

西瓜苗期抗旱性评价及鉴定体系的初步建立

成娟娟¹, 袁高鹏^{2,3}, 何影², 王惠林¹, 朱迎春^{2,3}

(1. 新疆农业大学园艺学院 乌鲁木齐 830052; 2. 国家瓜类工程技术研究中心·中国农业科学院西部农业研究中心 新疆昌吉 831100; 3. 果蔬园艺作物种质创新与利用全国重点实验室·中国农业科学院郑州果树研究所 郑州 450009)

摘要: 为了建立西瓜抗旱性鉴定评价体系、提供耐旱材料简单快速的筛选方法, 以5个西瓜品种西农8号、天冠2号、新优2号、中兴红1号、中农美冠2号为试材, 采用盆栽试验, 设置干旱胁迫(自然干旱7 d)和正常浇水2个处理, 测定西瓜生长指标及生理指标的变化, 采用隶属函数法、主成分分析等方法, 分析各西瓜品种对干旱胁迫响应的差异, 筛选西瓜苗期的关键抗旱指标。结果表明, 干旱处理后, 各西瓜品种的生长指标及生理指标发生不同程度的变化, 干旱胁迫导致西瓜幼苗株高、根长、地上部及地下部干质量均有不同程度的降低; 同时西瓜幼苗叶片中脯氨酸、丙二醛含量升高, 过氧化氢酶活性增强, 而可溶性蛋白含量及相对电导率提高; 各西瓜品种的叶绿素含量经干旱处理后呈现差异性变化。通过隶属函数法、主成分分析等方法得出地上部干质量、根长、丙二醛含量在干旱胁迫后变化显著, 因此选用这3个指标作为西瓜苗期抗旱性鉴定的评价指标, 最终建立回归方程: $Y = 0.870 + 0.260 RL + 0.218 SDW - 0.426 MDA$, 根据 Y 大小鉴定抗旱性强弱, $Y \geq 0.70$ 为抗旱材料, $0.35 < Y < 0.70$ 为中间抗旱材料, $0 < Y \leq 0.35$ 为干旱敏感材料。研究结果为西瓜苗期抗旱性资源筛选及耐旱品种选育奠定了基础。

关键词: 西瓜; 苗期; 干旱胁迫; 抗旱性

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)06-091-10

Preliminary establishment of a system for evaluating and characterizing drought resistance in watermelon seedling

CHENG Juanjuan¹, YUAN Gaopeng^{2,3}, HE Ying², WANG Huilin¹, ZHU Yingchun^{2,3}

(1. College of Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. National Melon Engineering Technology Research Center/Western Agricultural Research Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, Xinjiang, China; 3. National Key Laboratory of Fruit, Vegetable and Horticultural Crop Germplasm Innovation and Utilization/Zhengzhou Fruit Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450009, Henan, China)

Abstract: In order to establish a drought tolerance identification and evaluation system of watermelon seedling, and provide a simple and rapid screening method of drought-tolerant material, five watermelon varieties named Xinong No. 8, Tianguan No. 2, Xinyou No. 2, Zhongxinghong No. 1, and Zhongnong Meiguan No. 2 were used as test materials, and a pot experiment was set up with two treatments of drought stress (natural drought for 7 d) and normal watering to determine the growth indexes of watermelon and physiological indicators, using the method of the affiliation function, principal component analysis and other methods, to analyze the differences in the response of watermelon varieties to drought stress, and to screen out the key drought indicators of watermelon seedling stage. The results showed that the growth and physiological indexes of watermelon varieties changed of different degrees after drought treatment, and the height, root length, aboveground and belowground dry mass of watermelon seedling decreased to different degrees as a result of drought stress; at the same time, the proline and malondialdehyde content of watermelon seedling leaves increased significantly, and the catalase activity was enhanced, whereas the soluble protein content and the relative conductivity increased; the chlorophyll content of watermelon varieties was increased by drought treatment. Through the affiliation function method, principal component analysis and other methods, it was concluded that the aboveground dry mass, root length and

收稿日期: 2025-04-11; 修回日期: 2025-05-10

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2023B02017-2); 国家现代农业产业技术体系(CARS-25); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-ZFRI, CAAS-ASTIP-WRI)

作者简介: 成娟娟, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为西瓜栽培生理与育种。E-mail: 1319096004@qq.com

通信作者: 王惠林, 男, 副教授, 研究方向为西瓜栽培生理与育种。E-mail: wanghuilin@126.com

朱迎春, 女, 研究员, 研究方向为西瓜栽培与育种。E-mail: zhuyingchun@caas.cn

malondialdehyde content changed significantly after drought stress, therefore, these three indexes were selected as the indexes for the identification of watermelon seedling drought tolerance, and the regression equation was finally established: $Y=0.870+0.260 RL+0.218 SDW-0.426 MDA$. Drought tolerance was identified according to the magnitude of Y value. $Y\text{-value}\geq 0.70$ are drought-resistant materials, $0.35<Y\text{-value}<0.70$ are intermediate drought-resistant materials, and $0<Y\text{-value}\leq 0.35$ are drought-sensitive materials. The research results have laid a foundation for the screening of drought-resistant resources at the seedling stage of watermelon and the breeding of drought-tolerant variety.

Key words: Watermelon; Seedling; Drought stress; Drought resistance

西瓜 [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai] 是世界上重要的园艺经济作物,特别是进入 21 世纪后,西瓜产业在全球内发展迅速,种植面积和产量在世界水果中都位居前列^[1]。由于生产周期短、经济效益高,西瓜已成为农民增产致富的重要产业^[2]。诸多研究表明,西瓜品种间抗旱性差异显著^[3],选育抗旱性强的西瓜品种有助于解决因干旱胁迫产生的低产问题。干旱是影响植物正常生长发育的主要非生物胁迫之一,对植物造成的影响最广泛^[4],严重影响西瓜的产量与品质,是西瓜栽培过程中面临的主要问题之一。中国是世界西瓜生产与消费第一大国,而旱区西瓜栽培面积占全国的三分之一。选育抗旱性强的西瓜品种是促进西北旱地及水资源短缺地区西瓜产业发展的有效途径之一,挖掘和筛选优良抗旱种质资源可以为西瓜抗旱新品种选育提供材料,对西瓜产业的可持续发展具有重要的生产实践意义。

