DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2026.0145

不同浸种处理对甜瓜种子萌发、出苗及幼苗生理特性的影响

陈宝玲,周建辉,刘文君,周艳霞,黄凤婵,张 曼

(广西壮族自治区农业科学院 南宁 530007)

摘 要:为筛选适用于不同甜瓜品种(系)的浸种方案,以厚皮甜瓜品种桂蜜 12 号和纯合自交系 401、502 为试验材料,设置 6 种浸种处理:T1 为 55 ℃温水浸种 0.5 h;T2 为 50 ℃温水浸种 0.5 h;T3 为(25±1) ℃清水浸种 4.0 h;T4 为室温(25±1) ℃下 200 mg·kg^{-1} 乙酰水杨酸(ASA)溶液浸种 0.5 h;T5 为室温(25±1) ℃下 5 μg·L^{-1} 芸苔素内酯(BR)溶液浸种 0.5 h;T6 为室温(25±1) ℃下 20 mg·kg^{-1} 赤霉素(GA_3)溶液浸种 0.5 h。其中 T1、T2 及 T4~T6 处理浸种 0.5 h 后,均以(25±1) ℃清水继续浸种 3.5 h;T3 处理全程为(25±1) ℃清水浸种 4.0 h,研究不同浸种处理对甜瓜种子出芽率、出苗率以及幼苗生长指标、生理生化指标的影响,并进行主成分分析综合评价。结果表明,不同浸种处理主要影响种子萌发启动和出苗进程,对最终出芽率和出苗率影响较小。不同处理的差异主要集中在种子早期萌发和出苗阶段:桂蜜 12 号 24 h 时 T4 处理出芽率最高,为 98.7%;401 在 18 h 和 24 h 时均以 T5 处理出芽率最高;502 在 18 h 时 T4 和 T5 处理出芽率均最高、24 h 时 T5 处理最高。401 在 D1(播后第 1 天)和 D2(播后第 2 天)时均以 T5 处理出苗率最高,分别为 87.3%和 96.7%;502 在 D1 和 D2 时均以 T4 处理最高,分别为 64.7%和 83.3%。3 个品种(系)30 h 时出芽率和 D4 时出苗率各处理间均无显著差异。幼苗生长指标方面,桂蜜 12 号 T4 处理除 SPAD 值外其他生长指标均最高,401 中 T5 处理各生长指标均最高。生理指标中,桂蜜 12 号以及 502 的 T4 处理 SOD、POD 活性均最高、H_2O_2 含量均最低;401 中 T5 处理 SOD 活性最高,但 H_2O_2、MDA 含量(*b*)均最低(分别为 10.93 μmol·g^{-1}、17.53 nmol·g^{-1})。主成分分析表明,桂蜜 12 号 T4 处理综合得分最高(1.442),401 和 502 均以 T5 处理综合得分最高(分别为 2.954 和 2.230)。综上,在本试验条件下,桂蜜 12 号采用 200 mg·kg^{-1} ASA 浸种处理效果较好,401 和 502 均采用 5 μg·L^{-1} BR 浸种处理效果较好。

关键词:甜瓜;浸种处理;乙酰水杨酸;芸薹素内酯;SPAD 值;抗氧化系统;主成分分析

中图分类号:S652 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-2871(2026)10-124-09

Effects of different seed-soaking treatments on germination, emergence, and seedling physiological property in melon

Chen Baoling, Zhou Jianhui, Liu Wenjun, Zhou Yanxia, Huang Fengchan, Zhang Man

(*Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, Guangxi, China*)

Abstract: To identify suitable seed-soaking treatments for different melon genotypes, the thick-skinned melon cultivar Guimi No. 12 and two homozygous inbred lines, 401 and 502, were used as experimental materials. Six seed-soaking treatments were established: T1—soaking in warm water at 55 ℃ for 0.5 h; T2—soaking in warm water at 50 ℃ for 0.5 h; T3—soaking in water at(25±1) ℃ for 4.0 h; T4—soaking in a 200 mg·kg^{-1} acetylsalicylic acid(ASA) solution at room temperature(25±1) ℃ for 0.5 h; T5—soaking in a 5 μg·L^{-1} brassinolide(BR) solution at room temperature(25±1) ℃ for 0.5 h; and T6—soaking in a 20 mg·kg-1 gibberellin(GA_3) solution at room temperature(25±1) ℃ for 0.5 h. After the initial 0.5 h soaking, T1, T2, and T4-T6 were further soaked in water at(25±1) ℃ for an additional 3.5 h, whereas T3 was soaked continuously in water at (25±1) ℃ for 4.0 h. Germination rates at 18, 24, and 30 h, emergence rates from D1 to D4 after sowing, seedling growth traits, SPAD value, and physiological and biochemical traits were measured, followed by principal component analysis(PCA). The results indicated that treatment differences were concentrated mainly in early germination and emergence, with little effect on final germination and emergence rates. In Guimi No. 12, T4 reached the highest numerical germination rate at 24 h(98.7%). In line 401, T5 showed the highest germination rates at both 18 and

收稿日期:2026-02-13;**修回日期:**2026-06-02

基金项目:广西农业科技创新联盟(桂农科盟 202605);广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2026YT090)

作者简介:陈宝玲,女,助理研究员,主要从事西瓜、甜瓜、南瓜等瓜类作物研究工作。E-mail:chenbl@gxaas.net

通信作者:张 曼,女,研究员,主要从事蔬菜生产技术研究与推广工作。E-mail:1052204320@qq.com

24 h and produced the highest emergence rates at D1 and D2（87.3% and 96.7%, respectively）. In line 502, T4 and T5 were tied for the highest germination rate at 18 h, whereas T5 was highest at 24 h; T4 showed the highest numerical emergence rates at D1 and D2（64.7% and 83.3%, respectively）. Treatment difference was not significant for 30 h germination rate or D4 emergence rate. In seedling growth, T4 in Guimi No. 12 had the highest numerical valus for all measured growth traits except SPAD, and T5 in line 401 yielded the highest value for all measured growth traits. For physiological traits, T4 resulted in the highest SOD and POD activities and the lowest H_2O_2 content in both Guimi No. 12 and line 502; in line 401, T5 resulted in the highest SOD activity and the lowest H_2O_2 and MDA contents（10.93 μmol · g^{-1} and 17.53 nmol · g^{-1}, respectively）. PCA comprehensive scores ranked T4 first in Guimi No. 12（1.442）and T5 first in lines 401 and 502（2.954 and 2.230, respectively）. Under the present experimental conditions, 200 mg · kg^{-1} ASA is recommended for Guimi No. 12, whereas 5 μg · L^{-1} BR is recommended for lines 401 and 502.

