

· 研究报告 ·

基于主成分-聚类-逐步回归分析构建番茄苗期耐铝性综合评价体系

郭书亚¹, 艾金祥¹, 陈虹宇¹, 邵烨瑶¹, 汪妍¹, 王倩¹, 叶怡彤¹, 张雅婷¹
丁哲晓¹, 吴昊辰¹, 吴玉环^{2,3}, 张建新⁴, 饶米德^{1*}, 刘鹏^{1*}

¹浙江师范大学化学与生命科学学院/植物学实验室, 金华 321004; ²杭州师范大学生命与环境科学学院, 杭州 310036

³中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ⁴丽水职业技术学院, 丽水 323000

摘要 铝毒是限制酸性土壤中作物产量的主要因素之一。番茄(*Solanum lycopersicum*)是适合在酸性土壤中种植的主要经济作物, 不同品种番茄对铝胁迫的响应存在差异, 因此, 筛选苗期耐铝种质对番茄生产及研究具有重要意义。以10个番茄品种为材料, 采用室内土培盆栽, 设置1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{AlCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 处理, 测定反映植物铝胁迫下生长状况的16个形态、生理生化及光合指标。通过主成分分析, 将铝胁迫下番茄幼苗的16个指标转化为5个独立的综合指标, 累积贡献率达90.779%。基于耐铝性综合评价值(A)的系统聚类分析, 将供试种质划分为5类, 第I类为高度耐铝品种Qianxi, 第V类为高度不耐铝品种Puluowangsi。经多元线性逐步回归分析得出番茄苗期耐铝评价方程: $y=0.046+0.405X_6+0.515X_{10}-0.207X_{15}+0.028X_3$ ($R^2=0.997$), 从16个指标中提取出与A值显著相关($P<0.01$)的4个指标: 丙二醛含量(X_3)、净光合速率(X_6)、叶面积(X_{10})和地下部干重(X_{15})。利用评价方程可判断不同番茄品种苗期的耐铝性, 使番茄耐铝性鉴定工作快速简便。

关键词 番茄, 铝胁迫, 种质筛选, 酸性土壤, 综合评价

郭书亚, 艾金祥, 陈虹宇, 邵烨瑶, 汪妍, 王倩, 叶怡彤, 张雅婷, 丁哲晓, 吴昊辰, 吴玉环, 张建新, 饶米德, 刘鹏 (2022). 基于主成分-聚类-逐步回归分析构建番茄苗期耐铝性综合评价体系. 植物学报 57, 479–489.

铝(aluminum, Al)在地壳中的含量仅次于氧和硅, 常以无毒铝硅酸盐或氧化铝的形式存在, 其在pH<5的环境中溶解增加, 从而抑制植物的正常生长。当前土壤酸化已成为世界瞩目的环境问题, 全球近40%的耕地为酸性土壤, 不仅严重制约了农业生产, 还影响经济发展。过量 Al^{3+} 积累不仅会阻碍植物根系吸收水分和矿物质, 造成氧化损伤并破坏细胞结构(Yamamoto et al., 2019; Shetty and Prakash, 2020), 还会改变土壤理化性质, 导致耕地板结, 进而造成作物减产(He et al., 2019; Bauw et al., 2020)。熊洁等(2021)利用不同油菜(*Brassica napus*)品种研究其苗期耐铝性及根系形态对铝胁迫的响应, 发现耐铝品种拥有更多的细根, 以改变根系形态的方式适应铝胁迫。张永福等(2020)对葡萄(*Vitis vinifera*)种质根系的耐铝性进行了鉴定, 发现铝胁迫下供试品种的根系活力下降,

丙二醛和脯氨酸含量普遍升高, 但不同品种的变化幅度存在差异, 4个耐铝性较强的葡萄品种各生理指标变幅较小, 而4个铝敏感品种生理指标变幅较大。高小凤等(2016)研究表明, 铝胁迫诱导玉米(*Zea mays*)根系分泌异羟肟酸, 使植物抵御铝毒害。作物应对铝毒的机制十分复杂, 不同品种间耐铝性存在差异。因此, 鉴定耐铝性作物品种对于农业生产至关重要。

番茄(*Solanum lycopersicum*)隶属于茄科(Solanaceae)番茄属(*Lycopersicon*), 为一年生双子叶草本植物, 在世界主要蔬菜产量排名中位列第4, 具有止血、降血压及护肤等功效, 经济价值和市场潜力较大(Jin et al., 2020)。近年来, 随着铝制品的大量使用及酸雨的出现, 导致土壤中 Al^{3+} 含量增加, 番茄不可避免地遭受铝毒危害。目前, 我国引种保存的番茄原始材料已达10 000余份, 其中含有多重优良抗性基

收稿日期: 2022-04-08; 接受日期: 2022-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(No.32001224, No.41571049)和丽水市科技计划(No.2021GYX04)

* 通讯作者。E-mail: miderao@zjnu.edu.cn; sky79@zjnu.cn

因, 这为耐铝品种选育和推广提供了更多种质资源(原静云等, 2016; Jin et al., 2019)。目前, 国内外研究多为番茄耐镉(杨佳敏等, 2021)、耐盐等生理机制和品种筛选(贾邱颖等, 2021), 尚未见番茄耐铝品种选育的相关报道。

前人在构建综合评价体系及种质筛选实验中所选择的供试品种数目存在差异。例如, 宋静爽等(2020)通过探究2个辣椒(*Capsicum annuum*)品种对低温的响应构建了耐冷评价体系; 李彩斌和郭华春(2017)以10个马铃薯(*Solanum tuberosum*)品种为供试材料, 对比各品种耐弱光性并得到评价指标。本研究以10个番茄品种作为实验材料, 采用土培法对不同品种番茄实施铝胁迫处理, 在探究苗期受铝胁迫表现及解铝毒机理的同时, 比较不同品种对铝胁迫的生理响应差异, 并通过系统聚类等多种方法进行数据分析, 筛选耐铝性种质, 为优良品种选育提供理论支持和科学依据, 同时也为我国酸性土壤铝污染地区番茄种植及生产提供实践指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为10个番茄(*Solanum lycopersicum* Mill.)品种, 具体来源见表1。番茄生育期需要110–170天, 这与生长环境有关。六水氯化铝购自国药集团化学试剂有限公司, 分子式为 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 相对分子质量为241.43, 纯度>97.0%。参照鲍士旦(2000)的方法测定土壤基本理化性质: pH5.83, 有机质21.71 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮0.64 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮26.13 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷58.47 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾144.79 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。1/2Hoagland营养液成分: 硝酸钙、硝酸钾、磷酸二氢铵、硫酸镁、铁盐及微量元素溶液。