采用苗期盆栽持续干旱胁迫处理,试验可控性和重复性较好,且筛选周期短,已在抗旱种质筛选试验中广泛应用^[5],苗期的抗旱性鉴定已有相关报道,李聪^[6]主要采用盆栽称质量法通过抗旱指数分析、主成分分析、聚类分析等方法筛选出了 6 个比较抗旱的西瓜品种。李颖慧等^[7]采用 PEG-6000 模拟干旱胁迫的方法,通过隶属函数法对抗旱性进行综合评价,比较 4 个品种的种子萌发和幼苗生长情况,筛选出西瓜种子萌发力最强的品种为林籽一号。何亚萍^[8]以 30 余份西瓜种质为试材进行抗旱性评价及抗旱指标的筛选,基于旱害指数直接评价和利用隶属函数综合评价法最终筛选到 5 份高抗西瓜种质。孙小妹^[9]以 10 个抗旱性不同的西瓜品种为材料,在人工控制水分条件下进行种子胁迫萌发及幼苗干旱试验,通过抗旱指数法、直接比较法、隶属函数法、分级评价法开展西瓜抗旱性鉴定方法和指标的筛选研究,得到 2 份干旱适应性强的种质。余灵桦等^[10]采用聚类分析的方法评价各资源的抗旱性,并对砧用南瓜抗旱性的形态指标进行筛选,得到 2 份多重抗性较强的南瓜砧木。周国彦

等^[11]以 33 份旱黄瓜资源为试材,利用 15% PEG-6000 模拟干旱环境,采用模糊隶属函数法进行抗旱性综合评价,筛选出高抗旱资源 4 份。

在选育抗旱品种的同时,建立可靠的抗旱性鉴定方法,有助于快速准确筛选抗旱品种,为抗旱品种选育提供理论依据^[12]。何亚萍^[8]对 30 余份西瓜材料进行苗期抗旱性鉴定,筛选出地上鲜质量、根长、可溶性蛋白含量等 6 个抗旱指标。许国齐^[3]对 188 份西瓜材料进行抗旱性鉴定,筛选出地上鲜质量、最大荧光、可变荧光等 6 个抗旱指标。陈菁菁等^[12]通过盆栽试验对 9 份西瓜材料的叶片结构、水分生理和气孔特性进行抗旱性相关分析,筛选出西瓜叶片的解剖特征和气孔特性可用于品种抗旱性鉴定。目前关于西瓜抗旱性评价缺乏统一的标准,评价鉴定方法单一,抗旱指标不明确。鉴于此,笔者以 5 个优良西瓜品种为材料,采用盆栽控水的方法在苗期进行干旱胁迫处理,对植株干旱胁迫后的外部形态特征进行直接评价,然后结合旱害指数、相关性分析、隶属函数法、主成分分析法,对反映西瓜抗旱性的 18 项指标进行综合评价,以期筛选出高度抗旱性西瓜品种,初步建立西瓜苗期的抗旱性鉴定评价体系,为西瓜种质的抗旱性评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料天冠 2 号、中兴红 1 号、中农美冠 2 号由中国农业科学院郑州果树研究所提供,西农 8 号、新优 2 号由新疆西域种业股份有限公司提供,品种特性见表 1。

1.2 方法

试验于 2024 年 1—5 月在中国农业科学院西部农业研究中心进行。

1.2.1 西瓜幼苗干旱胁迫试验 选择直径 2~4 mm 的陶粒、7 cm×7 cm×8 cm 的黑色花盆,草炭、蛭石体积比为 3:1 的基质,Hoagland's 营养液,挑选籽粒饱满、大小均匀一致、成熟无霉斑的西瓜种子各 100 粒,55℃温水浸种 6 h 后放入恒温箱(30℃)催芽

表 1 西瓜品种特性

Table 1 Characteristics of watermelon varieties

品种名称 Variety name	品种特性 Variety characteristics
西农 8 号 Xinong No. 8	中熟,大果型,椭圆花皮果,生长势强,耐贮运,抗旱性强 Medium ripe, large fruit type, oval flower skin fruit, strong growth potential, storage and transportation resistance, drought resistance
天冠 2 号 Tianguan No. 2	中晚熟,大果型,椭圆花皮果,果皮硬且韧,耐贮运,抗旱性强 Medium-late maturity, large fruit type, oval flower skin fruit, hard and tough skin, storage and transportation resistance, drought resistance
新优 2 号 Xinyou No. 2	中熟,大果型,椭圆花皮果,生长势较旺,抗旱性中等 Medium-ripe, large-fruited, oval-skinned fruits with strong growth potential and medium drought resistance
中兴红 1 号 Zhongxinghong No. 1	特早熟,小果型,椭圆花皮果,高番茄红素,耐贮运,抗旱性弱 Extra-early maturity, small fruit type, oval flower skin fruit, high lycopene, storage and transportation resistance, weak drought resistance
中农美冠 2 号 Zhongnong Meiguan No. 2	早熟,中果型,高圆花皮果,耐低温弱光,抗旱性弱 Early maturity, medium fruit type, high round flower skin fruit, low temperature and low light tolerance, weak drought resistance

36~48 h。在 7 cm×7 cm×8 cm 黑色花盆中装入 64 g 基质,用镊子挑选发芽健硕的西瓜种子播种于花盆中,露白处向下,温度条件为白天 25~28 ℃,夜间 18~20 ℃。

播种后第 30 天西瓜幼苗长至 5 叶 1 心时,进行正常水分管理(CK),自然干旱处理(DS,自然干旱 7 d),每个处理 10 株,3 次重复。观察干旱处理后西瓜幼苗的变化,并记录。处理后第 7 天,摘取

西瓜幼苗生长点顶端倒数第二片叶(从上往下数第二片展开叶),迅速放入冰盒,置于-80 ℃冰箱保存,用于后续生理生化指标测定。

1.2.2 测定指标和方法 参照莫言玲^[4]的旱害分级标准(表 2)测定旱害指数。

从自然干旱处理开始(第 0 天)进行旱害处理统计^[5],每个重复取 10 株对植株进行旱害指数调查。公式如下:

