

陈兴华, 夏雨昕, 李家鑫, 等. 杂交玉米苗期耐铝毒的多元综合评价及指标筛选[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(5): 50-59.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.05.005

杂交玉米苗期耐铝毒的多元综合评价及指标筛选

陈兴华, 夏雨昕, 李家鑫, 丁广大, 徐芳森, 王创

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 为系统评价玉米品种耐铝毒特性并建立高效筛选体系, 对不同地区种植的45份杂交玉米品种采用土壤培养体系进行铝毒胁迫处理, 运用隶属函数法、主成分分析、相关性分析、聚类分析和逐步回归分析等方法综合评估不同玉米种质资源耐铝毒特性并进行耐铝毒玉米品种筛选。在玉米3叶期这一关键生长阶段, 测定茎粗、株高、SPAD值等12项形态生理指标, 并引入铝毒耐性系数(C_{Al})量化铝耐性水平。通过主成分分析降维提取特征指标, 结合隶属函数法计算铝毒耐性综合评价值(D 值), 继而运用系统聚类将品种划分为5个耐性等级(其中, 强耐铝毒型, $D \geq 0.75$; 铝毒极敏感型, $D \leq 0.25$), 筛选出强耐铝毒品种GY14022、EHD1、QKY900和HY1702, 铝毒极敏感品种TR1818、JF86和ZY303等。结果显示, 铝毒胁迫显著抑制玉米幼苗发育($P < 0.001$), 株高和生物量降幅分别达5.37%和17.65%, 各个耐性指标间存在显著相关性($P < 0.05$), 验证了评价体系的可靠性。通过灰色关联度与逐步回归的双重验证, 确立根系鲜质量、总干质量、SPAD值、总鲜质量和根长5个核心筛选指标。综上, 铝毒害胁迫严重抑制了玉米苗期的生长, 不同玉米品种耐酸性差异显著, 筛选出根系鲜质量、总干质量、SPAD、总鲜质量和根长为苗期玉米耐铝毒筛选的关键指标。

关键词 杂交玉米; 铝毒胁迫; 主成分分析; 隶属函数法; 聚类分析; 逐步回归分析

中图分类号 S513; Q945.78 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)05-0050-10

铝(Al)是地壳中最丰富的金属元素, 其含量约占地壳总含量的7%。土壤中的铝通常以无毒的铝氧化物和铝硅酸盐等结合态的形式存在^[1-2], 但在酸性条件下, 尤其当pH低于5.0时, 结合态的铝会释放铝离子(Al^{3+})进入土壤溶液, 成为酸性土壤中作物生长和产量增加的最主要限制因子之一, 同时高浓度的 Al^{3+} 又会进一步抑制作物对氮磷养分的吸收^[3-4]。为应对酸性土壤铝毒害及养分不足的问题, 在日常生产中, 通常将肥料与石灰配施来提高作物产量, 但是石灰和化肥的配施成本较高, 同时石灰仅对土壤表层起作用, 且不可持续, 因此, 筛选耐铝毒害的作物品种是一条经济有效的途径^[5]。

玉米(*Zea mays* L.)是世界上种植面积最大的作物之一, 也是我国年产量最高的粮食作物^[6-7]。研究发现, 玉米对铝毒害比较敏感, 酸性土壤条件会严重抑制玉米的生长^[8]。土壤中活性铝离子会损伤玉米根系的分生组织, 抑制根系生长, 进而影响根系对

水分和养分的运输, 最终导致玉米大幅减产^[9]。研究表明, 不同基因型玉米品种对铝毒的耐受能力具有显著差异^[10-11], 因此, 可以通过遗传育种的方式提高玉米的耐铝毒能力。目前, 关于耐铝毒作物品种筛选的培养方式包括营养液培养和土壤培养。营养液培养体系周期短, 该方法考虑了铝离子对细胞伸长和分裂的影响, 主要以主根和侧根的数量以及相对根伸长率作为指标来衡量耐铝特性^[8, 12-13]。土壤培养体系考虑了铝对植物地上部、根系生长以及养分吸收的综合影响, 相对营养液培养更符合实际情况, 通常以株高、叶色、干质量和养分吸收效率等为主要鉴定指标^[14-15]。但是前人的研究通常以单一的形态或生理指标作为铝毒鉴定指标^[16-17], 而作物耐铝毒是一个复杂的过程, 利用单项指标鉴定作物的耐铝毒能力有很大的局限性。因此, 开发简单、高效的方法评价和筛选耐铝毒玉米种质与品种, 对实际生产及耐铝玉米育种均至关重要。目前, 利用隶属函数法和主成分分析法可以定量计算每个测定指标对作

收稿日期: 2024-08-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1900705-4)

陈兴华, E-mail: cxh19970227@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 王创, E-mail: chuang.wang@mail.hzau.edu.cn

物抗逆能力贡献的权重,利用这些指标的权重确定不同品种的综合抗逆能力,最终确定作物抗逆能力的关键指标和抗逆品种,从而科学地评价各作物品种的抗逆能力^[18-20]。

自Konzak等^[21]于1976年采用溶液-滤纸法进行小麦、大麦、水稻、高粱、玉米、大豆、油菜等作物铝毒耐性品种筛选以来,该方法已经被广泛应用^[22-24],但是该方法筛选的耐铝毒品种与大田试验的一致性较低。因此,亟待开发新的土壤筛选体系及评价指标。本研究对不同地区种植的45份杂交玉米品种采用土壤培养体系进行铝毒胁迫处理,运用隶属函数法、主

成分分析、相关性分析、聚类分析和逐步回归分析等方法综合评估不同玉米种质资源耐铝毒特性并进行耐铝毒玉米品种筛选,以期为解决我国南方酸性土壤铝毒害地区玉米生产限制和提高玉米产量提供参考依据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试玉米种质资源

