

# 人工老化处理时间对黄瓜种子生理特性及解剖结构的影响

张百刚<sup>1</sup>, 李生娥<sup>1</sup>, 吴海涛<sup>2</sup>, 黄宗安<sup>2</sup>, 张圣美<sup>2</sup>, 罗天宽<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学生命科学与工程学院 兰州 730050;

2. 温州科技职业学院(温州市农业科学研究院)·全省浙南作物育种重点实验室 浙江温州 325006)

**摘要:**为探究老化对黄瓜种子生活力和生理变化规律及解剖结构的影响,以黄瓜新品种德丽1号种子为试材,采用高温高湿(45 °C, 95% RH)人工加速老化的方法,测定经不同时间老化后的种子萌发指标、生理生化指标,并采用石蜡切片法制片观察种子解剖结构的变化。结果表明,随老化时间延长,种子发芽率持续下降,与对照(老化0 d)相比,老化6 d和9 d分别显著降低了24.45、84.45个百分点;电导率和MDA含量均呈显著上升趋势;可溶性蛋白和可溶性糖含量显著降低;CAT和SOD活性呈显著下降趋势;而H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量和O<sub>2</sub>·<sup>-</sup>产生速率在老化第9天达峰值后又随种子活力丧失降低,但仍高于对照。老化后吸胀24 h结果表明,吸胀有助于高活力种子(发芽率94.43%以上)修复酶的激活,但对低活力种子(发芽率36.67%以下)而言,吸胀处理加剧了氧化应激。随老化程度加深,种子解剖结构发生变化,种胚及子叶细胞中内含物出现降解现象,结构受损严重。本研究结果可为黄瓜种子老化的生理机制研究提供理论依据,并为黄瓜种质资源的保存及利用提供参考。

**关键词:**黄瓜种子;人工老化;生理生化;解剖结构

中图分类号:S642.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)05-077-08

## Effects of artificial aging treatment time on physiological characteristics and anatomical structure of cucumber seeds

ZHANG Baigang<sup>1</sup>, LI Sheng'e<sup>1</sup>, WU Haitao<sup>2</sup>, HUANG Zongan<sup>2</sup>, ZHANG Shengmei<sup>2</sup>, LUO Tiankuan<sup>2</sup>

(1. College of Life Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Wenzhou Vocational College of Science and Technology(Wenzhou Academy of Agricultural Science)/Key Laboratory of Crop Breeding in Southern Zhejiang, Wenzhou 325006, Zhejiang, China)

**Abstract:** To investigate the effects of aging on the viability, physiological changes, and anatomical structure of cucumber seeds, seeds of the new cucumber variety Deli No. 1 was used as the experimental materials. An artificial accelerated aging method with high temperature and high humidity (45 °C, 95% RH) was adopted to determine the seed germination indices and physiological and biochemical indices after different aging durations. Meanwhile, paraffin sectioning was employed to observe the anatomical structure changes of the seeds. The results indicated that with the extension of aging time, the germination rate of seeds decreased continuously: Compared with the control (0 d of aging), the germination rate after 6 and 9 days of aging dropped significantly by 24.45 and 84.45 percentage points, respectively. The electrical conductivity and malondialdehyde (MDA) content exhibited significant increasing trends, the content of soluble protein and soluble sugar decreased markedly; the activity of catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD) decreased significantly. The levels of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>·<sup>-</sup> peaked on day 9 of aging and subsequently declined in tandem with the loss of seed viability, but remained higher than those of the control. The results of 24 h imbibition after aging indicated that imbibition was beneficial to the activation of repair enzymes in high-vigor seeds (with a germination rate of over 94.43%); whereas for low-vigor seeds (with a germination rate of below 36.67%), imbibition treatment aggravated oxidative stress. With the deepening of aging degree, the anatomical structure of seeds changed: The inclusions in embryo and cotyledon cells were degraded, and the structure was severely damaged. The results of this study can provide a theoretical basis for the re-

收稿日期: 2025-09-25; 修回日期: 2025-12-21

基金项目: 温州市农业“双强”奖补项目(Z2023015); 温州市农业新品种选育协作组项目(2019ZX007)

作者简介: 张百刚, 男, 副教授, 主要从事食品生物技术等研究。E-mail: zhangbaigang@163.com

通信作者: 罗天宽, 男, 教授, 主要从事农作物生物育种等研究。E-mail: wzltk@126.com

search on the physiological mechanism of cucumber seed aging, and a scientific reference for the preservation and utilization of cucumber germplasm resources.