表 2 旱害指数分级标准

Table 2 Drought index classification criteria

旱害指数等级 Level of drought index	症状 Symptomatic
0	植株生长正常,茎直立,叶片平展未下垂,叶缘未卷曲 Plants with normal growth, erect stems, leaf blades spreading without drooping, leaf margins not curled
1	植株茎直立,叶片下垂或叶片叶缘卷曲 Plant stems erect, leaf blades pendulous or leaf blades with curled margins
2	茎直立,但茎表皮皱缩,叶片弯曲下垂严重 Stems erect, but stem epidermis wrinkled, leaves bent and drooping heavily
3	茎失水弯曲,整株叶片均下垂 Stems bent by water loss, leaves drooping throughout the plant
4	幼苗茎失水弯曲,叶片下垂,且叶边缘干枯 Seedling stems lose water and bend, leaves droop and leaf margins dry out

DI (旱害指数) $= (0 \times S_0 + 1 \times S_1 + 2 \times S_2 + 3 \times S_3 + 4 \times S_4) / \text{总株数}$ 。

式中, S 代表相应旱害级别下的株数,以旱害指数平均值为评价标准,旱害指数越小,抗旱性越强,反之,抗旱性越弱。

生长指标的测定:干旱处理第 7 天,对照组和试验组每个重复随机选取 3 株幼苗,测定地上鲜质量和地下鲜质量,选择受胁迫程度一致的西瓜幼苗

根系用清水冲洗干净并迅速擦干,从根茎结合处划分地上部分,用百分之一电子天平称地上鲜质量和地下鲜质量,株高为茎基部处到生长点的高度。试验材料经 105 ℃高温处理 30 min 后,转入 80 ℃恒温烘干程序持续 24 h 至质量恒定。采用称质量法分别测定地上部与根系生物量;采用 IN-GX02 根系扫描仪(山东来因科技)测量根长、根表面积。

生理生化指标测定:随机选取对照组与处理组

幼苗各 3 株进行多指标同步测定,采用 95 %乙醇有机溶剂浸提法测定叶绿素含量^[13],采用茚三酮显色法测定脯氨酸含量^[14],采用紫外分光光度法测定过氧化氢酶活性^[15],采用硫代巴比妥酸反应法测定丙二醛含量^[15],采用硫酸钛比色法测定过氧化氢含量^[15],采用愈创木酚法测定过氧化物酶活性^[15],采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白含量^[16];采用氮蓝四唑光还原法测定超氧化物歧化酶活性^[17];采用电导仪法测定相对电导率^[18],采用羟胺氧化法测定超氧阴离子生成速率^[19]。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 处理数据,采用 SPSS 19.0 的 Duncan 法对同一西瓜品种在相同干旱胁迫下进行差异显著性分析。

1.3.1 相对变化率的计算 相对变化率的计算公式为: $X=(V_T-V_{CK})/V_{CK}$ 。式中: X 为相对变化率, V_T 为处理组各项指标的测定值, V_{CK} 为 CK 组各项指标的测定值。

1.3.2 隶属函数值的计算 当测定指标的相对变化率与西瓜种质抗旱性呈负相关时,隶属函数值 $\mu(X)=(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$ 。式中: X_{max} 和 X_{min} 分别表示相对变化率的最大值和最小值。当测定指标的相对变化率与西瓜种质抗旱性呈正相关时, $\mu(X)=$

$1-(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$ 。

1.3.3 抗旱指标的筛选 采用 SPSS25.0 中的多元线性逐步回归法,结合各品种 18 个指标的隶属函数值进行回归分析,筛选抗旱指标。

2 结果与分析

2.1 5个西瓜品种幼苗旱害指数的比较

正常浇水条件下,西瓜幼苗生长旺盛,植株状态健康,干旱处理后,幼苗生长受到胁迫,干旱处理 3 d 时,基本无明显的旱害表型,旱害指数为 0;干旱胁迫 4 d 时,慢慢表现出较为明显的旱害表型,主要表现为叶片萎蔫,叶柄弯曲下垂;干旱胁迫 5 d 时,叶尖和叶缘向内翻卷;干旱胁迫 6 d 时,真叶黄化缺绿;干旱胁迫 7 d 时,叶片褐化焦枯,甚至整个植株干枯死亡。随着胁迫时间延长,土壤含水量不断降低,干旱胁迫加剧,土壤含水量进一步降低,材料旱害表型加重,平均旱害指数增加幅度变大(图 1 和表 3)。

根据各材料旱害指数的平均值(表 3),干旱胁迫结束后,最大旱害指数为 2.04(中农美冠 2 号),最小旱害指数为 1.04(西农 8 号),对 5 个品种的抗旱性初步比较,强弱顺序为西农 8 号>天冠 2 号>新优 2 号>中兴红 1 号>中农美冠 2 号。