Key words: Melon; Seed soaking; Acetylsalicylic acid; Brassinolide; SPAD value; Antioxidant system; Principal component analysis

甜瓜（*Cucumis melo* L.）是我国设施和露地栽培中重要的经济作物之一，生产上普遍采用穴盘育苗。种子出芽和出苗的速度、幼苗整齐度以及健壮程度直接关系到补苗成本、生长一致性和田间管理效果。育苗过程中温度、水分等环境条件发生波动时，容易出现萌发滞后、出苗不齐或弱苗比例增大等问题。因此，筛选简便、可操作的播前种子处理措施，以促进甜瓜种子快速整齐萌发并形成健壮幼苗，具有实际生产意义[1-2]。

种子引发（seed priming）是改善作物早期建苗质量的重要技术途径。其基本原理是在胚根突破种皮之前，通过受控水化或外源物质处理，使种子提前完成膜修复、呼吸恢复、酶系激活和储藏物质动员等生理准备，从而缩短萌发滞后期、提高早期萌发速度和群体同步性[1,3-4]。引发处理通常更突出地影响萌发启动和出苗整齐度，对终点发芽率的影响取决于作物种类、品种、处理药剂浓度和处理时间等因素[3,5]。

从生理角度看，种子萌发和幼苗建成与氧化还原稳态密切相关。活性氧（ROS）在萌发过程中具有双重作用：适量 ROS 参与萌发信号调控，过量 ROS 则可能诱导膜脂过氧化、引起细胞损伤[6-9]。超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）和过氧化氢酶（CAT）共同参与 ROS 清除与细胞稳态维持。已有研究表明，不同播前处理可改变种子及幼苗的抗氧化状态，影响种子萌发和幼苗生长[10-12]。

在生产应用中，温水浸种和外源调节物质浸种是常见的播前处理方式。温水处理操作简便，但处理效果受温度和持续时间影响，处理不当可能降低种子活力[13]。外源调节物质的效应则具有明显的种类、浓度和基因型依赖性。例如，使用不同浓度的维生素、6-苄氨基嘌呤（6-BA）、复合植物生长调节剂及木醋液等进行浸种处理对种子萌发具有不同效应[14-16]。使用水杨酸（SA）及乙酰水杨酸（ASA）进行种子浸种处理可影响逆境条件下的种子萌发和幼苗生长[17-19]；芸薹素内酯（BR）可增强抗氧化防御能力，并通过与脱落酸（ABA）、SA 等激素信号互作有助于维持幼苗生长[20-21]；赤霉素（GA）可参与种子萌发启动，促进胚伸长，但其效果同样受处理条件影响[22]。因此，不同浸种方式在甜瓜中的适用性需要结合具体品种（系）进行比较。

目前，甜瓜播前种子处理研究多关注单一品种或对单一指标的影响，对不同基因型在同一处理体系下的响应差异以及对种子出芽、出苗、幼苗生长和生理指标的综合影响研究较少。生产应用中，仅依据某一时间点的发芽率或单一生理指标难以充分判断浸种处理的综合效果。因而，有必要在不同品种（系）内部开展综合评价，从而筛选适宜的品种（系）-处理组合。

基于此，本研究以厚皮甜瓜品种桂蜜 12 号及纯合自交系 401、502（均为厚皮甜瓜）为研究对象，设置不同温度清水[55、50 和（25±1）℃]以及 ASA、BR 和 GA_3 浸种处理，系统比较不同处理对甜瓜种子出芽、出苗、幼苗生长、SPAD 值及幼苗生理生化指标的影响，并采用主成分分析（PCA）进行多指标综合评价，以筛选不同品种（系）的适宜浸种方案，为设施甜瓜播前处理提供依据与参考。

1　材料与方法

1.1　材料

试验于 2025 年 3 月在广西壮族自治区农业科学院科研实验楼及科研核心基地开展。试验材料为桂蜜 12 号、纯合自交系 401 和纯合自交系 502，均为厚皮甜瓜，均由广西壮族自治区农业科学院蔬

菜研究所提供。桂蜜 12 号为生产应用品种，401 和 502 均为遗传背景相对稳定的纯合自交系。乙酰水杨酸（ASA，纯度≥98.0%）、芸薹素内酯（BR，纯度≥95%）和赤霉素（GA_3，纯度≥90.0%）均购自北京索莱宝科技有限公司。

1.2 试验设计

本试验采用单因素试验设计，每个品种（系）设置 6 种浸种处理，分别为 T1：55 ℃温水浸种 0.5 h，洗净后（25±1）℃清水浸种 3.5 h；T2：50 ℃温水浸种 0.5 h，洗净后（25±1）℃清水浸种 3.5 h；T3：（25±1）℃清水浸种 4.0 h；T4：（25±1）℃下 200 mg·kg^{-1} ASA 溶液浸种 0.5 h，洗净后（25±1）℃清水浸种 3.5 h；T5：（25±1）℃下 5 μg·L^{-1} BR 溶液浸种 0.5 h，洗净后（25±1）℃清水浸种 3.5 h；T6：（25±1）℃下 20 mg·kg^{-1} GA_3 溶液浸种 0.5 h，洗净后（25±1）℃清水浸种 3.5 h。上述药剂浓度均参考前人播前引发研究报道的有效浓度范围设置[19-23]。ASA、BR 和 GA_3 工作液均按上述目标浓度配制。ASA 以蒸馏水配制；BR 先以少量 95% 乙醇配制母液后用蒸馏水稀释至目标浓度；GA_3 先以少量 95% 乙醇助溶后用蒸馏水配制至目标浓度。各工作液均现配现用。各处理结束后均用蒸馏水充分冲洗并沥干。每个品种（系）每个处理 50 粒种子，3 次重复。