供试玉米为山东、河南、江苏、安徽、湖北等省份近年来审定或新育成的杂交玉米品种,共45份(表1)。

表 1 供试杂交玉米品种
Table 1 Hybrid maize varieties for trial

品种名称 Varieties names	亲本来源 Parental source	品种名称 Varieties names	亲本来源 Parental source	品种名称 Varieties names	亲本来源 Parental source
鲁单9088 LD9088	LX088×LX03-2	康农玉 KNY108	FL119×FL218	天任1818 TR1818	C06×C07
梦玉908 MY908	DK58-2×京772-2 DK58-2×Jing 772-2	康农20 KN20	FL706×FL598	农大372 ND372	X24621×BA702
津北288 JB288	BX144×BX143	正白1号 ZB1	M128×FNF2	联创839 LC839	CT16691×CT8204
济单7号 JD7	济533×昌7-2 Ji 533×Chang 7-2	隆平243 LP243	LG311×LA7359	百农5号 BN5	BN03×BN09
瑞华玉3号 RHY3	99A573×LH1805	隆平218 LP218	LB03×LJ876	沃玉3号 WY3	M51×VK22-4
瑞华玉288 RHY288	288-1×W5-4	迪卡653 DK653	H3659Z×G4675Z	腾龙1号 TL1	L103×T051
蠡玉16 LY16	953×L91158	圣瑞565 SR565	圣608×圣612 Sheng 608×Sheng 612	兴农单9号 XND9	CZ14×BY13
蠡玉128 LY128	L953×L119	登海682 DH682	DH382×DH361-1	中玉303 ZY303	CN3373×CNH3323
苏玉29 SY29	苏95-1×JS0451 Su 95-1×JS0451	登海605 DH605	DH351×DH382	郑单958 ZD958	郑58×昌7-2
蠡玉8号 KY8	ZM101×L91158	承玉10号 CY10	承系24×853 Chengxi 24×853	东单1311 DD1311	XC2327×XB1621
荃科玉900 QKY900	Q900×Q693	京丰86 JF86	京X027×京21 Jing X027×Jing 21	东单6531 DD6531	PH6WC×83B28
恩禾单1号 EHD1	12ED-27×12FW-07	先玉045 XY045	PH1DP8×PHRKB	东单816 DD816	16F39×16F35
高玉14022 GY14022	KNL1088×FL306	先玉335 XY335	PH6WC×PH4CV	豫禾868 YH868	W525×W020
湘玉10号 XY10	7164×毛白11 7164×MB11	富农玉6号 FNY6	SCL05×FL2764	金玉666 JY666	PCH6323×GD932
福玉18 FY18	西V21×毛白11 Xi V21×MB11	泽玉5号 ZY5	Z05×N601	衡玉1702 HY1702	H1027×HC705

1.2 试验设计

试验于2024年在华中农业大学盆栽场进行。供试土壤为第四纪红色黏土发育而成的坡地红壤,取

自湖北咸宁贺胜桥镇,土壤基础理化性质为pH 5.15、全氮含量0.47 g/kg、有机质含量5.24 g/kg、速效磷含量2.41 mg/kg、速效钾含量110.16 mg/kg、可

交换态铝(Ex-Al)含量为297.37 mg/kg。试验采用育秧盘进行,育秧盘由口径大小为50 mm×50 mm×85 mm的50个穴盘组成,每孔装有土壤100 g,每盘共装土壤5 kg,育秧盘下面放有底座,用于浇水,上方盖有与育秧盘契合的保温盖,用于保温保湿。试验设置2个处理,分别为原始酸性土壤处理(对照处理)和添加氯化铝的酸性土壤处理。其中土壤酸化处理参考廖伯寿等^[25]的方法稍加修改,播种前向每千克原始土壤中添加300 mg氯化铝并充分混匀,添加氯化铝后土壤中活性铝含量为612.67 mg/kg, pH为4.67。提前将2个处理的土壤混匀装盘,浇水,静置3 d。将45份杂交玉米品种的种子分别播在2个处理的土壤上,每穴播2粒种子,出苗后间苗为1株,每个品种重复5次,定期浇水,浇水量保持一致,其他条件也保持一致。

1.3 测定项目和测定方法

在玉米3叶期时,从5个重复中选取3株长势基本一致的幼苗直尺测定株高、主根长,用游标卡尺测定玉米茎粗,目视法对叶片数进行汇总,用日本 MINOLTA 公司生产的叶绿素测定仪 SPAD-502 测定各处理叶片的 SPAD 值,取样后带回实验室测定总鲜质量、地上部鲜质量、根系鲜质量、地上部干质量、根系干质量、总干质量和根冠比。

1.4 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 2023 统计、处理原始数据,运用 IBM SPSS Statistics 21 对处理后的数据进行方差分析、相关性分析、隶属函数分析、主成分分析、聚类分析、灰色关联度分析和逐步回归分析,采用 Origin 2022 pro 制作相关分析图。

参考文献[26-27]进行相关指标计算:

按照公式(1)计算各单项指标性状的铝毒耐性系数(aluminum toxicity tolerance coefficient, C_{Alt})。

$$C_{Alt} = S_{ij} / X_{CKij}, i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式(1)中, S_{ij} 、 X_{CKij} 分别表示第 j 个品种(系)第 i 个指标在铝毒胁迫和对照处理的测定值。

通过对各品种的 C_{Alt} 进行主成分分析,运用公式(2)~(5)计算各品种每个主成分得分的隶属函数值 $\mu(Y_{ij})$ 和综合评价 D 值。

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

$$\text{标准偏差系数 } V_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2 / \bar{Y}_j}, i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\text{每个综合指标的权重 } W_j = V_j / \sum_{j=1}^n V_j, j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

各品种(系)综合指标对铝毒耐性综合评价值

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(Y_{ij}) \times W_j], j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

运用公式(6)~(8),以各指标 C_{Alt} 为比较序列,以 D 值为参考序列进行灰色关联度分析,获得各指标 C_{Alt} 值与 D 值之间的关联度(γ_i)。

$$\xi_i = (\min \Delta_{ij} + p \max \Delta_{ij}) / (\Delta_{ij} + p \max \Delta_{ij}), i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\text{关联度 } \gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \xi_i, i=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$\text{各指标权重系数 } w_i(\gamma) = \gamma_i / \sum_{i=1}^m \gamma_i \Delta_{ij}, i=1, 2, \dots, m \quad (8)$$

其中, $\mu(Y_{ij})$ 为单项指标隶属函数值; Y_{ij} 是第 i 个品种在第 j 个主成分得分; Y_{\min} 、 Y_{\max} 、 V_j 和 \bar{Y}_j 分别表示所有品种第 j 个主成分得分的最小值、最大值、标准偏差系数和平均值; W 表示第 j 个指标在所有主成分得分中的权重; D 表示各品种(系)综合指标对铝毒耐性综合评价值; ξ_i 为关联系数, Δ_{ij} 为品种(系)最优性状与第 j 个品种(系)第 i 个指标的绝对差值, $\min \Delta_{ij}$ 为最小二级绝对差值, $\max \Delta_{ij}$ 为最大二级绝对差值, p 为分辨系数(取0.5); γ_i 为关联度; $w_i(\gamma)$ 为各指标权重系数; m 、 n 分别表示品种数和综合指标个数。