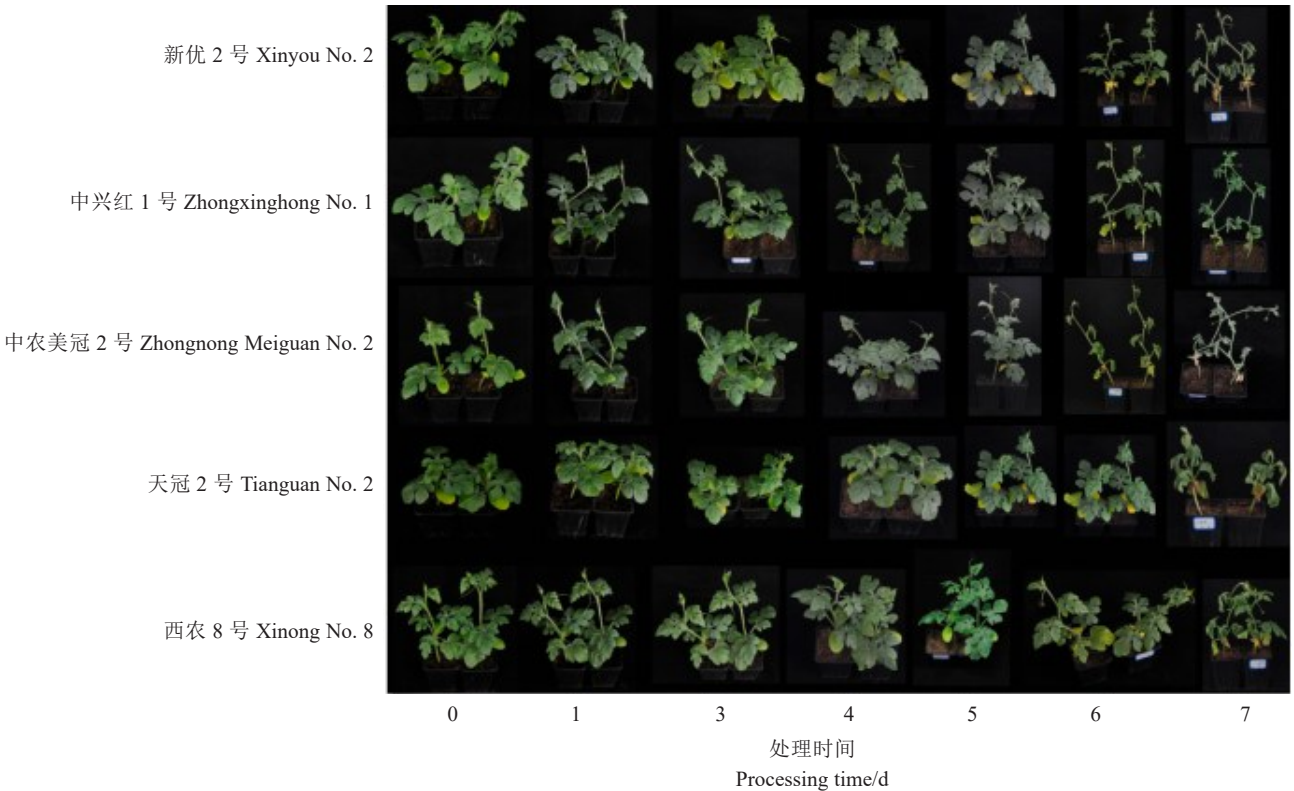


图 1 干旱处理下 5 个西瓜品种幼苗的形态变化
Fig. 1 Morphological changes in seedlings of five watermelon varieties under drought treatment

表3 干旱胁迫下不同西瓜品种幼苗的旱害指数及抗旱性排序

Table 3 Drought damage index and drought tolerance ranking of seedlings of different watermelon varieties under drought stress

品种 Variety	旱害指数 Drought damage index					抗旱性排名 Ranking of drought tolerance
	第4天 Day 4	第5天 Day 5	第6天 Day 6	第7天 Day 7	平均 Average	
西农8号 Xinong No. 8	0.10	0.60	1.16	2.30	1.04	1
天冠2号 Tianguan No. 2	0.10	0.60	1.18	2.31	1.05	2
新优2号 Xinyou No. 2	0.13	0.30	1.23	2.97	1.16	3
中兴红1号 Zhongxinghong No. 1	0.13	0.20	1.33	3.00	1.17	4
中农美冠2号 Zhongnong Meiguan No. 2	0.23	1.53	2.63	3.77	2.04	5

2.2 5个西瓜品种幼苗生长指标的比较

正常浇水情况下,未进行干旱胁迫的幼苗生长情况良好,但因各材料遗传背景不同,各生长指标在材料间表现出不同程度的差异。为消除遗传背景差异对试验结果的影响,通过计算各生长指标的相对变化率来评估材料的抗旱性。由表4可知,干旱胁迫下,所有西瓜品种的株高均降低,其中新优2号的株高与CK相比降低最少,只降低16.67%;天冠2号的株高与CK相比降低最多,达到43.67%。不同西瓜品种的根系伸长均受到抑制,新优2号根系伸长受到的抑制程度较大,与CK相比降低33.33%,天冠2号的根长与CK相比降低最少,为15.67%。干旱胁迫后不同西瓜品种的根表面积受到抑制,天冠2号根表面积与CK相比降低最少,仅降低了16.67%,新优2号降低最多,达66.67%。西农8号地上鲜质量与CK相比降低最多,达58.00%,中兴红1号与CK相比降低最少,只降低

32.67%。西农8号地下鲜质量与CK相比降低最多,降低96.33%,中农美冠2号与CK相比降低最少,降低83.00%。干旱胁迫后,西农8号地上干质量与CK相比降低最多,达15.33%,天冠2号地下干质量与CK相比降低最多,达66.29%,中农美冠2号降低最少,分别为5.04%和41.24%。中农美冠2号根冠比与CK相比降低最多,达166.67%,天冠2号与CK相比降低最少,为107.00%。综上,干旱胁迫对西瓜生长指标有不同程度的抑制,由于不同西瓜品种幼苗的生长对干旱胁迫的响应程度不同,不同品种之间抗旱性存在较大差异。

2.3 5个西瓜品种幼苗生理指标的比较

干旱胁迫对西瓜幼苗的生理指标有不同程度的影响,结果见表5,干旱胁迫后,各品种叶绿素含量均不同程度地提高,其中天冠2号与CK相比提高最多,达16.30%,中兴红1号提高最少,为7.30%。干旱胁迫后,各品种的可溶性蛋白含量不

表4 干旱胁迫后不同西瓜品种幼苗各生长指标的相对变化率

Table 4 Relative change rate of each growth index of seedlings of different watermelon varieties after drought stress