1.2 实验设计

本实验在浙江师范大学化学与生命科学学院植物逆境生物学实验室进行。取10个番茄品种的种子以温汤浸种方式进行消毒, 在常温水中浸泡15分钟, 于50–52℃水温下浸种15分钟, 并用玻璃棒不断搅拌, 降低水温, 继续浸种5小时。将已消毒的种子播种于装有红壤(pH<6)的育苗穴盆中, 每孔1粒, 置于恒温光照培养箱进行萌发。培养条件: 白天28℃/夜晚

表1 供试番茄种质来源

Table 1 Source of test *Solanum lycopersicum* germplasms

No.	Cultivar name	Origin
1	Jinpeng1	Xian jinpeng seed
2	Zhefen202	Zhejiang Academy of Agricultural Sciences
3	Jinpeng3	Xian jinpeng seed
4	Zhongshu4	Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences
5	Puluowangsi	Shouguang Xinxinran Horticulture Co., Ltd.
6	Qianxi	Known-You Seed (China) Co., Ltd.
7	Hongshengnv	Hejin Agricultural Science and Technology Hebei Co., Ltd.
8	Xianke8	JingyanYinong (Beijing) Seed Technology Co., Ltd.
9	Hezuo903	Shanghai Tomato Institute
10	Nongbofen3	Shijiazhuang Nongboshi Science and Technology Development Co., Ltd.

25℃, 光照强度为360 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对湿度50%。待幼苗长至5 cm左右时, 挑选长势一致的植株移入高16.5 cm、外口直径为25 cm的花盆中, 盆底垫滤纸防红壤漏出, 每盆定植3株幼苗。

在相同光照和湿度条件下, 持续培养至4叶期, 然后进行铝胁迫处理。铝离子供给形式为 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 浓度为1 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 以1/2Hoagland营养液作为溶剂, 调pH值为4.5。每个品种均设置对照组(1/2 Hoagland营养液)和铝胁迫处理组, 10个番茄品种共20个处理组, 每组重复4次。于每日上午8:00, 沿植物根部浇灌50 mL 1 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理液; 下午17:00, 各处理组均浇灌1/2Hoagland营养液。实验所用铝浓度1 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 由前期大量预实验筛选得出, 该浓度下处理组与对照组间植株形态差异明显。实验重复3次, 所有指标均重复测定3次。

1.3 测定方法

1.3.1 形态指标测定

播种45天后, 用精度为0.05 cm的直尺测量幼苗株高和主根长度。用CanoScan4400F扫描仪扫描植物叶片, 获得叶面积图, 并将该图导入图形分析软件WinFOLIA中, 读取叶面积参数。用精密电子天平BSA224S (最大量程220 g, 可读性0.1 mg)称量植株地上部鲜重(叶片鲜重+叶柄鲜重+茎蔓鲜重)及地下部鲜重(根系鲜重+块根鲜重); 于110℃杀青, 60℃烘干至恒重后测定幼苗地上部和地下部干重。

1.3.2 光合参数测定

使用LI-6800光合仪测定净光合速率、气孔导度及胞间二氧化碳浓度等光合参数。测定前先预热20分钟, 夹取叶片, 待各参数稳定后, 记录相关数据。用叶绿素测定仪SPAD-502 Plus测定叶绿素含量, 即获取叶片SPAD值。先对仪器进行校零, 再夹取叶片, 注意避开叶脉, 获取读数后松开, 当SPAD值不稳定时需再次调零。

1.3.3 生理生化指标测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性(李小方和张志良, 2016)、丙二醛(MDA)含量(施海涛, 2016)、根系活力(杨铁钊等, 2009)及脯氨酸(Pro)含量(Rady, 2011)均参照文献所述方法测定。

1.4 数据处理

各指标耐铝系数(aluminum toxicity tolerance coefficient, AC)按照公式(1)进行计算(刘勋等, 2019), i 代表各指标, 取1到 m 的值, j 表示各番茄品种, 取1到 n 的值, X_{ij} 和 CK_{ij} 分别代表处理和对照第 j 个品种、第 i 个指标对应的测定值。基于公式(1)的结果, 根据公式(2)计算综合耐铝性系数(徐银萍等, 2020) (comprehensive aluminum resistance coefficient, CAC)。利用AC值进行各指标间的相关性分析及主成分分析, 将多个指标转化为更具代表性的少数综合指标。隶属函数 $U(X_i)$ 的计算采用公式(3), 式中 CI_i 代表综合指标, CI_{\min} 与 CI_{\max} 分别代表第 i 个综合指标的最小值与最大值(周亚峰等, 2017)。综合指标(宋丽君等, 2021)的权重 ω_i 用公式(4)计算, P_i 代表各综合指标的贡献率, 由主成分分析获得。基于公式(3)和(4)的计算结果, 通过公式(5)得出耐铝性综合评价值(aluminum toxicity tolerance value, A), 式中 i 代表第 i 个综合指标(周亚峰等, 2017)。公式(6)用于计算关联系数 $\xi_i(j)$ (徐银萍等, 2020)。先确定分析数列, 以AC值作为比较序列, A值作为参考序列, 随后采用初值法对数据进行无量纲化处理, 最后计算关联系数, 其中 ρ 取0.5, 为分辨系数, $\min_j \min_i |x_0(j) - x_i(j)|$ 表示两极最小差, $\max_j \max_i |x_0(j) - x_i(j)|$ 表示两极最大差。利用公式(7)、(8)和(9)分别计算AC与A的灰色关联度 γ_i 、权重系数 $\omega_i(\gamma)$ 及加权耐铝系数WAC (常宝亮等, 2021)。

利用Microsoft Excel 2007统计并处理原始数据,

制作相关表格, 用SPSS 20.0软件进行方差分析、相关性分析、主成分分析、聚类分析及多元线性逐步回归分析。

$$AC_{ij} = \frac{X_{ij}}{CK_{ij}} \quad i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$CAC = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m AC \quad i=1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

$$U(X_i) = \frac{CI_i - CI_{\min}}{CI_{\max} - CI_{\min}} \quad i=1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

$$\omega_i = P_i \div \sum_{i=1}^m P_i \quad i=1, 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

$$A = \sum_{i=1}^m [U(X_i) \times \omega_i] \quad i=1, 2, 3, \dots, m \quad (5)$$

$$\xi_i(j) = \frac{\min_j \min_i |x_0(j) - x_i(j)| + \rho \max_j \max_i |x_0(j) - x_i(j)|}{|x_0(j) - x_i(j)| + \rho \max_j \max_i |x_0(j) - x_i(j)|} \quad i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \xi_i(j) \quad i=1, 2, 3, \dots, m \quad (7)$$

$$\omega_i(\gamma) = \gamma_i \div \sum_{i=1}^m \gamma_i \quad i=1, 2, 3, \dots, m \quad (8)$$

$$WAC = \sum_{i=1}^m [AC \times \omega_i(\gamma)] \quad i=1, 2, 3, \dots, m \quad (9)$$