2 结果与分析

2.1 玉米幼苗耐铝毒指标的变异分析

测定生长10 d的铝毒处理和对照处理玉米幼苗茎粗、株高、SPAD、叶片数、根长、总鲜质量、地上部鲜质量、根系鲜质量、总干质量、地上部干质量、根系干质量和根冠比共12个指标,进行数据汇总和分析(表2)。结果显示,铝毒和对照处理的各项指标变异系数(CV)范围分别为10.92%~40.73%和9.97%~55.25%,其中铝毒处理下茎粗、株高、SPAD、叶片数和根长的CV高于对照处理,其他指标则相反。总体来说,铝毒胁迫显著影响了不同玉米品种的生长发育($P < 0.001$),各项表型数据除茎粗外其他11个指标在铝毒胁迫下的均值都低于对照处理。12项指标的平均铝毒耐性系数(Mean C_{Alt})范围为0.87~1.08,其中SPAD的Mean C_{Alt} 最小,根冠比的Mean C_{Alt} 最大(表2)。说明不同的杂交玉米品种具有不同的耐铝性和遗传变异性。

表 2 铝毒胁迫下玉米各性状指标的汇总分析

Table 2 Summary analysis of maize traits under aluminum toxicity stress

指标 Index	铝毒处理 Aluminum toxicity treatment			对照处理 Control treatment			显著性 Sig.	平均铝毒 耐性系数 Mean C _{Alt}
	均值±标准误	变化范围	变异系数/%	均值±标准误	变化范围	变异系数/%		
	Mean±SD	Variation range	CV	Mean±SD	Variation range	CV		
茎粗/cm Stem diameter	2.53±0.02	1.91~ 3.31	10.92	2.50±0.02	1.83~ 3.15	9.97	***	1.02
株高/cm Plant height	12.34±0.27	2.50~ 18.20	25.81	13.04±0.27	6.50~ 19.00	23.57	***	0.98
SPAD值 SPAD value	21.41±0.29	14.50~ 30.40	15.85	24.95±0.31	15.80~ 32.20	14.48	***	0.87
叶片数 Leaf numbers	2.40±2.00	1.00~3.00	27.06	2.59±0.05	1.00~3.00	22.36	***	0.95
根长/cm Root length	15.40±0.37	7.70~ 28.00	28.02	17.15±0.35	9.00~ 28.00	23.71	***	0.93
总鲜质量/g Total fresh weight	1.05±0.03	0.42~ 1.86	31.03	1.24±0.04	0.44~ 2.77	39.78	***	0.95
地上部鲜质量/g Shoot fresh weight	0.54±0.01	0.13~ 0.86	30.53	0.59±0.02	0.10~ 1.03	34.13	***	1.00
根系鲜质量/g Root fresh weight	0.52±0.02	0.13~ 1.10	39.37	0.65±0.03	0.05~ 2.15	56.25	***	1.00
总干质量/g Total dry weight	0.14±0.003	0.04~ 0.23	29.07	0.17±0.01	0.05~ 0.39	38.69	***	0.91
地上部干质量/g Shoot dry weight	0.05±0.001	0.02~ 0.13	31.79	0.05±0.002	0.02~ 0.17	40.43	***	1.07
根系干质量/g Root dry weight	0.09±0.003	0.02~ 0.17	34.09	0.12±0.005	0.02~ 0.29	47.35	***	0.90
根冠比 Root shoot ratio	1.00±0.04	0.16~ 3.05	40.73	1.14±0.05	0.14~ 3.65	51.61	***	1.08

2.2 不同玉米品种耐铝毒的综合评价和分类

对 45 份玉米品种的 12 项指标进行主成分分析,将多个指标数据进行融合,筛选出特征值大于 1.0 的 3 个主成分,对品种进行评价。其中第一综合指标 F1 主要是生物量及其相关指标,贡献率达到 47.44%,主要由总鲜质量、总干质量、根系鲜质量、地上部鲜质量、根系干质量、地上部干质量、叶片数、株高和根长组成;第二综合指标 F2 贡献率为 19.33%,主要由根冠比和根系干质量决定;第三综合指标 F3 主要由 SPAD 决定,贡献率为 10.92%。前 3 个主成分综合贡献率达到 77.69%,包含了 12 项指标的大部分信息(表 3)。

表 3 各项指标主成分的载荷矩阵和方差贡献率

Table 3 Loading matrix and variance contribution of the principal components of each indicator

指标 Index	主成分 Principal component			相应成分权重 Weight of principal component		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
茎粗 Stem diameter	0.35	−0.54	0.04	0.14	−0.35	0.04
株高 Plant height	0.66	−0.5	−0.29	0.28	−0.33	−0.25
SPAD 值 SPAD value	0.15	0.16	0.74	0.06	0.11	0.65
叶片数 Leaf numbers	0.72	−0.32	−0.27	0.30	−0.21	−0.24
根长 Root length	0.56	−0.04	−0.61	0.23	−0.02	−0.53
总鲜质量 Total fresh weight	0.95	0.08	0.13	0.40	0.05	0.11
地上部鲜质量 Shoot fresh weight	0.84	−0.36	0.22	0.35	−0.24	0.19
根系鲜质量 Root fresh weight	0.87	0.37	0.01	0.37	0.24	0.01
总干质量 Total dry weight	0.88	0.33	0.08	0.37	0.21	0.07
地上部干质量 Shoot dry weight	0.72	−0.41	0.34	0.30	−0.27	0.30
根系干质量 Root dry weight	0.75	0.59	0.01	0.32	0.39	0.01
根冠比 Root shoot ratio	0.25	0.87	−0.2	0.10	0.57	−0.17
特征值 Eigen values	5.69	2.32	1.31	—	—	—
贡献率/% Contributive ratio	47.44	19.33	10.92	—	—	—
累计贡献率/% Cumulative contributive ratio	47.44	66.76	77.69	—	—	—
权重 Weight	0.61	0.25	0.14	—	—	—

根据主成分分析结果,分别计算各品种在 3 个主成分的得分 $\mu(Y_{ij})$,利用公式(2)计算各品种主成分得分的隶属函数值,根据公式(5)计算综合评价 D 值(表 4),并进行综合评价排序,D 值越大说明该品

表4 铝毒害下各品种主成分得分 Y_x 、 $\mu(Y_{ij})$ 、 D 值及排名
Table 4 Varieties' principal component score Y_x ,
 $\mu(Y_{ij})$, D values and ranking under aluminum toxicity

