

## 芦笋种子萌发期耐铝毒特性综合评价及筛选

叶艳英, 张冰冰, 周劲松, 汤泳萍, 罗绍春, 尹玉玲\*

(江西省农业科学院蔬菜花卉研究所, 南昌 330200)

**摘要:** 为明确不同芦笋品种(系)的耐铝程度, 为抗铝毒机理研究和品种选育提供参考, 以 25 个芦笋品种(系)为材料, 用  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度的铝溶液进行胁迫处理, 通过测定发芽率、发芽势、鲜重、胚根长、胚芽长等 10 个指标, 采用平均隶属函数值、主成分分析、综合评价和聚类分析等方法, 综合评价芦笋种子萌发期耐铝毒性, 并筛选萌发期耐铝毒芦笋种质。基于综合评价聚类分析, 将 25 个芦笋品种(系)分为 5 个耐性级别: 其中, 第 I 级含 4 份, 为强耐铝毒品种(系); 第 II 级含 4 份, 为耐铝品种(系); 第 III 级含 4 份, 为中等耐铝品种(系); 第 IV 级含 11 份为铝敏感品种(系); 第 V 级含 2 份, 为铝毒极敏感品种(系)。通过综合评价和聚类分析, 筛选出芦笋种子萌发期耐铝毒性极强的品种(系) UC157(F<sub>1</sub>) 和 JX2123, 可作为芦笋耐铝毒性育种和耐性机制研究的重要资源。

**关键词:** 芦笋; 铝胁迫; 种子萌发; 综合评价

中图分类号: S644.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2022)06-0906-07

### Comprehensive evaluation and screening of tolerance to aluminum toxicity at germination stage in asparagus (*Asparagus officinalis* L.)

YE Yanying, ZHANG Bingbing, ZHOU Jinsong, TANG Yongping, LUO Shaochun, YIN Yuling  
(Institute of Vegetables and Flowers, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200)

**Abstract:** In order to clarify the tolerance degree to aluminum toxicity in different asparagus (*Asparagus officinalis* L.) varieties (lines), and provide a reference for understanding resistance mechanism to aluminum toxicity and variety breeding, seeds from 25 asparagus varieties (lines) were treated with a concentration of  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  aluminum solution. Ten indexes were measured such as germination rate, germination energy, fresh weight, length of root and bud. Comprehensive assessment of tolerance to aluminum-toxicity at germination stage of asparagus was conducted by average membership function value, principal component analysis, clustering analysis and comprehensive evaluation method. Based on the assessment values, 25 asparagus varieties (lines) were classified into 5 groups: group I, including 4 varieties(lines) as the highest tolerance to aluminum toxicity; group II, including 4 varieties(lines) as aluminum resistant; group III, including 4 varieties (lines) as medium aluminum resistant; group IV, including 11 varieties (lines) as aluminum sensitive; group V, including 2 varieties (lines) as extremely sensitive to aluminum toxicity. Moreover, two asparagus varieties (lines), UC157(F<sub>1</sub>) and JX2123 appeared the highest tolerance to aluminum toxicity at seed germination stage, which can be used as important germplasm resources for breeding and mechanism study on aluminum tolerance in asparagus.

**Key words:** *Asparagus officinalis* L.; aluminum stress; seed germination; comprehensive evaluation

在我国, 酸性土壤主要分布于长江中下游及其以南的广大区域, 占我国耕地面积的五分之一<sup>[1]</sup>。当土壤 pH 值下降到 5.5 以下时, 土壤中铝逐渐解

离并以离子态释放到溶液中<sup>[2-3]</sup>。一般酸性土壤铝浓度为  $10 \sim 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而微摩尔级的铝就可能导致植物根系生长受阻以及影响氮、磷等营养物质的

收稿日期: 2022-01-04

基金项目: 江西省重点研发计划项目(20202BBFL63008), 江西省蔬菜产业技术体系建设专项 (JXARS-06)和江西现代农业科研协同创新专项项目(JXXTCXQN201908, JXXTCX201904-03) 共同资助。

作者简介: 叶艳英, 助理研究员。E-mail: yyy860925@126.com

\* 通信作者: 尹玉玲, 博士, 副研究员。E-mail: 20801017@qq.com

吸收效率, 从而影响植物的生长及产量<sup>[4-5]</sup>。

芦笋 (*Asparagus officinalis* L.) 又名石刁柏, 其嫩茎质嫩味美, 风味独特, 是一种深受消费者喜爱的营养保健型高档蔬菜, 被誉为“蔬菜之王”<sup>[6-7]</sup>。芦笋富含甾体皂苷、黄酮类、维生素、膳食纤维及植物多糖等多种活性成分, 具有很好的药用价值和保健功能<sup>[8-9]</sup>。近年来随着对芦笋产品需求的不断增加, 国内芦笋产业迅速发展, 2020 年全国芦笋种植面积达 135 万亩。虽芦笋对于酸碱度的适应性较强, pH5.5~7.8 的土壤均可进行栽培<sup>[10]</sup>。但 pH<5.5 时, 芦笋根系发育不良, 且品质下降。前期研究发现铝胁迫下, 芦笋种子萌发幼苗生长受到抑制 (文章已录用)。铝胁迫可能是酸性土壤条件下芦笋长势下降的原因之一。

