

西瓜萌芽期与幼苗期盐害参数的相关性分析

徐奥霖^{1,2}, 刘鹏², 孙建磊², 董玉梅², 高超², 高铁楠¹

(1. 天津农学院园艺园林学院 天津 300384; 2. 山东省农业科学院蔬菜研究所·农业农村部黄淮设施园艺工程重点实验室·山东省大宗露地蔬菜育种重点实验室 济南 250100)

摘要:为探究西瓜种子萌芽期与幼苗期耐盐性的相关性,以及萌芽期耐盐性是否能代表幼苗期耐盐性,本试验以16个西瓜品种为试验材料,测定各品种萌芽期和幼苗期的盐害相关指标(发芽势、发芽率、盐害指数、总鲜质量、地上部分鲜质量、叶绿素含量、丙二醛含量、脯氨酸含量)。采用主成分分析、隶属函数分析、相关性分析等方法对西瓜萌芽期盐害参数和幼苗期耐盐性进行综合评价。结果表明,NaCl处理后西瓜幼苗总鲜质量和地上鲜质量减少,丙二醛和脯氨酸含量上升。幼苗期综合隶属函数值范围为0.160~0.789,萌芽期综合隶属函数值范围为0.043~0.830。萌芽期各指标盐害参数聚类分析后将16个西瓜品种划分为5个耐盐等级。按照萌芽期分类的5个耐盐等级将萌芽期和幼苗期的综合隶属函数值和平均隶属函数值进行相关性分析后,发现萌芽期和幼苗期的皮尔逊相关系数分别达到0.727和0.826,萌芽期和幼苗期的耐盐等级之间达到了强相关水平,表明萌芽期的耐盐性在一定程度上能代表幼苗期耐盐性。研究结果为西瓜耐盐资源的早期筛选提供了理论依据。

关键词:西瓜; 盐胁迫; 隶属函数; 主成分分析; 相关性

中图分类号:S651

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)12-163-08

Correlation analysis of salt damage parameters during watermelon germination and seedling stages

XU Aolin^{1,2}, LIU Peng², SUN Jianlei², DONG Yumei², GAO Chao², GAO Yinan¹

(1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2. Vegetable Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Horticultural Engineering of Huanghuai Facilities, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Shandong Key Laboratory of Mass Open Field Vegetable Breeding, Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract: To investigate the correlation of salt tolerance between seed germination stage and seedling stage, and to determine whether salt tolerance during germination can serve as an indicator for salt tolerance in the seedling stage, 16 watermelon cultivars were used as experimental materials. Salt stress-related physiological and growth parameters—including germination potential, germination rate, salt injury index, total fresh masd, shoot fresh mass, chlorophyll content, malondialdehyde (MDA) content, and proline content—were measured at the germination and seedling stages. Principal component analysis, membership function analysis, and correlation analysis were employed to comprehensively evaluate salt tolerance traits at both developmental stages. The results indicated that NaCl treatment significantly reduced total fresh mass and shoot fresh mass of seedlings, while increasing MDA and proline content. The comprehensive membership function value at the seedling stage ranged from 0.160 to 0.789. Based on key indicators such as salt injury index, fresh mass, shoot fresh mass, chlorophyll content, MDA content, and proline content, the 16 cultivars were classified into five salt tolerance grades using cluster analysis. Similarly, at the germination stage, the comprehensive membership function values ranged from 0.043 to 0.830, and the cultivars were grouped into five salt tolerance classes. Correlation analysis between the average and comprehensive membership function values at the two stages—according to the five-grade classification system established at the germination stage—revealed Pearson correlation coefficients of 0.727 and 0.826, respectively, indicating a strong positive correlation between salt tolerance at the germination and seedling stages. These findings suggest that salt tolerance at the germination stage may be a reliable predictor of salt tolerance performance at the seedling stage in watermelon. The research results provide a theoretical basis for the early screening of watermelon salt-tolerant resource.

Key words: Watermelon; Salt stress; Membership function; Principal component analysis; Correlation

收稿日期:2025-06-11; 修回日期:2025-08-11

基金项目:河北省省级科技计划项目(22327213D);天津农学院科学发展基金(20190113);山东省农业科学院创新工程项目(CXGC2025B08)

作者简介:徐奥霖,男,在读硕士研究生,研究方向为西瓜甜瓜育种。E-mail:1315578804@qq.com

通信作者:高铁楠,女,助理研究员,研究方向为设施蔬菜栽培生理。E-mail:ilyzp1@gmail.com

我国是西瓜生产与消费的第一大国,西瓜产量一直保持世界第一,在世界园艺产业中始终占有重要地位^[1]。2022年,中国西瓜收获面积为138.41万hm²,占全世界总收获面积的47.46%,产量为6038.61万t,占全世界西瓜总产量的60.41%,是名副其实的西瓜生产大国^[2]。然而,由于过度施用化肥和不合理灌溉等,土壤的次生盐渍化问题日益加剧^[3],据联合国粮农组织统计,全球盐渍土面积达9.5亿hm²,我国盐渍土面积约990万hm²,位居世界前列,土壤盐渍化已严重制约我国西瓜产业的可持续发展^[4]。