品种 Varieties	Y_1	Y_2	Y_3	μ_{Y1}	μ_{Y2}	μ_{Y3}	D 值 D value	排名 Rank
GY14022	1.03	2.76	0.29	0.72	1.00	0.64	0.78	1
QKY900	1.78	-0.24	1.78	0.94	0.28	0.99	0.78	2
EHD1	1.51	0.56	1.19	0.86	0.47	0.85	0.76	3
HY1702	1.68	0.68	-0.05	0.91	0.50	0.57	0.76	4
XY335	1.75	-0.58	0.62	0.93	0.20	0.72	0.72	5
LY16	2.00	-0.41	-2.50	1.00	0.24	0	0.67	6
MY908	1.27	0.19	-0.42	0.79	0.39	0.48	0.65	7
JY666	1.28	-1.05	1.25	0.79	0.09	0.87	0.63	8
DH605	0.60	1.16	0.57	0.60	0.62	0.71	0.62	9
XY045	1.08	-0.53	0.68	0.74	0.21	0.73	0.61	10
YH868	0.53	0.52	1.32	0.58	0.46	0.88	0.59	11
ZB1	0.25	1.41	-0.06	0.50	0.68	0.56	0.55	12
JB288	0.85	-0.40	-0.54	0.67	0.24	0.45	0.53	13
SY29	1.13	-1.14	-1.12	0.75	0.07	0.32	0.52	14
DD816	0.01	1.15	-0.59	0.43	0.61	0.44	0.48	15
DH682	-0.41	1.78	0.06	0.31	0.77	0.59	0.46	16
LP243	-0.28	0.99	0.70	0.35	0.58	0.74	0.46	17
RHY3	0.35	0.35	-1.67	0.53	0.42	0.19	0.46	18
LP218	-0.24	0.95	-0.57	0.36	0.57	0.45	0.42	19
FY18	0.06	-0.64	0.65	0.45	0.19	0.73	0.42	20
LY128	0.21	-0.42	-1.23	0.49	0.24	0.29	0.40	21
JD7	0.31	-0.86	-1.43	0.52	0.13	0.25	0.38	22
KY8	-0.49	0.26	0.47	0.29	0.40	0.69	0.37	23
FL21	-0.26	-0.49	0.50	0.36	0.22	0.69	0.37	24
SR818	-0.50	0.38	-0.07	0.29	0.43	0.56	0.36	25
KNY108	-0.20	-0.15	-0.90	0.37	0.30	0.37	0.36	26
CY10	-0.55	0.22	0.11	0.27	0.39	0.60	0.35	27
DD6531	-0.61	0.09	-0.15	0.26	0.36	0.54	0.32	28
LD9088	-0.45	-0.87	0.56	0.30	0.13	0.71	0.32	29
TL1	-0.70	0.00	0.28	0.23	0.34	0.64	0.32	30
BN5	-0.60	-0.73	0.86	0.26	0.17	0.78	0.31	31
RHY288	-1.51	2.70	-0.73	0	0.99	0.41	0.30	32
WY3	-0.39	-1.22	0.14	0.32	0.05	0.61	0.29	33
XY10	-0.48	-0.10	-1.50	0.29	0.32	0.23	0.29	34
XND9	-0.61	-1.42	1.50	0.26	0	0.92	0.29	35
DK653	-1.51	0.83	1.83	0.00	0.54	1.00	0.27	36
FNY6	-0.84	-0.36	-0.22	0.19	0.25	0.53	0.25	37
DD1311	-1.16	0.38	-0.58	0.10	0.43	0.44	0.23	38
KN20	-1.10	-0.34	0.39	0.12	0.26	0.67	0.23	39
ND372	-0.95	-0.79	0.07	0.16	0.15	0.59	0.22	40
LC839	-0.61	-1.07	-1.31	0.26	0.08	0.27	0.22	41
ZD958	-1.06	-1.22	1.32	0.13	0.05	0.88	0.21	42
JF86	-1.31	0.27	-0.83	0.06	0.40	0.39	0.19	43
ZY303	-0.90	-1.00	-1.07	0.17	0.10	0.33	0.18	44
TR1818	-0.97	-1.14	-0.86	0.15	0.07	0.38	0.16	45

种耐铝毒能力越强,相反,则对铝毒敏感。其中, GY14022、QKY900、EHD1、HY1702 和 XY335 的 D 值大于 0.7, 这些品种具有较强的耐铝毒能力, TR1818、ZY303 和 JF86 的 D 值小于 0.2, 表明这些品种对铝毒极敏感。为了更科学地对不同玉米品种耐铝毒能力进行分类, 通过平均欧氏距离法将 45 个玉米品种的 D 值进行系统聚类, 结果显示 45 份玉米品种可以分为 5 组(图 1)。其中第 I 组是强耐铝毒品种($D \geq 0.76$), 第 II 组属于耐铝毒品种($0.72 \geq D \geq 0.59$), 第 III 组属于中性品种($0.55 \geq D \geq 0.46$), 第 IV 组属于铝毒敏感品种($0.42 \geq D \geq 0.27$), 第 V 组属于铝毒极敏感品种($D \leq 0.25$)。

2.3 耐铝毒鉴定指标的筛选

根据 12 个指标的 C_{Alt} 值与综合评价 D 值进行 Pearson's 相关性分析。结果显示, 除了 RSD 与 D 值无显著相关性外, 其余指标均与 D 值显著正相关($P < 0.05$), 其中 RLN、RTFW、RSFW、RRFW、RTDW、RSDW、RRDW、RRSR 与 D 值呈极显著正相关($P < 0.001$) (图 2)。此外, D 值与 RTFW、RRFW、RTDW 和 RRDW 的 $r \geq 0.90$, 说明以上指标在玉米耐铝毒综合评价体系中具有重要作用。统计分析各单项指标的 C_{Alt} 值与 D 值的灰色关联度、权重和排序(表 5), 结果显示, 以 D 值计算出的 12 项指标的灰色关联度和权重大小依次为: SPAD (8.81%)、根系干质量 (8.69%)、根长 (8.53%)、总干质量 (8.52%)、总鲜质量 (8.41%)、叶片数 (8.39%)、根系鲜质量 (8.32%)、株高 (8.31%)、地上部鲜质量 (8.20%)、茎粗 (8.02%)、根冠比 (8.01%) 和地上部干质量 (7.88%)。为了进一步分析各指标 C_{Alt} 和玉米耐铝毒的关系, 筛选耐铝毒精准鉴定指标, 通过逐步回归分析建立玉米苗期耐铝毒评价的数学模型。将 D 值设为因变量, 各项性状指标设为自变量, 建立了铝毒胁迫下各指标逐步回归模型。 D 值的最优回归模型为: $D = -0.314 + 0.125X_1 + 0.273X_2 + 0.264X_3 + 0.103X_4 + 0.043X_5$ ($R^2 = 0.99$, $F = 898.99$, $P < 0.001$), 公式中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 分别代表根系鲜质量、总干质量、SPAD、总鲜质量和根长的 C_{Alt} 值。因此, 可以利用这 5 个代表性指标鉴定玉米苗期耐铝毒的综合能力。相较于单个指标的分析, 利用多个指标的综合评估方法能更准确地筛选出耐铝毒玉米。

