立性，能够避免单一指标评价的片面性，更为客观和系统地分析不同油菜品种的耐酸性差异[38]。本研究基于113份油菜品种在2个处理下10项性状指标的测定值，利用主成分分析、隶属函数法对不同油菜品种进行综合评价得出耐酸综合评价值（D值），并通过系统聚类分析将113份油菜品种分为5个类群。由此筛选出2份极耐酸型油菜品种（杨油6、沣油823）和4份极敏感型油菜品种（浙双8号、12-P24、金油杂6号、鄂垦油629），可作为极端材料用于油菜耐酸机制研究，也能够为耐酸油菜田间推广试验提供参考。

筛选较为简易、直观、有效的油菜耐酸鉴定指标，对于耐酸油菜品种的鉴定和选育工作具有重要意义。前人对于油菜耐酸抗铝的研究结果表明许多表型和生理指标与油菜耐酸抗铝相关[39-43]，表型指标包括根长、根系形态结构、株高、生物量等；生理指标包括叶片光合速率、呼吸速率、叶绿素荧光参数，ROS、丙二醛含量，SOD、CAT、APX等抗氧化酶活性等，能够作为油菜耐酸抗铝特性的鉴定指标。本研究为了明确油菜苗期耐酸性最适宜鉴定指标，先通过灰色关联度分析确定10项指标耐性系数与D值的密切关联程度，然后进一步以D值为因变量、各指标的耐酸系数为自变量，进行逐步回归分析，构建最优回归方程筛选出总干质量、根系鲜质量、SPAD、株高、根系干质量5项指标可作为油菜苗期耐酸性快速鉴定指标。在相同逆境条件下，也可通过测定这5项指标利用该回归方程初步评价预测油菜苗期耐酸性，可为油菜耐酸种质鉴定与筛选及品种培育提供参考。但油菜对酸胁迫的响应和耐受机制在不同生育时期可能存在一定差异，因此，本研究筛选的指标在其他生育时期的适用性还有待于进一步验证和研究。

参考文献 References

[1] KRUG E C, FRINK C R. Acid rain on acid soil: a new perspective[J]. Science, 1983, 221(4610): 520-525.

[2] 徐仁扣，李九玉，周世伟，等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. 中国科学院院刊，2018，33(2)：160-167. XU R K, LI J Y, ZHOU S W, et al. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China[J]. Bulletin of Chinese academy of sciences, 2018, 33(2): 160-167 (in Chinese with English abstract).

[3] 孟红旗，刘景，徐明岗，等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的pH演变[J]. 土壤学报，2013，50(6)：1109-1116. MENG H Q, LIU J, XU M G, et al. Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization[J]. Journal of soil sciences, 2013, 50(6): 1109-1116 (in Chinese with English abstract).

[4] MATSUMOTO H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants[J]. International review of cytology, 2000, 200: 1-46.

[5] VON UEXKÜLL H R, MUTERT E. Global extent, development and economic impact of acid soils[J]. Plant and soil, 1995, 171(1): 1-15.

[6] 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 coping with aluminum stress in acidic soil[J]. Chinese journal of applied ecology, 2013, 24(10): 3003-3011 (in Chinese with English abstract).

[7] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤，2015，47(2)：238-244. XU R K. Research progress of soil acidification and its regulation[J]. Soils, 2015, 47(2): 238-244 (in Chinese with English abstract).

[8] 吴道铭，傅友强，于智卫，等. 我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治[J]. 土壤，2013，45(4)：577-584. WU D M, FU Y Q, YU Z W, et al. Present situation and prevention of acidification and aluminum poisoning in red soil in southern China[J]. Soils, 2013, 45(4): 577-584 (in Chinese with English abstract).

[9] CARVER B, OWNBY J. Acid soil tolerance in wheat[J]. Advances in agronomy, 1995, 54: 117-173.

[10] 应小芳,刘鹏,徐根娣,等.大豆耐铝毒基因型筛选及筛选指标的研究[J].中国油料作物学报,2005,27(1):46-51.YING X F,LIU P,XU G D,et al.Screening of soybean genotypes with tolerance to aluminum toxicity and study of the screening indices[J].Chinese journal of oil crop sciences,2005,27(1):46-51 (in Chinese with English abstract).

[11] HU Q,HUA W,YIN Y,et al.Rapeseed research and production in China[J].The crop journal,2017,5(2):127-135.