多种作物通过苗期等耐铝性鉴定及综合评价手段筛选出耐铝种质资源。熊洁等<sup>[11]</sup>对 81 个不同基因型的油菜品种进行耐铝性综合评价, 筛选出耐铝性较强的品种 6 个; 舒畅<sup>[12]</sup>对 45 个基因型不同的水稻进行苗期耐铝性鉴定, 筛选出相对较强耐铝材料 1 份; 刘武<sup>[13]</sup>对 141 个玉米自交系进行抗铝鉴定, 发现 25 个自交系为铝耐受型; 齐波等<sup>[14]</sup>通过对 509 份大豆种质资源进行苗期耐铝毒性鉴定, 筛选出 15 份强耐铝毒资源; 李颜冰<sup>[15]</sup>对 20 个花生品种进行萌芽期耐铝性鉴定, 鉴定出高度耐铝性花生品种粤油 7 号 1 个。

芦笋种质资源中存在耐盐性芦笋材料<sup>[16-18]</sup>, 而对芦笋种质资源的耐铝性评价研究尚鲜见报道。芦笋为多年生蔬菜, 选择耐铝品种对芦笋整个生长期产量和品质均有积极影响。该研究通过溶液滤纸法模拟酸性土壤铝毒对芦笋种子发芽势、发芽率、发芽指数、鲜重、胚根长、胚芽长等相关性状的影响, 采用隶属函数、主成分分析、聚类分析等综合评价方法, 筛选萌芽期铝毒耐性较强的芦笋种质, 旨在为选育耐铝毒芦笋品种提供参考依据, 对开发利用酸性土壤促进芦笋产业可持续发展提供理论支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

25 份芦笋材料名称、来源见表 1。种子由江西省农业科学院蔬菜花卉研究所保存。

### 1.2 试验方法

在前期不同铝浓度对芦笋萌发胁迫的研究基础上, 本试验设置 500 mg·L<sup>-1</sup>(T) 浓度的铝胁迫 (AlCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O, pH = 4.5) 和对照 (清水) 2 个处理对 25 个芦笋品种 (系) 种子进行试验; 选择饱满、大小一致的种子进行铝毒胁迫试验。将种子于 500

倍多菌灵溶液中处理 30 min, 然后再用清水洗 3~4 次, 每次清洗 2~3 min, 并去除漂浮、软化等劣质种子。将种子摆放在铺有滤纸的培养皿中 ( $\Phi = 90$  mm), 每皿 30 粒, 处理组分别加入 10 mL Al<sup>3+</sup> 溶液, 对照 (CK) 加等量清水, 处理及对照均设置 3 次重复。将培养皿放在光照培养箱中, 温度为 (26±1)°C, 日/夜光照条件为 16 h/8 h; 前期每天清洗种子, 更换培养皿中滤纸并补充 10 mL 相应溶液; 等露白后, 为避免胚根断裂, 不清洗种子, 只定量补充相应溶液, 逐日观察记载发芽种子数, 萌发后铝溶液处理 7 d, 调查根长和芽长, 用吸水纸吸干胚根和胚芽上的水分, 用万分之一分析天平称量其鲜重。

### 1.3 各指标计算方法和数据统计分析

发芽势  $GE(\%) = (\text{种子发芽数达到高峰时的发芽数量} / \text{总种子数}) \times 100\%$

发芽率  $GR(\%) = (\text{试验结束时萌发的种子数} / \text{总种子数}) \times 100\%$

相对发芽率  $RGR(\%) = (\text{处理组发芽率} / \text{对照组发芽率}) \times 100\%$

相对发芽势  $RGE(\%) = (\text{处理组发芽势} / \text{对照组发芽势}) \times 100\%$

发芽指数  $GI = \sum(Gt / Dt)$  (Gt 为不同时间 (t, d) 的发芽数量, Dt 为相应的发芽试验时间/d)