2 结果与讨论

2.1 各单项指标耐铝系数及其相关性分析

不同番茄品种经铝胁迫处理后, 各品种根系活力、蒸腾速率、净光合速率、气孔导度、株高、叶面积、叶片SPAD值、地下部和地上部鲜重、根长、地下部及地上部干重与对照相比均有所下降, 而它们的叶片超氧化物歧化酶活性、丙二醛含量、脯氨酸含量及胞间二氧化碳浓度均高于对照组; 各指标的耐铝系数存在差异, 即铝胁迫下, 各品种单项指标间的变化幅度不同。16个指标间的变异系数介于0–0.29之间, 表现为丙二醛含量>净光合速率=脯氨酸含量>地上部鲜重等指标, 其中超氧化物歧化酶的变异系数最小(表2)。

各指标耐铝系数存在不同程度的相关性(表3)。蒸腾速率与气孔导度呈极显著正相关, 相关系数为0.96; 胞间二氧化碳浓度与净光合速率和地下部干重呈极显著负相关, 相关系数分别为–0.80和–0.79。株高与地上部干重呈极显著正相关; 叶面积与地上部鲜重呈极显著正相关; 地下部干重与地上部干重呈极显

表2 铝胁迫下番茄幼苗各单项指标的耐铝系数

Table 2 Aluminum tolerance coefficient of each individual index in *Solanum lycopersicum* seedlings under aluminum stress

No.	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆
1	1.09	0.54	1.01	0.86	0.35	0.60	0.84	0.35	0.88	0.55	0.82	0.22	0.59	0.95	0.67	0.70
2	1.03	0.65	1.61	1.18	0.57	0.61	0.99	0.54	0.74	0.28	0.85	0.17	0.41	0.73	0.27	0.24
3	1.07	0.54	0.87	1.51	0.49	0.57	0.96	0.45	0.77	0.49	0.79	0.14	0.65	0.85	0.21	0.41
4	1.02	0.59	1.23	1.49	0.29	0.43	0.90	0.29	0.90	0.64	0.61	0.38	0.69	1.15	0.29	0.43
5	1.04	0.44	1.19	0.91	0.14	0.13	0.97	0.10	0.56	0.22	0.74	0.24	0.53	0.61	0.33	0.15
6	1.08	0.59	1.17	1.37	0.54	1.18	0.52	0.54	1.01	0.69	0.98	0.40	1.09	0.84	0.94	0.80
7	1.03	0.42	0.60	1.11	0.22	0.17	1.05	0.21	0.86	0.44	0.81	0.33	0.56	0.70	0.40	0.29
8	1.06	0.24	2.60	1.37	0.24	0.20	1.09	0.24	0.87	0.30	0.78	0.27	0.54	0.66	0.42	0.51
9	0.98	0.36	1.33	0.53	0.33	0.24	1.28	0.46	0.72	0.23	0.69	0.32	0.20	0.90	0.26	0.33
10	1.02	0.51	1.18	1.27	0.72	0.68	1.01	0.67	0.66	0.52	0.76	0.17	0.48	0.84	0.38	0.40
Average	1.04	0.49	1.28	1.16	0.39	0.48	0.96	0.38	0.80	0.44	0.78	0.26	0.57	0.82	0.42	0.43
Coefficient variation	0.00	0.02	0.29	0.10	0.03	0.10	0.04	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	0.05	0.03	0.05	0.04

编号1–10同表1。X₁: 叶片超氧化物歧化酶活性; X₂: 根系活力; X₃: 叶片丙二醛含量; X₄: 叶片脯氨酸含量; X₅: 蒸腾速率; X₆: 净光合速率; X₇: 胞间二氧化碳浓度; X₈: 气孔导度; X₉: 株高; X₁₀: 叶面积; X₁₁: 叶片叶绿素含量; X₁₂: 地下部鲜重; X₁₃: 地上部鲜重; X₁₄: 根长; X₁₅: 地下部干重; X₁₆: 地上部干重

No.1–10 see Table 1. X₁: Superoxide dismutase activity of leaves; X₂: Root vitality; X₃: Malondialdehyde content of leaves; X₄: Proline content of leaves; X₅: Transpiration rate; X₆: Net photosynthetic rate; X₇: Intercellular carbon dioxide concentration; X₈: Stomatal conductance; X₉: Plant height; X₁₀: Leaf area; X₁₁: Chlorophyll content of leaves; X₁₂: Fresh weight underground; X₁₃: Fresh weight above ground; X₁₄: Root length; X₁₅: Dry weight underground; X₁₆: Dry weight above ground

表3 铝胁迫下番茄幼苗各单项指标的相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of each individual index of *Solanum lycopersicum* seedlings under aluminum stress

Index	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆
X ₁	1.00															
X ₂	0.17	1.00														
X ₃	0.00	−0.48	1.00													
X ₄	0.40	0.30	0.13	1.00												
X ₅	0.07	0.55	−0.08	0.31	1.00											
X ₆	0.46	0.67*	−0.17	0.38	0.75*	1.00										
X ₇	−0.70*	−0.60	0.22	−0.46	−0.28	−0.80**	1.00									
X ₈	−0.08	0.47	−0.06	0.14	0.96**	0.72*	−0.17	1.00								
X ₉	0.44	0.16	0.04	0.41	0.01	0.47	−0.56	0.05	1.00							
X ₁₀	0.44	0.54	−0.39	0.56	0.37	0.70*	−0.75*	0.31	0.69*	1.00						
X ₁₁	0.61	0.27	−0.05	0.16	0.38	0.65*	−0.63*	0.31	0.40	0.24	1.00					
X ₁₂	−0.17	−0.14	−0.02	−0.03	−0.41	0.04	−0.26	−0.28	0.59	0.32	−0.03	1.00				
X ₁₃	0.69*	0.39	−0.18	0.62	0.14	0.68*	−0.93**	0.04	0.66*	0.77**	0.56	0.40	1.00			
X ₁₄	−0.10	0.44	−0.27	0.14	0.18	0.31	−0.21	0.27	0.41	0.65*	−0.40	0.32	0.18	1.00		
X ₁₅	0.62	0.17	−0.05	0.06	0.16	0.67*	−0.79**	0.15	0.63*	0.56	0.72*	0.42	0.72*	0.06	1.00	
X ₁₆	0.65*	0.16	0.06	0.25	0.27	0.70*	−0.69*	0.30	0.78**	0.72*	0.50	0.32	0.671*	0.40	0.84**	1.00

X₁–X₁₆同表2。X₁–X₁₆ see Table 2. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