在农业生产中,为缓解植物盐害,常采用的措施包括喷施外源调节剂物质^[5-7]、良种选育^[8]、设施栽培^[9]等,良种选育无疑是最高效经济的措施。因此快速简洁的耐盐品种筛选方式极为重要。种子萌发和幼苗生长是蔬菜对盐分胁迫最敏感的两个阶段,也是蔬菜生长发育的关键时期^[10]。盐胁迫对种子的发芽势和发芽率有显著影响^[11]。西瓜幼苗材料可采用隶属函数分析和聚类分析等方法进行耐盐分级^[12]。前人研究表明,萌芽期盐胁迫会严重影响黄瓜幼苗期耐盐性,而西瓜的萌芽期和幼苗期耐盐性的相关性尚不明确^[13]。

在种质耐盐性评价中,多采用主成分分析和隶属函数分析的方法进行综合评价,可有效消除各指标间的相互影响,较好地处理大量的农艺性状数据,提高鉴定准确度,目前在小白菜、南瓜、甜瓜、番茄等多种园艺作物上得到广泛应用^[14-17],但是在西

瓜研究领域应用较少。笔者前期试验探究了140个西瓜品种在盐胁迫下的发芽势和发芽率,为进一步检测盐胁迫下萌芽期的发芽参数能否反映西瓜幼苗的耐盐水平奠定了基础,笔者进一步从5个耐盐等级的西瓜品种中分别随机选取代表品种,检测幼苗期盐胁迫相关参数,利用主成分分析和隶属函数法进行综合评价,分析萌芽期与幼苗期耐盐参数的相关性,检验萌芽期参数是否能够体现西瓜幼苗期的耐盐特性,以期为今后的耐盐西瓜资源早期筛选和品种选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2024年5月在山东农业科学院蔬菜研究所进行,所用的16个西瓜品种由表1所示单位和公司提供。

1.2 试验设计

1.2.1 西瓜萌芽期 采用随机区组设计,选用16个西瓜品种,以清水处理为对照,试验组加入150 mmol·L⁻¹NaCl溶液,3次重复,每次重复40粒种子,共计3840粒。具体方法如下:挑选大小均匀的种子放入29℃、湿度90%的高精度恒温恒湿箱中水浸2 h,取出后抖去表面水分,取40粒放入直径9 cm培养皿中,培养皿下铺双层滤纸,上铺1层滤纸,用移液枪分别加入清水和150 mmol·L⁻¹的NaCl溶液各5 mL,将培养皿放回恒温恒湿箱中催

表1 16个西瓜品种名称及来源
Table 1 Name and source of 16 watermelon varieties

编号 Number	材料名称 Name of material	来源 Source
Y-1	小西瓜 205 Small watermelon 205	山东省农业科学院 Shandong Academy of Agricultural Sciences
Y-3	小兰 Xiaolan	台湾农友种苗公司 Taiwan Nongyou Seed Company
Y-5	甜王 Tianwang	潍坊创科种苗有限公司 Weifang Chuangke Seedling Co., LTD.
Y-6	钱源 Qianyuan	武威安泰达种业有限责任公司 Wuwei Antaida Seed Industry Limited Liability Company
Y-7	全美 2K Quanmei 2K	日本丸种公司 Maru Seed Company of Japan
Y-9	双星 Shuangxing	河北双星种业股份有限公司 Hebei Double Star Seed Industry Co., LTD.
Y-14	秋农 Qiunong	潍坊创科种苗有限公司 Weifang Chuangke Seedling Co., LTD.
Y-16	桂西瓜 Gui watermelon	广西壮族自治区农业科学院园艺研究所 Horticulture Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences
Y-17	莱州 2 号 Laizhou 2	山东省莱州市金城种子公司 Shandong Laizhou Jincheng Seed Company
Y-24	绿王子 Lüwangzi	安徽省安生种子有限责任公司 Anhui Ansheng Seed Co., LTD.
Y-30		山东省农业科学院 Shandong Academy of Agricultural Sciences
Y-33		山东省农业科学院 Shandong Academy of Agricultural Sciences
Y-34		山东省农业科学院 Shandong Academy of Agricultural Sciences
Y-35	21SW1930	山东省农业科学院 Shandong Academy of Agricultural Sciences
Y-37	21A20B30	山东省农业科学院 Shandong Academy of Agricultural Sciences
Y-105	初心 Chuxin	济南伟丽种苗有限公司 Jinan Weili Seedling Co., LTD.