品种 Variety	PH	RL	RSA	SFW	FUW	SDW	DBW	R/S
西农8号 Xinong No. 8	-32.67±2.21 c	-22.33±2.60 b	-30.33±2.40 b	-58.00±2.11 b	-96.33±2.50 b	-15.33±0.66 e	-50.80±3.96 ab	-127.33±9.27 ab
天冠2号 Tianguan No. 2	-43.67±1.46 d	-15.67±0.88 a	-16.67±0.33 a	-44.33±4.70 a	-91.00±3.66 b	-14.43±1.45 cd	-66.29±5.77 b	-107.00±7.35 a
新优2号 Xinyou No. 2	-16.67±1.20 a	-33.33±1.33 d	-66.67±1.76 d	-44.67±6.60 a	-90.67±4.70 b	-12.25±0.88 c	-64.15±5.84 ab	-115.00±4.26 ab
中兴红1号 Zhongxinghong No. 1	-25.67±2.40 b	-31.33±2.19 cd	-58.00±0.58 c	-32.67±2.23 a	-91.00±9.35 b	-9.12±0.57 b	-50.22±10.50 ab	-110.33±7.22 ab
中农美冠2号 Zhongnong Meiguan No. 2	-19.67±0.33 a	-25.67±1.85 bc	-54.00±3.79 c	-33.67±4.15 a	-83.00±5.17 a	-5.04±0.58 a	-41.24±6.13 a	-166.67±5.87 c

注:PH. 株高;RL. 根长;RSA. 根表面积;SFW. 地上鲜质量;FUW. 地下鲜质量;SDW. 地上干质量;DBW. 地下干质量;R/S. 根冠比。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: PH. Plant height; RL. Root length; RSA. Root surface area; SFW. Aboveground fresh mass; FUW. Belowground fresh mass; SDW. Aboveground dry mass; DBW. Belowground dry mass; R/S. Root crown ratio. Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 leve. The same below.

同程度地提高,其中西农 8 号与 CK 相比提高最少,仅为 2.00%,天冠 2 号提高最多,达 9.00%。各品种叶片相对电导率不同程度地提高,其中西农 8 号提高最多,达 209.33%,中兴红 1 号提高最少,为 127.33%。中兴红 1 号与 CK 相比丙二醛含量提高最多,达 49.87%,天冠 2 号提高最少,为 18.27%。超氧阴离子、过氧化氢含量在干旱胁迫后均不同程度地提高,其中西农 8 号与 CK 相比提高最多,分别为 68.40%、103.37%,新优 2 号超氧阴离子提高最少,为 25.37%,天冠 2 号的过氧化氢含量提高最少,

为 32.13%。干旱胁迫后,天冠 2 号的脯氨酸含量与 CK 相比提高最少,为 119.10%,而中农美冠 2 号提高最多,达 429.13%。

在干旱胁迫后,新优 2 号 POD 活性与 CK 相比提高最多,达 243.30%,中兴红 1 号提高最少,为 18.13%。SOD 活性与 CK 相比均有所降低,中兴红 1 号在干旱胁迫后降低最多,达 38.57%,天冠 2 号降低最少,为 19.83%。在干旱胁迫后,不同品种的 CAT 活性与 CK 相比表现不一致,其中西农 8 号降低 29.97%,中兴红 1 号提高 78.40%。

表 5 干旱胁迫后不同西瓜品种幼苗各生理指标的相对变化率

Table 5 Relative change rate of each physiological index in seedlings of different watermelon varieties after drought stress %										
品种 Variety	Chl	SP	EC	MDA	O ₂ ⁻	H ₂ O ₂	Pro	POD	SOD	CAT
西农 8 号 Xinong No. 8	7.67± 1.76 b	2.00± 0.57 c	209.33± 7.34 a	21.33± 2.08 b	68.40± 2.33 a	103.37± 2.14 a	335.83± 3.26 b	131.37± 7.28 c	-25.93± 9.46 a	-29.97± 4.64 c
天冠 2 号 Tianguan No. 2	16.30± 0.33 a	9.00± 0.58 a	194.67± 19.80 ab	18.27± 2.60 b	46.20± 3.84 b	32.13± 2.60 c	119.10± 5.02 d	39.93± 9.12 d	-19.83± 1.89 a	-33.33± 2.78 c
新优 2 号 Xinyou No. 2	12.00± 3.79 ab	2.33± 0.33 bc	131.67± 9.58 c	46.50± 3.48 a	25.37± 2.19 c	39.27± 2.28 c	285.57± 7.53 c	243.30± 7.28 a	-34.17± 4.96 a	-29.20± 2.74 c
中兴红 1 号 Zhongxinghong No. 1	7.30± 1.86 b	4.33± 0.88 b	127.33± 8.01 c	49.87± 3.78 a	41.07± 1.33 b	75.13± 3.84 b	260.57± 7.52 c	18.13± 8.60 d	-38.57± 6.92 a	78.40± 7.34 a
中农美冠 2 号 Zhongnong Meiguan No. 2	8.00± 1.15 b	6.90± 0.58 bc	161.33± 4.34 bc	33.63± 3.71 b	64.77± 2.65 a	67.13± 8.00 b	429.13± 7.76 a	175.17± 2.24 b	-29.57± 6.96 a	33.53± 6.58 b

注:Chl. 叶绿素含量;SP. 可溶性蛋白含量;EC. 相对电导率;MDA. 丙二醛含量;O₂⁻. 超氧阴离子含量;H₂O₂. 过氧化氢含量;Pro. 脯氨酸含量;POD. 过氧化物酶活性;SOD. 超氧化物歧化酶活性;CAT. 过氧化氢酶活性。

Note: Chl. Chlorophyll content; SP. Soluble protein content; EC. Relative conductivity; MDA. Malondialdehyde content; O₂⁻. Superoxide anion content; H₂O₂. Hydrogen peroxide content; Pro. Proline content; POD. Peroxidase activity; SOD. Superoxide dismutase activity; CAT. Catalase activity.