**Key words:** Cucumber seed; Artificial aging; Physiological and biochemical; Anatomical structure

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)属葫芦科黄瓜属蔓生草本植物,在我国设施蔬菜栽培中占有重要地位<sup>[1]</sup>。FAO 统计数据显示,中国黄瓜种植面积在全球黄瓜总种植面积中的占比已超过 50%,产量在全球黄瓜总产量中的占比更是突破 70%<sup>[2]</sup>。研究发现,葫芦科种子富含油酸、亚油酸、棕榈酸等脂肪油,其品质与大豆、向日葵、花生等其他主要油料作物的种子相当<sup>[3]</sup>,对氧化敏感,在高温条件下极不稳定,容易变质,影响黄瓜种子的生产、贮藏和资源利用。因此,明确黄瓜种子贮藏过程中的生理动态变化对种质资源的长期保存具有重要意义。

种质资源是现代种业发展的关键,种子质量和活力直接影响作物的产量和品质<sup>[4-5]</sup>。正常状态下,种子内各类代谢活动保持平衡且有序进行<sup>[6]</sup>。然而,种子在长时间贮藏过程中因遗传因素和种子自身含水量、贮藏时间、温度、湿度等内外因素的相互作用,常发生劣变衰老,最终随着老化而丧失生活力<sup>[7-8]</sup>。种子老化是一种自然的、不可避免的现象<sup>[9]</sup>,涉及多种分子、生理代谢和细胞结构变化等复杂生物学性状<sup>[10]</sup>,体现在种子活力、酶活性、膜脂过氧化、物质代谢等方面<sup>[11-12]</sup>。研究表明,在种子老化过程中,细胞内活性氧(ROS)大量积累,导致膜脂过氧化加剧,抗氧化系统受损,细胞器功能紊乱,对种子生活力产生负面影响<sup>[13-14]</sup>。

种子加速老化是在种子保存环境中施加较高的温度和相对湿度,可以模拟自然老化过程,为种子老化机制的研究提供了便利,广泛应用于种子活力测试和老化研究<sup>[15]</sup>。目前,人工加速老化相关的研究已经在燕麦<sup>[9]</sup>、小麦<sup>[16]</sup>、大豆<sup>[17]</sup>和水稻<sup>[18]</sup>等多种粮食作物中开展,为种子贮藏和利用提供了重要的科学依据。然而,黄瓜种子老化过程中活力丧失的原因和机制之间的关系尚未完全明确。鉴于此,笔者以黄瓜种子为试材,利用高温高湿人工加速老化的方法,通过测定人工老化和吸胀处理后黄瓜种子活力及生理生化指标,同时观察种胚解剖结构,以期揭示黄瓜种子的衰老机制奠定基础,并为黄瓜种质资源的长期保存及老化种子的修复提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验于 2024 年 9 月至 2025 年 3 月在温州市

农业科学研究院实验室进行。试验材料为黄瓜新品种德丽 1 号种子,由温州市农业科学研究院作物所选育。该品种为普通株系,植株长势中等,耐热,抗西瓜花叶病毒(WMV),中抗霜霉病、白粉病和细菌性角斑病等病害。种子收获于 2023 年秋,自收获后于 4 °C 冰箱保存,初始发芽率 100%,初始含水量 5.9%。挑选出大小均匀、形状规则且饱满的种子,用铝箔袋密封,于 4 °C 冰箱内贮藏,供后续试验使用。

### 1.2 方法

1.2.1 黄瓜种子人工老化 参照刘备等<sup>[19]</sup>的方法测定黄瓜种子初始含水量,并将其调整为 20%,具体方法参考文献[20]。用 1%次氯酸钠溶液对种子消毒 10 min 后,蒸馏水冲洗 3~5 次,吸水纸吸干种子表面水分。根据预试验结果,采用随机区组设计,将调整好含水量的种子装入网纱袋,平铺放入恒温恒湿老化箱中,设置温度 45 °C,相对湿度 95%,分别进行 0(对照)、1.5、3.0、4.5、6.0、7.5、9.0、10.5、12.0 d 的老化处理。老化结束后,统一取出种子于室温下干燥,待恢复至原始含水量后装入铝箔袋封口,在 4 °C 冰箱中保存备用。

