DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2024.0771

西瓜萌发期耐盐种质材料筛选

王明笛[1],张妍楚[1],李兴远[1],王彬权[1],黄 战[1],
刘金宝[2],张云玲[2],由守昌[3],张锐敏[1]

(1.山东农业大学园艺学院 山东泰安 271018; 2.优奈尔生物科技有限公司 山东潍坊 261101;
3.潍坊郭牌农业有限公司 山东潍坊 261101)

摘 要:耐盐西瓜种质资源匮乏,限制了其在盐碱地的规模化生产。以12份西瓜种质为试材,研究了不同浓度盐处理(0、100、150、200 mmol·L^{-1} NaCl)对其萌发的影响,分别测定萌发率、发芽指数、发芽势等指标,利用隶属函数分析和聚类分析等方法对12份西瓜种质材料进行耐盐性综合评价。结果表明,与对照(0 mmol·L^{-1} NaCl)相比,不同浓度的盐处理降低了大部分西瓜种子的发芽势、发芽指数、芽长、活力指数等,盐害指数反之;12份西瓜种质在萌发期的耐盐性呈现明显差异。通过隶属函数及聚类分析,确定W62、E125、E62、B24等4份种质为耐盐材料;B12、C84、C21、A79、D12等5份种质为中等耐盐材料;C5、D47、B56等3份种质为盐敏感材料。研究结果为西瓜耐盐基因挖掘及耐盐品种选育提供了材料。

关键词:西瓜;耐盐;萌发期;聚类分析;种质筛选

中图分类号:S651 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-2871(2025)07-062-10

Screening of salt-tolerant watermelon germplasm at germination stage

WANG Mingdi[1], ZHANG Yanchu[1], LI Xingyuan[1], WANG Binquan[1], HUANG Zhan[1], LIU Jinbao[2], ZHANG Yunling[2], YOU Shouchang[3], ZHANG Ruimin[1]

(1. College of Horticulture, Shandong Agricultural University, Taian 271018, Shandong, China; 2. UNELL Biotechnology Co., Ltd., Weifang 261101, Shandong, China; 3. Weifang Guopai Agricultural Technology Co., Ltd., Weifang 261101, Shandong, China)

Abstract: The scarcity of salt-tolerant watermelon germplasm resources limits its large-scale production in saline soils. Using 12 watermelon germplasm as test materials, the effects of different concentrations of salt treatments (0, 100, 150 and 200 mmol·L^{-1} NaCl) on their germination were studied. The germination rate, germination index, and germination potential were measured, and the salt tolerance of the 12 watermelon germplasm were comprehensively evaluated using methods such as subordinate function analysis and cluster analysis. The results showed that compared with CK (0 mmol·L^{-1} NaCl), salt treatments at different concentrations reduced the germination potential, germination index, shoot length, and vigor index in most watermelon germplasm, while the salt injury index was the opposite. The salt tolerance of the 12 watermelon germplasms showed significant difference during the germination stage. By using the subordinate function and cluster analysis, the germplasm resources were classified as follows: W62, E125, E62 and B24 as salt-tolerant, B12, C84, C21, A79 and D12 as moderately salt-tolerant, C5, D47 and B56 as salt-sensitive. The research results provide materials for the exploration of salt-tolerant genes and the breeding of salt-tolerant varieties in watermelon.

Key words: Watermelon; Salt tolerance; Germination stage; Cluster analysis; Germplasm screening

世界盐渍壤土面积近1×10^9 hm^2,其中亚洲约有3.99×10^8 hm^2[1]。由于农业用水管理粗放等农业措施持续存在,次生盐渍化土壤面积仍在逐年扩大[2]。目前世界上20%耕地及33%灌溉农田受土壤盐渍化影响[3]。日趋严重的土壤盐渍问题已影响到农业生产的健康及可持续发展。

盐胁迫作为全球性主要非生物逆境胁迫之一,能够引起植物氧化胁迫等次生胁迫,进而抑制种子

收稿日期:2024-12-01;**修回日期:**2025-02-12

基金项目:宁波市公益性科技计划项目(2024S114);山东省科技型中小企业创新能力提升工程(2022TSGC2338);山东省重点扶持区域引进急需紧缺人才项目(2024-94);山东省重点研发计划(良种工程)(2022LZGCQY00601);山东省蔬菜产业技术体系(SDAIT-05)

作者简介:王明笛,女,在读本科生,主要从事蔬菜育种工作。E-mail:sdtamd@163.com

通信作者:张锐敏,女,副教授,主要从事西瓜遗传育种工作。E-mail:zrm0923@sdau.edu.cn

萌发，削弱植株长势，降低果实产量及品质[4]。目前，应对盐害的措施主要有选育抗盐品种、抗盐锻炼、洗盐灌溉、改良土壤等方式[5]，其中筛选培育耐盐种质是利用盐渍化土壤最经济有效的方式之一，对盐碱地农业发展具有重要的现实意义。

前人针对作物耐盐性筛选及评价做了大量研究，种子萌发期对盐分比较敏感，不同盐浓度处理对种子萌发的影响是筛选耐盐种质的重要依据之一。郭珍珠等[6]对20份上海地区大麦地方种质材料进行萌发期耐盐鉴定，根据耐盐等级划分，初步筛选到5份高耐盐种质材料、4份耐盐种质材料、4份中耐盐种质材料、3份不耐盐种质材料和4份极不耐盐种质材料。李春花等[7]对46份甜荞种质的萌发期耐盐性进行评价，筛选出耐盐种质3份，高敏感种质2份以及敏感种质3份。渠鹏正等[8]对40份山栏稻、3份旱稻和3份水稻在芽期和全生育期进行盐胁迫处理，通过测定与水稻耐盐性相关的25个生长指标，筛选出耐盐性强的材料9份，耐盐性较强的材料3份，耐盐性一般的材料16份和耐盐性弱的材料18份。