芽,为保证盐浓度稳定,第3天更换滤纸和溶液。分别于试验第3天和第5天统计发芽种子数,种子露白即为发芽。

1.2.2 西瓜幼苗期 采用随机区组设计,选择16个西瓜品种大小均匀的种子,将其浸入29℃、湿度90%的高精度恒温恒湿箱中2 h。取出后,抖去表面水分,各取100粒种子,放入直径18 cm的培养皿中。在培养皿下放置双层滤纸,在上面放置1层滤

纸。加入10 mL清水,将培养皿放回恒温恒湿室催芽。第2天,将露白的种子播种在预先装满基质的穴盘中。每5 d加入1/2浓度的霍格兰营养液,每株10 mL。西瓜长出第3片真叶时,进行150 mmol·L⁻¹ NaCl处理,以清水为对照,3次重复,每次重复15株。处理后7 d测定幼苗总鲜质量、地上部分鲜质量、叶绿素含量、丙二醛含量、脯氨酸含量等5项指标。改良的霍格兰营养液配方如表2所示。

表2 改良霍格兰营养液的组成

Table 2 Composition of improved Hogland nutrients solution

营养成分 Macronutrient	最终质量浓度 Final concentration/(mg·L ⁻¹)	微量元素 Micronutrient	最终质量浓度 Final concentration/(mg·L ⁻¹)
KNO ₃	607	H ₃ BO ₃	2.86
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	826	MnSO ₄ ·4H ₂ O	2.13
NH ₄ H ₂ PO ₄	115	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22
MgSO ₄ ·7H ₂ O	483	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08
		(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	0.02
		Na Fe-EDTA	30

1.3 测定指标与方法

采用电子天平称量幼苗总鲜质量和地上部分鲜质量。发芽势/%=(第3天发芽种子数/供试种子总数)×100;发芽率/%=(第5天发芽种子总数/供试种子总数)×100^[18]。采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量^[19]。采用酸性茚三酮比色法测定脯氨酸含量^[20]。采用SPAD-502叶绿素仪测定叶绿素含量(SPAD)^[21]。

$$\text{盐害指数}/\% = \sum \frac{\text{代表级数} \times \text{株数}}{\text{总株数} \times \text{最高级数}} \times 100^{[22]}$$

盐害分级标准如下:0级,生长正常,叶片无伤斑无卷曲,且叶柄无盐害症状;1级,轻度盐害,叶片伤斑或卷曲枯黄面积<25%;2级,叶片伤斑或卷曲枯黄面积在25%~50%之间,或叶柄有膨压降低,稍变软,保持直立;3级,叶片伤斑或卷曲枯黄面积在>50%~75%之间;4级,叶片伤斑或卷曲枯黄面积在75%以上,或叶柄严重膨压降低,软化并且倒伏;5级,叶片死亡或枯落,叶柄软化死亡。

各指标相对盐害参数=处理指标/对照指标。

1.4 数据处理与分析

采用IBM SPSS Statistics26、Microsoft Excel 2019等软件处理数据,进行隶属函数分析、主成分分析、聚类分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 西瓜幼苗期耐盐性评价

2.1.1 西瓜幼苗期各相对盐害参数的统计分析

由表3可以看出,16个西瓜品种幼苗中,丙二醛含量相对盐害参数的范围为0.69~1.81,其中Y-16最高,Y-33最低。脯氨酸含量相对盐害参数的范围为1.11~2.37,其中Y-7最高,Y-14最低。盐害指数的范围为1.67~19.33,其中Y-16最高,Y-34最低。总鲜质量相对盐害参数的范围为0.31~0.82,其中Y-34最高,Y-17最低。地上鲜质量相对盐害参数的范围为0.34~0.81,其中Y-34最高,Y-33最低。叶绿素含量相对盐害参数的范围为0.76~1.27,其中Y-35最高,Y-5最低。

2.1.2 西瓜幼苗期各指标相对盐害参数相关性及主成分分析 将丙二醛含量、脯氨酸含量、盐害指数、总鲜质量、地上鲜质量、叶绿素含量等数据利用SPSS软件进行相关性分析,结果如表4所示,进行主成分分析得到表5。丙二醛含量与脯氨酸含量呈负相关,与其他相对指标呈正相关;脯氨酸含量与叶绿素含量呈显著正相关,与总鲜质量呈显著负相关,与地上鲜质量呈极显著负相关,相关系数为-0.633;盐害指数与总鲜质量和地上鲜质量呈显著负相关;总鲜质量与地上鲜质量呈极显著正相关,相关系数为0.883。

由表5可知,依据特征值>1的原则,提取出前3个主成分,累计贡献率为82.774%,可将6个指标代表的信息降维成3个因子。其中第一个主成分特征值为2.640,贡献率为43.997%,地上鲜质量和总鲜质量的载荷因子较大,可以将地上鲜质量和总

表3 西瓜幼苗期各指标相对盐害参数的统计分析

Table 3 Statistical analysis of relative salt damage parameters of each index in watermelon seedling stage