1.2.2 活力指标的测定 发芽试验参照《农作物种子检验规程 第 4 部分:发芽试验》(GB/T 3543.4—2025)的标准进行<sup>[21]</sup>。老化后的黄瓜种子采用纸上发芽法,在发芽盒(规格 10.5 cm×9 cm×7 cm)中平铺双层滤纸,用蒸馏水完全浸湿,将不同老化时间处理的种子分别置于不同发芽盒中,采用随机区组、3 次重复的试验方法,每个发芽盒中整齐摆放 30 粒种子,9 个处理组,以老化 0 d 种子作为对照,于 25 °C 人工气候培养箱中进行发芽试验,16 h 光照/8 h 黑暗。自种子置床 24 h 后每日于固定时间向发芽盒中喷施 2 mL 蒸馏水。以胚根突破种皮 2 mm 为发芽标准,观测并记录种子发芽数,4 d 统计发芽势,8 d 统计发芽率及正常幼苗,8 d 发芽结束后,每个处理随机挑选 10 株幼苗用直尺测定下胚轴长(初生根以上至子叶着生点以下的部分)。根据下列公式计算发芽率(germination percentage, GP)、发芽指数(germination index, GI)和活力指数(vigour index, VI)。

$GP\% = (\text{8 d 内正常发芽种子数} / \text{发芽试验样品})$

粒数) $\times 100$ ; (1)

$$GI = \sum \frac{Gt}{Dt}; \quad (2)$$

$$VI = GI \times S. \quad (3)$$

式中, $Dt$ 是发芽天数, $Gt$ 为 $Dt$ 所对应的每天发芽的种子粒数; $S$ 是发芽8 d时幼苗的下胚轴长(cm)。

1.2.3 种子吸胀处理 将老化0、3、6、9、12 d的种子均分为2个处理组:未吸胀组(吸胀0 h,老化后直接测定)与水吸胀组(吸胀24 h,25 °C蒸馏水中避光吸胀萌发)。

1.2.4 生理生化指标的测定 利用电导率仪(型号:DDS-307A)测定老化后黄瓜种子浸出液电导率(EC),具体方法参考文献[22]。

对人工老化0、3、6、9、12 d共5个时间梯度种子的两个处理进行相关生理生化指标的测定。采用考马斯亮蓝G-250法测定可溶性蛋白(SP)含量。参照生工(上海)生物科技股份有限公司生产的试剂盒(D 799391 - 0050、D 799762 - 0100、D 799774 - 0100、D 799598 - 0100、D 799594 - 0100、D 799772 - 0100)说明书分别测定可溶性糖(SS)、丙二醛(MDA)、过氧化氢( $H_2O_2$ )含量及过氧化氢酶(CAT)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性和超氧阴离子( $O_2\cdot$ )产生速率,每个指标进行3次生物学重复,每个重复称取种子0.1 g。

1.2.5 种子解剖结构观察 采用常规石蜡切片的方法。取老化0、6、9 d的黄瓜种子适量,在蒸馏水中浸泡4 h,然后剖去种皮立即投入FAA固定液

(70%乙醇)中固定24 h。采用不同梯度乙醇进行脱水。75%乙醇4 h,85%乙醇2 h,90%乙醇2 h,95%乙醇1 h,无水乙醇I 30 min,无水乙醇II 30 min,醇苯5~10 min,二甲苯I 5~10 min,二甲苯II 5~10 min,65 °C融化石蜡I 1 h,65 °C融化石蜡II 1 h,65 °C融化石蜡III 1 h。将浸好蜡的组织进行包埋后修整蜡块,切片(厚4  $\mu$ m)后于40 °C温水上展片,在60 °C烘箱内烤片。采用番红-固绿染色,首先切片脱塑至水后,浸入番红染液中染色3~5 s,自来水冲洗后,依次放入50%、70%、80%梯度乙醇中脱色,浸入固绿染液中染色4~6 s,无水乙醇三缸脱水。切片浸入干净的二甲苯溶液中透明5 min,用中性树脂胶封片。在Leica DFC 7000 T显微镜下观察样品切片并拍照。