著正相关; 超氧化物歧化酶与地上部鲜重及干重呈显著正相关; 净光合速率与气孔导度、叶面积、叶绿素含量、地上部鲜重、地下部及地上部干重呈显著正相关; 地上部鲜重与地下部干重和地上部干重呈显著正

相关。用统计学方法研究多变量问题时, 变量过多会增加计算量和分析问题的复杂性, 且各指标所提供的信息有重叠, 因此有必要利用主成分分析获得综合指标, 进而对各品种耐铝性进行评价。

2.2 基于耐铝系数的主成分分析及隶属函数分析

对16个生理生化和形态指标进行主成分分析, 将具有一定相关性的指标进行重新组合, 其中特征值最大为7.111, 最小为1.231。基于特征值大于1, 提取出5个成分, 贡献率分别为44.4%、17.3%、13.1%、8.3%和7.7%, 累积贡献率达90.8%, 可以解释16个变量的整体情况。由贡献率可求出因子权重, 主成分1权重最大(为0.490), 按顺序依次减小, 最小权重为0.085(表4)。主成分1在超氧化物歧化酶、净光合速率、胞间二氧化碳浓度、株高、叶面积、地上部鲜重、地下部及地上部干重上有较高载荷量; 主成分2在根系活力、蒸腾速率、气孔导度及地下部鲜重上有较高载荷量; 主成分3在叶绿素含量及根长上有较高载荷量; 主成分4在丙二醛含量上有较高载荷量; 主成分5在脯氨酸含量上有较高载荷量。

表4 铝胁迫下番茄幼苗16个单项指标的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of 16 individual index of *Solanum lycopersicum* seedlings under aluminum stress

Index	Principle factors				
	Cl_1	Cl_2	Cl_3	Cl_4	Cl_5
X_1	0.659	-0.262	-0.463	-0.281	0.157
X_2	0.568	0.546	0.244	-0.377	-0.082
X_3	-0.198	-0.223	-0.392	0.607	0.516
X_4	0.508	0.047	0.010	-0.206	0.788
X_5	0.470	0.827	-0.129	0.237	0.062
X_6	0.902	0.363	-0.077	0.126	-0.093
X_7	-0.923	0.111	0.077	0.245	0.047
X_8	0.409	0.795	-0.024	0.424	-0.062
X_9	0.724	-0.438	0.206	0.252	0.115
X_{10}	0.864	0.010	0.412	-0.092	0.110
X_{11}	0.648	0.004	-0.647	-0.008	-0.274
X_{12}	0.249	-0.648	0.481	0.253	-0.214
X_{13}	0.881	-0.295	-0.025	-0.242	0.119
X_{14}	0.357	0.137	0.850	0.158	0.074
X_{15}	0.801	-0.336	-0.223	0.183	-0.356
X_{16}	0.841	-0.233	-0.016	0.359	-0.030
Characteristic root	7.111	2.764	2.092	1.326	1.231
Contribution rate (%)	44.442	17.276	13.077	8.288	7.695
Cumulative contribution (%)	44.442	61.719	74.796	83.084	90.779
Factor weight	0.490	0.190	0.144	0.091	0.085

X_1 – X_{16} 同表2。 X_1 – X_{16} see Table 2.

根据因子载荷与特征值, 可算出各主成分对应的相关系数特征向量(表5), 随后求出5个综合指标值, 即 $Cl_1=0.247X_1+0.213X_2-0.074X_3+0.190X_4+0.176X_5+0.338X_6-0.346X_7+0.153X_8+0.272X_9+0.324X_{10}+0.243X_{11}+0.093X_{12}+0.330X_{13}+0.134X_{14}+0.300X_{15}+0.315X_{16}$, Cl_2 、 Cl_3 、 Cl_4 和 Cl_5 参照同样的方式进行计算。主成分1中, 6号番茄品种的隶属函数值最大(为1.002), 说明其耐铝性最强(表6); 而9号品种隶属函数值最小(为0.001), 表明其在主成分1的苗期耐铝性最弱。 Cl_2 – Cl_5 中, 耐铝性强的品种依次为3、4、8和8号, 耐铝性弱的品种依次为8、8、7和1号。

2.3 供试番茄品种耐铝性综合评价

各品种的CAC值和WAC值分别介于0.859–0.518和0.859–0.509之间, 平均值分别为0.669和0.662, 两者的变异系数相同(均为0.009)。根据CAC值对10个品种耐铝性进行排序, 各品种耐铝性强弱依次为6、8、4、10、1、2、3、7、9和5号; 根据WAC值的排序结果与CAC值基本一致(表7)。此外, 10个番茄品种

表5 铝胁迫下番茄幼苗各综合指标的特征向量值

Table 5 Characteristic vector values of the comprehensive indexes of *Solanum lycopersicum* seedlings under aluminum stress

Index	Eigen vector of measured indicators				
	1	2	3	4	5
X_1	0.247	-0.157	-0.320	-0.244	0.142
X_2	0.213	0.328	0.169	-0.327	-0.074
X_3	-0.074	-0.134	-0.271	0.527	0.465
X_4	0.190	0.028	0.007	-0.179	0.710
X_5	0.176	0.497	-0.089	0.205	0.056
X_6	0.338	0.219	-0.053	0.109	-0.084
X_7	-0.346	0.067	0.053	0.213	0.043
X_8	0.153	0.478	-0.016	0.368	-0.055
X_9	0.272	-0.263	0.143	0.219	0.104
X_{10}	0.324	0.006	0.285	-0.080	0.099
X_{11}	0.243	0.002	-0.447	-0.007	-0.247
X_{12}	0.093	-0.390	0.332	0.220	-0.193
X_{13}	0.330	-0.177	-0.017	-0.210	0.107
X_{14}	0.134	0.082	0.587	0.137	0.066
X_{15}	0.300	-0.202	-0.154	0.159	-0.321
X_{16}	0.315	-0.140	-0.011	0.312	-0.027

X_1 – X_{16} 同表2。 X_1 – X_{16} see Table 2.

表6 铝胁迫下番茄幼苗的综合指标值及隶属函数值

Table 6 Comprehensive index values and subordinate function values of *Solanum lycopersicum* seedlings under aluminum stress

No.	Comprehensive index value					Subordinate function value				
	CI_1	CI_2	CI_3	CI_4	CI_5	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$U(X_5)$
1	1.880	-0.145	-0.126	0.902	0.973	0.528	0.444	0.626	0.398	0.003
2	1.452	0.251	-0.452	1.075	1.537	0.292	0.848	0.282	0.547	0.472
3	1.713	0.184	-0.111	0.575	1.545	0.435	0.780	0.641	0.116	0.479
4	1.740	-0.188	0.226	0.763	1.707	0.450	0.400	0.996	0.279	0.614
5	1.007	-0.311	-0.356	0.576	1.184	0.048	0.275	0.383	0.117	0.178
6	2.744	-0.115	-0.295	0.999	1.252	1.002	0.474	0.447	0.482	0.235
7	1.370	-0.266	-0.056	0.444	1.055	0.247	0.321	0.699	0.004	0.071
8	1.256	-0.578	-0.716	1.600	2.171	0.185	0.002	0.004	1.000	1.001
9	0.923	-0.047	-0.144	1.219	0.994	0.001	0.544	0.607	0.671	0.020
10	1.681	0.397	-0.231	0.998	1.425	0.418	0.997	0.515	0.481	0.379

编号1–10同表1。No.1–10 see Table 1.