编号 Number	丙二醛含量 MDA content	脯氨酸含量 Proline content	盐害指数 Salt damage index	总鲜质量 Total fresh mass	地上鲜质量 Aboveground fresh mass	叶绿素含量 Chlorophyll content
Y-34	1.50	1.13	1.67	0.82	0.81	1.02
Y-1	1.51	1.40	14.00	0.41	0.53	0.93
Y-5	1.58	1.24	12.00	0.54	0.55	0.76
Y-24	1.36	1.28	9.33	0.61	0.61	0.78
Y-35	1.49	2.27	7.00	0.41	0.42	1.27
Y-7	1.52	2.37	3.33	0.48	0.35	0.99
Y-37	1.60	1.67	11.67	0.33	0.41	0.78
Y-30	1.46	1.37	15.33	0.37	0.39	1.00
Y-33	0.69	1.70	17.67	0.37	0.34	1.02
Y-6	1.22	2.14	14.00	0.34	0.35	0.96
Y-9	0.78	1.47	6.33	0.44	0.46	0.85
Y-16	1.81	2.10	19.33	0.46	0.45	1.00
Y-17	1.20	2.27	6.33	0.31	0.39	0.91
Y-3	0.99	1.51	9.00	0.48	0.43	0.88
Y-14	1.37	1.11	7.00	0.46	0.49	0.93
Y-105	1.03	2.20	12.33	0.50	0.44	0.94

表4 盐胁迫下不同西瓜品种幼苗期各相对指标相关性

Table 4 Correlation of relative indexes of different watermelon varieties at seedling stage under salt stress

指标 Index	丙二醛含量 MDA content	脯氨酸含量 Proline content	盐害指数 Salt damage index	总鲜质量 Total fresh mass	地上鲜质量 Aboveground fresh mass	叶绿素含量 Chlorophyll content
丙二醛含量 MDA content	1	-0.016	0.016	0.180	0.296	0.064
脯氨酸含量 Proline content		1	0.065	-0.461*	-0.633**	0.447*
盐害指数 Salt damage index			1	-0.449*	-0.396*	-0.047
总鲜质量 Total fresh mass				1	0.883**	-0.058
地上鲜质量 Aboveground fresh mass					1	-0.164
叶绿素含量 Chlorophyll content						1

注: *表示在 0.05 水平显著相关; **表示在 0.01 水平极显著相关。下同。

Note: * represents significant correlation at 0.05 level; ** represents extremely significant correlation at 0.01 level. The same below.

鲜质量作为西瓜幼苗期耐盐品种鉴定的重要指标;第二个主成分特征值为 1.304, 贡献率为 21.734%, 叶绿素含量和脯氨酸含量的载荷因子较大, 可以将叶绿素含量和脯氨酸含量作为盐胁迫下能反映西瓜幼苗期的生理指标;第三个主成分特征值为 1.023, 贡献率为 17.044%, 丙二醛含量的载荷因子较大, 能反映盐胁迫对西瓜盐害指标的影响。

2.1.3 西瓜幼苗期隶属函数分析 分别计算平均隶属函数值和综合隶属函数值并进行排序, 计算得出表 6, 平均隶属函数值范围为 0.150~0.746, 综合隶属函数值范围为 0.160~0.789, 不同品种的幼苗期

耐盐性存在较大差异。按照综合隶属函数进行排序, Y-34、Y-35、Y-24 排名前三, 表明他们的幼苗期耐盐性较其他品种更强。

2.2 西瓜萌芽期耐盐性评价

2.2.1 西瓜萌芽期各性状统计分析 由表 7 可知, 西瓜 Y-34、Y-1、Y-5、Y-24、Y-35 的发芽势和发芽率要高于其他品种, 其中 Y-34 的发芽势和发芽率最高, 均为 93%, Y-3 发芽势和发芽率最低, 均为 0。Y-30 的百粒质量最高, 为 8.41 g, Y-17 最低, 仅为 1.40 g。

2.2.2 西瓜萌芽期各指标相关性分析和主成分分析 将发芽势、发芽率、百粒质量等数据利用 SPSS

表5 盐胁迫下西瓜各相对指标的主成分因子载荷矩阵

Table 5 Principal component factor load matrix of each relative index of watermelon under salt stress

指标 Index	因子1 Factor 1	因子2 Factor 2	因子3 Factor 3	因子4 Factor 4	因子5 Factor 5	因子6 Factor 6
丙二醛含量 MDA content	0.261	0.348	0.844	-0.298	-0.094	0.261
脯氨酸含量 Proline content	-0.725	0.515	-0.045	-0.237	0.384	-0.725
盐害指数 Salt damage index	-0.493	-0.459	0.545	0.458	0.200	-0.493
总鲜质量 Total fresh mass	0.893	0.230	-0.071	0.169	0.301	0.893
地上鲜质量 Aboveground fresh mass	0.957	0.096	0.079	0.130	0.080	0.957
叶绿素含量 Chlorophyll content	-0.301	0.804	-0.014	0.478	-0.187	-0.301
特征值 Eigenvalue	2.640	1.304	1.023	0.628	0.328	0.077
贡献率 Contribution rate/%	43.997	21.734	17.044	10.475	5.472	1.279
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	43.997	65.731	82.774	93.249	98.721	100.000