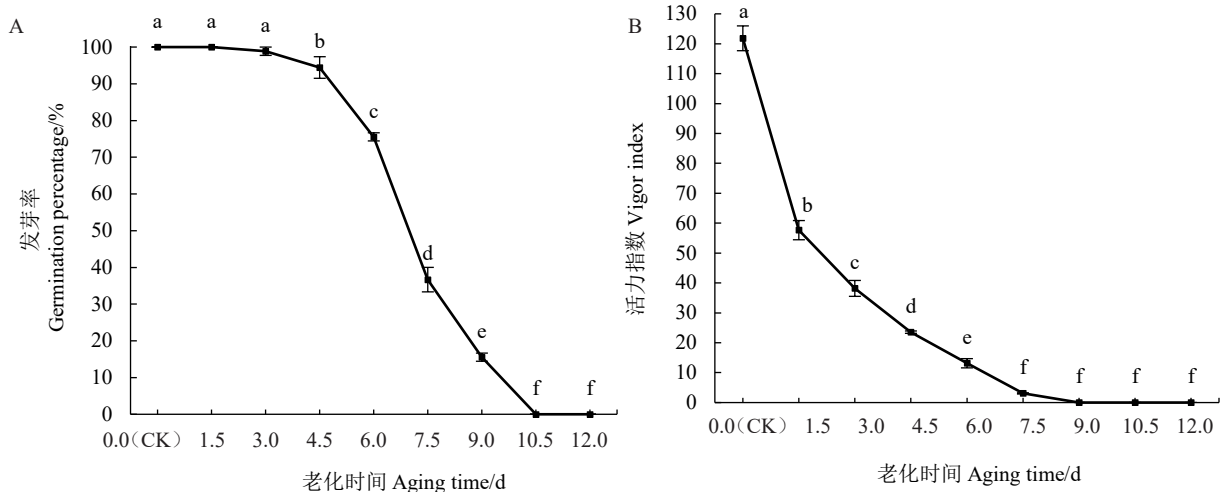
### 1.3 数据分析

采用Microsoft Excel 2021软件整理试验数据和绘图,采用IBM SPSS Statistics 27.0.1软件进行描述性统计、方差分析,使用Waller - Duncans法进行多重比较并检验差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同老化时间对黄瓜种子活力的影响

种子发芽率和活力指数是种子质量的重要表征,在一定程度上可反映幼苗的生长情况。由图1可知,随人工老化时间的延长,黄瓜种子的发芽率和活力指数均呈逐渐降低的趋势。不同老化时间处理的种子萌发后幼苗的形态特征如图2所示,老化1.5 d时,种子发芽率仍维持较高水平,幼苗长势



注:不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图1 不同老化时间处理的黄瓜种子发芽率(A)和活力指数(B)的变化

Fig. 1 Change of germination percentage(A)and vigor index(B)of cucumber seeds under different aging time treatments

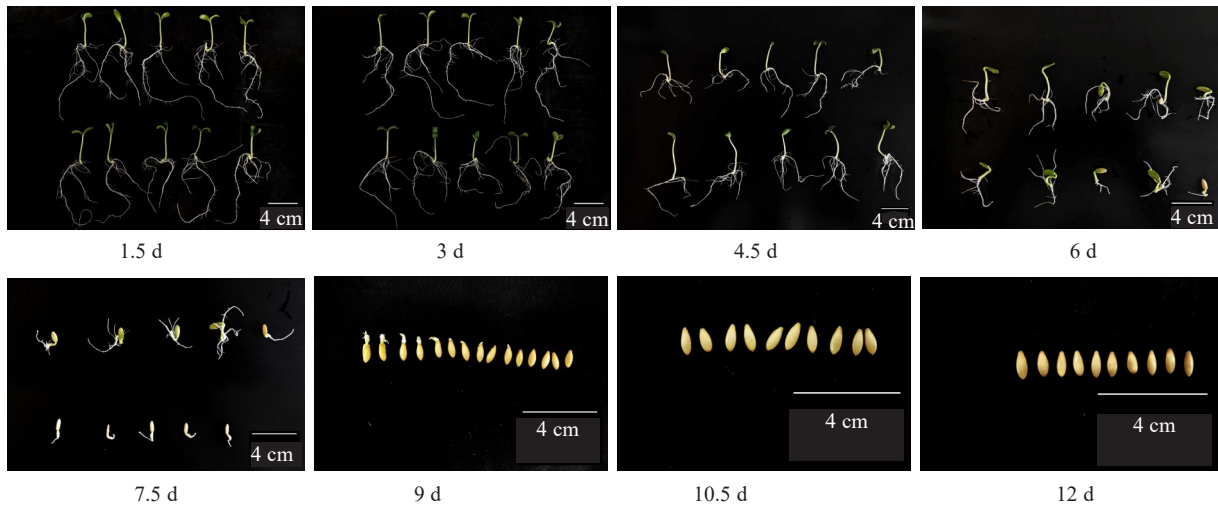


图2 不同老化程度黄瓜种子萌发后的形态变化

Fig. 2 Morphological change of cucumber seeds after germination at different aging levels

形态良好;老化3 d,与对照相比,种子发芽率无显著变化,而活力指数显著降低了68.66%,幼苗株高与根长开始降低;老化6 d,种子发芽率逐渐降低为75.55%,活力指数显著降低,开始出现不能发育成苗的种子,幼苗生长细弱;老化7.5 d,发芽率迅速降低,种子不能完全正常成苗;老化9 d,发芽率显著降低至15.55%,活力指数逐渐趋近于0,多数种子不能萌发,种子活力逐渐丧失;老化12 d,种子发芽率降为0,完全丧失萌发能力。