表7 供试番茄种质耐铝性评价的CAC值、A值和WAC值

Table 7 CAC value, A value and WAC value for evaluation of aluminum tolerance of test *Solanum lycopersicum* germplasms

No.	CAC value	Rank	A value	Rank	WAC value	Rank
1	0.688	5	0.470	5	0.687	5
2	0.680	6	0.435	6	0.673	6
3	0.673	7	0.505	4	0.668	7
4	0.707	3	0.517	3	0.701	2
5	0.518	10	0.157	10	0.509	10
6	0.859	1	0.709	1	0.859	1
7	0.576	8	0.289	7	0.569	8
8	0.712	2	0.268	8	0.694	4
9	0.573	9	0.255	9	0.565	9
10	0.704	4	0.545	2	0.700	3
Average	0.669	–	0.415	–	0.662	–
Coefficient variation	0.009	–	0.028	–	0.009	–

编号1–10同表1。CAC value: 综合耐铝性系数; A value: 耐铝性综合评价值; WAC value: 加权耐铝系数

No.1–10 see Table 1. CAC value: Comprehensive aluminum resistance coefficient; A value: Aluminum toxicity tolerance value; WAC value: Weighted aluminum resistance coefficient

的A值介于0.157–0.709之间, 平均值为0.415, 变异系数为0.028。根据A值进行耐铝性排序, 得到耐铝性强的品种有6、10和4号, 耐铝性弱的品种有9和5号, 其它品种介于两者之间。10个品种在不同评价指标下的耐铝性强弱顺序差异不大, 其地上部表型如图1

(A–J)所示。结果表明, 6号番茄耐铝性最强, 铝处理下的表型优于对照组(图1F), 5号番茄耐铝性最弱, 生长受严重影响(图1E)。这与用A值、CAC值和WAC值筛选出的耐铝性结果一致。

2.4 系统聚类分析及耐铝评价指标筛选

基于A值进行系统聚类分析, 将10个番茄品种按照耐铝性强弱分为5类(图2), 第I类为高度耐铝品种, Qianxi; 第II类为耐铝性较强品种, 包括Jinpeng3、Zhongshu4和Nongbofen3; 第III类为一般耐铝品种, 包括Jinpeng1和Zhefen202; 第IV类为不耐铝品种, 包括Xianke8、Hezuo903和Hongshengnv; 第V类为耐铝性最弱品种, 为Puluowangsi。

分别以A值、CAC值和WAC值为参考序列, 对16个生理生化及形态指标的AC值进行多元线性逐步回归分析, 得到3个最优回归方程的相关系数 r 与决定系数 R^2 接近1.000, F 值分别为409.418、178.487和241.535, 均达极显著水平($P<0.01$)。这说明回归方程可信度较高、解释能力强, 可用于筛选耐铝鉴定指标及进行耐铝性预测。由表8可知, 各单项指标耐铝系数为自变量, A、CAC和WAC值均为因变量, 在CAC值与耐铝系数AC值以及WAC值与AC值的回归方程中, 丙二醛含量、净光合速率、株高、叶面积分别与综合耐铝系数、加权耐铝系数密切相关; 从A值与AC值的回归方程可知, 在番茄苗期耐铝性鉴定中, 选择与A值密切相关的丙二醛含量、净光合速率、叶面积

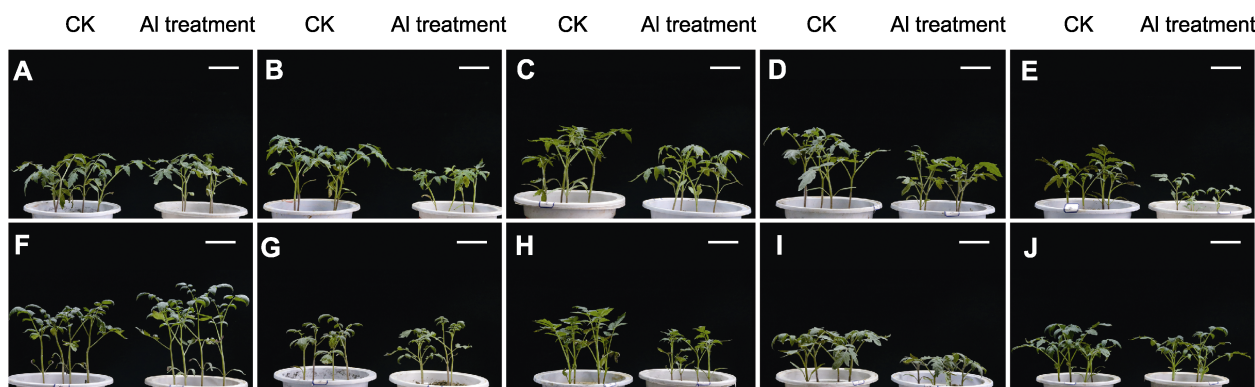


图1 供试番茄种质地上部表型
A-J表示编号1-10, 同表1。Bars=5 cm

Figure 1 The phenotype of test *Solanum lycopersicum* germplasms above ground
A-J represent No.1-10, see Table 1. Bars=5 cm

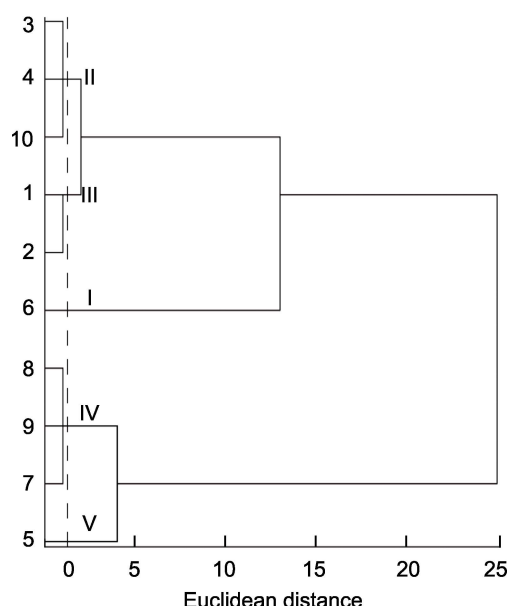


图2 供试番茄种质基于A值的系统聚类结果
编号1-10同表1。

Figure 2 The cluster analysis of test *Solanum lycopersicum* germplasms based on the A value
No.1-10 see Table 1.