西瓜是重要的葫芦科经济作物，因其生产周期短且经济效益高而成为农民增收致富的重要园艺作物[9]。作为中度盐敏感作物，筛选耐盐西瓜种质材料对盐碱地农业发展意义重大。侯尹婕等[10]对12份西瓜种质材料进行苗期盐胁迫处理，通过盐害指数结合隶属函数法综合评价西瓜苗期的耐盐性。马肖静等[11]用150 mmol·L^{-1} NaCl对44份西瓜种质材料的幼苗进行处理，筛选出10个高耐盐、21个中耐盐、13个弱耐盐西瓜种质资源。阎志红等[12]对23个西瓜品种（系）的种子进行盐胁迫处理，对5项测定指标进行聚类分析，将23份种质资源分为4类。综上所述，前人研究主要聚焦于西瓜苗期耐盐性或商品种萌发期耐盐性鉴定。

笔者以12份高代自交系西瓜种质为试验材料，研究了不同盐胁迫对种子萌发率、发芽势、发芽指数、芽长等指标的影响，并利用隶属函数及聚类分析进行综合评价，以此为西瓜耐盐基因挖掘及品种选育提供材料支撑。

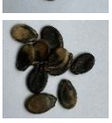
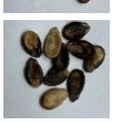
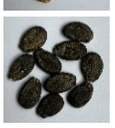
1　材料与方法

1.1　材料

试验于2024年5—9月在山东农业大学黄河流域生态保护和高质量发展协同创新中心开展。选用12份西瓜种质材料，均由山东农业大学设施蔬菜抗性与品质调控团队收集保存，为栽培型西瓜高代自交系材料，编号分别为A79、B12、B24、B56、C5、C21、C84、D12、D47、E62、E125、W62，其中B、C、D系列种质由美国西瓜种质资源库引进，其他均由国内不同地方引进，种质信息及种子表型如表1所示。

表1　种质信息

Table 1　Germplasm information

材料 Material	来源 Origin	种子表型 Seed phenotype	材料 Material	来源 Origin	种子表型 Seed phenotype
A79	中国新疆 Xinjiang, China		C84	美国 United States	
B12	美国 United States		D12	美国 United States	
B24	美国 United States		D47	美国 United States	
B56	美国 United States		E62	中国河南 Henan, China	
C5	美国 United States		E125	中国河南 Henan, China	
C21	美国 United States		W62	中国宁夏 Ningxia, China	

1.2 方法

1.2.1 试验处理 选取颗粒饱满、整齐一致的种子，用 55 ℃温水浸泡 8 h，在铺有双层滤纸的培养皿中催芽，每个培养皿（90 mm）中放 15 粒种子，并分别添加不同浓度的 NaCl 溶液（0、100、150、200 mmol·L^{-1}）7 mL，以 0 mmol·L^{-1} 为对照组 CK，种子完全随机排布，处理过后放在 28 ℃的恒温培养箱中萌发。当观察到培养皿内的滤纸水分蒸发过干时，及时对所有试验组补充相同剂量的试剂。每处理设置 3 次重复。

1.2.2 观察记录 种子萌发以胚根突破种皮 2 mm 为标准[13]，分别于 48、60、72 h 统计种子萌发状况，于 72 h 用直尺测量芽长，并记录试验数据。

1.3 测定内容与方法

种子萌发率（GP）/%=种子萌发数/种子总数×100；

相对萌发率/%＝NaCl 处理组萌发率/对照组萌发率×100；

种子发芽势（GE）/%=第 2 天种子发芽数/种子总数×100；

发芽指数（GI）=∑（Gt/Dt）。

式中：Gt 指发芽天数内总的发芽数，Dt 指种子的发芽天数[14-16]；

盐害指数[8]/%=（对照组萌发率−NaCl 处理组萌发率）/ 对照组萌发率×100；

活力指数[17]=发芽指数×主根长；

耐盐系数[18]=X 指标处理值/X 指标对照值；

隶属函数[19]值计算公式：$R(X_j)=(X_j-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$。

式中的 X_j、X_{min}、X_{max} 分别为该指标在各品种的第 j 个品种的综合指标，及 j 个品种综合指标的最小值和最大值（注：由于本试验中经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理的发芽材料较少，因此综合指标最大值为 NaCl 150 mmol·L^{-1}，最小值为 NaCl 0 mmol·L^{-1}）。

权重计算公式[19]：

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

式中的 W_j 值表示第 j 个综合指标权重 P_j 为各品种（系）第 j 个综合指标的贡献率。

耐盐性综合评价值[19]：

$$D=\sum_{j=1}^{n}\left[U(x_j)\times W_j\right] \quad j=1,2,3\cdots n$$

式中的 $U(x_j)$ 表示第 j 个综合指标值的隶属函数值，W_j 表示第 j 个综合指标的权重。

1.4 数据分析

采用 SPSS 19 进行数据分析，以 Duncan 检验的单因素方差分析处理间的差异；通过层次聚类对隶属函数值进行聚类分析，制作树状图。

2 结果与分析

2.1 不同浓度NaCl胁迫对西瓜种子萌发率的影响

由表 2 可知，对于同一份材料，随着盐浓度的升高其种子萌发率逐渐降低。但是不同材料之间西瓜种子对盐胁迫的耐受性存在较大差异。经 100、150 mmol·L^{-1} NaCl 处理的 B24（72 h）的终萌发率与对照组（0 mmol·L^{-1}）相比并无显著差异，显示了其对低盐浓度的耐受性较强；经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理的 E62、E125、W62 在 48 h 已经开始萌发，且到 72 h 时的萌发率分别达到 13.33%、40.00%、22.22%，说明以上材料在萌发期具有较强的盐胁迫耐受性。对照组 C5 的终萌发率可达到 71.77%，但是 100 mmol·L^{-1} NaCl 处理后其终萌发率仅为 26.67%，与对照相比降低了 62.49%，且被 150、200 mmol·L^{-1} NaCl 完全抑制，说明该种质萌发对盐胁迫极为敏感；另外，经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理的 C84、B12、B56、D47、C21 种子萌发完全被抑制，说明以上材料在萌发期的盐胁迫耐受性较差。