相对发芽指数  $RGI(\%) = \text{处理组发芽指数} / \text{对照组发芽指数} \times 100\%$

活力指数  $VI = \text{发芽指数} \times \text{胚根长}$

相对活力指数  $RVI(\%) = \text{处理组活力指数} / \text{对照组活力指数} \times 100\%$

相对胚根长  $RBL(\%) = \text{处理组胚根长} / \text{对照组胚根长} \times 100\%$

相对胚芽长  $RRL(\%) = \text{处理组胚芽长} / \text{对照组胚芽长} \times 100\%$

相对苗鲜重  $RFW(\%) = \text{处理组苗鲜重} / \text{对照组苗鲜重} \times 100\%$

胚根毒害指数  $RTI(\%) = (\text{对照组胚根长} - \text{处理组胚根长}) / \text{对照组胚根长} \times 100\%$

胚芽毒害指数  $BTI(\%) = (\text{对照组胚芽长} - \text{处理组胚芽长}) / \text{对照组胚芽长} \times 100\%$

苗鲜重毒害指数  $RFI(\%) = (\text{对照组苗鲜重} - \text{处理组苗鲜重}) / \text{对照组苗鲜重} \times 100\%$

耐铝系数 = 处理组的指标值 / 对照组的指标值

隶属函数值:  $X = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$

(式中: X 表示某一项评价指标的测定值,  $X_{\min}$  和  $X_{\max}$  分别为所有品种此评价指标值的最小值和最大值。如果此评价指标与目标性状呈负相关, 则可通

过反隶属函数进行计算, 计算公式如下:  $X = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$

所有测量数据最后保留两位小数, 数据整理与分析主要通过 Microsoft Excel 2013、SPSS 25.0 计算完成。

表 1 材料和来源  
Table 1 Materials and origins

编号	材料名称	来源	编号	材料名称	来源
C01	京绿芦 3 号	北京	C14	潍 2	山东
C02	京绿芦 1 号	北京	C15	潍 4	山东
C03	井冈 111	江西	C16	潍 12	山东
C04	井冈红	江西	C17	T <sub>2</sub>	山东
C05	格兰德 (F <sub>1</sub> )	美国	C18	JX2015	江西
C06	冠军	山东	C19	JX2123	江西
C07	鲁芦笋 7 号	山东	C20	JX2113	江西
C08	阿特拉斯 (F <sub>1</sub> )	美国	C21	JX2122	江西
C09	UC157(F <sub>1</sub> )	美国	C22	JX2108	江西
C10	沃克先锋 (F <sub>1</sub> )	山东	C23	JX2023	江西
C11	阿波罗 (F <sub>1</sub> )	美国	C24	JX2103	江西
C12	佳芦 1 号	杭州	C25	JX2114	江西
C13	硕丰	山东			

## 2 结果与分析

### 2.1 铝胁迫对发芽势、发芽率、发芽指数与活力指数的影响

由表 2 可知, 25 个芦笋品种(系)相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数和相对活力指数均值分别为 103.00%、97.00%、106.30%和 44.50%, 相对发芽势和相对发芽指数比对照分别增加 3.00%和 6.30%。发芽率与活力指数分别比对照减少了 3.00%和 55.50%。种子发芽势、发芽率和发芽指数在铝胁迫处理下对芦笋种子萌发影响较小; 不同品种间的种子发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数的相对值存在差异, 相对发芽势变化范围为 37.14% ~ 168.20%, 变异系数为 25.90%; 相对发芽率变化范围为 67.82% ~ 115.80%, 变异系数为 10.40%; 相对发芽指数变化范围为 38.80% ~ 130.40%, 变异系数为 17.70%; 相对活力指数变化范围为 12.23% ~ 100.20%, 变异系数为 43.70%。

### 2.2 铝胁迫对胚根长、胚芽长和苗鲜重的影响

由表 2 可知, 铝胁迫下, 25 个芦笋品种(系)萌发期, 胚根长、胚芽长和苗鲜重较 CK 均有所降低, 但降低幅度不同。25 个芦笋品种(系)相对胚根长的变化范围为 10.72% ~ 83.67%, 变异系数为 40.61%; 相对胚芽长的变化范围为 3.36% ~ 84.26%, 变异系数为 45.73%; 相对苗鲜重的变化范围为 43.18% ~ 86.77%, 变异系数为 12.78%。在铝胁迫下, 各性状的铝毒害表现出不同的变化。胚根毒害指数的变化范围为 16.33% ~ 89.28%, 变异系数为 29.88%; 胚芽毒害指数的变化范围为 15.74% ~ 96.64%, 变异系数为 40.74%; 苗鲜重毒害指数的变