表8 基于回归分析的耐铝性模型预测

Table 8 Forecast of aluminum resistance model based on regression analysis

Dependent variable	Multiple stepwise regression equation	<i>r</i>	<i>R</i> ²	<i>F</i> -value	<i>P</i> -value
A value	$y=0.046+0.405X_6+0.515X_{10}-0.207X_{15}+0.028X_3$	0.998	0.997	409.418	0.000
CAC value	$y=0.295+0.173X_6+0.083X_3+0.226X_{10}+0.108X_9$	0.997	0.993	178.487	0.000
WAC value	$y=0.293+0.183X_6+0.106X_9+0.077X_3+0.224X_{10}$	0.997	0.995	241.535	0.000

A value、CAC value和WAC value同表7。A value, CAC value, and WAC value see Table 7.

及地下部干重能够准确评价番茄苗期耐铝性。进一步对回归方程的预测精度进行分析, 结果表明, 10份种质的预测精度均在 87.287% 以上, 平均精度为 97.092% (表9), 说明利用该回归方程对番茄种质进行耐铝性评价准确度较高。

2.5 讨论

不同作物对铝的耐受能力有差异。酸雨频发使土壤中的铝离子不断析出, 因此, 筛选耐铝种质资源对农业生产至关重要。评价作物的耐铝性需要选择适宜的评价指标及数据处理方法, 仅用单一指标无法进行准确评估。目前, 多种指标相结合的手段已在高粱 (*Sorghum bicolor*) 芽期的耐盐性(宝力格等, 2020)、胡麻 (*Linum usitatissimum*) 的抗旱性(罗俊杰等, 2014)、甘蓝型油菜 (*Brassica napus*) 的苯磺隆耐性(王倩等, 2018)以及水稻 (*Oryza sativa*) 芽期耐寒性(潘晓雪等, 2021)等作物种质资源评价中广泛运用。前人的研究主要集中在耐盐性(Yu et al., 2021)、抗旱性(Zou et al., 2007)及耐寒性(Shoroardi et al., 2017)

表9 10份番茄种质耐铝性评价回归方程的预测精度分析
Table 9 Analysis of forecast accuracy of the aluminum tolerance regression equation of 10 *Solanum lycopersicum* germplasms

No.	Primary value	Regression	Difference	Evaluation accuracy (%)
1	0.470	0.462	0.008	98.264
2	0.435	0.426	0.009	98.032
3	0.505	0.510	-0.005	98.992
4	0.517	0.524	-0.007	98.615
5	0.157	0.177	-0.020	87.287
6	0.709	0.717	-0.008	98.811
7	0.289	0.275	0.014	95.311
8	0.268	0.267	0.001	99.761
9	0.255	0.245	0.010	96.106
10	0.545	0.544	0.001	99.739

编号1–10同表1。No.1–10 see Table1.

等方面,有关植物耐铝性鉴定评价研究较少,更未见有关番茄的报道。本研究通过主成分分析提取主要因子,各因子权重介于0.085–0.490之间,特征根均大于1,最大值为7.111,最小值为1.231,得到各因子与原始变量AC值的线性关系,即综合指标的表达式;再将隶属函数与聚类分析相结合,得出5个综合指标隶属函数的最大值均接近1,对应的耐铝性品种依次为6、10、4、8和8号,各综合指标隶属函数最小值约为0,对应的不耐铝品种依次为9、8、8、7和1号,在欧氏距离1.25处,将各供试品种按照耐铝性强弱分为5级;通过多元线性逐步回归分析得到关于A的最优方程。将A值、CAC值和WAC值从大到小进行排序,结果显示,10个品种综合评价值、综合耐铝系数、加权耐铝系数的排序结果基本一致,但基于A值的系统聚类分析与实际耐铝表现更为相近,因此,确定A值作为主要筛选评价手段,结果客观可靠。

合理选择指标是鉴定作物耐铝性的关键。目前,针对作物在逆境条件下的耐受性已经开展了大量研究。张鹤等(2021)对不同生长阶段的花生(*Arachis hypogaea*)进行耐冷性鉴定,结果表明利用叶面积与地上部鲜重可有效且快速地鉴定苗期耐冷性;根据本研究得出的最优回归方程 $y=0.046+0.405X_6+0.515X_{10}-0.207X_{15}+0.028X_3$ (相关系数 $r=0.998$, 决定系数 $R^2=0.997$, $F=409.418$, $P<0.01$), 可知丙二醛含量、净光合速率、叶面积及地下部干重是评价番茄

耐铝性的重要指标,这与花生耐冷性的鉴定指标存在共同点。彭玉梅等(2014)对番茄幼苗期13个指标的耐盐系数进行逐步回归分析,得出地下部干重及丙二醛含量与耐盐性显著相关($P<0.05$),回归方程的相关系数 $r=0.996$, $F=133.491$, $P<0.01$ 。崔翠等(2019)对豌豆(*Pisum sativum*)种质进行耐铝性划分并获取耐铝鉴定指标,从萌发期的8个性状中抽取2个因子,贡献率分别为69.8%和14.3%,可代表原始变量的84.1%,通过回归分析,获得包括地下部干重等7项指标,可初步鉴定豌豆的耐铝性。本研究对16个指标的AC值进行多元线性逐步回归分析,通过模型排除及共线性分析,最终获得以A值为因变量、AC值为自变量的回归方程,由此得出在番茄苗期耐铝性鉴定中,选择丙二醛含量、净光合速率、叶面积及地下部干重能够有效评价番茄苗期耐铝性。丙二醛含量在番茄耐盐性(彭玉梅等, 2014)、地下部干重在豌豆耐铝性(崔翠等, 2019)、净光合速率及叶面积在花生耐冷性(陈小姝等, 2020; 张鹤等, 2021)筛选鉴定中作为重要指标。本研究得出的4个指标涵盖了作物对逆境响应的多个方面,包括形态、生理生化及光合参数,可有效鉴定番茄的耐铝性,并使鉴定工作高效、简化。