2.2 不同浓度NaCl胁迫对西瓜种子相对萌发率、发芽势、发芽指数的影响

由表 3 可知，同一材料的相对萌发率、发芽势和发芽指数随盐浓度升高而下降。相对萌发率是对种子萌发能力的量化指标之一，可判断不同种子在盐胁迫条件下的适应性和竞争力。从相对萌发率来看，C5、B12、B56、C21、C84、D47 经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理后的相对萌发率均为 0，说明其种子萌发完全被抑制，对盐胁迫耐受性较差。其他材料经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理后的相对萌发率 E125（45.00%）> W62（27.03%）> E62（18.53%）> B24（11.59%）> D12（6.00%）> A79（4.76%），值得注意的是，仅 B24、E125 种子经 100 mmol·L^{-1} NaCl 处理后的相对萌发率为 100%，经 150 mmol·L^{-1} NaCl 处理后的相对萌发率分别为 95.40%、93.00%，说明以上材料尤其是 E125 和 W62 对 200 mmol·L^{-1} NaCl 具有较强的耐受性，而 B24 表现出较强的低盐耐受性。

发芽势和发芽指数是反映种子品质优劣的主要指标之一，在萌发率相同时，发芽势和发芽指数高低反映了种质材料的生命力强弱。由表 3 可知，不同种子发芽势、发芽指数存在较大差异，其中 A79、B24、E125、W62 的发芽势、发芽指数分别为 73.33%~95.56% 和 10.61~33.72，明显高于其他材

表 2　不同浓度 NaCl 胁迫对西瓜种子各时间萌发率的影响

Table 2　Effects of different concentrations of NaCl stress on germination rate of watermelon seeds at different time

材料 Material	c(NaCl)/(mmol·L^{-1})	48 h 萌发率 48 h germination rate/%	60 h 萌发率 60 h germination rate/%	72 h 萌发率 72 h germination rate/%
A79	0	86.67±6.67 a	88.89±7.70 a	95.56±3.85 a
	100	55.56±13.88 b	84.44±7.70 a	88.89±10.18 a
	150	6.67±11.55 c	37.78±15.40 b	48.89±13.88 b
	200	0.00±0.00 c	2.22±3.85 c	4.44±3.85 c
B12	0	64.44±19.25 a	84.44±13.88 a	91.11±10.18 a
	100	17.78±13.88 b	51.11±10.18 b	64.44±13.88 b
	150	0.00±0.00 b	6.67±6.67 c	20.00±13.33 c
	200	0.00±0.00 b	0.00±0.00 c	0.00±0.00 c
B24	0	95.56±3.85 a	95.56±3.85 a	95.56±3.85 a
	100	91.11±3.85 a	95.56±3.85 a	95.56±3.85 a
	150	60.00±11.55 b	75.56±10.18 b	91.11±3.85 a
	200	0.00±0.00 c	0.00±0.00 c	11.11±3.85 b
B56	0	40.00±6.67 a	60.00±13.33 a	73.33±6.67 a
	100	4.44±3.85 b	22.22±3.85 b	31.11±10.18 b
	150	0.00±0.00 b	0.00±0.00 c	4.44±3.85 c
	200	0.00±0.00 b	0.00±0.00 c	0.00±0.00 c
C5	0	8.89±7.70 a	31.11±7.70 a	71.11±7.70 a
	100	2.22±3.85 ab	6.67±0.00 b	26.67±6.67 b
	150	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b	0.00±0.00 c
	200	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b	0.00±0.00 c
C21	0	64.67±4.04 a	71.11±3.46 a	75.67±7.51 a
	100	33.33±6.51 b	55.67±10.26 b	64.33±10.26 a
	150	0.00±0.00 c	13.00±0.00 c	22.33±4.04 b
	200	0.00±0.00 c	0.00±0.00 d	0.00±0.00 c
C84	0	68.89±3.85 a	82.22±3.85 a	84.45±3.85 a
	100	28.89±3.85 b	57.78±10.18 b	62.22±13.88 b
	150	6.67±0.00 c	15.56±10.18 c	26.67±6.67 c
	200	0.00±0.00 d	0.00±0.00 d	0.00±0.00 d
D12	0	60.00±7.00 a	60.00±27.00 a	78.00±10.15 a
	100	22.33±4.04 b	40.00±7.00 a	62.33±4.04 ab
	150	2.33±4.04 c	11.11±10.15 b	46.67±13.50 bc
	200	0.00±0.00 c	0.00±0.00 b	4.67±4.04 c
D47	0	28.89±10.18 a	44.44±7.70 a	71.11±10.18 a
	100	4.44±3.85 b	13.33±6.67 b	35.56±3.85 b
	150	0.00±0.00 b	2.22±3.85 c	4.45±3.85 c
	200	0.00±0.00 b	0.00±0.00 c	0.00±0.00 c
E62	0	57.58±3.85 a	60.00±6.67 a	73.33±6.67 a
	100	42.22±7.70 a	46.67±6.67 ab	51.11±7.70 ab
	150	24.44±15.40 b	31.11±10.18 b	37.78±7.70 b
	200	2.22±3.85 c	8.89±10.18 c	13.33±6.67 c
E125	0	82.33±16.62 a	89.00±10.15 a	89.00±10.15 a
	100	22.33±8.08 ab	60.00±17.58 b	82.33±4.04 a
	150	11.33±7.51 bc	46.67±6.51 b	80.00±0.00 a
	200	2.33±4.04 c	6.67±6.51 c	40.00±7.00 b
W62	0	73.33±17.64 a	82.22±10.18 a	82.22±10.18 a
	100	57.78±16.78 a	71.11±3.85 ab	71.11±3.85 a
	150	51.11±3.85 a	55.56±16.78 b	68.89±7.69 a
	200	4.44±3.85 b	13.33±6.67 c	22.22±10.18 b