2.4 干旱胁迫后不同西瓜品种幼苗各生长指标与旱害指数的相关关系

由表 6 可知,根长与株高呈极显著负相关,相关系数为-0.722;地上鲜质量与地上干质量呈极显著正相关,相关系数为 0.761;地上干质量与株高呈显著正相关,相关系数为 0.548,地下干质量与地下鲜质量呈极显著正相关,相关系数为 0.976;根冠比与地上鲜质量和地上干质量均呈极显著负相关,相关系数分别为-0.700 和-0.970;根表面积与株高、地上干质量呈极显著或显著负相关,相关系数分别为-0.924 和-0.558,与根长呈极显著正相关,相关系数为 0.889;旱害指数(DI)与地上干质量呈极显著正相关,相关系数为 0.838,与地下鲜质量呈显著正相关,相关系数为 0.640,与根冠比呈极显著负相关,相关系数为-0.814。

2.5 干旱胁迫后不同西瓜品种幼苗各生理指标与旱害指数的相关关系

由表 7 可知,过氧化氢含量、脯氨酸含量与叶

绿素含量呈显著负相关,相关系数分别为-0.608、-0.611;过氧化氢含量与超氧阴离子含量呈极显著正相关,相关系数为 0.686;超氧阴离子含量与相对电导率呈显著正相关,相关系数为 0.589;SOD 活性与相对电导率呈显著正相关,相关系数为 0.590;CAT 活性与相对电导率呈显著负相关,相关系数为-0.565,与丙二醛含量呈极显著负相关,相关系数为-0.733;旱害指数与丙二醛含量呈显著负相关,相关系数为-0.616,与脯氨酸含量呈极显著正相关,相关系数为 0.722。

2.6 主成分分析

采用主成分分析可以消除各指标间的相互影响,排除次要指标的干扰作用,提高分析的准确性。由表 8 可知,前 3 个主成分特征值均大于 1,贡献率分别为 44.128%、27.493%、15.528%,累计贡献率达 87.149%,表明可以将原来 18 个相关的单项指标转换为 3 个彼此独立的主成分,且覆盖了原始指

表 6 干旱胁迫后不同西瓜品种幼苗各生长指标与旱害指数的相关性

Table 6 Correlation between each growth index and drought damage index of seedlings of different watermelon varieties after drought stress

指标 Index	PH	RL	SFW	FUW	SDW	DBW	R/S	RSA
RL	-0.722 **							
SFW	0.295	-0.284						
FUW	0.308	-0.111	0.115					
SDW	0.548 *	-0.396	0.761 **	0.502				
DBW	0.255	-0.084	0.050	0.976 **	0.385			
R/S	-0.689 **	0.494	-0.700 **	-0.466	-0.970 **	-0.344		
RSA	-0.924 **	0.889 **	-0.440	-0.220	-0.558 *	-0.175	0.662 **	
DI	0.500	-0.115	0.415	0.640 *	0.838 **	0.502	-0.814 **	-0.359

*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: * denotes significant correlation at 0.05 level, ** denotes extremely significant correlation at 0.01 level. The same below.

表 7 干旱胁迫后不同西瓜品种幼苗各生理指标与旱害指数的相关性

Table 7 Correlation between various physiological indexes and drought damage index of seedlings of different watermelon varieties after drought stress

指标 Index	Chl	SP	EC	MDA	O ₂ ^{-•}	H ₂ O ₂	Pro	POD	SOD	CAT
SP	0.637 *									
EC	0.090	0.181								
MDA	0.079	-0.263	0.324							
O ₂ ^{-•}	-0.267	-0.102	0.589 *	-0.133						
H ₂ O ₂	-0.608 *	-0.578 *	0.267	0.027	0.686 **					
Pro	-0.611 *	-0.729 **	-0.067	-0.193	0.538 *	0.600 *				
POD	-0.016	-0.612 *	-0.162	0.336	-0.114	-0.062	0.487			
SOD	0.024	0.205	0.590 *	0.187	0.221	0.007	-0.222	-0.127		
CAT	-0.464	-0.110	-0.565 *	-0.733 **	0.031	0.265	0.335	-0.390	-0.344	
DI	-0.266	-0.246	-0.172	-0.616 *	0.385	0.101	0.722 **	0.339	-0.069	0.401

标绝大部分的信息。其中地上鲜质量、地上干质量在第 1 主成分中载荷较大,是主成分 1 的重要变量,主要反映了盐胁迫下西瓜幼苗的地上部分生物量;第 2 主成分中根长、根表面积的载荷较大,反映了干旱胁迫下西瓜幼苗根部的生长情况;第 3 主成分中 MDA 含量的载荷较大,反映了盐胁迫下西瓜幼苗叶片的生理变化。综合相关性分析的结果,选择载荷(绝对值)较大的 3 个指标:地上干质量(载荷值为 0.953)、丙二醛含量(载荷值为 0.656)、根长(载荷值为 0.909)作为西瓜苗期的抗旱筛选指标。

2.7 隶属函数分析

隶属函数分析是基于模糊集合理论,对受到多种指标影响的事物进行综合评价的方法。由表 9 可知,试验品种的 *D* 值范围为 0.11~0.72,说明供试品种存在着广泛的抗旱性差异。*D* 值≥0.7 的品种有西农八号、天冠 2 号,*D* 值<0.2 的为中兴红 1 号,新优 2 号的 *D* 值为 0.48,中农美冠 2 号的 *D* 值为 0.32,抗旱性强弱顺序为西农八号>天冠 2

表 8 3 个主成分特征值、贡献率及载荷矩阵分析

Table 8 Eigenvalue, contribution rate and loading matrix of three principal components

指标 Index	PC1	PC2	PC3
SDW	0.953	0.244	0.173
EC	-0.900	0.101	-0.083
DBW	-0.880	0.284	-0.113
SFW	0.831	-0.115	0.512
FUW	0.818	0.212	-0.347
SP	0.765	-0.403	0.251
R/S	-0.752	-0.200	0.590
MDA	0.750	0.070	0.656
CAT	0.767	-0.439	0.051
O ₂ ^{-•}	0.742	0.496	-0.346
Pro	0.694	0.530	-0.320
PH	0.669	-0.562	-0.191
H ₂ O ₂	0.470	0.351	-0.176
POD	0.101	-0.912	-0.317
RL	-0.258	0.909	-0.062
RSA	0.277	0.842	0.306
SOD	0.126	0.822	0.469
Chl	0.579	-0.723	0.326
特征值 Eigenvalue	7.943	4.949	2.795
贡献率 Contribution rate/%	44.128	27.493	15.528
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	44.128	71.621	87.149