1.3 催芽试验与出芽率测定

每个品种（系）每个处理取 50 粒种子均匀置于培养皿双层滤纸上，加入蒸馏水使滤纸充分湿润但无积水，置于 30 ℃光照培养箱中，光周期为 12 h 光/12 h 暗，光照强度约 4 000 lx，培养皿按完全随机原则摆放；催芽期间每日用蒸馏水冲洗种子并更换滤纸。发芽试验参照 GB/T 3543.4—2025[24]进行。每个品种（系）每个处理 3 次重复。

分别于浸种后 18、24 和 30 h 统计出芽数，以“胚根伸出且芽长超过种子长度”为出芽判定标准。出芽率/%=出芽数/50×100。

1.4 出苗试验与出苗率测定

催芽 30 h 后将种子统一播入穴盘，育苗基质由草炭、蛭石和珍珠岩按体积比 3∶1∶1 混匀，pH 调至 6.0~6.5。育苗期间环境温度维持在（25±2）℃，空气相对湿度为 60%~70%，统一采用常规育苗管理。播种后连续 4 d 统计出苗情况，以子叶平展为出苗判定标准，分别记录播后第 1、2、3、4 天（D1、D2、D3、D4）出苗数，并计算出苗率。出苗率/%=出苗数/50×100。每个品种（系）每个处理 3 次重复。

1.5 幼苗生长指标与SPAD值测定

播后 20 d（3 月 14 日）每个品种（系）每个处理选取长势一致的 3 株幼苗测定株高、茎粗、SPAD 值、叶长、叶宽、叶面积，每个品种每个处理 3 次重复。株高测量基部至生长点的高度，茎粗在子叶节下固定位置用游标卡尺测量。SPAD 值采用 SPAD-502Plus 便携式叶绿素仪（日本柯尼卡美能达公司）测定第 2 片完全展开真叶中部区域，避开主脉，每片叶测定 3 点并取平均值；SPAD 值为基于叶片光学特性获得的无损相对指标，用于表征叶片相对绿色程度，其与提取法测定的叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量相关但不等同，二者用于从不同层面评价叶片色素状态。叶长和叶宽测定第 2 片完全展开真叶最大长度和最大宽度。叶面积测定同样采用第 2 片完全展开真叶，参照 Xie 等[25]的方法测定。

1.6 幼苗生理生化指标的测定

播后 20 d，每个品种（系）每个处理随机选取 3 株长势一致的幼苗，取第 2~3 片真叶混合，作为 1 个生物学重复。参照南京建成生物工程研究所生产的试剂盒（A001-3-1、A084-3-1、A007-1-1、A064-1-1、A003-1-2、A107-1-1、A145-1-1、A045-2-2）说明书分别测定超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）、过氧化氢酶（CAT）活性以及 H_2O_2、MDA、脯氨酸（Pro）、可溶性糖、可溶性蛋白含量，每个处理 3 次重复。

播后 20 d，采集第 2~3 片真叶混合样，参照 Lichtenthaler 等[26]的方法测定叶绿素 a、叶绿素 b 含量。总叶绿素含量=叶绿素 a 含量+叶绿素 b 含量。

1.7 主成分分析与综合评价

为综合评价不同浸种处理的总体效应，参照 Jolliffe 等[27]的方法，对出芽率（18、24、30 h）、出苗率（D1~D4）、幼苗生长指标（株高、茎粗、叶长、叶宽、叶面积）、SPAD 值及生理生化指标（SOD、POD、CAT 活性以及 H_2O_2、MDA、Pro、可溶性糖、可溶性蛋白、叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量）进行主成分分析（PCA）。PCA 前对各指标进行 Z-score 标准化；H_2O_2 和 MDA 含量作为逆向指标进行方向一致化，其余指标按数值越高综合评价值越高进行处理。采用相关矩阵提取主成分，保留累计方差贡献率≥80% 的主成分。综合得分按 $F=\sum(F_i\times W_i)$ 计算（i=1，…，k），其中 F_i 为第 i 个主成分得分，W_i 为该主成分的方差贡献率，k 为纳入综合评价的主成分个数；各品种（系）内部按综合得分由高到低排序。其中，SPAD 值为无损相对指标，叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含

量为提取法获得的生化定量指标，二者信息相关但不等同，因此作为互补指标共同纳入综合评价。

1.8　数据分析

采用 Excel 整理试验数据，采用单因素方差分析（one-way ANOVA）进行差异显著性分析（$P<0.05$），采用 Tukey HSD 进行多重比较。

2　结果与分析

2.1　不同浸种处理对厚皮甜瓜早期萌发进程的影响

由表 1 可知，3 个甜瓜品种（系）不同浸种处理的出芽率差异主要出现在 18 h 和 24 h，30 h 时处理间差异明显减小。桂蜜 12 号浸种后 18 h 出芽率差异最大，T5 处理出芽率最高，显著高于 T1、T2、T6，与 T3、T4 处理差异均不显著；24 h 时，T4 处理出芽率最高，显著高于 T1、T3、T6，但与 T2、T5 差异均不显著；30 h 时，T2、T3 和 T4 处理均为 100.0%，T6 处理显著低于 T2、T3 和 T4，但与 T1、T5 处理差异均不显著。纯合自交系 401 出芽率在浸种后 18 h 和 24 h 时 T5 处理均最高，且各处理间差异较大；30 h 时，T4 和 T5 处理均为 100.0%，但各处理间差异均不显著。纯合自交系 502 在浸种后 18 h 时 T4 和 T5 处理均最高，均显著高于 T2；24 h 时 T5 处理最高，显著高于 T1、T2、T3；30 h 时 T5 处理最高，为 98.0%，但与 T4、T6 处理间差异均不显著。T4 和 T5 处理在多个时间点表现出较好的促萌效果。