表6 盐胁迫下不同西瓜品种幼苗期
相对盐害参数隶属函数值Table 6 Subordinate function values of relative salt
damage parameters of different watermelon varieties at
seedling stage under salt stress

编号 Number	平均隶属函数值 Average membership function value	综合隶属函数值 Comprehensive membership function value	排名 Rank
Y-34	0.746	0.789	1
Y-35	0.563	0.503	2
Y-24	0.408	0.429	3
Y-14	0.418	0.411	4
Y-9	0.443	0.401	5
Y-7	0.390	0.391	6
Y-105	0.439	0.382	7
Y-3	0.419	0.379	8
Y-33	0.460	0.330	9
Y-1	0.345	0.325	10
Y-5	0.286	0.314	11
Y-17	0.316	0.290	12
Y-30	0.337	0.285	13
Y-16	0.294	0.264	14
Y-6	0.306	0.243	15
Y-37	0.150	0.160	16

软件进行相关性分析,发现发芽势与发芽率呈极显著正相关,百粒质量与发芽势和发芽率呈正相关,但相关性较低(相关系数分别为0.24和0.22)。

对西瓜种子萌芽期的3个指标进行主成分分析,结果由表9所示,发芽势的贡献率为69.256%,是代表性最高的指标。发芽势和发芽率的累计贡献率达99.078%,可以代表变量的绝大部分信息,而百粒质量贡献率占比不足1%,可以忽略不计。

2.2.3 西瓜萌芽期隶属函数分析 分别计算平均隶属函数值和综合隶属函数值并进行排序,计算得出表10,平均隶属函数值范围为0.071~0.878,综合

表7 萌芽期各性状统计分析

Table 7 Statistical analysis of each character during germination stage

编号 Number	发芽势 Germination potential/%	发芽率 Germination rate/%	百粒质量 Hundred-grain mass/g
Y-34	93 a	93 a	4.96
Y-1	56 bc	83 abc	3.03
Y-5	73 ab	90 ab	4.45
Y-24	70 b	86 abc	3.54
Y-35	70 b	80 abc	3.84
Y-7	23 def	40 ef	3.16
Y-37	26 de	43 de	2.96
Y-30	43 cd	63 cd	8.41
Y-33	46 cd	66 bc	2.12
Y-6	13 ef	13 g	3.63
Y-9	23 def	23 efg	3.37
Y-16	13 ef	16 g	5.65
Y-17	10 ef	20 fg	1.40
Y-3	0 f	0 g	1.74
Y-14	0 f	3 g	3.72
Y-105	0 f	3 g	4.30

注:同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

隶属函数值范围为0.043~0.830,不同西瓜品种萌芽期的耐盐性存在较大差异。按照综合隶属函数进行排序,Y-30、Y-34、Y-5排名前3,其萌芽期耐盐性较其他品种更强,而Y-14、Y-17、Y-3的萌芽期耐盐性相对较差。

2.2.4 西瓜萌芽期综合隶属函数的聚类分析 以发芽势、发芽率等数据对16个西瓜品种进行聚类分析,将这些品种划分为5个耐盐等级。第I类强耐盐品种为Y-34;第II类耐盐品种为Y-1、Y-35、Y-24、Y-5;第III类中耐盐品种为Y-30、Y-33;第IV类低耐盐品种为Y-37、Y-7;第V类盐敏感品种有7

表 8 盐胁迫下不同西瓜品种萌芽期各指标相关性
Table 8 Correlation between indices of different watermelon varieties at germination stage under salt stress

指标 Index	发芽势 Germination potential	发芽率 Germination rate	百粒质量 Hundred-grain mass
发芽势 Germination potential	1	0.97**	0.24
发芽率 Germination rate		1	0.22
百粒质量 Hundred-grain mass			1

表 9 盐胁迫下不同西瓜品种萌芽期各指标主成分分析
Table 9 Principal component analysis of each index of different watermelon varieties at germination stage under salt stress

指标 Index	贡献率 Contribution rate	累计贡献率 Cumulative contribution rate	%
发芽势 Germination potential	69.256	69.256	
发芽率 Germination rate	29.822	99.078	
百粒质量 Hundred-grain mass	0.922	100.000	

个,包括 Y-9、Y-17、Y-16、Y-6、Y-3、Y-105、Y-14。

2.3 西瓜萌芽期和幼苗期不同盐害等级隶属函数值相关性分析

按照萌芽期 5 个耐盐等级分类,将萌芽期和幼苗期的 5 个耐盐等级的平均综合隶属函数值进行相关性分析,结果由表 11 所示,萌芽期平均隶属函数值与综合隶属函数值的皮尔逊相关系数达到

表 10 盐胁迫下不同西瓜品种萌芽期
盐害参数隶属函数值

Table 10 The membership function value of salt damage parameters during the germination stage of different watermelon varieties under salt stress