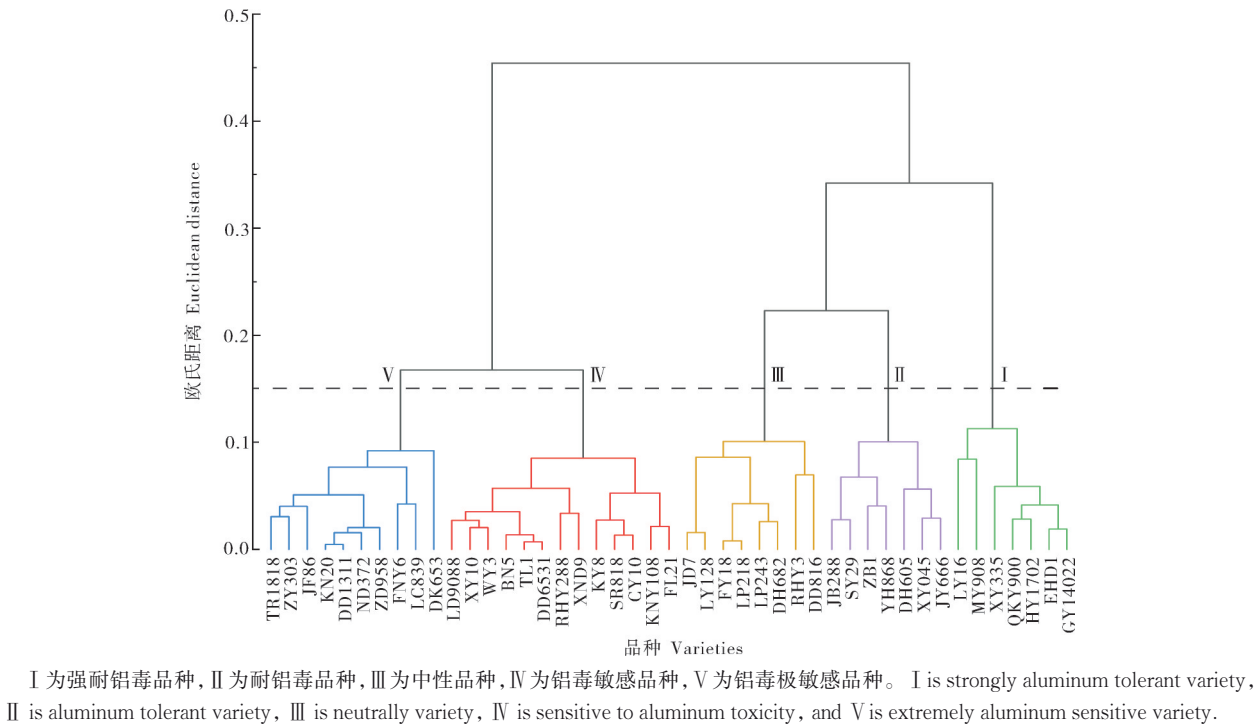
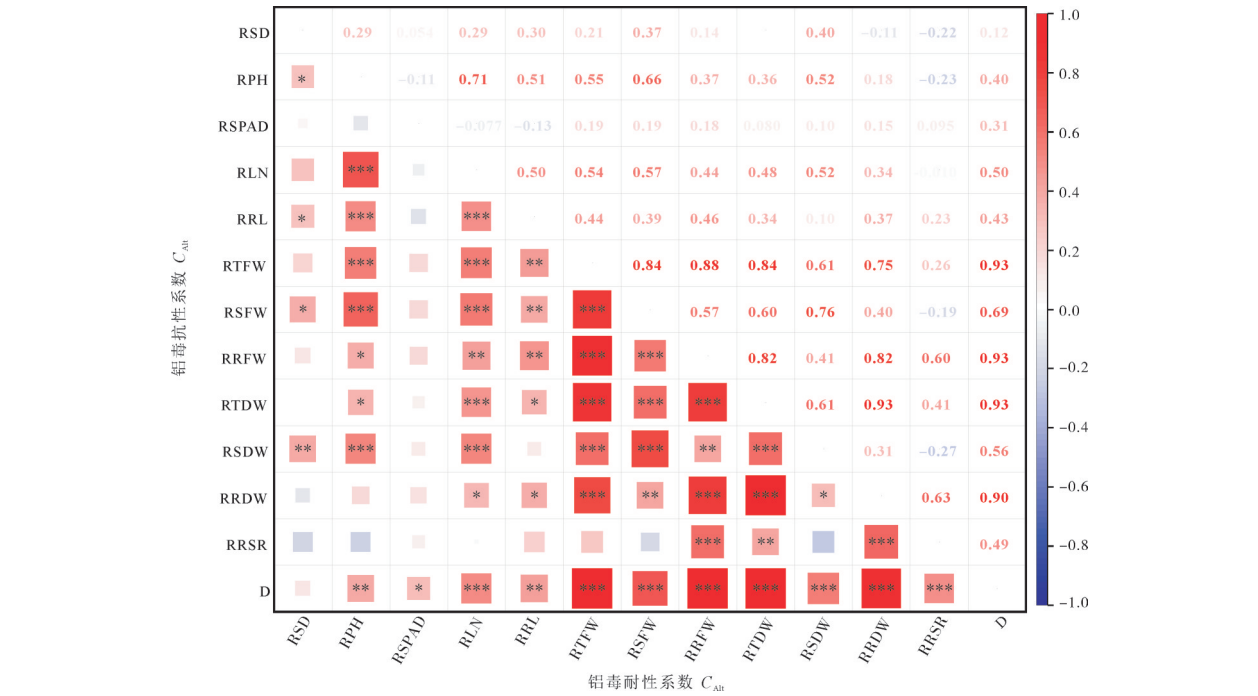