表 1　不同浸种处理对甜瓜种子出芽率的影响

Table 1　Effects of different seed-soaking treatments on seed germination rate in melon　%

品种（系）Cultivar（line）	处理 Treatment	出芽率 Germination rate		
		18 h	24 h	30 h
桂蜜 12 号 Guimi No. 12	T1	48.7±2.3 d	76.7±3.1 d	98.7±1.2 ab
	T2	60.7±3.1 c	94.7±2.3 a	100.0±0.0 a
	T3	68.0±3.5 ab	83.3±3.1 cd	100.0±0.0 a
	T4	70.7±1.2 ab	98.7±1.2 a	100.0±0.0 a
	T5	72.7±1.2 a	92.7±3.1 ab	98.0±2.0 ab
	T6	64.7±3.1 bc	86.7±1.2 bc	96.7±1.2 b
401	T1	33.3±1.2 bc	76.7±6.4 bc	98.7±1.2 a
	T2	34.7±1.2 ab	70.7±5.0 c	98.0±2.0 a
	T3	34.7±1.2 ab	66.7±3.1 c	99.3±1.2 a
	T4	37.3±2.3 ab	87.3±2.3 ab	100.0±0.0 a
	T5	39.3±1.2 a	88.7±2.3 a	100.0±0.0 a
	T6	29.3±3.1 c	84.7±5.0 ab	99.3±1.2 a
502	T1	12.0±3.5 ab	45.3±4.2 b	96.7±1.2 a
	T2	10.0±2.0 b	47.3±3.1 b	97.3±2.3 a
	T3	12.0±2.0 ab	47.3±3.1 b	94.7±1.2 a
	T4	17.3±2.3 a	54.0±2.0 ab	97.3±2.3 a
	T5	17.3±2.3 a	56.7±3.1 a	98.0±2.0 a
	T6	16.7±1.2 a	52.0±3.5 ab	97.3±2.3 a

注：同列不同小写字母表示同一品种（系）同一时间不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference among different treatments at 0.05 level within the same variety（line）at same time. The same as below.

综上，种子萌发前期，T4 处理对桂蜜 12 号出芽促进效果较好，T5 处理对 401、502 出芽促进效果较好；综合 3 个甜瓜品种（系）结果，不同浸种处理的出芽率在 18~24 h 差异较大，30 h 时差异较小，说明不同浸种处理主要影响种子早期萌发进程而非最终出芽率。

2.2　不同浸种处理对厚皮甜瓜出苗动态的影响

由表 2 可知，桂蜜 12 号在 D1 时 T2、T3、T4 和 T5 处理的出苗率均显著高于 T1 和 T6，其中 T2 处理最高，为 74.7%，T4 次之；D2 时 T4 处理出苗率最高，但各处理间差异均不显著；D3 时 T4 处理出苗率最高，为 98.7%，显著高于 T3，但与其他处理差异均不显著；D4 时 T4 处理出苗率最高，但各处理间差异均不显著。

纯合自交系 401 在 D1~D4 时 T5 处理出苗率均最高。D1、D2 时 T5 处理均显著高于其他处理；D3 和 D4 时各处理间差异均不显著。

纯合自交系 502 在 D1 时 T4 和 T5 处理均显著高于 T1、T2 和 T3，但与 T6 差异均不显著；D2 时 T4 和 T6 处理均显著高于 T1、T2 和 T3，T5 处理显著高于 T1 和 T3；D3 和 D4 时各处理间差异均不显著。

总体而言，不同品种（系）出苗率均在 D1 和 D2 时差异较大；D4 时 3 个品种（系）各处理间差异均不显著。出苗前期，T4 处理对桂蜜 12 号出苗促进效果较好，T5 处理对 401 出苗促进效果较好；T4 处理对 502 出苗促进效果较好。

2.3　不同浸种处理对厚皮甜瓜幼苗生长指标的影响

由表 3 可知，桂蜜 12 号厚皮甜瓜各处理间株高、茎粗、SPAD 值、叶宽、叶面积均无显著差异，T6 处理叶长显著大于 T4，但与 T1、T2、T3 和 T5 差异均不显著；除 SPAD 值外，T4 处理各生长指标均最高。纯合自交系 401 各处理间株高、茎粗、叶宽差异均不显著；T4、T5 处理叶长均显著大于其他处理，但两者间差异不显著；SPAD 值中 T5 显著高于 T1、T3，T4 显著高于 T1，其余处理间差异均不显著，T5 处理各生长指标均最高。纯合自交系 502 各处

表 2 不同浸种处理对甜瓜种子出苗率的影响

Table 2 Effects of different seed-soaking treatments on seedling emergence rate in melon %

品种（系）Cultivar（line）	处理 Treatment	出苗率 Emergence rate			
		D1	D2	D3	D4
桂蜜 12 号 Guimi No. 12	T1	60.7±3.1 b	86.0±2.0 a	96.7±1.2 ab	98.0±2.0 a
	T2	74.7±3.1 a	90.7±3.1 a	97.3±3.1 ab	98.0±2.0 a
	T3	71.3±1.2 a	85.3±3.1 a	93.3±1.2 b	94.7±3.1 a
	T4	73.3±2.3 a	92.7±3.1 a	98.7±1.2 a	99.3±1.2 a
	T5	70.0±2.0 a	85.3±3.1 a	94.0±2.0 ab	98.0±2.0 a
	T6	55.3±1.2 b	88.0±2.0 a	96.0±2.0 ab	98.0±2.0 a
401	T1	54.0±3.5 c	83.3±3.1 bc	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a
	T2	67.3±2.3 b	85.3±3.1 bc	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a
	T3	68.7±4.2 b	81.3±2.3 c	95.3±5.0 a	98.7±2.3 a
	T4	68.7±2.3 b	86.0±2.0 bc	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a
	T5	87.3±1.2 a	96.7±1.2 a	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a
	T6	74.0±3.5 b	88.0±2.0 b	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a
502	T1	53.3±3.1 c	70.7±3.1 cd	96.0±0.0 a	97.3±2.3 a
	T2	55.3±2.3 bc	74.0±2.0 bc	95.3±5.0 a	97.3±2.3 a
	T3	53.3±1.2 c	65.3±3.1 d	97.3±2.3 a	98.7±2.3 a
	T4	64.7±3.1 a	83.3±4.2 a	98.7±2.3 a	98.7±2.3 a
	T5	63.3±3.1 a	80.0±2.0 ab	97.3±2.3 a	98.7±2.3 a
	T6	60.7±1.2 ab	82.0±2.0 a	97.3±2.3 a	98.7±2.3 a