注：同一材料相同指标的同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: The same lowercase letters after the same column of the same index and material indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

表 3 不同浓度 NaCl 对西瓜种子相对萌发率、发芽势、发芽指数的影响

Table 3 Effects of different concentrations of NaCl on relative germination rate, germination potential and germination index of watermelon seeds

材料 Material	c(NaCl)/(mmol·L^{-1})	相对萌发率 Relative germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index
A79	0		86.67±6.67 a	22.39±1.11 a
	100	92.86±7.15 a	55.56±13.88 b	15.00±2.09 b
	150	51.59±16.21 b	6.67±11.55 c	5.00±2.33 c
	200	4.76±4.12 c	0.00±0.00 c	0.33±0.33 d
B12	0		64.44±19.25 a	9.72±2.43 a
	100	70.73±15.23 a	17.78±13.88 b	4.56±1.23 b
	150	21.95±14.63 b	0.00±0.00 b	1.00±0.67 c
	200	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b	0.00±0.00 c
B24	0		95.56±3.85 a	33.72±0.84 a
	100	100.00±0.00 a	91.11±3.85 a	29.06±3.71 b
	150	95.40±3.99 a	60.00±11.55 b	15.33±1.96 c
	200	11.59±3.88 b	0.00±0.00 c	0.55±0.19 d
B56	0		40.00±6.67 a	6.67±0.44 a
	100	42.42±13.89 a	4.44±3.85 b	2.06±0.92 b
	150	6.06±5.25 b	0.00±0.00 b	0.22±0.19 c
	200	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b	0.00±0.00 c
C5	0		8.89±7.70 a	6.11±1.35 a
	100	38.33±12.58 a	2.22±3.85 ab	1.83±0.44 b
	150	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b	0.00±0.00 c
	200	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b	0.00±0.00 c
C21	0		64.67±4.04 a	10.61±0.68 a
	100	84.67±5.69 a	33.33±6.51 b	5.72±0.92 b
	150	29.33±4.04 b	0.00±0.00 c	1.28±0.25 c
	200	0.00±0.00 c	0.00±0.00 c	0.00±0.00 d
C84	0		68.89±3.85 a	11.05±0.63 a
	100	73.68±16.43 a	28.89±3.85 b	5.28±0.82 b
	150	31.58±7.89 b	6.67±0.00 c	1.83±0.34 c
	200	0.00±0.00 c	0.00±0.00 d	0.00±0.00 d
D12	0		60.00±7.00 a	9.39±0.82 a
	100	81.33±16.44 a	22.33±4.04 b	5.11±0.79 b
	150	62.00±24.98 b	2.33±4.04 c	2.50±0.93 c
	200	6.00±5.29 c	0.00±0.00 c	0.22±0.19 d
D47	0		28.89±10.18 a	8.11±1.78 a
	100	51.26±13.48 a	4.44±3.85 b	2.94±0.86 b
	150	5.81±5.04 b	0.00±0.00 b	0.33±0.33 c
	200	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b	0.00±0.00 c
E62	0		57.58±3.85 a	15.67±1.59 a
	100	69.55±5.69 a	42.22±7.70 a	11.39±2.84 b
	150	51.26±6.53 b	24.44±15.40 b	6.44±2.46 c
	200	18.53±9.55 c	2.22±3.85 c	1.28±1.11 d
E125	0		82.33±16.62 a	10.61±1.77 a
	100	100.00±0.00 a	22.33±8.08 ab	5.78±0.39 b
	150	93.00±6.56 a	11.33±7.51 bc	4.83±0.58 b
	200	45.00±6.25 b	2.33±4.04 c	2.17±0.44 c
W62	0		73.33±17.64 a	11.61±2.68 a
	100	86.49±4.68 a	57.78±16.78 a	8.89±1.25 ab
	150	83.78±9.36 a	51.11±3.85 a	7.28±1.3 4 b
	200	27.03±12.39 b	4.44±3.85 b	1.44±0.75 c

料，表现出较强的生命活力。然而经 150 mmol·L^{-1} NaCl 处理后，A79 和 E125 的发芽势、发芽指数分别仅为 6.77%、5.00 和 11.33%、4.83，明显低于其他 2 份材料，说明其萌发期盐胁迫耐受性较差。另外，E62 发芽势为 57.58%，明显低于以上 4 种材料，但是经过 150 mmol·L^{-1} NaCl 处理后，其发芽势下降了 57.55%，低于 A79、E125 等大部分材料的下降幅度，说明盐胁迫耐受性较强。经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理后，各材料发芽势均在 5%以下，说明高浓度盐胁迫明显抑制了种子萌发。其中，B12、B56、C5、C21、C84、D47 经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理后发芽势与发芽指数均为 0，说明这些材料的耐盐性较差。