[12] 闫志浩,胡志华,王士超,等.石灰用量对水稻油菜轮作区土壤酸度、土壤养分及作物生长的影响[J].中国农业科学,2019,52(23):4285-4295.YAN Z H,HU Z H,WANG S C,et al.Effects of lime content on soil acidity,soil nutrients and crop growth in rice-rapeseed rotation system[J].Agricultural sciences in China,2019,52(23):4285-4295 (in Chinese with English abstract).

[13] 周会汶,黄朝平,汪子怡,等.大豆苗期耐铝毒特性综合评价及种质筛选[J].大豆科学,2022,41(6):654-662.ZHOU H W,HUANG C P,WANG Z Y,et al.Comprehensive evaluation and germplasm screening of aluminum toxicity tolerance of soybean at seedling stage[J].Soybean science,2022,41(6):654-662 (in Chinese with English abstract).

[14] 于天一,林建材,孙学武,等.花生幼苗耐酸鉴定指标筛选及综合评价[J].中国油料作物学报,2017,39(4):488-495.YU T Y,LIN J C,SUN X W,et al.Screen of acid resistance evaluation indicators and comprehensive evaluation in peanut seedlings of different genotypes[J].Chinese journal of oil crop sciences,2017,39(4):488-495 (in Chinese with English abstract).

[15] 曾勇军,周庆红,吕伟生,等.土壤酸化对双季早、晚稻产量的影响[J].作物学报,2014,40(5):899-907.ZENG Y J,ZHOU Q H,LÜ W S,et al.Effects of soil acidification on the yield of double season rice[J].Journal of crop science,2014,40(5):899-907 (in Chinese with English abstract).

[16] DAI S F,YAN Z H,LIU D C,et al.Comparative analysis of six *Triticum turgidum* L. subspecies for acid and aluminum tolerance[J].Agricultural sciences in China,2010,9(5):642-650.

[17] JOHNSON J,CARVER B,BALIGAR V.Productivity in great plains acid soils of wheat genotypes selected for aluminium tolerance[J].Plant and soil,1997,188(1):101-106.

[18] 章爱群,贺立源,李德华,等.酸胁迫对不同基因型玉米生长和养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(4):548-553,568.ZHANG A Q,HE L Y,LI D H,et al.Effect of acid-stress on growth and nutrient absorption of different maize genotypes[J].Plant nutrition and fertilizer science,2007,13(4):548-553,568 (in Chinese with English abstract).

[19] 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].Journal of crop science,2019,45(9):1416-1430 (in Chinese with English abstract).

[20] 熊洁,丁戈,陈伦林,等.不同基因型油菜耐铝性及其根系形态对铝胁迫的响应[J].中国油料作物学报,2021,43(4):673-682.XIONG J,DING G,CHEN L L,et al.Aluminum tolerance and root morphology response from different rapeseed cultivars under aluminum stress[J].Chinese journal of oil crop sciences,2021,43(4):673-682 (in Chinese with English abstract).

[21] 梁潇,侯向阳,王艳荣,等.羊草种质资源耐盐碱性综合评价[J].中国草地学报,2019,41(3):1-9.LIANG X,HOU X Y,WANG Y R,et al.Comprehensive evaluation of salt and alkali tolerance of leymus chinensis germplasm [J].Chinese journal of grassland,2019,41(3):1-9 (in Chinese with English abstract).

[22] 张静,高文博,晏林,等.燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及耐盐碱种质筛选[J].作物学报,2023,49(6):1551-1561.ZHANG J,GAO W B,YAN L,et al.Identification and evaluation of salt-alkali tolerance and screening of salt-alkali tolerant germplasm of oat (*Avena sativa* L.)[J].Journal of crop science,2023,49(6):1551-1561 (in Chinese with English abstract).

[23] 陈二影,王润丰,秦岭,等.谷子芽期耐盐碱综合鉴定及评价[J].作物学报,2020,46(10):1591-1604.CHEN E Y,WANG R F,QIN L,et al.Comprehensive identification and evaluation of foxtail millet for saline-alkaline tolerance during germination[J].Journal of crop science,2020,46(10):1591-1604 (in Chinese with English abstract).

[24] 沈倩,张思平,刘瑞华,等.棉花出苗期耐冷综合评价体系的构建及耐冷指标筛选[J].中国农业科学,2022,55(22):4342-4355.SHEN Q,ZHANG S P,LIU R H,et al.Construction of a comprehensive evaluation system and screening of cold tolerance indicators for cold tolerance of cotton at seedling emergence stage[J].Agricultural sciences in China,2022,55(22):4342-4355 (in Chinese with English abstract).