表 3 不同浸种处理对甜瓜幼苗生长指标的影响

Table 3 Effects of different seed-soaking treatments on seedling growth indicators in melon

品种（系）Cultivar（line）	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	SPAD 值 SPAD value	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶面积 Leaf area/cm²
桂蜜 12 号 Guimi No. 12	T1	8.24±0.78 a	2.62±0.24 a	28.78±1.64 a	5.24±0.23 ab	5.16±0.35 a	23.46±1.65 a
	T2	9.18±1.60 a	2.61±0.26 a	29.79±1.91 a	5.37±0.38 ab	5.06±0.45 a	23.67±3.61 a
	T3	8.67±1.24 a	2.58±0.21 a	29.49±1.80 a	5.41±0.32 ab	5.38±0.33 a	25.24±1.76 a
	T4	10.29±2.55 a	2.83±0.44 a	29.99±2.15 a	5.74±0.45 a	5.55±0.74 a	27.89±5.89 a
	T5	9.25±1.57 a	2.58±0.39 a	28.24±1.91 a	5.21±0.19 ab	5.28±0.55 a	23.89±2.98 a
	T6	8.80±1.51 a	2.57±0.27 a	30.43±1.34 a	5.17±0.25 b	5.05±0.51 a	22.69±2.77 a
401	T1	11.15±1.49 a	3.35±0.70 a	27.77±2.07 c	4.78±0.20 b	5.42±0.57 a	22.59±3.25 b
	T2	11.58±2.04 a	3.59±0.72 a	28.67±1.70 abc	4.86±0.21 b	5.49±0.33 a	23.15±1.40 b
	T3	11.23±2.06 a	3.39±0.53 a	28.19±1.76 bc	4.86±0.08 b	5.31±0.42 a	22.43±2.06 b
	T4	12.22±2.07 a	3.86±0.66 a	30.78±0.89 ab	5.28±0.15 a	5.78±0.53 a	26.51±2.98 ab
	T5	12.69±2.40 a	4.44±1.36 a	31.24±1.83 a	5.43±0.11 a	6.08±0.61 a	28.70±3.28 a
	T6	11.57±1.89 a	3.58±0.70 a	28.49±1.55 abc	4.63±0.19 b	5.67±0.47 a	22.78±1.84 b
502	T1	7.43±1.15 a	2.81±0.44 a	27.52±0.85 a	5.19±0.18 ab	5.57±0.56 a	26.88±4.68 a
	T2	7.04±1.80 a	2.66±0.36 a	28.02±1.45 a	5.24±0.34 ab	5.53±0.72 a	24.60±4.99 a
	T3	6.96±1.43 a	2.69±0.45 a	27.31±0.38 a	4.97±0.11 b	5.39±0.59 a	23.35±2.71 a
	T4	6.84±1.42 a	2.68±0.42 a	27.92±1.00 a	5.53±0.33 a	5.28±0.85 a	25.56±5.39 a
	T5	7.75±1.57 a	2.73±0.36 a	27.37±0.82 a	5.16±0.09 ab	5.34±0.49 a	24.60±3.22 a
	T6	6.75±1.36 a	2.72±0.42 a	27.66±0.87 a	5.03±0.35 b	5.42±0.71 a	23.49±4.18 a

理间株高、茎粗、SPAD 值、叶宽、叶面积差异均不显著；T4 处理叶长最长，为 5.53 cm，T3、T6 显著大于 T4，与 T1、T2、T5 差异均不显著。

2.4 不同浸种处理对甜瓜幼苗生理生化指标的影响

由表 4 可知，桂蜜 12 号中 T4 处理 SOD 和 POD 活性均最高。其中 SOD 活性与 T1 差异不显著，但显著高于其他处理，POD 活性显著高于其他处理；T4 处理 H_2O_2 含量最低，与 T2 差异不显著，但显著低于 T1、T3、T5 和 T6；T5 处理叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量均最高，MDA 含量较低；T6 处理 CAT 活性最高，显著高于其他处理。

表 4　不同浸种处理对厚皮甜瓜幼苗生理生化指标的影响

Table 4　Effects of different seed-soaking treatments on physiological and biochemical indicators of thick-skinned melon seedlings