号>新优 2 号>中农美冠 2 号>中兴红 1 号,此结果与旱害分级结果存在差异,因此根据苗期旱害分级标准判断西瓜抗旱性存在一定的局限性。

2.8 抗旱回归方程预测

为进一步研究各耐旱指标与平均隶属函数的定量关系,以平均隶属函数为因变量,以 5 个西瓜

表 9 各品种综合指标值、 $\mu(X)$ 和 D 值
Table 9 Combined index value, $\mu(X)$ and D value for each variety

品种 Variety	$CI(1)$	$CI(2)$	$CI(3)$	$\mu(X1)$	$\mu(X2)$	$\mu(X3)$	D	排序 Ranking
西农八号 Xinong No. 8	1.48	0.19	-0.92	1.00	0.74	0.00	0.72	1
天冠 2 号 Tianguan No. 2	0.59	-0.08	1.49	0.62	0.63	1.00	0.70	2
新优 2 号 Xinyou No. 2	-0.66	0.83	0.49	0.08	1.00	0.59	0.48	3
中兴红 1 号 Zhongxinghong No. 1	-0.56	-1.66	-0.27	0.13	0.00	0.27	0.11	5
中农美冠 2 号 Zhongnong Meiguan No. 2	-0.85	0.72	-0.78	0.00	0.96	0.06	0.32	4

品种的地上干质量、丙二醛含量、根长为自变量建立回归方程。如表 10 所示, R^2 表示方程拟合的好坏,本研究中调整后 R^2 为 0.876,表明这 3 个耐旱指标可以解释平均隶属函数 87.6%的信息,拟合效果较好。如表 11 所示,Anova 表中 p 值大小决定了该回归方程的有效性,本研究中 p 为 0.002,小于 0.05,表明该回归方程可靠。如表 12 所示,系数表中 B 值表示各变量的系数,根据 B 值建立的回归方程为: $Y=0.870+0.260 RL+0.218 SDW-0.426 MDA$ 。

3 讨论与结论

抗旱品种鉴定是西瓜抗旱育种的基础工作。前人多采用表型指标结合生长指标的鉴定方法,如地上部分鲜质量^[20-22]、地上部分干质量^[20-22]、茎粗^[22]、根长^[23-26]等指标来评价植物苗期抗旱性。张富来^[21]研究认为,地上部鲜干质量、茎粗、根长等指标是南瓜苗期抗旱性鉴定的重要指标。杨维强等^[27]、伞薪潼^[28]、李洁等^[29]、高亚宁^[30]认为,丙二醛含量是抗旱性鉴定的重要指标。本研究揭示,在遭受连续干旱处理后,西瓜幼苗的各项生理指标呈现出多样化的抗旱响应差异,这一发现强调了干旱环境下植物适应性的多样化及其潜在的遗传基础。

通过采用主成分分析技术,笔者将原始的 18 个指标进行了正交变换,成功地转化为 3 个全新的、彼此间相互独立的变量。基于变量加载的重要性,笔者选取了地上干质量、根长以及丙二醛含量这 3 个至关重要的抗旱指标进行重点分析。植物的抗旱性,作为一类典型的多基因调控网络性状,其表型表现的整合效果受到遗传基础与环境相互作用的共同调控与协同影响。传统的单一维度评估框架展现出明显的局限性,其中任意特定指标下的抗旱性能排名会显示出显著差异。采用多变量统计分析技术显得尤为必要,旨在深入探索并揭示植物多种抗旱相关指标间的相互依存关系及其内在机制。崔永梅等^[31]通过相关性分析、主成分分析和聚类分析将 246 个青稞品种划分为 3 个抗旱级别;赵晓倩^[32]运用主成分分析和聚类分析将 259 个高粱品种划分为 5 类,并通过相关性分析和逐步回归分析确定其苗期抗旱性鉴定的重要指标;郑婷婷等^[24]采用隶属函数分析和聚类分析以及主成分分析将 40 份黍稷划分为 3 类;高亚宁等^[33]结合主成分分

表 10 模型汇总
Table 10 Summary of models

模型 Model	相关系数 Correlation coefficient(R)	拟合优度 R^2	调整后 R^2 Adjusted R^2	标准误 Standard error
1	0.897	0.894	0.876	0.041

表 11 Anova 表
Table 11 Anova table

模型 Model	平方和 Quadratic sum	自由度 df	均方 Mean square	方差检验 F	显著性 Sig.
回归 Regression	0.276	3	0.092	55.617	0.098
残差 Residual	0.002	1	0.002		
总计 Total	0.277	4			

表 12 回归方程系数
Table 12 Coefficient table of regression equation

模型 Model	未标准化系数 B	标准错误 Standard error	T 检验 T test	显著性 Sig.
常量 Constant	0.870	0.207	0.000	0.128
RL	0.260	0.002	0.410	0.137
SDW	0.218	0.008	0.610	0.131
MDA	-0.426	0.198	1.392	0.397

析、加权隶属函数分析和回归分析等方法对茺菁苗期抗旱性进行综合评价,将40份茺菁分为3类。李洁等^[29]运用抗旱度量值、聚类分析和主成分分析以及通径分析相结合的方法将50份菜豆划分为5个抗旱级别,并得出MDA含量可直接用于普通菜豆资源的抗旱性鉴定。

在西瓜的抗旱鉴定方面,何亚萍^[8]基于旱害指数直接评价,并利用隶属函数综合评价法筛选西瓜的抗旱种质。许国齐^[3]通过旱害指数初步评价各品种的抗旱性,再结合隶属函数综合评价西瓜抗旱性。李颖慧等^[7]采用隶属函数法对抗旱性进行综合评价,筛选萌发力强的西瓜种子。孙小妹^[9]通过抗旱指数法、直接比较法、隶属函数法、分级评价法开展西瓜抗旱性鉴定方法和指标的筛选研究。前人在鉴定方法上多采用单一分析方法进行抗旱鉴定,笔者采用主成分分析法与隶属函数法相结合的方法进行综合评价,鉴定出西农8号的抗旱性最强,中兴红1号的抗旱性最弱,并建立抗旱回归方程: $Y=0.870+0.260RL+0.218SDW-0.426MDA$ 。