图 1 基于 D 值的各品种耐酸性聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of acid tolerance of each variety based on D -value



RSD: 相对茎粗; RPH: 相对株高; RSPAD: 相对 SPAD 值; RLN: 相对叶片数; RRL: 相对根长; RTFW: 相对总鲜质量; RSFW: 相对地上部鲜质量; RRFW: 相对根系鲜质量; RTDW: 相对总干质量; RSDW: 相对地上部总干质量; RRDW: 相对根系总干质量; RRSR: 相根冠比; *, $P < 0.05$, **, $P < 0.01$, ***, $P < 0.001$ 。RSD: Relative sem diameter; RPH: Relative plant height; RSPAD: Relative SPAD value; RLN: Relative leaf number; RRL: Relative root length; RTFW: Relative total fresh weight; RSFW: Relative shoot fresh weight; RRFW: Relative root fresh weight; RTDW: Relative total dry weight; RSDW: Relative shoot total dry weight; RRDW: Relative root total dry weight; RRSR: Relative root shoot ratio; *, $P < 0.05$, **, $P < 0.01$, ***, $P < 0.001$.

图 2 各单项指标铝毒耐性系数 (C_{Alt}) 与 D 值的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of the coefficient of aluminum toxicity tolerance (C_{Alt}) of individual indicators with D -value

表 5 不同玉米品种各项指标 C_{Alt} 与 D 值的灰色关联度分析

Table 5 Grey correlation analysis of C_{Alt} of different maize varieties with the D value

指标 Index	关联度 Correlation degree	权重/% Weight	排序 Rank
SPAD 值 SPAD value	0.72	8.81	1
根系干质量 Root dry weight	0.71	8.69	2
根长 Root length	0.70	8.53	3
总干质量 Total dry weight	0.70	8.52	4
总鲜质量 Total fresh weight	0.69	8.41	5
叶片数 Leaf numbers	0.69	8.39	6
根系鲜质量 Root fresh weight	0.68	8.32	7
株高 Plant height	0.68	8.31	8
地上部鲜质量 Shoot fresh weight	0.67	8.20	9
茎粗 Stem diameter	0.66	8.02	10
根冠比 Root shoot ratio	0.66	8.01	11
地上部干质量 Shoot dry weight	0.65	7.88	12

3 讨 论

土壤酸化严重限制了作物的生长,铝毒害作为酸性土壤上的主要障碍因子之一,影响全球玉米的产量,而不同基因型玉米对铝毒害的响应存在显著差异,因此,选择合适的耐铝毒品种可以有效缓解铝毒害胁迫、提高玉米产量^[28]。研究发现,不同基因型作物间的铝毒耐性差异随着铝离子浓度的变化而变化^[24],选择合适稳定的环境对筛选至关重要。植物耐铝的筛选方法主要有水培法和土培法,而单一的水培胁迫试验筛选出的品种很难适应土壤环境^[29-30],虽然土壤的综合影响会引起较高的变异系数,但是它更能反映植物在铝毒害土壤中的适应能力。因此,本研究利用 45 份杂交玉米品种在添加 $AlCl_3$ 的酸性土壤上对玉米进行耐铝毒响应特征分析和综合评价。本研究发现,45 份杂交玉米在土壤铝毒耐性方面表现较大的变异性,玉米的生长均受到不同程度的抑制,除茎粗外其他 11 个指标在铝毒胁迫下的均值均低于对照处理,其中 SPAD 的平均铝毒系数最小,根冠比的平均铝毒系数最大(表 2),这与前人在豌豆^[18]、玉米^[23]、油菜^[31]等作物的铝毒害研究结果类似。

大多数植物在幼苗生长阶段易受到铝毒害的影响,而铝毒耐性系数(C_{Alt})作为合理、可靠的耐性指标被广泛应用到作物耐铝毒性状的筛选^[32]。不同的耐铝毒指标,如幼苗干质量、叶色、根系伸长率、地上部生物量,茎叶生长等被广泛应用到玉米苗期耐铝毒评价研究中^[8, 12, 14-15, 33]。但是植物耐铝毒能力受

多种因素影响,单一指标间存在相关性,导致在评价过程中存在指标冗余的现象,难以准确进行品种评价。因此,本研究将玉米的 12 项表型指标通过主成分分析消除各指标间的冗余性,将其划分为 3 项独立的主成分,累计贡献率达 77.69%。其中,第一主成分主要是生物量相关指标,反映了作物长势好坏;第二主成分主要为植物地下部分与地上部分的相关性,反映了铝毒害对地上部和根部的影响;第三主成分主要是光合相关指标,反映了铝毒害影响作物光合能力(表 3)。此外,通过各品种的 3 个主成分得分值计算了综合评价值 D 值,并进行排序和聚类分析,根据其耐铝毒能力将这些品种划分为 5 个不同级别,耐铝毒能力依次减弱。其中第 I 类为强耐铝毒品种($D \geq 0.76$),包括 GY14022、QKY900、EHD1 和 HY1702;第 V 类为铝毒极敏感品种($D \leq 0.25$),包括 TR1818、JF86、ZY303 等(图 1)。因此,利用主成分分析法和隶属函数法计算的 D 值对玉米耐铝毒评价较单一评价指标更能准确反映作物在铝毒害胁迫下的表现,科学评价和筛选耐铝毒玉米品种,且 D 值与研究的各项指标的铝毒耐性系数大部分呈现显著相关性^[23, 34]。

在耐铝毒玉米种质资源的鉴定和选育过程中,筛选简单可靠的鉴定指标同样具有重要意义。关于植物铝毒胁迫下的关键性指标,前人主要通过表型指标和生理指标进行研究,表型指标主要有:根长、侧根数、叶色、生物量、干质量等;生理指标包括:生长速度、光合速率、活性氧含量、有机酸分泌量、丙二醛含量、SOD、POD、APX、CAT 等抗氧化酶活性、叶片和根系铝浓度等^[35-37]。为明确玉米苗期耐铝毒筛选的关键指标,本研究先利用灰色关联度分析初步分析了各指标 C_{Alt} 值与 D 值的密切程度^[38-39],之后分别以 D 值为因变量,12 项表型指标的 C_{Alt} 值为自变量,利用逐步回归方法建立了最优回归模型,进一步确定了玉米耐铝毒的关键指标。基于 D 值的逐步回归分析分别筛选出了根系鲜质量、总干质量、SPAD、总鲜质量和根长等 5 个指标,这些指标可作为玉米苗期耐铝毒鉴定的综合指标。