品种（系）Cultivar（line）	处理 Treatment	SOD 活性 SOD activity/（U·g^{-1}）	POD 活性 POD activity/（U·g^{-1}）	CAT 活性 CAT activity/（U·g^{-1}）	b（H_2O_2）/（μmol·g^{-1}）	b（MDA）/（nmol·g^{-1}）	w（Pro）/（μg·g^{-1}）	w（可溶性糖）Soluble sugar content/（mg·g^{-1}）	w（可溶性蛋白）Soluble protein content/（mg·g^{-1}）	w（叶绿素 a）Chlorophyll a content/（mg·g^{-1}）	w（叶绿素 b）Chlorophyll b content/（mg·g^{-1}）	w（总叶绿素）Total chlorophyll content/（mg·g^{-1}）
桂蜜 12 号 Guimi No. 12	T1	299.88±2.23 a	553.33±3.06 c	358.77±1.59 e	10.80±0.94 a	28.96±1.10 a	5.55±0.37 a	2.53±0.17 b	14.61±1.10 a	0.62±0.06 d	0.39±0.04 b	1.02±0.09 d
	T2	254.29±2.62 d	545.33±2.08 d	387.09±2.16 b	9.64±0.46 ab	22.39±1.34 b	4.05±0.13 c	2.83±0.21 b	12.65±0.97 ab	0.66±0.06 cd	0.45±0.03 b	1.12±0.05 cd
	T3	264.82±2.46 c	578.00±2.00 b	314.40±1.72 f	10.34±0.78 a	29.72±1.04 a	4.87±0.24 b	3.55±0.13 a	11.75±0.98 b	0.77±0.04 bc	0.44±0.03 b	1.21±0.06 bcd
	T4	304.22±2.81 a	727.33±2.52 a	373.40±2.83 d	7.98±0.64 b	23.58±2.26 b	4.66±0.10 b	2.55±0.38 b	13.06±1.17 ab	0.75±0.03 bcd	0.65±0.04 a	1.41±0.07 b
	T5	278.20±1.13 b	518.67±2.08 e	379.54±2.70 c	10.04±0.67 a	23.04±1.03 b	4.32±0.24 bc	3.14±0.10 ab	13.30±0.68 ab	0.94±0.07 a	0.78±0.07 a	1.72±0.13 a
	T6	211.16±0.87 e	514.33±2.08 e	471.58±1.68 a	10.23±0.54 a	28.96±0.55 a	5.69±0.12 a	3.58±0.38 a	13.82±1.10 ab	0.81±0.03 b	0.45±0.04 b	1.25±0.07 bc
401	T1	184.08±4.53 c	214.33±1.53 c	328.64±2.65 c	12.77±0.37 a	18.84±0.71 a	3.71±0.13 cd	2.02±0.04 b	12.36±0.36 b	0.80±0.01 b	0.50±0.06 b	1.31±0.07 b
	T2	188.36±1.41 c	246.67±1.15 ab	371.04±0.60 a	11.82±0.51 ab	18.09±0.53 ab	3.72±0.09 c	2.57±0.09 a	12.42±0.36 b	0.73±0.02 c	0.54±0.05 ab	1.27±0.05 b
	T3	187.13±1.98 c	214.67±3.06 c	298.72±1.62 d	12.47±0.49 a	18.96±0.13 a	4.03±0.04 bc	2.04±0.04 b	13.07±0.07 b	0.71±0.02 c	0.57±0.01 ab	1.28±0.01 b
	T4	233.99±3.49 a	246.67±4.93 ab	342.39±2.80 b	11.08±0.21 b	17.98±0.07 ab	3.30±0.24 d	2.56±0.07 a	14.07±0.37 a	0.81±0.02 b	0.58±0.03 ab	1.40±0.04 b
	T5	238.84±0.96 a	244.33±4.04 b	269.09±1.38 e	10.93±0.19 b	17.53±0.37 b	4.31±0.11 ab	2.50±0.02 a	13.92±0.27 a	0.73±0.04 c	0.64±0.04 a	1.37±0.07 b
	T6	216.97±2.61 b	254.00±3.46 a	261.59±2.32 f	12.24±0.60 a	18.95±0.44 a	4.59±0.21 a	2.01±0.10 b	12.59±0.22 b	0.92±0.02 a	0.65±0.04 a	1.57±0.05 a
502	T1	273.94±3.51 a	436.89±5.00 c	263.31±36.28 b	11.62±0.25 b	10.25±0.21 b	3.38±0.18 b	1.99±0.48 ab	11.86±0.39 c	0.81±0.04 a	0.62±0.03 a	1.43±0.02 a
	T2	232.01±11.05 b	376.67±4.16 d	371.04±0.60 a	11.78±0.49 b	16.90±0.18 a	5.47±0.49 a	1.26±0.25 b	10.63±0.08 d	0.77±0.04 a	0.66±0.02 a	1.42±0.05 a
	T3	221.79±2.42 bc	380.67±3.51 d	270.09±2.85 b	11.92±0.15 ab	16.21±0.33 a	5.44±0.37 a	1.29±0.03 b	10.43±0.41 d	0.71±0.02 ab	0.63±0.02 a	1.34±0.03 ab
	T4	269.69±6.85 a	484.67±19.73 b	376.05±5.23 a	9.39±0.19 c	10.77±0.67 b	3.77±0.21 b	2.38±0.22 a	11.23±0.28 cd	0.63±0.08 bc	0.45±0.08 b	1.08±0.15 c
	T5	282.94±6.02 a	630.67±4.62 a	374.27±3.20 a	8.47±0.29 d	10.52±0.30 b	4.05±0.17 b	1.68±0.37 ab	14.51±0.47 a	0.75±0.03 ab	0.44±0.01 b	1.18±0.04 bc
	T6	209.75±0.42 c	418.67±4.16 c	260.59±2.74 b	12.62±0.08 a	10.44±0.37 b	4.05±0.12 b	2.08±0.15 a	13.13±0.75 b	0.59±0.01 c	0.40±0.03 b	0.99±0.02 c

纯合自交系401中T5处理SOD活性最高，H_2O_2、MDA含量均最低；T6处理叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量均最高。

纯合自交系502中T5处理SOD、POD活性均最高，H_2O_2含量最低；T2处理MDA含量最高；T1、T2处理叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量均较高。

2.5 主成分分析与综合评价

基于出芽率、出苗率、幼苗生长指标、SPAD值和生理生化指标进行PCA分析，结果如表5所示，桂蜜12号、401、502均提取前3个主成分，累计方差贡献率分别为81.706%、87.200%、83.135%，能够较好地反映各评价指标的综合信息。

由表5可知，桂蜜12号中T4处理综合得分最高（1.442），T5处理次之，T1处理最低（−1.690）。纯合自交系401中T5处理综合得分最高（2.954），T4处理次之（1.248），T1处理最低（−2.255）。纯合自交系502中T5处理综合得分最高（2.230），T4处理次之（1.458），T3处理最低（−2.178）。