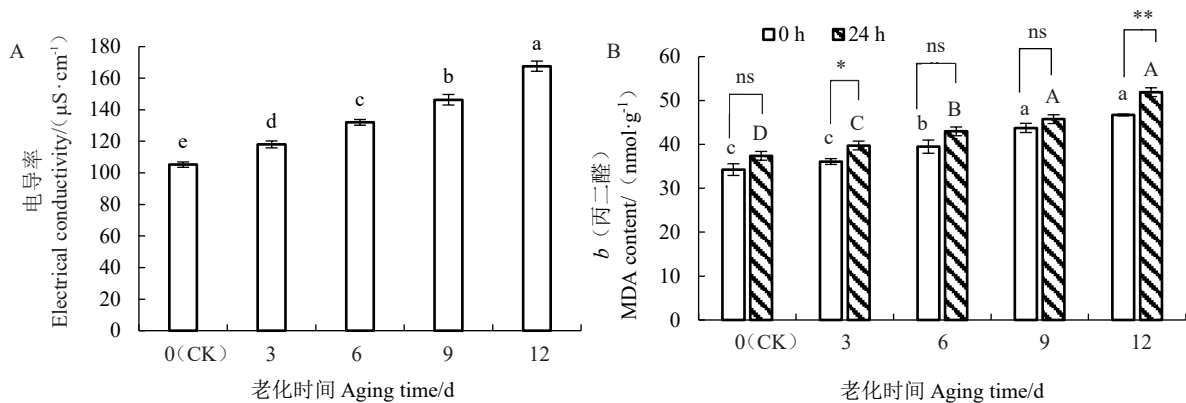
### 2.2 不同老化时间对黄瓜种胚脂质过氧化指标的影响

由图3可知,在人工老化处理下,随着老化时间的延长,种子浸出液电导率和MDA含量均呈逐

渐上升趋势。老化3 d,与对照相比,种子电导率显著升高了12.19%,老化12 d,种子电导率显著升高了59.32%。老化后水吸胀萌发24 h的种子MDA含量高于老化后吸胀0 h,且在老化3 d和12 d呈显著和极显著差异,而老化0、6、9 d无显著差异;老化12 d,2种处理的种子MDA含量均达到最高,与对照相比分别显著升高了36.36%和38.77%。

### 2.3 人工老化及吸胀处理对种胚渗透调节物质含量的影响

由图4可知,随人工老化时间延长,种胚可溶性蛋白和可溶性糖含量均呈降低趋势,老化后吸胀24 h的种子可溶性蛋白和可溶性糖含量低于吸胀0 h。人工老化0、3、6 d,两个处理的种胚可溶性蛋



注:不同大写字母和小写字母表示在0.05水平差异显著。ns、\*、\*\*分别表示同一老化程度吸胀0 h和吸胀24 h种子间差异不显著( $P>0.05$ )、差异显著( $P<0.05$ )和差异极显著( $P<0.01$ )。下同。

Note: Different uppercase and lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. ns, \* and \*\* indicate no significant ( $P>0.05$ ), significant ( $P<0.05$ ), and extremely significant ( $P<0.01$ ) difference, respectively, between seeds with the same aging level at 0 h and 24 h of imbibition. The same below.

图3 不同老化时间种胚脂质过氧化指标变化

Fig. 3 Change of lipid peroxidation indices in seed embryos at different aging durations

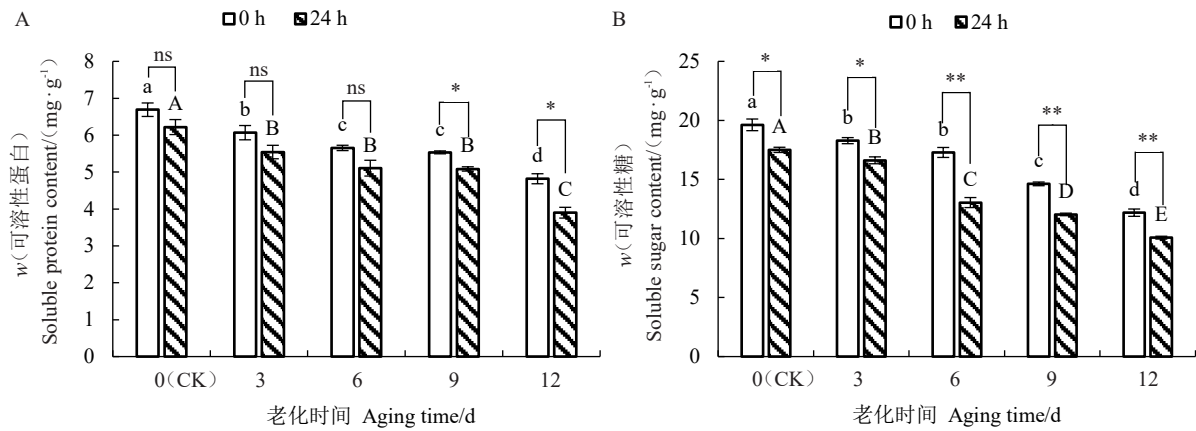


图4 人工老化及吸胀处理对种胚渗透调节物质含量的影响

Fig. 4 Effects of artificial aging and imbibition treatment on osmoregulatory substances content of seed embryos