2.3　不同浓度NaCl胁迫对西瓜种子芽长、活力指数的影响

芽长指从种子内部生长出的胚根和胚芽的长度；而活力指数的高低直接反映了种子的活力水平。由表 4 可知，与对照相比，不同浓度的 NaCl 处理均降低了西瓜种子的芽长和活力指数。经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理后，A79、E125、B24、D12、E62、W62 均有一定萌发力，平均芽长和活力指数均大于 0。其中，经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理后，A79 芽长下降幅度最小，为 55%；E125 经 100 mmol·L^{-1} NaCl 处理后，芽长降低 25.11%，经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理后，芽长仍能达到 0.77 cm（图 1），说明以上材料的耐胁迫耐受性较强。B12、B56、C5、C21、C84、D47 经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理后，芽长和活力指数均为 0，例如 B56 的芽长和活力指数经 150 mmol·L^{-1} NaCl 处理后仅为 0.07 cm 和 0.02，经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理后，均降低到 0（图 1），说明以上材料萌发完全被抑制，生长活力极低。

2.4　不同浓度NaCl胁迫对西瓜种子萌发盐害指数的影响

盐害指数是一个用于评估植物在盐胁迫下受害程度的量化指标，可以反映盐分对种子萌发率、发芽势以及幼苗生长初期的影响。由表 5 可知，对于同一份材料，盐害指数随着盐浓度的升高逐渐升高，不同材料对盐胁迫反应差异较大，经 100 mmol·L^{-1} NaCl 处理后 B24 盐害指数为 0，说明 B24 在 NaCl 浓度为 100 mmol·L^{-1} 中可以正常萌发，几乎不受盐胁迫影响。经 150 mmol·L^{-1} NaCl 处理后，A79、B24、D12、E62、E125、W62 的盐害指数均小于 50%，其中 B24、E125、W62 分别为 4.60%、9.33%、16.22%，且经 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理后，均小于 100%，其中 E125 为 55%，说明这几份材料对盐胁迫耐受性强，而其他材料经

表 4　不同浓度 NaCl 对西瓜种子芽长、活力指数的影响

Table 4　Effects of different concentrations of NaCl on seed bud length and vigor index of watermelon seeds

材料 Material	c（NaCl）/（mmol·L^{-1}）	芽长 Bud length/cm	活力指数 Vital index
A79	0	2.60±0.35 a	58.48±10.43 a
	100	2.18±0.38 ab	33.01±9.90 b
	150	1.19±0.37 b	6.44±4.22 c
	200	1.17±1.01 b	0.60±0.64 c
B12	0	0.94±0.15 a	9.08±1.99 a
	100	0.80±0.16 a	3.75±1.53 b
	150	0.46±0.27 b	0.41±0.37 c
	200	0.00±0.00 c	0.00±0.00 c
B24	0	2.85±0.45 a	95.70±12.71 a
	100	2.72±0.11 a	79.25±13.65 a
	150	1.39±0.57 b	22.02±11.99 b
	200	0.25±0.22 c	0.17±0.15 c
B56	0	0.89±0.24 a	5.94±1.98 a
	100	0.44±0.17 b	0.86±0.50 b
	150	0.07±0.06 c	0.02±0.02 b
	200	0.00±0.00 c	0.00±0.00 b
C5	0	1.24±0.37 a	7.86±3.92 a
	100	0.70±0.26 b	1.32±0.74 b
	150	0.00±0.00 c	0.00±0.00 b
	200	0.00±0.00 c	0.00±0.00 b
C21	0	2.59±0.14 a	27.45±1.68 a
	100	2.22±0.42 a	12.40±1.23 b
	150	0.93±0.45 b	1.25±0.82 c
	200	0.00±0.00 c	0.00±0.00 c
C84	0	1.19±0.11 a	13.19±1.45 a
	100	0.56±0.11 b	2.88±0.71 b
	150	0.38±0.16 b	0.65±0.16 c
	200	0.00±0.00 c	0.00±0.00 c
D12	0	2.17±0.21 a	20.26±0.61 a
	100	1.30±0.14 b	6.76±1.77 b
	150	1.02±0.21 c	1.80±1.10 c
	200	0.80±0.69 c	0.13±0.12 c
D47	0	1.10±0.58 a	9.29±6.14 a
	100	1.01±0.29 a	3.11±1.66 b
	150	0.10±0.10 b	0.04±0.03 b
	200	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b
E62	0	2.74±0.14 a	42.75±3.24 a
	100	2.26±0.41 ab	26.37±11.25 b
	150	1.68±0.20 b	11.12±5.23 c
	200	0.67±0.40 c	0.90±0.72 c
E125	0	2.31±0.17 a	24.43±3.28 a
	100	1.73±0.51 ab	10.08±3.45 b
	150	1.50±0.35 b	7.32±2.37 b
	200	0.77±0.16 c	1.69±0.61 c
W62	0	1.60±0.32 a	18.58±4.29 a
	100	1.36±0.15 a	12.09±1.70 b
	150	0.97±0.21 b	7.06±1.29 c
	200	0.10±0.00 c	0.14±0.08 d