编号 Number	平均隶属函数值 Average membership function value	综合隶属函数值 Comprehensive membership function value	排名 Rank
Y-30	0.878	0.830	1
Y-34	0.657	0.793	2
Y-5	0.570	0.687	3
Y-35	0.493	0.607	4
Y-24	0.471	0.601	5
Y-1	0.395	0.515	6
Y-16	0.498	0.417	7
Y-33	0.268	0.375	8
Y-37	0.289	0.321	9
Y-7	0.299	0.318	10
Y-9	0.298	0.292	11
Y-6	0.296	0.257	12
Y-105	0.327	0.243	13
Y-14	0.270	0.199	14
Y-17	0.079	0.096	15
Y-3	0.071	0.043	16

0.941,呈极显著正相关;幼苗期平均隶属函数值与综合隶属函数值的皮尔逊相关系数达到 0.951,呈极显著正相关;萌芽期和幼苗期的综合隶属函数值与平均隶属函数值进行相关性分析后发现,萌芽期和幼苗期的皮尔逊相关系数分别达到 0.727 和 0.826,萌芽期和幼苗期的耐盐等级之间达到了强相关水平,这为早期筛选优质耐盐品种提供了参考。

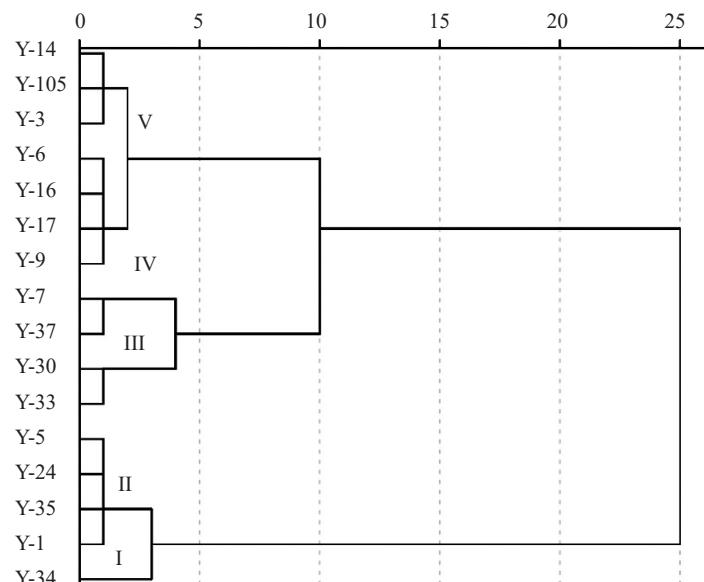


图 1 西瓜萌芽期综合隶属函数的聚类分析图

Fig. 1 Cluster analysis diagram of comprehensive membership function of watermelon germination stage

表 11 西瓜萌芽期和幼苗期不同盐害等级隶属函数相关性

Table 11 Correlation between membership function value of different salt damage levels during watermelon germination and seedling stages

指标 Index	萌芽期综合 隶属函数值 Embryonic synthesis membership function value	萌芽期平均 隶属函数值 Germination average membership function value	幼苗期综合 隶属函数值 Seedling stage comprehensive membership function value	幼苗期平均 隶属函数值 Seedling stage mean membership function value
萌芽期综合隶属函数值 Embryonic synthesis membership function value	1	0.941**	0.727	0.300
萌芽期平均隶属函数值 Germination average membership function value		1	0.270	0.826
幼苗期综合隶属函数值 Seedling stage comprehensive membership function value			1	0.951**
幼苗期平均隶属函数值 Seedling stage mean membership function value				1

3 讨论与结论

植物在种子萌芽期对盐分较为敏感,且在萌芽期进行耐盐性分析操作简便易行,适合大量筛选,因此萌芽期是进行植物耐盐性初步鉴别的关键时期^[23]。在萌芽期,发芽势和发芽率一定程度上能够反映盐胁迫对植株萌发的抑制作用,可以作为耐盐性鉴别的指标^[24]。在萌芽期进行种质耐盐性筛选,还具有高通量、鉴定周期短、容易操作等优点^[25]。本研究结果表明,以发芽势和发芽率两项指标对品种耐盐性的聚类虽然不够精确,但足以初步将品种进行区分。

作为膜脂过氧化的特征性产物,丙二醛含量能够直接反映细胞抗逆能力与生物膜损伤程度的关系。已有研究证实,丙二醛的持续积累与植物抗逆性衰退存在显著相关性^[26],这使得丙二醛含量成为评估逆境条件下植物细胞受损程度的重要依据。杨建军等^[27]发现盐胁迫会引发丙二醛含量的显著上升,导致细胞膜结构完整性受损。在植物应对逆境的生理响应中,渗透调节物质发挥着双重作用:既维持细胞渗透平衡,又参与酶系统稳定和自由基清除过程。其中脯氨酸作为关键的渗透调节因子,其特异性的积累现象与植物逆境耐受性提升密切相关。当植物感知环境胁迫信号时,会启动脯氨酸合成与转运的特异性调控机制,使其在细胞内形成保护性积累。这种适应性变化既能有效维持细胞膜系统稳定性,又通过参与蛋白质结构保护及代谢调控等分子过程,发挥生理保护功能^[28]。综上所述,丙二醛和脯氨酸含量的动态变化模式与植物抗逆反应关系密切,二者协同构成评估植物逆境响应强度的核心指标体系。