综上，桂蜜12号最优处理为T4，401和502最优处理均为T5。

表5 基于主成分分析的不同浸种处理综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of different seed-soaking treatments based on principal component analysis

品种（系）Cultivar（line）	处理 Treatment	PC1	PC2	PC3	综合得分 Comprehensive score
桂蜜12号 Guimi No. 12	T4	4.719	0.337	−1.441	1.442
	T5	−0.435	4.066	2.216	1.374
	T2	2.229	−0.357	−1.015	0.477
	T3	−0.630	−1.952	3.540	−0.013
	T6	−4.169	1.568	−2.689	−1.589
	T1	−1.715	−3.661	−0.611	−1.690
	方差贡献率 Variance contribution rate/%	34.895	26.410	20.401	
	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	34.895	61.305	81.706	
401	T5	5.356	−0.196	1.472	2.954
	T4	3.296	−1.779	−0.662	1.248
	T6	0.569	4.511	−1.152	1.083
	T3	−3.799	0.016	3.320	−1.505
	T2	−1.524	−2.331	−1.703	−1.524
	T1	−3.898	−0.221	−1.275	−2.255
	方差贡献率 Variance contribution rate/%	52.045	21.041	14.114	
	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	52.045	73.086	87.200	
502	T5	3.121	3.274	−0.520	2.230
	T4	4.089	−0.939	−1.764	1.458
	T6	2.427	−2.803	2.548	0.686
	T1	−2.647	3.162	1.735	−0.221
	T2	−3.777	−0.248	−1.452	−1.975
	T3	−3.212	−2.446	−0.548	−2.178
	方差贡献率 Variance contribution rate/%	46.333	25.721	11.081	
	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	46.333	72.054	83.135	

3 讨论与结论

本研究表明，不同浸种处理对甜瓜种子萌发和出苗的影响主要集中在早期阶段，3个品种（系）各处理间出芽率在浸种后18、24 h差异较大，30 h时差异明显缩小；出苗率在D1（播后第1天）、D2（播后第2天）时差异较大，D4（播后第4天）时各处理

间均无显著差异，说明不同浸种处理主要加快萌发启动和出苗进程，对最终出芽率和出苗率影响较小。该规律与种子引发主要缩短萌发滞后期、提高早期同步性的认识一致[1-4]。Paparella 等[1]研究表明，种子引发通过受控水化启动萌发前代谢，使种子在胚根突破前提前完成一系列生理生化准备，从而改善种子活力和萌发性能；Farooq 等[3]指出，种子引发的实际效应受作物种类、处理方式及处理条件等因素影响。结合本研究 30 h 出芽率和 D4 出苗率处理间差异明显缩小的结果，在甜瓜育苗中评价浸种处理效果时，早期萌发速度和出苗整齐度较终点出芽率、出苗率更具实际意义。

桂蜜 12 号 T4（ASA）处理以及纯合自交系 401、502 的 T5（BR）处理早期发芽率和出苗率均较高。Alam 等[23]研究表明，水分亏缺条件下，SA 种子引发可改善甜瓜种子萌发状况、提高根和地上部的干物质积累量、膜稳定性、净光合速率以及产量。Sharma 等[19]研究表明，SA 参与抗氧化防御和多种胁迫响应过程；Allahverdian 等[21]研究表明，24-表油菜素内酯种子引发可提高碱性胁迫条件下植株中 SOD、CAT 活性，并降低 H_2O_2 和 MDA 积累量，表明 BR 引发可通过改善抗氧化状态缓解胁迫损伤。本研究桂蜜 12 号 T4 处理以及纯合自交系 401、502 的 T5 处理早期发芽率和出苗率均较高，可能与 SA 和 BR 可提高抗氧化酶活性有关。此外本研究中不同品种（系）的最优处理不同，提示浸种处理效应可能与材料遗传背景有关，但具体原因仍需进一步研究。

从生长指标看，桂蜜 12 号 T4 处理除 SPAD 值外各生长指标均最高；401 中 T5 处理各生长指标均较高。Alam 等[23]研究表明，SA 种子引发可增加甜瓜幼苗根和地上部的干物质累积，并提高净光合速率，说明种子引发产生的早期生理效应可延续至幼苗生长阶段。

生理生化结果表明，桂蜜 12 号 T4 处理的 SOD、POD 活性均最高且 H_2O_2 含量最低，但 CAT 活性最高的为 T6（GA_3）；401 中 T5 处理的 SOD 活性最高，但 H_2O_2、MDA 含量均最低，POD 活性 T6 处理最高，CAT 活性 T2（50 ℃温水）处理最高；502 中 T5 处理 SOD、POD 活性均最高，H_2O_2 含量最低。ROS 在萌发过程中具有双重作用：适量 ROS 可参与萌发信号调控，过量 ROS 则可能诱导膜脂过氧化和细胞损伤[6-9]。结合植物 ROS 稳态由多种酶促和非酶促抗氧化系统共同调控的认识[7-9]，单一抗氧化酶活性的高低不宜被解释为整体抗氧化能力的直接指标。本研究中 502 的 T5 处理 SOD、POD 活性均最高，H_2O_2 含量最低，与较轻的氧化损伤状态一致；桂蜜 12 号 T6 处理 CAT 活性最高但 H_2O_2 含量并非最低，也表明单项酶活性与组织 H_2O_2 水平并非简单一一对应。

本研究基于出芽率、出苗率、幼苗生长指标、SPAD 值和生理生化指标进行 PCA 分析，桂蜜 12 号、401、502 的前 3 个主成分累计方差贡献率分别为 81.706%、87.200%、83.135%，均能较好地反映各评价指标的综合信息。桂蜜 12 号 T4 处理的综合得分最高（1.442），401 和 502 均以 T5 处理综合得分最高（分别为 2.954 和 2.230）。Jolliffe 等[27]研究表明，PCA 可通过构建彼此不相关的主成分，在降低数据维度的同时尽可能保留原始数据的主要变异信息。因此，本研究中 T4 和 T5 处理综合得分较高，反映的是出芽、出苗、生长及生理生化等多个指标的综合贡献，而非由某一单项指标决定。实际应用时应结合具体品种（系）的综合表现选择处理，不宜仅依据单一时间点或单一生理指标作判断。