白含量无显著差异,老化9 d和12 d时,差异显著;与对照相比,老化12 d的两个处理可溶性蛋白含量分别显著降低了27.95%和37.30%。两个处理种子的可溶性糖含量在各老化时间均表现出显著或极显著差异,老化12 d后,与对照相比,可溶性糖含量分别显著降低了37.87%和42.46%。

2.4 人工老化及吸胀处理对种胚抗氧化酶活性的影响

由图5可知,随着种子老化程度的加剧,黄瓜种子CAT和SOD活性均显著降低。同一老化时间

下,水吸胀0 h与24 h的种子CAT活性呈显著或极显著差异,老化0、3、6 d,吸胀24 h种子的CAT活性显著高于吸胀0 h,老化9 d和12 d则相反,且两处理种子的CAT活性在老化12 d时降至最低,与对照相比,分别显著降低了72.89%和93.90%。老化0 d吸胀24 h的种子SOD活性略高于吸胀0 h,差异不显著;而老化3、6、9、12 d,吸胀24 h的种子SOD活性极显著低于吸胀0 h。老化12 d,两处理的种子SOD活性与对照相比分别显著降低了45.12%和75.25%。

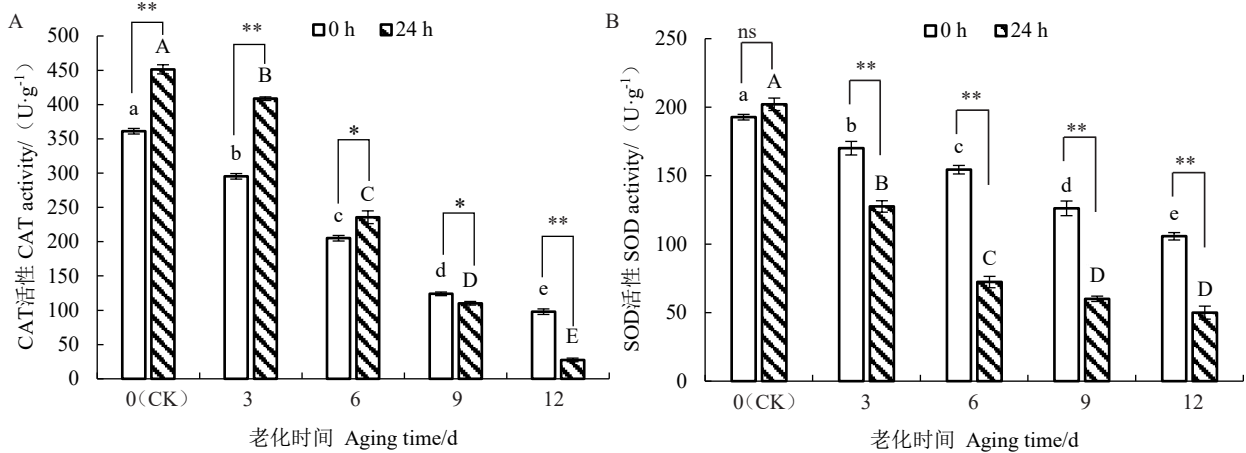


图5 人工老化及吸胀处理对种胚抗氧化酶活性的影响

Fig. 5 Effects of artificial aging and imbibition treatment on the activity of antioxidant enzymes in seed embryos

2.5 人工老化及吸胀处理对种胚活性氧水平的影响

由图6可知,随着种子老化程度的加剧,黄瓜种子H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量和O<sub>2</sub>·产生速率均呈先升高后降低的趋势,且老化9 d时均达到最大值。老化后吸胀24 h的种子H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量和O<sub>2</sub>·产生速率呈上升趋势,

其中两种吸胀处理的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量在老化初期无显著差异,老化6、9、12 d时,吸胀24 h的种子H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量极显著高于吸胀0 h;吸胀0 h和吸胀24 h的种子H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量分别在老化9 d和12 d时达到最大值,与对照相比,分别显著提高了325.19%和525.64%。吸胀24 h的种子O<sub>2</sub>·产生速率在每个老化时间梯