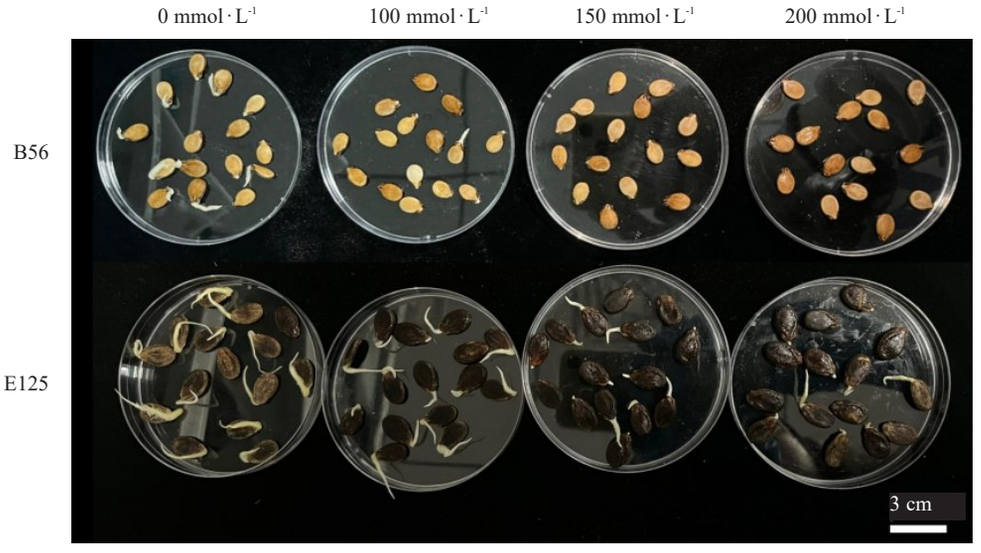


图 1　B56、E125 72 h 发芽情况

Fig. 1　The germination of B56 and E125 at 72 h

表 5　不同浓度 NaCl 对西瓜种子盐害指数的影响

Table 5　Effects of different concentrations of NaCl on salt damage index of watermelon seeds　%

材料 Material	c(NaCl)/(mmol·L-1)		
	100	150	200
A79	7.14±7.14 c	48.41±16.21 b	95.24±4.12 a
B12	29.67±8.39 c	78.67±13.05 b	100.00±0.00 a
B24	0.00±0.00 b	4.60±3.99 b	88.41±3.88 a
B56	57.58±13.89 b	93.94±5.25 a	100.00±0.00 a
C5	61.67±12.58 b	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a
C21	14.67±6.11 c	70.67±4.04 b	100.00±0.00 a
C84	26.08±18.76 c	68.33±9.02 b	100.00±0.00 a
D12	18.67±16.44 bc	38.00±24.98 b	94.00±5.29 a
D47	48.74±13.48 b	94.19±5.04 a	100.00±0.00 a
E62	14.91±6.46 c	37.31±7.22 b	77.22±11.82 a
E125	7.00±6.56 b	9.33±3.25 b	55.00±6.25 a
W62	13.51±4.68 b	16.22±9.36 b	72.97±12.39 a

注：同行数字后不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters after the same row indicate significant differences at 0.05 level among different treatments.

150 mmol·L-1 NaCl 处理后盐害指数均大于 50%，经 200 mmol·L-1 NaCl 处理后均达到 100%，说明其他材料受盐胁迫影响大。综上所述，由盐害指数综合分析，B24、E62、E125、W62 对盐胁迫反应较小，抗盐能力较强，可能为耐盐型的种质材料。B56、C5、D47 对盐胁迫的反应较大，耐盐能力弱，可能为盐敏感型的种质材料。

2.5　各种指标耐盐系数的隶属函数分析

以西瓜材料的 72 h 萌发率、发芽指数、芽长、活力指数作为指标来表示西瓜的耐盐程度，利用公式计算西瓜的耐盐系数（表 6），材料耐盐能力越强，各指标的耐盐系数越大。耐盐材料的 72 h 萌发率、发芽指数、芽长、活力指数均大于其他类型，其中 72 h 萌发率和发芽指数、活力指数在各类型之间存在明显差异，其差异均有统计学意义；盐敏感种质材料的 72 h 萌发率、发芽指数、芽长、活力指数明显小于其他类型西瓜种质材料，差异具有统计学意义。

利用 SPSS 19 对数据进行主成分分析，提取因子得出因子得分，运用公式计算得出隶属函数值（表 7）。以隶属函数评价结果为依据，利用 SPSS 19，采

表 6　不同浓度 NaCl 对西瓜种子耐盐系数的影响

Table 6　Effects of different concentrations of NaCl on salt tolerance coefficient of watermelon seeds

材料 Material	耐盐系数 Salt tolerance coefficient			
	72 h 萌发率 72 h germination rate	发芽指数 Germination index	芽长 Bud length	活力指数 Vital index
A79	0.510	0.22	0.46	0.110
B12	0.220	0.11	0.49	0.050
B24	0.950	0.45	0.49	0.230
B56	0.060	0.03	0.08	0.003
C5	0.000	0.00	0.00	0.000
C21	0.300	0.12	0.36	0.050
C84	0.320	0.17	0.32	0.050
D12	0.600	0.27	0.47	0.090
D47	0.060	0.04	0.09	0.004
E62	0.520	0.41	0.61	0.260
E125	0.900	0.46	0.65	0.300
W62	0.840	0.63	0.61	0.380

用层次聚类方法进行聚类分析。对 12 份西瓜种质材料的萌发期耐盐性进行聚类分析形成树状图（图 2），在欧式距离为 5 时，将 12 份种质材料分为 3 类，第 I 类综合耐盐能力较弱，在盐胁迫下几乎无法萌发，属于盐敏感材料，分别为 C5、D47、B56；第 II 类综合耐盐能力处于中等水平，在盐胁迫环境下萌发受到较大影响，属于中等耐盐材料，分别为 D12、A79、C21、C84、B12；第 III 类综合耐盐能力较强，在盐胁迫环境下萌发受到的影响不大，属于耐盐材料，分别为 W62、E125、E62、B24。

表 7　12 份西瓜材料的隶属函数值

Table 7　Subordinative function value of 12 watermelon materials

材料 Material	72 h 萌发率 72 h germination rate	发芽指数 Germination index	芽长 Bud length	活力指数 Vital index	平均隶属函数值 Mean subordinative function value
A79	0.537	0.349	0.708	0.289	0.471
B12	0.232	0.175	0.754	0.132	0.323
B24	1.000	0.714	0.754	0.605	0.768
B56	0.063	0.048	0.123	0.008	0.060
C5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C21	0.316	0.190	0.554	0.132	0.298
C84	0.337	0.270	0.492	0.132	0.308
D12	0.632	0.429	0.723	0.237	0.505
D47	0.063	0.063	0.138	0.011	0.069
E62	0.547	0.651	0.938	0.684	0.705
E125	0.947	0.730	1.000	0.789	0.867
W62	0.884	1.000	0.938	1.000	0.956