综上，不同浸种处理主要影响甜瓜早期萌发、出苗以及部分幼苗生长和生理生化指标，不同品种（系）的响应存在差异。PCA 综合评价表明，桂蜜 12 号 T4 处理综合得分最高，纯合自交系 401 和 502 均为 T5 处理综合得分最高。因此，桂蜜 12 号可优先采用 200 mg·kg^{-1} ASA 浸种，401 和 502 可优先采用 5 μg·L^{-1} BR 浸种。相关生产应用仍应结合品种遗传背景和育苗条件进行验证。

参考文献

[1] Paparella S，Araújo S S，Rossi G，et al. Seed priming: State of the art and new perspectives[J]. Plant Cell Reports，2015，34（8）：1281-1293.

[2] Gohari G，Spanos A，Ioannou A，et al. Seed priming approaches for climate-resilient agriculture[J]. Journal of Experimental Botany，2026，77（7）：2013-2026.

[3] Farooq M，Usman M，Nadeem F，et al. Seed priming in field crops: Potential benefits，adoption and challenges[J]. Crop and Pasture Science，2019，70（9）：731-771.

[4] Thakur M，Tiwari S，Kataria S，et al. Recent advances in seed priming strategies for enhancing planting value of vegetable seeds[J]. Scientia Horticulturae，2022，305：111355.

[5] Bicalho E，Ferreira A M O. Seed priming: The concept matters[J]. European Journal of Horticultural Science，2026，91（1）：0002.

[6] El-Maarouf-Bouteau H，Bailly C. Oxidative signaling in seed germination and dormancy[J]. Plant Signaling and Behavior，2008，3（3）：175-182.

[7] Mittler R. ROS are good[J]. Trends in Plant Science，2017，22（1）：11-19.

[8] Wang P，Liu W C，Han C，et al. Reactive oxygen species: Multidimensional regulators of plant adaptation to abiotic stress and development[J]. Journal of Integrative Plant Biology，2024，66（3）：330-367.

[9] Mansoor S，Ali W O，Lone J K，et al. Reactive oxygen species in plants: From source to sink[J]. Antioxidants，2022，11（2）：225.

[10] 袁珊，卜凤姣，何长征，等. 褪黑素引发对无籽西瓜陈种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 中国蔬菜，2026（6）：198-207.

[11] 张雨晴，李晨冰雪，张琴，等. 低温条件下 ABA 浸种对糯玉米种子萌发和抗氧化酶活性的影响[J]. 天津农林科技，2025（6）：1-5.

[12] 王玥，高佩，赵筱妍，等. 枯草芽孢杆菌浸种对垂穗披碱草种子萌发及幼苗生长的影响[J/OL]. 草原与草坪，1- 14（2026- 03- 16）. https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20260314.1344.002.

[13] Nega E，Ulrich R，Werner S，et al. Hot water treatment of vegetable seed：An alternative seed treatment method to control seed- borne pathogens in organic farming[J]. Journal of Plant Diseases and Protection，2003，110（3）：220-234.

[14] 李丹，金姣姣，杨芳. 不同维生素浸种对紫苏种子萌发的影响[J]. 寒旱农业科学，2025，4（9）：856-859.

[15] 韦蔷，徐六一，陈雪莲，等. 不同浓度 6-BA 浸种对干旱胁迫下黄山松种子萌发的影响[J]. 安徽林业科技，2025，51（3）：9-12.

[16] 项秉晗，何杰，蔡新仪，等. 28-表高芸•赤•吲乙浸种对瓠瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 浙江农业科学，2025，66（8）：1871-1876.

[17] Ben Youssef R，Jelali N，Acosta Motos J R，et al. Salicylic acid seed priming: A key frontier in conferring salt stress tolerance in barley seed germination and seedling growth[J]. Agronomy，2025，15（1）：154.

[18] Karimi M R，Sabokdast M，Beheshti H K，et al. Seed priming with salicylic acid enhances salt stress tolerance by boosting antioxidant defense in *Phaseolus vulgaris* genotypes[J]. BMC Plant Biology，2025，25（1）：489.

[19] Sharma A，Kohli S K，Khanna K，et al. Salicylic Acid: A phenolic molecule with multiple roles in salt-stressed plants[J]. Journal of Plant Growth Regulation，2023，42（8）：4581-4605.

[20] Khosravifar F，Mohammadi M，Eghlima G. Brassinosteroids improve drought resistance in *Zinnia* by regulating antioxidant activity and hormonal interactions with ABA and salicylic acid[J]. Plant Growth Regulation，2025（105）：2259-2273.

[21] Allahverdian M，Rahmani F. Epibrassinolide seed priming alleviates alkaline stress by enhancing antioxidant defense in dragonhead plants[J]. Scientific Reports，2026，16（1）：1137.

[22] Macdonald M T，Mohan V R. Chemical seed priming: Molecules and mechanisms for enhancing plant germination, growth, and stress tolerance[J]. Current Issues in Molecular Biology，2025，47（3）：177.

[23] Alam A，Ullah H，Thuenprom N，et al. Seed priming with salicylic acid enhances growth, physiological traits, fruit yield, and quality parameters of cantaloupe under water- deficit stress[J]. South African Journal of Botany，2022（150）：1-12.

[24] GB/T 3543.4—2025 农作物种子检验规程 发芽试验[S].

[25] Xie Z B，Li J L，Zhao T J，et al. Climate- dependent effects of root restriction on yield and quality of netted melon in a South China greenhouse[J]. Horticulturae，2026，12（2）：194.

[26] Lichtenthaler H K，Wellburn A R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents[J]. Biochemical Society Transactions，1983，11（5）：591-592.

[27] Jolliffe I T，Cadima J. Principal component analysis: A review and recent developments[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical，Physical and Engineering Sciences，2016，374（2065）：20150202.