本研究建立了“表型测定-耐性量化-系统分类-指标优化”四步分析法,筛选出的关键指标组合可实现苗期快速鉴定。但是玉米对铝毒害响应和耐受机制在不同时期可能存在差异,因此本研究的筛选指标在其他生育期的适用性还需进一步探究。

参考文献 References

- [1] KOCHIAN L V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants[J]. Annual review of plant physiology and plant molecular biology, 1995, 46: 237-260.
- [2] GUPTA A, TRIPATHI G, LAHIRI D, et al. Compression molded ultra high molecular weight polyethylene-hydroxyapatite-aluminum oxide-carbon nanotube hybrid composites for hard tissue replacement[J]. Journal of materials science & technology, 2013, 29(6): 514-522.
- [3] 沈仁芳. 铝在土壤—植物中的行为及植物的适应机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008. SHEN R F. Behavior of aluminum in soil-plant and adaptive mechanism of plants[M]. Beijing: Science Press, 2008 (in Chinese).
- [4] 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. Status of red soil acidification and aluminum toxicity in South China and prevention[J]. Soils, 2013, 45(4): 577-584 (in Chinese with English abstract).
- [5] PANDEY S, CEBALLOS H, MAGNAVACA R, et al. Genetics of tolerance to soil acidity in tropical maize[J]. Crop science, 1994, 34(6): 1511-1514.
- [6] NGOUNE TANDZI L, MUTENGWA C S, NGONKEU E L M, et al. Breeding maize for tolerance to acidic soils: a review [J/OL]. Agronomy, 2018, 8(6): 84 [2024-08-15]. <https://doi.org/10.3390/agronomy8060084>.
- [7] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022. National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022 (in Chinese).
- [8] 许玉凤, 曹敏建, 王文元, 等. 玉米耐铝毒的基因型筛选[J]. 玉米科学, 2004, 12(1): 33-35. XU Y F, CAO M J, WANG W Y, et al. Screen on genotypes of aluminum toxicity-tolerance in maize[J]. Journal of maize sciences, 2004, 12(1): 33-35 (in Chinese with English abstract).
- [9] BORRERO J C, PANDEY S, CEBALLOS H, et al. Genetic variances for tolerance to soil acidity in a tropical maize population[J]. Maydica, 1995, 40: 283-288.
- [10] 林咸永, 章永松, 罗安程. 不同小麦基因型耐铝性的差异及筛选方法的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1): 64-70. LIN X Y, ZHANG Y S, LUO A C. Differences of aluminum tolerance on wheat genotypes and its screening techniques[J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2001, 7(1): 64-70 (in Chinese with English abstract).
- [11] 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).
- [12] 邵继锋, 车景, 董晓英, 等. 不同基因型玉米耐铝特性比较[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(1): 61-64. SHAO J F, CHE J, DONG X Y, et al. Comparison of aluminum tolerance of different genotypes of maize[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2015, 43(1): 61-64 (in Chinese).
- [13] 鲍学敏, 赵学强, 肖作义, 等. 铝对不同耐铝水稻品种根系生长和养分吸收的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(12): 2157-2162. BAO X M, ZHAO X Q, XIAO Z Y, et al. Effects of aluminum on the root growth and nutrient uptake of two rice varieties with different aluminum tolerances[J]. Plant physiology journal, 2015, 51(12): 2157-2162 (in Chinese with English abstract).
- [14] 贺立源, 徐尚忠, 李建生. 玉米自交系苗期耐酸的生物学和营养学特性[J]. 作物学报, 2000, 26(2): 205-209. HE L Y, XU S Z, LI J S. Biologic and nutrient characters of maize for tolerance to acid soil at seedling stage[J]. Acta agronomica sinica, 2000, 26(2): 205-209 (in Chinese with English abstract).
- [15] 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).
- [16] NAVA KODE S, WEIDNER A, LOHWASSER U, et al. Molecular mapping of quantitative trait loci (QTLs) controlling aluminum tolerance in bread wheat[J]. Euphytica, 2009, 166(2): 283-290.
- [17] ALVIM M N, RAMOS F T, OLIVEIRA D C, et al. Aluminum localization and toxicity symptoms related to root growth inhibition in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. Journal of bio-sciences, 2012, 37(1): 1079-1088.
- [18] 崔翠, 程闯, 赵愉风, 等. 52份豌豆种质萌发期耐铝毒性的综合评价与筛选[J]. 作物学报, 2019, 45(5): 798-805. CUI C, CHENG C, ZHAO Y F, et al. Screening and comprehensive evaluation of aluminum-toxicity tolerance during germination stage in 52 varieties (lines) of pea germplasm[J]. Acta agronomica sinica, 2019, 45(5): 798-805 (in Chinese with English abstract).
- [19] 白金顺, 王雪翠, 王艳秋. 箭筈豌豆种质资源萌发期抗旱指标筛选及抗旱性评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2253-2263. BAI J S, WANG X C, WANG Y Q. Screening of drought-resistance index and drought-resistance evaluation of common vetch (*Vicia sativa* L.) germplasms at germination stage[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2020, 26(12): 2253-2263 (in Chinese with English abstract).
- [20] 胡树平, 苏治军, 于晓芳, 等. 玉米自交系抗旱相关性状的主成分分析与模糊聚类[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(6): 81-88. HU S P, SU Z J, YU X F. Principal component analysis and fuzzy clustering on drought tolerance related traits of maize