化范围为 43.18% ~ 86.77%, 变异系数为 12.78%。

### 2.3 隶属函数分析

通过隶属函数计算结果(表 3)可知: 25 个芦笋品种(系)平均隶属函数值介于 0.204 ~ 0.794 之间。C01 等 8 个品种(系)的隶属函数值在 0.658 ~ 0.794 之间, 均大于 0.6, 分别为 C01、C03、C05、C07、C09、C10、C19 和 C21, 其中 C09 的相对胚根长、相对胚芽长和相对苗鲜重的隶属函数值均大于 0.8, 平均隶属函数值最高, 整体表现为耐铝毒性最好, 综合排名第 1; C19 平均隶属函数值为 0.793, 排名第 2。C16 等 4 个品系的隶属函数值在 0.531 ~ 0.575 之间, 大于中值 0.5, 属于中等耐铝品种(系)。C02 等 11 个品种(系)的隶属函数值在 0.497 ~ 0.402 之间, 小于中值 0.5, 所以属于对铝毒较敏感品种(系)。C17、C18 平均隶属函数值分别为 0.204 和 0.269, 属于对铝毒极敏感品种(系), 胚根与胚芽生长受铝毒影响严重。

### 2.4 性状的相关性分析

从各性状耐铝系数相关系数矩阵(表 4)可知, 各性状之间存在一定的相关性。其中, 相对苗鲜重与相对胚芽长、相对胚根长、相对活力指数呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.748、0.636 和 0.719; 与胚芽毒害指数、胚根毒害指数呈极显著负相关, 相关系数分别为 -0.748 和 -0.636。相对胚芽长与相对胚根长、相对活力指数呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.552 和 0.617。相对胚根长与相对活力指数呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.885。苗鲜重毒害指数与胚芽毒害指数、胚根毒害指数呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.748 和 0.636, 与相对活力指数呈极显著负相关, 相关系数分别为 -0.719。胚

芽毒害指数与胚根毒害指数呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.552, 与相对活力指数呈极显著负相关, 相关系数分别为 -0.617。相对发芽率与相对发芽指数呈极显著正相关, 与相对活力指数呈显著正相

关, 相关系数分别为 0.734 和 0.415。不同程度的相关性反映了 10 个性状指标信息存在一定程度上的重叠, 为了得到综合评价的客观的结果, 因此有必要通过主成分分析对 10 项指标进行简化综合分析。

表 2 不同芦笋品种(系)铝胁迫下的性状指标

Table 2 Traits of different asparagus varieties (lines) under aluminum stress

编号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$
C01	0.775	0.715	0.620	0.225	0.285	0.380	0.921	0.903	1.095	0.678
C02	0.662	0.544	0.414	0.338	0.456	0.586	0.818	0.571	0.998	0.414
C03	0.757	0.843	0.746	0.243	0.157	0.254	0.952	0.725	0.966	0.721
C04	0.681	0.425	0.446	0.319	0.575	0.554	0.914	0.809	0.932	0.416
C05	0.720	0.761	0.500	0.280	0.239	0.500	1.068	1.286	1.190	0.595
C06	0.687	0.402	0.392	0.313	0.598	0.608	1.026	0.371	1.265	0.496
C07	0.788	0.559	0.452	0.212	0.441	0.548	1.020	1.421	1.148	0.519
C08	0.675	0.357	0.346	0.325	0.643	0.654	1.050	0.842	0.927	0.321
C09	0.868	0.806	0.701	0.132	0.194	0.299	0.978	0.985	0.990	0.694
C10	0.846	0.827	0.506	0.154	0.173	0.494	1.085	0.861	1.092	0.552
C11	0.766	0.358	0.469	0.234	0.642	0.531	0.848	0.880	0.884	0.415
C12	0.628	0.325	0.254	0.372	0.675	0.746	1.024	1.682	1.078	0.274
C13	0.707	0.332	0.258	0.293	0.668	0.742	1.019	1.031	1.255	0.324
C14	0.614	0.332	0.291	0.386	0.668	0.709	1.070	1.027	1.207	0.351
C15	0.711	0.450	0.205	0.289	0.550	0.795	0.988	1.094	1.057	0.217
C16	0.705	0.493	0.323	0.295	0.507	0.677	1.012	1.256	1.159	0.374
C17	0.432	0.034	0.107	0.568	0.966	0.893	1.000	1.094	1.140	0.122
C18	0.556	0.107	0.535	0.444	0.893	0.465	0.678	1.256	0.388	0.208
C19	0.799	0.335	0.837	0.201	0.665	0.163	1.158	1.174	1.197	1.002
C20	0.748	0.583	0.434	0.252	0.417	0.566	0.950	0.980	0.992	0.431
C21	0.745	0.681	0.472	0.255	0.319	0.528	1.000	1.118	1.147	0.541
C22	0.669	0.567	0.360	0.331	0.433	0.640	0.947	1.103	1.181	0.425
C23	0.708	0.264	0.245	0.292	0.736	0.755	0.855	1.048	1.162	0.284
C24	0.677	0.359	0.313	0.323	0.641	0.687	0.862	1.043	0.823	0.257
C25	0.688	0.320	0.370	0.312	0.680	0.630	1.000	1.194	1.304	0.483
极小值	0.432	0.034	0.107	0.132	0.157	0.163	0.678	0.371	0.388	0.122
极大值	0.868	0.843	0.837	0.568	0.966	0.893	1.158	1.682	1.304	1.002
均值	0.704	0.471	0.424	0.296	0.529	0.576	0.970	1.030	1.063	0.445
标准差 $SD$	0.090	0.215	0.172	0.090	0.215	0.172	0.101	0.267	0.188	0.194
变异系数 $CV/\%$	12.78	45.73	40.61	30.45	40.74	29.88	10.40	25.90	17.70	43.70