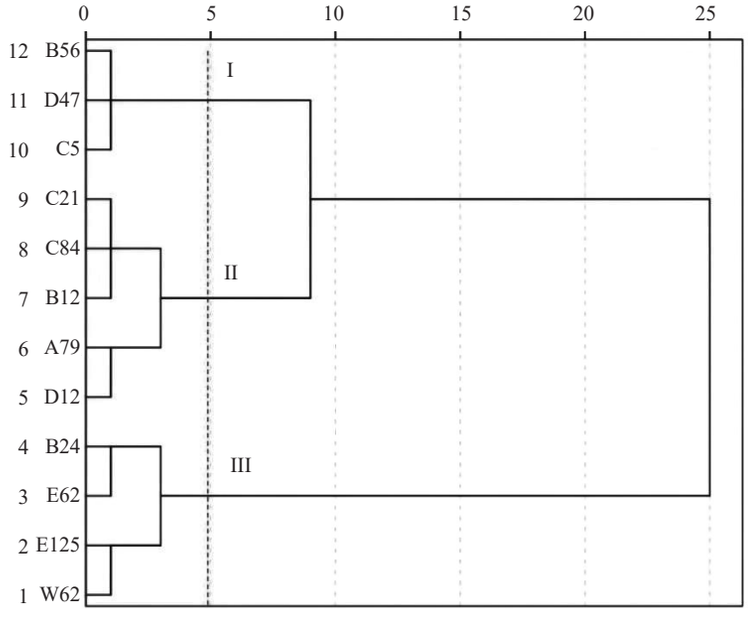


图 2　西瓜种质萌发期耐盐能力聚类分析

Fig. 2　Cluster analysis of salt tolerance of watermelon germplasm during germination stage

3　讨论与结论

土壤盐渍化是目前世界范围内日益严重的农业问题[20]，因用水管理不合理等导致耕地土壤中 NaCl 浓度增高，高浓度 Na^+ 和 Cl^- 积累可破坏植物细胞结构与功能，导致离子毒害、植物代谢紊乱，从而抑制植物的生长发育[21]。作物在种子萌发期对盐分较为敏感，因此萌发期可作为评价作物耐盐性的一个重要时期[22]。

西瓜种质耐盐性鉴定工作大部分聚焦于幼苗期[23-25]，与其他作物萌发期耐盐鉴定[26-27]相比，较为复杂且受季节、栽培环境的限制。前人研究表明，

随着NaCl浓度增加，砧用南瓜、伽师瓜、甜瓜等种子的萌发率不断下降；同一盐浓度下，不同种质间种子萌发指标差异较大[28-30]，由此可见，种子萌发期耐盐性鉴定具有可行性。本研究结果表明，随着NaCl浓度的不断升高，西瓜种子的萌发率、发芽势、相对萌发率、发芽指数、芽长、活力指数总体呈下降趋势，且不同种质之间各项指标差异明显，这与前人的研究结果基本一致。然而，种子萌发及盐胁迫对植物生长的影响均是一个较为复杂的生理过程，即同一材料因受种子本身胚结构、营养物质或受水分、盐分不均匀等环境差异的影响，也存在一定的萌发顺序的差异，导致本研究早期萌发不稳定、数值相差较大等，因此，试验设计100、150、200 mmol·L^{-1} 3个NaCl浓度梯度，综合统计了48、60、72 h的萌发情况并统计多个萌发相关指标，确保分析的全面性及可靠性。

种质资源在耐盐性评价时应该科学地使用多个指标进行综合评价。隶属函数及聚类分析法较为广泛地应用到甜瓜、辣椒、葡萄等种质抗逆评价及鉴定研究中，为园艺作物抗性种质选育提供了参考[31-33]。萌发率、发芽势、发芽指数、芽长和活力指数等各指标可从不同方面反映西瓜种子发芽期的耐盐性，但是其评价程度不尽相同。因此，笔者综合以上萌发指标，采用隶属函数和聚类分析法，综合计算其耐盐能力，将种质材料分为3类，分别为盐敏感、中等耐盐和耐盐材料，得出的结果与盐害指数得出的结论基本一致。与前人研究结果不同的是，通过设置低、中、高盐浓度，发现个别种质对中、低度盐害与高浓度盐害耐受性具有较大差异，例如W62、E125、E62等对不同盐浓度均表现为较强的耐受性，而B24尤其对中、低度盐浓度表现出较强的耐受性，这可能是由于种质本身对盐胁迫响应机制的差异。

综上所述，笔者对12份西瓜种质材料耐盐性采用隶属函数和聚类分析法，将其分为耐盐材料、中等耐盐材料及盐敏感材料，由此为西瓜耐盐遗传机制研究和耐盐性新品种选育提供材料基础。然而，植物耐盐是一个较为复杂的生理响应过程，受遗传及环境等多因素影响，不同生长阶段对盐胁迫的敏感度并不完全一致。因此，为了更好地将这些材料用于耐盐育种，后续还需要在筛选到芽期耐盐材料的基础上对其进行苗期及成株期耐盐性鉴定。

盐胁迫引起西瓜种子的萌发率、发芽势、发芽指数、根长、活力指数等指标下降，盐害指数反之。萌发率、发芽势、发芽指数、芽长、活力指数的综合指标越大，盐害指数越低，则种子耐盐性越强。W62、E125、E62、B24等4份种子材料属于耐盐材料；B12、C84、C21、A79、D12等5份材料属于中等耐盐材料；C5、D47、B56等3份材料属于盐敏感材料。

参考文献

[1] 于贝贝，何莉莉，杨生茂，等.木醋液改良盐碱土的研究进展[J].国土与自然资源研究，2024(1)：62-67.