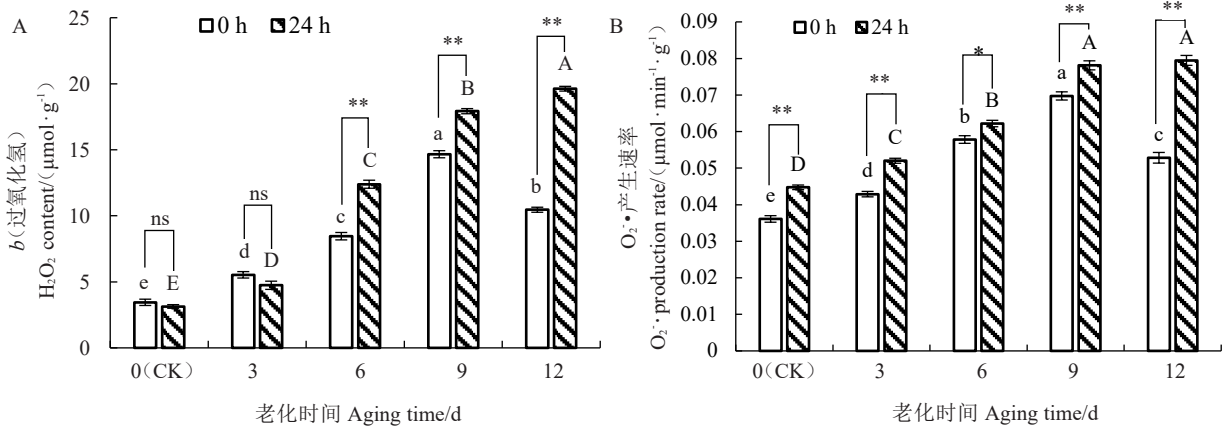


图6 人工老化及吸胀处理对种胚活性氧水平的影响

Fig. 6 Effects of artificial aging and imbibition treatment on ROS levels in seed embryos

度均显著高于吸胀 0 h,两种处理的 O<sub>2</sub>·产生速率分别在老化 9 d 和 12 d 时达到最大值,与对照相比分别显著提高了 93.21%和 77.55%。

双因素方差分析结果表明,老化时间及吸水处理对黄瓜种子 MDA 含量、可溶性蛋白含量、抗氧化酶活性等生理指标均存在显著影响;老化时间与吸水处理的交互作用对可溶性糖含量、SOD 活性、CAT 活性、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量和 O<sub>2</sub>·产生速率均存在显著影响。

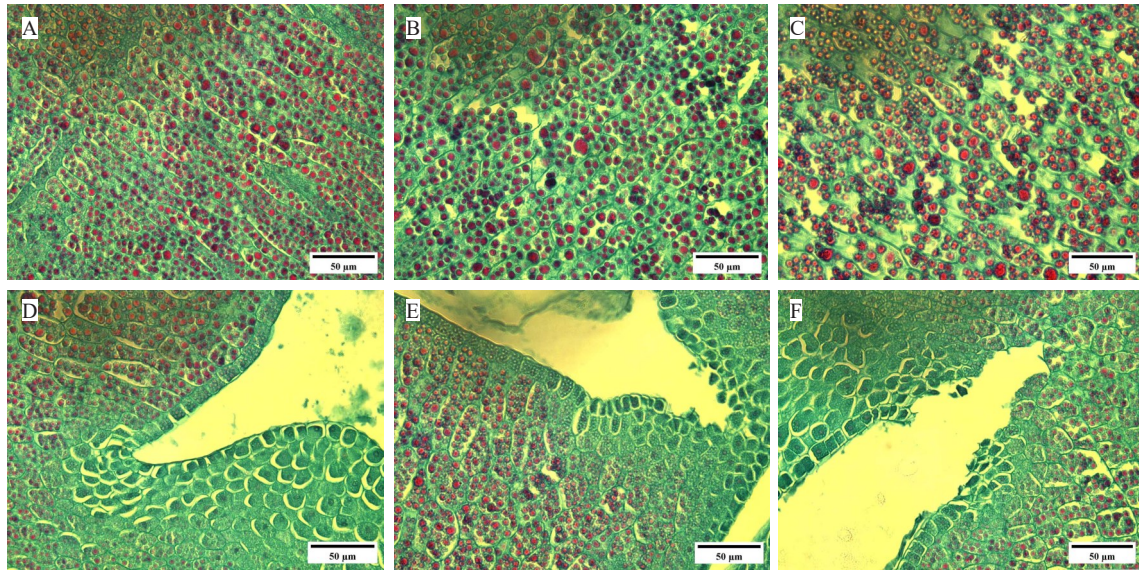
2.6 人工老化对黄瓜种子解剖结构的影响

随着人工老化程度的加剧,种子胚的微观结构发生变化。未经人工老化处理的种子子叶细胞饱满,排列紧密,并保持其典型的形态。子叶中内含物丰富,均匀地散布在子叶中(图 7-A);种胚细胞饱