注:  $X_1$ : 相对苗鲜重;  $X_2$ : 相对胚芽长;  $X_3$ : 相对胚根长;  $X_4$ : 苗鲜重毒害指数;  $X_5$ : 胚芽毒害指数;  $X_6$ : 胚根毒害指数;  $X_7$ : 相对发芽率;  $X_8$ : 相对发芽势;  $X_9$ : 相对发芽指数;  $X_{10}$ : 相对活力指数。下同。

表 3 芦笋各品种(系)的隶属函数值及排序

Table 3 Membership value and ordering of asparagus varieties (lines)

编号	隶属函数值	排序	编号	隶属函数值	排序
C01	0.698	6	C14	0.455	20
C02	0.460	19	C15	0.461	18
C03	0.740	4	C16	0.548	10
C04	0.479	16	C17	0.204	25
C05	0.712	5	C18	0.269	24
C06	0.497	13	C19	0.793	2
C07	0.667	7	C20	0.575	9
C08	0.452	21	C21	0.658	8
C09	0.794	1	C22	0.543	11
C10	0.744	3	C23	0.413	22
C11	0.495	14	C24	0.402	23
C12	0.467	17	C25	0.531	12
C13	0.481	15			

表 4 各性状耐铝系数的相关系数矩阵

Table 4 Correlation matrix of Al-tolerance coefficients of different characters

性状	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$
$X_1$										
$X_2$	0.748**									
$X_3$	0.636**	0.552**								
$X_4$	-1.000**	-0.748**	-0.636**							
$X_5$	-0.748**	-1.000**	-0.552**	0.748**						
$X_6$	-0.636**	-0.552**	-1.000**	0.636**	0.552**					
$X_7$	0.271	0.234	0.053	-0.271	-0.234	-0.053				
$X_8$	-0.136	-0.205	-0.171	0.136	0.205	0.171	0.150			
$X_9$	0.174	0.167	-0.194	-0.174	-0.167	0.194	0.734**	0.023		
$X_{10}$	0.719**	0.617**	0.885**	-0.719**	-0.617**	-0.885**	0.415*	-0.152	0.273	

注: \*表示在 0.05 水平相关性显著, \*\*表示在 0.01 水平相关性显著。

表 5 主成分特征向量及贡献率

Table 5 Eigenvectors and percentages of accumulated contribution of principal components

性状	成分 1	成分 2	成分 3
$X_1$	0.902	0.067	-0.078
$X_2$	0.855	0.073	-0.331
$X_3$	0.837	-0.393	0.319
$X_4$	-0.902	-0.067	0.078
$X_5$	-0.855	-0.073	0.331
$X_6$	-0.837	0.393	-0.319
$X_7$	0.322	0.830	0.223
$X_8$	-0.215	0.246	0.692
$X_9$	0.168	0.911	-0.067
$X_{10}$	0.903	0.050	0.288
特征根	5.481	1.910	1.051
贡献率/%	54.814	19.103	10.511
累计贡献率/%	54.814	73.917	84.428

### 2.5 主成分分析

利用 SPSS 软件对 10 个指标进行主成分分析, 提取了特征值大于 1 的前 3 个主成分, 贡献率分别为 54.81%、19.10%和 10.51%, 累计贡献率达 84.42%。代表了原始指标携带的绝大部分信息, 其余贡献率可忽略不计。将 10 个单项指标转换为 3 个新的相互独立的综合指标。其中主成分 1 在相对胚根长、相对胚芽长、相对苗鲜重、胚根毒害指数、胚芽毒害指数、苗鲜重毒害指数和相对活力指数的特征向量值载荷较高; 主成分 2 在相对发芽率和相对发芽指数上载荷量较大; 主成分 3 在相对发芽芽上载荷量较大。从 3 个主成分因子包含内容和贡献率来看, 主成分 1 贡献率最高, 成为种子萌发期耐铝性筛选的主要指标, 主成分 2 和 3 作为参考指标。

表 6 芦笋各品种(系)的综合得分和 F 值

Table 6 Comprehensive scores and F-value of asparagus varieties (lines)