逆境胁迫是影响作物生长的关键因素,作物的耐受程度主要取决于品种的遗传潜力、品种特性、生长阶段和胁迫持续的时长、强度等^[29]。研究表明,多数作物的萌芽和幼苗阶段是对逆境胁迫的敏感时期,发育早期逆境胁迫会延缓种子萌发,降低种子发芽率^[30];幼苗期受到胁迫会使植物叶片损伤,促使叶片失绿,光合作用减弱,刺激植物衰老,继而降低产量;因此明确作物在不同生育期的抗逆能力强弱,才能更好地发挥品种优势,以更好地适应环境。谭薇等^[31]研究表明,马铃薯不同生育期的耐盐性不同,萌芽期与幼苗期对盐胁迫反应最为明显,而花蕾期和结薯期反应较小。

本试验中,不同西瓜品种的抗逆指标在盐处理下都有一定的上升,但不能完全显示出西瓜的耐盐能力。盐处理后相关抗逆指标上升,丙二醛和脯氨酸含量对综合耐盐指数的影响较显著。西瓜的耐盐能力受多个因素影响,单一指标并不能准确反映出不同材料的耐盐性,只有相应的综合性指标才能更好地反映出材料的耐盐性^[32]。已有不少学者对多种作物综合各项指标的隶属函数值进行种质资源鉴定,该方法在很大程度上可反映出种质资源耐盐性的水平^[33-36]。马肖静等^[37]、颜志明^[38]在选取多个指标进行耐盐性评价时,使用的是各指标的隶属函数值。本试验结合主成分分析、聚类分析、隶属函数分析等方法综合评价西瓜耐盐性,发现部分品种萌芽期和幼苗期显示不同的耐盐性,与前人的研究结果部分相同^[13]。根据前人的试验,不同瓜类作物品种所能耐受的盐成分及浓度不同,且随着苗龄增大,植株对盐胁迫的适应能力增强。笔者通过采用萌芽期和幼苗期相同的耐盐性生长指标,发现

幼苗期的耐盐能力要强于萌芽期，并且耐盐品种的两个时期耐盐性没有太大变化，而盐敏感品种的幼苗期的耐盐性比萌芽期要强。由于萌芽期和幼苗期盐胁迫时间较短，只能为西瓜阶段性耐盐能力提供参考。

综上所述，盐处理后西瓜幼苗总鲜质量和地上鲜质量减少，丙二醛含量和脯氨酸含量上升。萌芽期综合隶属函数值范围为0.043~0.831，幼苗期综合隶属函数值范围为0.160~0.789。萌芽期各指标盐害参数聚类分析后将16个西瓜品种分为5个耐盐等级，其中第I类强耐盐品种为Y-34；第V类盐敏感品种为Y-9(双星)、Y-17(莱州2号)、Y-16(桂西瓜)、Y-6(钱源)、Y-3(小兰)、Y-105(初心)、Y-14(秋农)。按照萌芽期分类的5个耐盐等级将萌芽期和幼苗期的综合隶属函数值和平均隶属函数值进行相关性分析，发现萌芽期和幼苗期的皮尔逊相关系数分别达到0.727和0.826，表明萌芽期和幼苗期的耐盐等级之间达到了强相关水平，萌芽期的耐盐性在一定程度上能代表幼苗期耐盐性。