[25] 李丰先,周宇飞,王艺陶,等.高粱品种萌发期耐碱性筛选与综合鉴定[J].中国农业科学,2013,46(9):1762-1771.LI F X,ZHOU Y F,WANG Y T,et al.Screening and identification of *Sorghum* cultivars for alkali tolerance during germination [J].Agricultural sciences in China,2013,46(9):1762-1771 (in Chinese with English abstract).

[26] 于天一,孙秀山,石程仁,等.土壤酸化危害及防治技术研究进展[J].生态学杂志,2014,33(11):3137-3143.YU T Y,SUN X S,SHI C R,et al.Advances in soil acidification hazards and control techniques[J].Chinese journal of ecology,2014,33(11):3137-3143 (in Chinese with English abstract).

[27] 韩配配,秦璐,李银水,等.不同营养元素缺乏对甘蓝型油菜苗期生长和根系形态的影响[J].中国油料作物学报,2016,38(1):88-97.HAN P P,QIN L,LI Y S,et al.Effects of different nutrient deficiencies on growth and root morphological

changes of rapeseed seedlings(*Brassica napus* L.)[J].Chinese journal of oil crop sciences,2016,38(1):88-97 (in Chinese with English abstract).

[28] 刘波,魏全全,鲁剑巍,等.苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜产量及氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):144-153.LIU B,WEI Q Q,LU J W,et al.Effects of waterlogging at the seedling stage and nitrogen application on seed yields and nitrogen use efficiency of direct-sown winter rapeseed(*Brassica napus* L.)[J].Journal of plant nutrition and fertilizer,2017,23(1):144-153 (in Chinese with English abstract).

[29] HEDE A R,SKOVMAND B,RIBAUT J M,et al.Evaluation of aluminium tolerance in a spring rye collection by hydroponic screening[J].Plant breeding,2002,121(3):241-248.

[30] NAVAKODE S,WEIDNER A,LOHWASSER U,et al.Molecular mapping of quantitative trait loci (QTLs) controlling aluminium tolerance in bread wheat[J].Euphytica,2009,166(2):283-290.

[31] FOY C D.Tolerance of barley cultivars to an acid,aluminum-toxic subsoil related to mineral element concentrations in their shoots[J].Journal of plant nutrition,1996,19(10):1361-1380.

[32] ALVIM M N,RAMOS F T,OLIVEIRA D C,et al.Aluminium localization and toxicity symptoms related to root growth inhibition in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J].Journal of biosciences,2012,37(1):1079-1088.

[33] MA J F,NAGAO S,SATO K,et al.Molecular mapping of a gene responsible for Al-activated secretion of citrate in barley [J]. Journal of experimental botany, 2004, 55(401):1335-1341.

[34] 张恒,陈艳琦,任杰莹,等.西南麦区小麦苗期氮高效品种筛选及指标体系构建[J].四川农业大学学报,2022,40(1):10-18,27.ZHANG H,CHEN Y Q,REN J Y,et al.Screening of wheat cultivars with high nitrogen efficiency at seedling stage and construction of index system in southwest wheat region [J].Journal of Sichuan Agricultural University,2022,40(1):10-18,27 (in Chinese with English abstract).

[35] 刘光辉,陈全家,吴鹏昊,等.棉花花铃期抗旱性综合评价及指标筛选[J].植物遗传资源学报,2016,17(1):53-62,69.LIU G H,CHEN Q J,WU P H,et al.Screening and comprehensive evaluation of drought resistance indices of cotton at blossing and boll-forming stages[J].Journal of plant genetic resources,2016,17(1):53-62,69 (in Chinese with English abstract).

[36] 连盈,卢娟,胡成梅,等.低氮胁迫对谷子苗期性状的影响和耐低氮品种的筛选[J].中国生态农业学报,2020,28(4):523-534.LIAN Y,LU J,HU C M,et al.Effects of low nitrogen stress on foxtail millet seedling characteristics and screening of low nitrogen tolerant varieties[J].Chinese journal of eco-agriculture,2020,28(4):523-534 (in Chinese with English abstract).