编号	F 值	排序	综合得分	排序	编号	F 值	排序	综合得分	排序
C01	1.322	5	1.015	6	C14	-0.710	20	-0.553	20
C02	-0.609	17	-0.497	17	C15	-0.690	19	-0.525	18
C03	1.676	4	1.286	4	C16	-0.041	10	0.005	10
C04	-0.450	16	-0.374	16	C17	-2.911	25	-2.211	25
C05	1.258	6	1.037	5	C18	-2.507	24	-1.844	24
C06	-0.043	11	-0.162	13	C19	2.309	1	1.701	1
C07	0.947	7	0.772	7	C20	0.280	9	0.215	9
C08	-0.624	18	-0.530	19	C21	0.909	8	0.729	8
C09	2.143	2	1.641	2	C22	-0.100	13	-0.034	11
C10	1.786	3	1.341	3	C23	-1.043	22	-0.818	22
C11	-0.278	14	-0.259	14	C24	-1.201	23	-0.915	23
C12	-0.900	21	-0.588	21	C25	-0.087	12	-0.067	12
C13	-0.438	15	-0.366	15					

根据主成分分析的得分系统矩阵(表 5), 得出第 1、第 2 和第 3 主成分的计算公式分别如下:

$$F_1 = 0.385X_1 - 0.365X_2 + 0.357X_3 - 0.385X_4 - 0.365X_5 - 0.357X_6 + 0.138X_7 - 0.09X_8 + 0.07X_9 + 0.386X_{10}$$

$$F_2 = 0.049X_1 + 0.052X_2 - 0.285X_3 - 0.049X_4 - 0.052X_5 + 0.285X_6 + 0.600X_7 + 0.178X_8 + 0.659X_9 + 0.036X_{10}$$

$$F_3 = -0.076X_1 - 0.323X_2 + 0.311X_3 + 0.076X_4 + 0.323X_5 - 0.311X_6 + 0.218X_7 + 0.675X_8 - 0.065X_9 + 0.281X_{10}$$

主成分的综合得分值计算公式:

$$F = 0.548F_1 + 0.191F_2 + 0.105F_3$$

根据主成分综合得分值( $F$  值)大小排序显示(表 6), 25 个品种(系) $F$  值大于 0 的有 9 个, 占 36.0%, 其中 C19 的  $F$  值 2.309, 在 25 个品种(系)中排名第 1; C09 的  $F$  值 2.143, 排名第 2。  $F$  值小于 0 的共有 16 个, 占 64.0%, 其中 C17 和 C18 的  $F$  值分别为 -2.911 和 -2.507, 均属于铝毒耐性极敏感品种。

## 2.6 不同品种(系)芦笋耐铝性的综合性评价

将主成分  $F$  值与隶属函数值进行相关性分析, 结果显示二者间呈极显著正相关( $R^2=0.995$ ;  $P<0.01$ ), 因此主成分分析与隶属函数分析评价方法是可行的和统一的。通过 SPSS 软件将主成分  $F$  值和隶属函数值分别进行数据标准化, 并求出对应品种(系)各自主成分  $F$  值和隶属函数值的平均值, 作为综合评价得分值并进行排序(表 6)。C19 综合得分为 1.701, 为耐铝最好品系; C09 综合得分为 1.641, 耐铝次之; C17

综合得分为 -2.211, 属于铝极敏感品种。

## 2.7 聚类分析

根据主成分分析  $F$  值与隶属函数值二者的综合得分值进行欧式距离系统聚类分析, 欧式遗传距离  $D=7.0$  左右, 将 25 个芦笋品种划分为 5 类(图 1)。第 I 类为强耐铝型, 包括‘井冈 111’、‘UC157(F<sub>1</sub>)’、‘沃克先锋(F<sub>1</sub>)’和‘JX2123’, 占参试品种的 16.0%; 第 II 类为耐铝型, 包括‘京绿芦 3 号’、‘格兰德(F<sub>1</sub>)’、‘鲁芦笋 7 号’和‘JX2122’, 占参试品种的 16.0%; 第 III 类为中等耐铝型, 包括‘JX2018’、‘JX2114’、‘JX2113’和‘淮 12’, 占参试品种的 16.0%; 第 IV 类为铝敏感型, 包括‘京绿芦 1 号’、‘井冈红’、‘冠军’、‘阿特拉斯(F<sub>1</sub>)’、‘阿波罗(F<sub>1</sub>)’、‘佳芦 1 号’、‘硕丰’、‘淮 2’、‘淮 4’、‘JX20213’和‘JX2103’, 占参试品种的 44.0%; 第 V 类为铝极敏感型, 包括‘T<sub>2</sub>’和‘JX2015’, 占参试品种的 8.0%。