参考文献

- [1] 雷玲,王夏君,于国光,等.国内外西瓜农药残留限量标准比对研究[J].中国瓜菜,2024,37(10):1-8.
- [2] 孟祥志,刘小林,苏海滨.中外西瓜产业发展现状及国际竞争力比较[J].北方园艺,2024(18):145-153.
- [3] 赵梦晨.盐胁迫对蓝靛果种子萌发生理生化及植株光合特性的影响研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2023.
- [4] 闵筱筱,高佳音,岳建华,等.不同品种传统菊花对盐胁迫的生理响应及耐盐性评价[J].山东农业科学,2024,56(8):62-73.
- [5] LI L, SHU S, XU Q, et al. NO accumulation alleviates H₂O₂-dependent oxidative damage induced by Ca(NO₃)₂ stress in the leaves of pumpkin-grafted cucumber seedlings[J]. Physiologia Plantarum, 2017, 160(1):33-45.
- [6] JIN X Q, LIU T, XU J J, et al. Exogenous GABA enhances muskmelon tolerance to salinity-alkalinity stress by regulating redox balance and chlorophyll biosynthesis[J]. BMC Plant Biology, 2019, 19(1):48.
- [7] 许姣姣.多胺和一氧化氮在γ-氨基丁酸调节甜瓜盐碱耐性中的作用[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [8] 李世玉.26份甜瓜材料耐盐性评价及外源NO对甜瓜盐胁迫的缓解效应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [9] ROUPHAEL Y, CARDARELLI M, REA E, et al. Improving melon and cucumber photosynthetic activity, mineral composition, and growth performance under salinity stress by grafting onto cucurbita hybrid rootstocks[J]. Photosynthetica, 2012, 50(2):180-188.
- [10] IBRAHIM E A. Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds[J]. Journal of Plant Physiology, 2016, 192: 38-46.
- [11] 陈嵘峰,屠静韵,许学文,等.蔬菜作物盐胁迫响应及耐盐机制研究进展[J].中国蔬菜,2024(4):23-33.
- [12] 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.
- [13] 杨文强.不同甜瓜品种耐盐性比较的研究[D].山东泰安:山东农业大学,2022.
- [14] 余如刚,张迪,余心悦,等.13种小白菜苗期耐盐比较分析及耐性指标筛选[J].云南农业大学学报(自然科学),2022,37(1):24-31.
- [15] 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.
- [16] 李世玉,程登虎,闫星,等.26份甜瓜材料耐盐性鉴定与评价[J].中国瓜菜,2022,35(9):23-30.
- [17] 张明亚,庞胜群,刘玉东,等.加工番茄种子萌发期耐盐性综合评价[J].中国瓜菜,2023,36(10):84-90.
- [18] 刘彤彤,李宁,魏良迪,等.山西省主推小麦品种芽期及苗期耐盐性的综合评价[J].中国农业大学学报,2022,27(2):22-33.
- [19] 张清航,张永涛.植物体内丙二醛(MDA)含量对干旱的响应[J].林业勘查设计,2019(1):110-112.
- [20] 郝再彬,苍晶,徐仲.植物生理实验[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.
- [21] 刘海英,梁长志,高路银,等.甜瓜种质叶部SPAD值的变异分析[J].中国瓜菜,2020,33(5):6-11.
- [22] 沈兰兴,张小村,孔凡美,等.耐盐黄瓜品种鉴定及萌芽期盐胁迫对黄瓜苗期耐盐性的影响[J].肥料与健康,2024,51(4):33-40.
- [23] 张国伟,路海玲,张雷,等.棉花萌发期和苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选[J].应用生态学报,2011,22(8):2045-2053.
- [24] 李鹤,郭世荣,束胜,等.48份黄瓜(*Cucumis sativus* L.)嫁接砧木种质资源耐寒性综合评价[J].沈阳农业大学学报,2013,44(5):609-615.
- [25] 成宜德.萝卜耐盐品种筛选及其对盐胁迫的生理响应[D].山东泰安:山东农业大学,2024.
- [26] 侯尹婕,黄欣,冯梦娇,等.十二份西瓜种质资源耐盐性鉴定[J].北方园艺,2025(7):1-8.
- [27] 杨建军,张国斌,郁继华,等.盐胁迫下内源NO对黄瓜幼苗活性氧代谢和光合特性的影响[J].中国农业科学,2017,50(19):3778-3788.
- [28] KHAMPENG B, 沈镭, 钟帅, 等.脯氨酸引发提高烟草种子和幼苗抗逆性及其与抗氧化系统的关系[J].山西农业科学, 2019, 47(1):39-48.
- [29] MAHALINGAM R, BREGITZER P. Impact on physiology and malting quality of barley exposed to heat, drought and their combination during different growth stages under controlled environment[J]. Physiologia Plantarum, 2019, 165(2):277-289.
- [30] LI W Y, ZHANG B, LI R Z, et al. Favorable alleles for stem water-soluble carbohydrates identified by association analysis contribute to grain weight underdrought stress conditions in wheat[J]. PLoS One, 2015, 10(3):e0119438.
- [31] 谭薇,刘金涛,吕春桃,等.马铃薯不同生育期耐盐性鉴定[J].云南师范大学学报(自然科学版),2023,43(4):29-35.
- [32] 董志刚,程智慧.番茄品种资源芽苗期和幼苗期的耐盐性及耐盐指标评价[J].生态学报,2009,29(3):1348-1355.
- [33] 江建霞,张俊英,李延莉,等.甘蓝型油菜耐低温发芽和苗期抗冻性种质的筛选和鉴定[J/OL].分子植物育种,1-13(2023-11-21)[2025-08-11].<https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231120.1528.018>.
- [34] 黄海涛,胡江,徐冬梅,等.豇豆萌芽期耐冷性综合鉴定与评价[J].西北农业学报,2019,28(2):237-246.
- [35] 李航,刘丽,黄乾,等.棉花种质资源萌发期耐盐性鉴定及筛选[J].作物学报,2024,50(5):1147-1157.
- [36] 刘鹏,杨文强,王崇启,等.甜瓜品系萌发期耐盐性鉴定及筛选[J].中国瓜菜,2024,37(8):34-50.
- [37] 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.
- [38] 颜志明.外源脯氨酸提高甜瓜幼苗耐盐性的生理调节功能[D].南京:南京农业大学,2011.