[37] 付鸾鸿,于崧,于立河,等.不同基因型燕麦萌发期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选[J].作物杂志,2018(6):27-35.FU L H,YU S,YU L H,et al.Analysis of saline-alkaline tolerance and screening of identification indexes of different oat genotypes at the germination stage[J].Crops,2018(6):27-35(in Chinese with English abstract).

[38] 虞晓芬,傅玳.多指标综合评价方法综述[J].统计与决策,2004(11):119-121.YU X F,FU D.Summary of multi-index comprehensive evaluation methods[J].Statistics and decision making, 2004 (11):119-121 (in Chinese with English abstract).

[39] 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.

[40] 王志颖,刘鹏,李锦山,等.铝胁迫下外源有机酸对油菜根系形态及叶绿素荧光特性的影响[J].江苏农业学报,2011,27(4):756-762.WANG Z Y,LIU P,LI J S,et al.Effects of exogenous organic acids on root morphology and chlorophyll fluorescence characteristics of rapeseed under aluminum stress [J].Jiangsu journal of agricultural sciences,2011,27(4):756-762 (in Chinese with English abstract).

[41] 韦冬萍,刘鹏,徐根娣,等.Al胁迫下油菜生物量Al积累及保护酶系统的响应[J].农业环境科学学报,2008,27(6):2351-2356.WEI D P,LIU P,XU G D,et al.Aluminum accumulation in rapeseed biomass and response of protective enzyme system to aluminum stress [J].Journal of agro-environment science,2008,27(6):2351-2356 (in Chinese with English abstract).

[42] QIAN P,SUN R,ALI B,et al.Effects of hydrogen sulfide on growth,antioxidative capacity,and ultrastructural changes in oilseed rape seedlings under aluminum toxicity[J].Journal of plant growth regulation,2014,33(3):526-538.

[43] ALI B,QIAN P,SUN R,et al.Hydrogen sulfide alleviates the aluminum-induced changes in *Brassica napus* as revealed by physiochemical and ultrastructural study of plant[J].Environmental science and pollution research, 2015, 22(4):3068-3081.

Comprehensive evaluation of acid -tolerance and screening of acid-tolerant germplasm in *Brassica napus* at seedling stage

ZHANG Pengchao, ZHANG Wen, HUANG Yidan, RAN Wenhao, XU Fangsen, DING Guangda

College of Resources and Environment/ Microelement Research Center/ Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, *China*

Abstract In order to explore the characteristics of acid tolerance of rapeseed at the seedling stage in acidic soil environment, 113 rapeseed varieties were treated with acid stress and acid soil improvement by pot experiment. 10 traits including root length, plant height, shoot fresh mass, root fresh mass, total fresh mass, shoot dry mass, root dry mass, total dry mass, root/shoot ratio and SPAD were measured at the seedling stage. The acid resistance of different rapeseed varieties were evaluated by correlation analysis, principal component analysis, membership function method, cluster analysis, grey correlation degree and stepwise regression analysis, the acid-resistant evaluation model was established and the acid-tolerant rapeseed varieties were screened. The results showed that 113 rapeseed varieties showed extremely significant differences in 10 traits under two treatments. The coefficient of variation of 10 indicators ranged from 10.09% to 78.68%. The 10 indicators were converted into 4 independent comprehensive indicators, representing 88.688% of the information content of the original indicators. Based on the cluster analysis of the comprehensive evaluation value of acid tolerance (D value) of 113 varieties, they were divided into 5 groups, namely, extremely acid-resistant type (2 samples), acid-resistant type (16 samples), intermediate type (41 samples), sensitive type (50 samples) and extremely sensitive type (4 samples). The optimal regression equation was constructed using D value and 10 indicators: $D=-0.075+0.0403X_{\text{total dry weight}}+0.100X_{\text{root fresh weight}}+0.188X_{\text{SPAD}}+0.099X_{\text{plant height}}+0.092X_{\text{root dry weight}}$ ($R^2=0.982$, $F=1\,154.562^{***}$), and the suitable identification index of acid tolerance in rapeseed at seedling stage was screened out. In conclusion, acid stress could seriously inhibit the growth of rapeseed at the seedling stage, and there were great differences in acid tolerance among different rapeseed varieties. The acid tolerance of rapeseed could be evaluated by measuring total dry mass, root fresh mass, SPAD, plant height, root dry mass and combining with regression equation.

Keywords *Brassica napus*; seedling stage; acidic soil; comprehensive evaluation of acid resistance; acid resistant variety

(责任编辑:边书京)