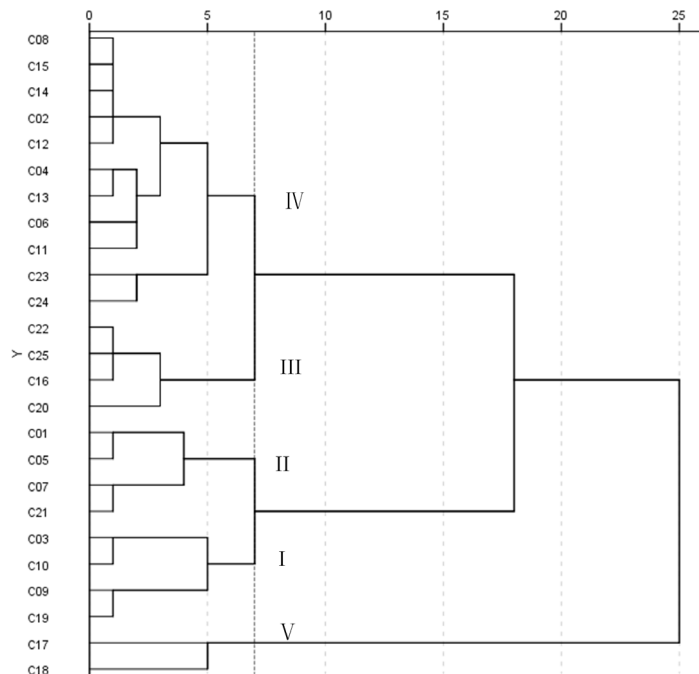


图 1 25 个芦笋品种(系)系统聚类

Figure 1 Systematic clustering of 25 asparagus varieties(lines)

## 3 讨论与结论

我国酸性土壤遍及南方多个省区, 以往多使用石灰对表层土壤进行改良, 治标不治本, 而利用和选育耐铝的作物基因型是提高酸性铝毒土壤生产力, 是促进农业可持续发展既经济又有效的重要途径。首先, 铝并非植物生长发育的必需元素, 铝被植物吸收主要在植物根系表皮以及皮层组织中富集<sup>[19]</sup>。其次, 根尖是铝胁迫的最重要部位, 最突出的影响表现为

抑制根的生长<sup>[20-22]</sup>。当根系积累过量  $Al^{3+}$  时, 影响根系对于磷酸盐、Ca、Mg 等营养物质的吸收, 造成营养元素失调, 最终导致整株植物体生长受限<sup>[23-25]</sup>。本试验发现, 不耐铝的芦笋品种(系)在铝胁迫下, 使其胚根颜色由白逐渐加深至褐色, 显著抑制胚根生长, 降低胚芽长和苗鲜重, 与应小芳在大豆<sup>[26]</sup>、刘强等在油菜<sup>[27]</sup>等作物中的研究结果相近。

芦笋是一年种植而多年收获的多年生宿根性的蔬菜, 酸性土壤地区选用适合的耐铝芦笋种苗对于

芦笋种植十分重要,而种子萌发期对耐铝毒资源进行筛选是一种简便而又易于操作的筛选方法。参考预试验,我们确定  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Al}^{3+}$  为 25 份芦笋种质铝毒胁迫浓度,结果显示该浓度胁迫处理有效区分了 25 份芦笋种质萌发期耐铝毒能力的强弱。采用单一评价方法具有一定的片面性,而综合评价方法已在油菜<sup>[28]</sup>、豌豆<sup>[29]</sup>、高粱<sup>[30]</sup>等多种作物耐铝盐资源综合评价中进行广泛运用,故本研究采用平均隶属函数值、主成分分析、综合得分值和聚类分析多种方法对 25 份芦笋种质耐铝性进行了综合评价。

根据综合得分值进行聚类,我们将 25 个芦笋品种(系)划分为 5 类。第 I 类为强耐铝型,包括‘井冈 111’、‘UC157(F<sub>1</sub>)’、‘沃克先锋(F<sub>1</sub>)’和‘JX2123’;第 II 类为耐铝型,包括‘京绿芦 3 号’、‘格兰德(F<sub>1</sub>)’、‘鲁芦笋 7 号’和‘JX2122’;第 III 类为中等耐铝型,包括‘JX2018’、‘JX2114’、‘JX2113’和‘淮 12’;第 IV 类为铝敏感型,包括‘京绿芦 1 号’、‘井冈红’、‘冠军’、‘阿特拉斯(F<sub>1</sub>)’、‘阿波罗(F<sub>1</sub>)’、‘佳芦 1 号’、‘硕丰’、‘淮 2’、‘淮 4’、‘JX20213’和‘JX2103’;第 V 类为铝极敏感型,包括‘T<sub>2</sub>’和‘JX2015’。