[2] 杜志钊，邹磊，张艳敏，等.NaCl处理对大麦种子萌发后生长量和相关生理生化指标的影响[J].上海农业学报，2010，26(2)：34-37.

[3] 陆姣云，田宏，张鹤山，等.H_2O_2浸种对盐胁迫下紫花苜蓿种子萌发和幼苗生长的影响[J].草业学报，2023，32(10)：141-152.

[4] 段旭旋，管小妮，刘家奇，等.NaCl胁迫对甜玉米幼苗生长的影响[J].安徽农学通报，2023，29(22)：1-9.

[5] 李卫欣，陈贵林，赵利，等.NaCl胁迫下不同南瓜幼苗耐盐性研究[J].植物遗传资源学报，2006，7(2)：192-196.

[6] 郭珍珠，李路丽，李文瑞，等.上海地区不同大麦地方品种萌发期耐盐性鉴定及聚类分析[J].分子植物育种，2024，21(6)：1-9.

[7] 李春花，加央多拉，吴晗，等.46份甜荞种质萌发期耐盐资源评价与筛选[J].种子，2024，43(5)：1-6.

[8] 渠鹏正，袁潜华.山栏稻耐盐性评价与耐盐指标筛选[J].热带生物学报，2024，15(5)：531-546.

[9] 李严，张春庆.西瓜杂交种遗传多态性的SRAP标记分析[J].园艺学报，2005，32(4)：643-647.

[10] 侯尹婕，黄欣，冯梦娇，等.12份西瓜种质资源耐盐性鉴定[J].北方园艺，2025(7)：1-8.

[11] 马肖静，刘勇鹏，尚文凯，等.44份西瓜种质资源苗期耐盐性综合评价[J].中国瓜菜，2024，37(3)：45-53.

[12] 阎志红，刘文革，赵胜杰，等.NaCl胁迫对不同西瓜种质资源发芽的影响[J].植物遗传资源学报，2006，7(2)：220-225.

[13] 朱云娜，陆贵云，汤婉君，等.香茅纯露对蔬菜种子萌发和幼苗生长的影响[J].安徽农学通报，2022，28(3)：94-99.

[14] 朱世杨，张小玲，罗天宽，等.花椰菜种质资源萌发期耐盐性综合评价[J].核农学报，2012，26(2)：380-390.

[15] 阿曼姑•艾麦尔艾力，乃比•阿不来提，李陈建，等.盐胁迫对6个品种饲用甜高粱种子萌发和幼苗生长的影响[J].种子，2024，43(5)：137-146.

[16] 彭建营，束怀瑞，孙仲序，等.中国枣种质资源的RAPD分析[J].园艺学报，2000，27(3)：171-176.

[17] ZHANG Y L，ZHAO M X，TAN J S，et al. Telomere-to-telomere *Citrullus* super-pangenome provides direction for watermelon breeding[J]. Nature Genetics，2024，56：1750-1761.

[18] 陈淑芳，朱月林，刘友良，等.NaCl胁迫对番茄嫁接苗保护酶活性、渗透调节物质含量及光合特性的影响[J].园艺学报，2005，32(4)：609-613.

[19] 田治国，王飞，张文娥，等.多元统计分析方法在万寿菊品种抗旱性评价中的应用[J].应用生态学报，2011，22(12)：3315-3320.

[20] FANG Z X，FAN Q L，TIAN L X，et al. Evaluation of cucumber

seed germination vigor under salt stress environment based on improved YOLOv8[J]. Frontiers in Plant Science，2024，15：1447346.

[21] 曹镇宇，魏鹏超，杨忠仁，等.复合盐碱胁迫对沙葱种子萌发的影响[J].种子，2024，43(4)：104-110.

[22] 白小明，王靖婷，贺佳圆，等.8个野生早熟禾种子萌发期耐盐性研究[J].草地学报，2013，21(3)：546-555.

[23] 韩志平，郭世荣，冯吉庆，等.盐胁迫对西瓜幼苗生长、叶片光合色素和脯氨酸含量的影响[J].南京农业大学学报，2008，31(2)：32-36.

[24] 高博文，孙德玺，袁高鹏，等.121份西瓜材料幼苗期耐盐性鉴定[J].果树学报，2022，39(9)：1597-1606.

[25] 刘香娥，郭世荣，田婧，等.嫁接对西瓜幼苗生长及其耐盐性的影响[J].江苏农业学报，2009，25(3)：628-634.

[26] 张蒙，周经明，马玮，等.砧用中国南瓜种子萌发期耐盐性鉴定评价[J].中国瓜菜，2023，36(1)：26-34.

[27] 王薇薇，吴永成，梅燚，等.大蒜萌发期耐盐性综合评价[J].江苏农业科学，2021，49(21)：143-146.

[28] 时丕彪，耿安红，李亚芳，等.不同砧用南瓜品种萌芽期的耐盐性筛选[J].贵州农业科学，2019，47(6)：92-97.

[29] 谢志明，茹仙古丽·尤努斯，马刘峰，等.芽苗期伽师瓜耐盐性筛选与评价[J].北方园艺，2023(6)：19-25.

[30] 谢志明，玛依努尔·吾斯曼，覃志强，等.盐胁迫对4种甜瓜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].江苏农业科学，2023，51(11)：146-152.

[31] 卿东山，江鸿，张露瑶，等.甜瓜种质资源形态学性状遗传多样性分析[J].中国蔬菜，2023(4)：39-49.

[32] 李晓芬，尚庆茂，张志刚，等.多元统计分析方法在辣椒品种耐盐性评价中的应用[J].园艺学报，2008，35(3)：351-356.

[33] 曹建东，陈佰鸿，王利军，等.葡萄抗寒性生理指标筛选及其评价[J].西北植物学报，2010，30(11)：2232-2239.