各单项指标的相对值能够反映植物抗逆能力,根据处理组与对照组的比值(即耐性系数)可更直观地反映作物的生长情况。本研究对铝胁迫下番茄的16个形态、生理生化、光合指标进行测定,采用耐铝系数(AC)、综合耐铝系数(CAC)、相关性分析、主成分分析、隶属函数、系统聚类和多元线性逐步回归相结合的方法,进行综合评价、耐铝性划分和评价指标的筛选。陈小姝等(2020)测定了花生幼苗的15个生理生化指标,发现低温下叶片的超氧化物歧化酶活性、丙二醛含量、胞间二氧化碳浓度及气孔导度与对照相比有所升高(耐低温系数 >1),主成分累积贡献率达92.2%。张玮等(2019)对18个木薯(*Manihot esculenta*)品种进行冷害分级,从丙二醛和可溶性糖含量以及保护性酶活等7个生理生化指标中提取出的主成分贡献率为90.7%。本研究铝胁迫下多数番茄品种的丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性以及胞间二氧化碳浓度等指标的耐铝系数 >1 ,从16个形态、生理生化及光合指标中提取出5个主成分,其贡献率达90.8%,该值与前人通过主成分分析得出的结果相近,即贡献率均 $>90\%$ 。而李灿东(2020)对大豆(*Glycine max*)耐密性进

行评价, 将9个形态指标转换为4个综合指标, 累积贡献率达85.2%。综合以上研究结果, 可推测指标的类型和数量均影响贡献率, 测定的参数越多, 累积贡献率越大, 且作物在逆境下的生理响应与形态性状相比, 更有助于品种筛选。因此, 在进行耐性筛选时, 需测定植物多方面的指标, 通过回归分析获取最有效的鉴定指标。

综上, $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝胁迫下, 番茄幼苗生长受到抑制, 测定苗期相关形态、生理生化及光合指标, 对获取的16个指标进行多元统计分析, 根据主成分、综合指标、隶属函数、A值、WAC值和聚类分析将10个番茄品种按照耐铝性分为5类, 各品种耐铝性强弱排序为: Qianxi>Nongbofen3>Zhongshu4>Jinpeng-3>Jinpeng1>Zhefen202>Hongshengnv>Xianke8>Hezuo903>Puluowangsi。通过逐步回归分析构建关于A值的耐铝评价方程: $y=0.046+0.405X_6+0.515X_{10}-0.207X_{15}+0.028X_3$, $R^2=0.997$, 模型拟合度高。用本研究构建的回归方程对耐铝性的预测结果与实际值高度一致, 说明该模型可准确评价番茄种质的耐铝性。本研究通过测定16个指标, 分析了10个番茄品种的耐铝性, 在相同的铝胁迫条件下测定丙二醛含量(X_3)、净光合速率(X_6)、叶面积(X_{10})和地下部干重(X_{15})4个指标的AC值, 代入方程中计算出A值, 即可比较不同番茄品种苗期的耐铝性。本研究得到的回归方程可广泛应用于番茄种质的耐铝性评价。

参考文献

- 宝力格, 陆平, 史梦莎, 许月, 刘敏轩 (2020). 中国高粱地方种质芽期苗期耐盐性筛选及鉴定. 作物学报 46, 734–744.
- 鲍士旦 (2000). 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社. pp. 39–114.
- 常宝亮, 陈俊杰, 钱萍, 沈志国, 王永江, 金奇江, 王彦杰, 徐迎春 (2021). 基于层次分析(AHP)-灰色关联分析的盆栽荷花旱花品种的综合评价与筛选. 植物资源与环境学报 30 (3), 54–60.
- 陈小姝, 赵跃, 蒋春姬, 刘海龙, 吕永超, 宁洽, 张鹤, 王绍伦, 高华援 (2020). 花生品种幼苗耐低温鉴定的生理生化指标筛选. 中国油料作物学报 42, 649–657.
- 崔翠, 程闯, 赵愉风, 邹欢欢, 王瑞莉, 王刘艳, 周清元 (2019). 52份豌豆种质萌发期耐铝毒性的综合评价与筛选. 作物学报 45, 798–805.
- 高小凤, 郭添香, 唐新莲, 黎晓峰 (2016). 铝胁迫诱导根系分泌异羟肟酸及其对玉米抵御铝毒害的作用. 中国农业科学 49, 2063–2071.
- 贾邱颖, 吴晓蕾, 冀胜鑫, 褚新培, 赵峰, 宫彬彬, 李敬蕊, 高洪波 (2021). γ -氨基丁酸对番茄嫁接苗耐盐性的生理调控效应. 植物营养与肥料学报 27, 122–134.
- 李彩斌, 郭华春 (2017). 马铃薯品种耐弱光性评价及其指标的筛选. 中国农业科学 50, 3461–3472.
- 李灿东 (2020). 大豆种质资源耐密性评价及鉴定指标筛选. 大豆科学 39, 688–695.
- 李小方, 张志良 (2016). 植物生理学实验指导(第5版). 北京: 高等教育出版社. pp. 200–259.
- 刘勋, 张娇, 沈昱辰, 谢德斌, 李宏利, 李春明, 易小平, 赵勇, 唐道彬, 吕长文, 王季春 (2019). 基于光合系统参数建立马铃薯耐荫性综合评价体系. 植物学报 54, 360–370.
- 罗俊杰, 欧巧明, 叶春雷, 王方, 王镛臻, 陈玉梁 (2014). 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选. 作物学报 40, 1259–1273.
- 潘晓雪, 胡明瑜, 王忠伟, 吴红, 雷开荣 (2021). 不同水稻种质资源重要农艺性状与发芽期耐寒性鉴定研究. 作物杂志 (1), 47–53.
- 彭玉梅, 石国亮, 崔辉梅 (2014). 加工番茄幼苗期耐盐生理指标筛选及耐盐性综合评价. 干旱地区农业研究 32(5), 61–66.
- 施海涛 (2016). 植物逆境生理学实验指导. 北京: 科学出版社. pp. 1–80.
- 宋静爽, 王静, 刘周斌, 吕俊恒, 吴永红, 欧立军, 邹学校 (2020). 辣椒苗期对低温胁迫的响应及耐冷评价体系的建立. 分子植物育种 18, 7537–7546.
- 宋丽君, 聂晓玉, 何磊磊, 蒯婕, 杨华, 郭安国, 黄俊生, 傅廷栋, 汪波, 周广生 (2021). 饲用大豆品种耐荫性鉴定指标筛选及综合评价. 作物学报 47, 1741–1752.
- 王倩, 崔翠, 叶桑, 崔明圣, 赵愉风, 林呐, 唐章林, 李加纳, 周清元 (2018). 甘蓝型油菜种子萌发期耐苯磺隆种质筛选与综合评价. 作物学报 44, 1169–1184.
- 熊洁, 丁戈, 陈伦林, 李书宇, 邹小云, 黄杨, 宋来强 (2021). 不同基因型油菜耐铝性及其根系形态对铝胁迫的响应. 中国油料作物学报 43, 673–682.
- 徐银萍, 潘永东, 刘强德, 姚元虎, 贾延春, 任诚, 火克仓, 陈文庆, 赵锋, 包奇军, 张华瑜 (2020). 大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 作物学报 46, 448–461.
- 杨佳敏, 贺希格都楞, 万家悦, 丁艳菲, 王飞娟, 朱诚 (2021).