在各种评价方法中,发现‘UC157(F<sub>1</sub>)’和‘JX2123’均表现为萌发期耐铝性较强,将来这 2 个品(种)系可用于芦笋耐铝性育种亲本材料筛选。然而,滤纸发芽试验条件与复杂的田间条件存在一定差异,因此,若要全面准确地鉴定芦笋的耐铝性,还需进一步在铝含量超标的地块上进行全生育期的耐铝性鉴定。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈振,黄春琼,刘国道.狗牙根对铝胁迫响应及临界浓度的研究[J].热带作物学报,2015,36(4):645-649.
- [3] 姚春娟,熊光康,杨肖华,等.铝胁迫对决明属种子萌发与幼苗生长的影响[J].安徽农业大学学报,2017,44(5):801-805.
- [4] 郑阳霞,赵善梅,向前,等.铝胁迫对豆瓣菜生理特性及营养元素吸收的影响[J].甘肃农业大学学报,2019,54(4):83-91.
- [5] 戴清霞,陆鑫眉,张琼,等.铝胁迫对山茶花吸收矿质元素的影响[J].福建热作科技,2017,42(1):16-24.
- [6] 厉广辉,于继庆,李书华,等.我国芦笋育种研究进展及展望[J].核农学报,2016,30(10):1934-1940.
- [7] 陈光宇.中国芦笋产业发展现状与趋势[J].世界农业,2013(10):181-186,188.
- [8] 崔云前,裘祥雨,周长生.芦笋营养价值及新型加工技术的研究[J].食品科技,2020,45(7):88-92.

- [9] 尹培培,刘昌衡,赵鲁豫,等.芦笋膳食纤维及酚类物质的抗氧化活性[J].食品工业,2019,40(7):190-194.
- [10] 李书华,刘保真,李少勇,等.芦笋高产高效标准化栽培技术规程[J].山东农业科学,2004,36(4):34-36.
- [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.
- [12] 舒畅.耐铝毒水稻(*Oryza sativa* L.)种质资源的筛选及不同形态 N 素对水稻幼苗耐铝性的影响[D].南京:南京农业大学,2011.
- [13] 刘武.玉米抗铝毒自交系的筛选、生理检测和基因芯片分析[D].雅安:四川农业大学,2013.
- [14] 齐波,赵团结,盖钧镛.中国大豆种质资源耐铝毒性的变异特点及优选[J].大豆科学,2007,26(6):813-819.
- [15] 李颜冰.花生耐铝性筛选鉴定方法初探[D].广州:华南农业大学,2017.
- [16] 胡淑明,乜兰春,陈海媛,等.11份芦笋种质材料耐盐性评价[J].中国农学通报,2012,28(13):167-170.
- [17] 潘美红,薛萍,杨海峰,等.耐盐芦笋组合的筛选试验[J].江苏农业科学,2016,44(2):185-189.
- [18] 谢启鑫,尹玉玲,张岳平,等.人工海水胁迫下芦笋品种耐盐性评价的多元统计分析[J].植物遗传资源学报,2015,16(2):411-416.
- [19] 何龙飞,刘友良,沈振国,等.铝对小麦幼苗营养元素吸收和分布的影响[J].电子显微学报,2000,19(5):685-694.
- [20] JAN F. Aluminium effects on growth, nutrient net uptake and transport in 3 rice (*Oryza sativa*) cultivars with different sensitivity to aluminium[J]. Physiol Plant, 1991, 83(3): 441-448.
- [21] ARCHAMBAULT D J, ZHANG G C, TAYLOR G J. Spatial variation in the kinetics of aluminium (Al) uptake in roots of wheat (*Triticum aestivum* L.) exhibiting differential resistance to Al. Evidence for metabolism-dependent exclusion of Al[J]. J Plant Physiol, 1997, 151(6): 668-674.
- [22] MEDA A R, FURLANI P R. Tolerance to aluminum toxicity by tropical leguminous plants used as cover crops[J]. Braz Arch Biol Technol, 2005, 48(2): 309-317.
- [23] RENGEL Z. Role of calcium in aluminium toxicity[J]. New Phytol, 1992, 121(4): 499-513.
- [24] KELTJENS W G. Magnesium uptake by Al-stressed maize plants with special emphasis on cation interactions at root exchange sites[J]. Plant Soil, 1995, 171(1): 141-146.
- [25] VERA-VILLALOBOS H, LUNARIO-DELGADO L, PÉREZ-RETAMAL D, et al. Sulfate nutrition improves short-term Al<sup>3+</sup>-stress tolerance in roots of *Lolium perenne* L.[J]. Plant Physiol Biochem, 2020, 148: 103-113.
- [26] 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.
- [27] 刘强,龙婉婉,胡萃,等.铝胁迫对油菜种子萌发和幼苗生长的影响[J].种子,2009,28(7):5-6,10.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 高春华,朱金英,张华文,等.38个粒用高粱品种芽期耐盐性的综合鉴定及评价[J].核农学报,2019,33(9):1841-1855.