- inbred lines[J].Agricultural research in the arid areas,2016,34(6):81-88 (in Chinese with English abstract).
- [21] KONZAK C F, POLLE E, KITTRICK J A.Screening several crops for aluminum tolerance [M].Maryland: Cornell University Press,1976:311-327.
- [22] 武建新,张志飞,张鹤山,等.白三叶耐酸铝种质资源筛选研究[J].草地学报,2018,26(2):497-504.WU J X,ZHANG Z F,ZHANG H S,et al.Study on the screening germplasm resources of acid-aluminum tolerance in white clover[J].Acta agrestia sinica,2018,26(2):497-504 (in Chinese with English abstract).
- [23] DING J Z,YANG W,HU X Q,et al.Large-scale evaluation of aluminum tolerance in maize (*Zea mays* L.) accessions[J].Theoretical and experimental plant physiology,2022,34(2):155-169.
- [24] ROSADO R D S,FIALHO G S,DIAS B A S,et al.Screening *Jatropha* genotypes for aluminum tolerance using the solution-paper method[J].Semina:ciências agrárias,2012,33(4):1273-1280.
- [25] 廖伯寿,周蓉,雷永,等.花生高产种质的耐铝毒能力评价[J].中国油料作物学报,2000,22(1):38-42.LIAO B S,ZHOU R,LEI Y,et al.Evaluation of tolerance to aluminum toxicity in high yielding groundnut genotypes[J].Chinese journal of oil crop sciences,2000,22(1):38-42(in Chinese with English abstract).
- [26] 马帅国,田蓉蓉,胡慧,等.粳稻种质资源苗期耐盐性综合评价与筛选[J].植物遗传资源学报,2020,21(5):1089-1101.MA S G,TIAN R R,HU H,et al.Comprehensive evaluation and selection of rice (*Oryza sativa* Japonica) germplasm for saline tolerance at seedling stage[J].Journal of plant genetic resources,2020,21(5):1089-1101 (in Chinese with English abstract).
- [27] WANG G Y,AHMAD S,WANG Y,et al.Multivariate analysis compares and evaluates drought and flooding tolerances of maize germplasm [J]. Plant physiology, 2023, 193 (1) : 339-355.
- [28] PENNING B W,HUNTER C T,TAYENGWA R,et al.Genetic resources for maize cell wall biology[J].Plant physiology,2009,151(4):1703-1728.
- [29] 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).
- [30] 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).
- [31] 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 *Brassica napus* [J].Acta agronomica sinica,2019,45(9):1416-1430 (in Chinese with English abstract).
- [32] 田蕾,陈亚萍,刘俊,等.粳稻种质资源芽期耐盐性综合评价与筛选[J].中国水稻科学,2017,31(6):631-642.TIAN L,CHEN Y P,LIU J,et al.Comprehensive evaluation and selection of rice (*Oryza sativa* Japonica) germplasm for saline tolerance at germination stage [J].Chinese journal of rice science,2017,31(6):631-642 (in Chinese with English abstract).
- [33] 李德华,贺立源,李建生,等.不同基因型玉米根系对铝胁迫反应的差异研究[J].华中农业大学学报,2003,22(4):365-369.LI D H,HE L Y,LI J S,et al.The response of maize roots with different genotypes to Al-stress[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2003,22(4):365-369 (in Chinese with English abstract)..
- [34] SUN F L,CHEN Q,CHEN Q J,et al. Screening of key drought tolerance indices for cotton at the flowering and boll setting stage using the dimension reduction method [J/OL].Frontiers in plant science,2021,12:619926 [2024-08-15].<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.619926>.
- [35] 李德华,贺立源,刘武定.耐铝的和对铝敏感的玉米自交系根系的有机酸分泌[J].植物生理与分子生物学学报,2003,29(2):114-120.LI D H,HE L Y,LIU W D.Organic acid secretion from roots in the Al-tolerant and Al-sensitive maize inbred lines[J].Acta photophysiological sinica,2003,29(2):114-120 (in Chinese with English abstract).
- [36] 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 of aluminum toxicity tolerance and screening of germplasm during seedling stage in soybean [J].Soybean science,2022,41(6):654-662 (in Chinese with English abstract).
- [37] KOCHIAN L V,HOEKENGA O A,PINEROS 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.
- [38] 王正航,武仙山,昌小平,等.小麦旗叶叶绿素含量及荧光动力学参数与产量的灰色关联度分析[J].作物学报,2010,36(2):217-227.WANG Z H,WU X S,CHANG X P,et al.Chlorophyll content and chlorophyll fluorescence kinetics parameters of flag leaf and their gray relational grade with yield in wheat[J].Acta agronomica sinica,2010,36(2):217-227 (in Chinese with English abstract).
- [39] 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.ZHANG P C,ZHANG W,HUANG Y D,et al.Compre-

hensive evaluation of acid-tolerance and screening of acid-tolerant germplasm in *Brassica napus* at seedling stage [J]. Jour-

nal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(6): 164-174 (in Chinese with English abstract).

Comprehensive multivariate evaluation and screening of indicators for aluminum toxicity tolerance in hybrid maize seedlings

CHEN Xinghua, XIA Yuxin, LI Jiaxin, DING Guangda, XU Fangsen, WANG Chuang

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 To systematically evaluate the Al-toxicity of maize varieties and to establish an efficient screening system, 45 hybrid maize varieties were selected to conduct Al-toxicity stress trials in this study. The experiment was designed in a dual-treatment mode: basic acidic soil (pH 5.15) and high-aluminum-toxic acidic soil to reveal the resistance mechanism of the varieties by comparing the differences in stress. During the critical growth stage of maize at the 3-leaf stage, the research team systematically measured 12 morpho-physiological indexes, including stem diameter, plant height, and SPAD value, and quantified the level of resistance by introducing the aluminum toxicity tolerance coefficient (C_{Al}). In this study, we used a multidimensional analysis method to construct an evaluation system, firstly, we extracted the characteristic indexes by dimensional reduction of principal component analysis, combined with the affiliation function method to calculate the comprehensive resistance evaluation value (D value), and then we used the systematic clustering to classify the varieties into five resistance levels (among which extremely resistant $D \geq 0.75$, extremely sensitive $D \leq 0.25$), and then we screened out the extremely resistant varieties of aluminum toxicity, such as GY14022, EHD1, QKY900, and HY1702, and the aluminum toxicity resistant varieties of GY14022, EHD1, QKY900 and HY1702, and the aluminum toxicity resistant varieties of GY14022, EHD1, QKY900 and HY1702. HY1702, and extremely sensitive varieties TR1818, JF86 and ZY303. It was found that aluminum stress significantly inhibited the development of maize seedlings ($P < 0.001$), the plant height and biomass decreased by 5.37% and 17.65%, respectively, and there was a significant correlation between the resistance indexes ($P < 0.05$), which verified the reliability of the evaluation system. Finally, through the double validation of gray correlation and stepwise regression, the five core screening indexes of root fresh weight, total dry weight, SPAD value, total fresh weight and root length were confirmed. In conclusion, aluminum toxicity stress severely inhibited the growth of maize at seedling stage, and there were significant differences in acid tolerance among different maize varieties. The comprehensive analysis screened root fresh weight, total dry weight, SPAD, total fresh weight and root length as the key indexes for screening of aluminum toxicity resistance of maize at seedling stage.

Keywords hybrid maize; aluminum toxicity stress; principal component analysis; affiliation function method; cluster analysis; stepwise regression analysis

(责任编辑: 张志钰)