笔者在本研究中仅对西瓜苗期的抗旱性进行鉴定,无法代表西瓜全生育期的抗旱特性。室内基质栽培与大田鉴定的结果会因温度、光照、水分等环境因素存在一定差异。因此,未来应加强对西瓜种质伸蔓期、成熟期等性状的抗旱性研究,建立全生育期的西瓜抗旱评价体系。

综上所述,笔者通过隶属函数法、主成分分析等方法得出地上干质量、根长、丙二醛含量在干旱胁迫后变化显著,因此选用这3个指标作为西瓜苗期抗旱性鉴定的评价指标,最终建立抗旱回归方程: $Y=0.870+0.260RL+0.218SDW-0.426MDA$,根据Y值判断抗旱性,Y值 ≥ 0.70 为抗旱材料,包括西农8号和天冠2号; $0.35 < Y < 0.70$ 为中间抗旱性材料,包括新优2号; $0 < Y \leq 0.35$ 为干旱敏感材料,包括中兴红1号和中农美冠2号。

参考文献

- [1] 杨念.我国西瓜甜瓜生产及全要素生产率研究[D].北京:中国农业科学院,2016.
- [2] 陈炜韬,王鹰,王明年,等.冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究[J].岩土力学,2007(11):2343-2347.
- [3] 许国奇.不同西瓜品种在干旱胁迫下的生理响应及抗旱评价[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [4] 莫言玲.西瓜对干旱胁迫的响应机制及丛枝菌根真菌的缓解效应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [5] 张海英,宫国义,郭绍贵,等.西瓜种质资源抗旱性苗期筛选与评价[J].植物遗传资源学报,2011,12(2):223-227.
- [6] 李聪.西瓜种质资源苗期抗旱性鉴定研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [7] 李颖慧,李亚东.PEG模拟干旱胁迫对4种籽用西瓜种子萌发的影响[J].中国瓜菜,2019,32(8):115-119.
- [8] 何亚萍.西瓜种质抗旱性鉴定及遗传多样性分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [9] 孙小妹.西瓜抗旱性鉴定指标与方法研究[D].兰州:甘肃农业大学,2011.
- [10] 余灵桦,郭世荣,徐扬,等.砧用南瓜品种资源抗旱性鉴定[J].中国蔬菜,2016(4):27-34.
- [11] 周国彦,谢洋,邢雨蒙,等.33份旱黄瓜种子萌发期抗旱性鉴定[J].中国瓜菜,2023,36(3):92-97.
- [12] 陈菁菁,孙小妹,纪海波,等.西瓜品种叶部特征与抗旱性的关系[J].中国瓜菜,2015,28(5):8-13.
- [13] 高阳,傅积海,章建新.施氮量对高产春大豆光合特性及产量的影响[J].中国农学通报,2020,36(14):34-40.
- [14] LATEF A A H A, HE C X. Arbuscular mycorrhizal influence on growth, photosynthetic pigments, osmotic adjustment and oxidative stress in tomato plants subjected to low temperature stress[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2011, 33(4): 1217-1225.
- [15] QIU P, LI J Y, ZHANG L, et al. Polyethyleneimine-coated MXene quantum dots improve cotton tolerance to *Verticillium dahliae* by maintaining ROS homeostasis[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 7392.
- [16] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1/2):248-254.
- [17] LIU C X, LI C X, BING H, et al. Integrated physiological, transcriptomic, and metabolomic analysis reveals the mechanism of guvermectin promoting seed germination in direct-seeded rice under chilling stress[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(19):7348-7358.
- [18] 李忠喜,姚莹莹,罗晓雅,等.抗寒型大叶女贞的筛选及其抗寒性与相对电导率的关系[J].上海农业学报,2012,28(2):21-24.
- [19] REN B Z, YU W Z, LIU P, et al. Responses of photosynthetic characteristics and leaf senescence in summer maize to simultaneous stresses of waterlogging and shading[J]. The Crop Journal, 2023, 11(1):269-277.
- [20] 何亚萍,尹丽娟,丁小玲,等.25份西瓜种质苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(12):49-59.
- [21] 张富来.玉米不同品种抗旱指标筛选及其抗旱性综合评价[D].新疆阿拉尔:塔里木大学,2023.
- [22] 吴遥,高日平,蔡琳琳,等.苗前补灌对内蒙古黄土高原旱作区谷子生长及光合特性的影响[J].北方农业学报,2023,51(5):51-61.
- [23] 王亚茹,杨向东,赵寒冬,等.油莎豆种质资源苗期抗旱性鉴定与评价[J].干旱地区农业研究,2022,40(6):12-22.
- [24] 郑婷婷,赵丽红,王海岗,等.40份黍稷种质资源芽苗期抗旱性评价及耐旱资源筛选[J].山西农业科学,2022,50(7):954-964.
- [25] 陈云鑫,马巧利,麻冬梅,等.66个紫花苜蓿品种无性系苗期

抗旱性评价[J].草业科学,2024,41(4):908-918.

[26] 杨伟,刘文辉,马祥,等.青藏高原地区野生老芒麦苗期抗旱种质材料的筛选[J].草原与草坪,2021,41(4):74-80.

[27] 杨维强,张晗,姜吉顺,等.白三叶抗旱种质资源筛选及抗旱评价指标筛选[J/OL].草地学报,1-18(2025-01-06).<https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20250116.1348.002>.

[28] 伞薪潼.阴山北麓箭筈豌豆品种抗旱性评价及抗旱指标筛选[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.

[29] 李洁,张小宁,晋凡生,等.普通菜豆种质资源苗期抗旱性综合评价[J].核农学报,2022,36(8):1516-1529.

[30] 高亚宁.芜菁种质资源苗期抗旱性评价及其应对干旱胁迫的生理响应[D].新疆阿拉尔:塔里木大学,2023.

[31] 崔永梅,李洁,张丽,等.青稞种质资源抗旱性鉴定评价[J].植物遗传资源学报,2025,26(3):519-542.

[32] 赵晓倩.高粱苗期抗旱种质资源鉴定和全基因组关联分析[D].长春:吉林农业大学,2022.

[33] 高亚宁,张凯浩,杨鸿基,等.芜菁苗期抗旱性鉴定及抗旱指标的评价[J].西北农业学报,2023,32(2):310-319.