- 镉污染地区番茄品种的筛选及其抗氧化能力. 生物工程学报 **37**, 242–252.
- 杨铁钊, 杨志晓, 聂红资, 张小全, 刘友杰, 尚晓颖, 任周营, 范进华 (2009). 富钾基因型烤烟的钾积累及根系生理特性. 作物学报 **35**, 535–540.
- 原静云, 原让花, 李贞霞, 王晓玲 (2016). 我国番茄种质资源研究进展. 种业导刊 (4), 9–14.
- 张鹤, 蒋春姬, 殷冬梅, 董佳乐, 任婧瑶, 赵新华, 钟超, 王晓光, 于海秋 (2021). 花生耐冷综合评价体系构建及耐冷种质筛选. 作物学报 **47**, 1753–1767.
- 张玮, 易拓, 唐维, 宋勇 (2019). 木薯耐寒性种质资源及其鉴定指标的筛选与综合评价. 热带作物学报 **40**, 1–10.
- 张永福, 徐仕琴, 杨砚斌, 栾文杰, 莫丽玲, 韩丽 (2020). 二十七份葡萄种质根系对铝胁迫的生理响应及耐铝基因型筛选. 北方园艺 (13), 15–24.
- 周亚峰, 许彦宾, 王艳玲, 李琼, 胡建斌 (2017). 基于主成分-聚类分析构建甜瓜幼苗耐冷性综合评价体系. 植物学报 **52**, 520–529.
- de Bauw P, Shimamura E, Rakotoson T, Andriamananjara A, Verbeeck M, Merckx R, Smolders E (2021). Farm yard manure application mitigates aluminium toxicity and phosphorus deficiency for different upland rice genotypes. *J Agron Crop Sci* **207**, 148–162.
- He H, Li Y, He LF (2019). Aluminum toxicity and tolerance in Solanaceae plants. *S Afr J Bot* **123**, 23–29.
- Jin JF, Wang ZQ, He QY, Wang JY, Li PF, Xu JM, Zheng SJ, Fan W, Yang JL (2020). Genome-wide identification and expression analysis of the NAC transcription factor family in tomato (*Solanum lycopersicum*) during aluminum stress. *BMC Genomics* **21**, 288.
- Jin L, Zhao LP, Wang YL, Zhou R, Song LX, Xu LP, Cui X, Li R, Yu WG, Zhao TM (2019). Genetic diversity of 324 cultivated tomato germplasm resources using agronomic traits and InDel markers. *Euphytica* **215**, 69.
- Rady MM (2011). Effect of 24-epibrassinolide on growth, yield, antioxidant system and cadmium content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under salinity and cadmium stress. *Sci Hortic* **129**, 232–237.
- Shetty R, Prakash NB (2020). Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. *Sci Rep* **10**, 12249.
- Shoroardi M, Mortuza MG, Islam MM, Samiha T (2017). Phenotypic screening and molecular characterization of 10 rice (*Oryza sativa*) landraces for cold tolerance. *J Environ Sci Nat Res* **10**, 85–91.
- Yamamoto Y (2019). Aluminum toxicity in plant cells: mechanisms of cell death and inhibition of cell elongation. *Soil Sci Plant Nutr* **65**, 41–55.
- Yu R, Wang G, Yu X, Li L, Li C, Song Y, Xu Z, Zhang J, Guan C (2021). Assessing alfalfa (*Medicago sativa* L.) tolerance to salinity at seedling stage and screening of the salinity tolerance traits. *Plant Biol* **23**, 664–674.
- Zou GH, Liu HY, Mei HW, Liu GL, Yu XQ, Li MS, Wu JH, Chen L, Luo LJ (2007). Screening for drought resistance of rice recombinant inbred populations in the field. *J Integr Plant Biol* **49**, 1508–1516.

Establishment of a Comprehensive Evaluation System for Aluminum Tolerance in Tomato Seedlings Based on Principal Component Analysis–Clustering Analysis–Stepwise Regression Analysis

Shuya Guo¹, Jinxiang Ai¹, Hongyu Chen¹, Yeyao Shao¹, Yan Wang¹, Qian Wang¹
Yitong Ye¹, Yating Zhang¹, Zhexiao Ding¹, Haochen Wu¹, Yuhuan Wu^{2,3}
Jianxin Zhang⁴, Mide Rao^{1*}, Peng Liu^{1*}

¹College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University/Botany Laboratory, Jinhua 321004, China; ²College of Life and Environmental Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China; ³Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ⁴Lishui Vocational and Technical College, Lishui 323000, China

Abstract Aluminum toxicity is one of the major factors limiting crop production in acid soils. Tomato is a dominant economic crop in acid soil and different varieties of tomato have different responses to aluminum stress. Therefore, screening aluminum tolerant seedling is of great significance for tomato production and research. In this study, 10 tomato varieties were used as materials, which were cultured indoor in pots containing soil, treated with $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{AlCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$. 16 morphological, physiological, biochemical or photosynthetic indicators reflecting the growth of plants under aluminum stress were determined. Through principal component analysis, 16 indicators of tomato seedlings under aluminum stress were converted into 5 independent comprehensive indicators, with a cumulative contribution rate of 90.779%. Based on the systematic cluster analysis of aluminum resistance value (A), the test germplasms were divided into five levels, category I is a highly aluminum-tolerant variety, Qianxi, and category V was a highly aluminum-intolerant variety, Pu-luowangsi. According to the multiple linear regression analysis, 4 of the 16 indicators were found to be significantly correlated with the A value ($P<0.01$): malondialdehyde content (X_3), net photosynthetic rate (X_6), leaf area (X_{10}) and dry weight of underground (X_{15}), with the following evaluation equation: $y=0.046+0.405X_6+0.515X_{10}-0.207X_{15}+0.028X_3$ ($R^2=0.997$). The evaluation equation can be used to judge the aluminum toxicity resistance characteristics of different tomato varieties in seedling stage, which made the identification of tomato aluminum tolerance quick and simplified.

Key words *Solanum lycopersicum*, aluminum stress, germplasm screening, acid soil, comprehensive evaluation

Guo SY, Ai JX, Chen HY, Shao YY, Wang Y, Wang Q, Ye YT, Zhang YT, Ding ZX, Wu HC, Wu YH, Zhang JX, Rao MD, Liu P (2022). Establishment of a comprehensive evaluation system for aluminum tolerance in tomato seedlings based on principal component analysis–clustering analysis–stepwise regression analysis. *Chin Bull Bot* **57**, 479–489.

* Authors for correspondence. E-mail: miderao@zjnu.edu.cn; sky79@zjnu.cn

(责任编辑: 白羽红)