满,且与子叶交界处的细胞排列整齐有序,解剖结构表现正常(图 7-D)。人工老化 6 d 后,子叶细胞开始出现肿胀、质壁分离和变形、破裂等现象(图 7-B);种胚细胞少部分出现破裂现象,而种胚中与子叶连接处的细胞无明显变化(图 7-E)。人工老化 9 d 后,子叶内细胞间隙增大,组织结构疏松,萎缩、变形、破裂现象明显,部分细胞内含物降解(图 7-C);种胚细胞破裂加剧,出现降解现象,且种胚中与子叶连接处的细胞排列紊乱(图 7-F)。

3 讨论与结论

种子萌发是植物生长发育的关键阶段,种子活力表征了种子在多种环境条件下的萌发潜能,发芽



注: A~C. 人工老化 0、6、9 d 的子叶; D~F. 人工老化 0、6、9 d 的种胚。

Note: A-C. Cotyledons of cucumber seeds at 0, 6, and 9 days of artificial aging, respectively; D-F. Embryos of cucumber seeds at 0, 6, and 9 days of artificial aging, respectively.

图7 人工老化对黄瓜种子子叶和种胚解剖结构的影响(×400)

Fig. 7 Effects of artificial aging on the anatomical structures of cotyledon and embryo in cucumber seeds(×400)

势、发芽率、发芽指数和活力指数是评估种子活力的核心生物学指标<sup>[23]</sup>。本研究结果表明,黄瓜种子发芽率和活力指数随人工老化时间的延长而逐渐降低。燕麦(*Avena sativa*)种子老化过程中的活力变化也表现出类似的负面影响<sup>[19]</sup>,与本研究结果相似。以上研究表明,老化过程会损害种子质量,抑制其萌发能力和幼苗的生长性能,进而导致种子活力降低,直至完全丧失。

种子发生老化时,细胞膜破损导致膜透性增加,细胞内容物外渗,浸出液电导率升高<sup>[14]</sup>;同时,脂质过氧化破坏膜结构,生成氧化损伤的主要生物标志物 MDA<sup>[12]</sup>。本研究中,随老化时间的延长,黄瓜种子浸出液电导率及 MDA 含量逐渐升高,与活力指标降低的结果一致,表明脂质过氧化增强可能是黄瓜种子活力丧失的原因。小麦种子的加速老化也导致发芽率显著降低,并与 MDA 含量增加有关<sup>[16]</sup>,这一现象揭示了脂质氧化的发生。本研究结果表明,经人工老化后吸胀萌发 24 h 的种子比吸胀 0 h 种子表现出更高的 MDA 含量,且后期较明显,可能是老化导致的氧化损伤与吸胀后代谢激活共同作用的结果。

老化胁迫下,细胞内 ROS 的产生和清除失衡以及由此引起的氧化损伤与种子生活力的丧失有关<sup>[24]</sup>。老化过程中,ROS 积累,氧化产生自由基,这些自由基与各种细胞成分发生反应,破坏细胞膜结构,导致膜功能受损,从而导致种子劣变<sup>[25-26]</sup>。在本研究中,黄瓜种子 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量和 O<sub>2</sub>·<sup>-</sup> 产生速率在老化开始时维持在一个较低水平,而 SOD 和 CAT 保持较高活性,说明此时抗氧化系统发挥清除 ROS 的功能。随着老化时间延长,SOD 和 CAT 活性逐渐降低,而 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量和 O<sub>2</sub>·<sup>-</sup> 产生速率显著升高,表明种子抗氧化能力衰退,ROS 清除能力下降,自身修复能力不足以抵挡老化造成的伤害。本研究结果与前人在棉花<sup>[27]</sup>和鹰嘴豆<sup>[28]</sup>种子中的研究结果一致。老化后期种子活力完全丧失时,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量和 O<sub>2</sub>·<sup>-</sup> 产生速率降低。研究表明,种子活力与 ROS 水平呈钟形响应:活力丧失前 ROS 水平升高,活力丧失时 ROS 水平下降<sup>[29]</sup>,与本研究结果相似。

老化后吸胀 24 h 种子启动萌发,线粒体电子传递链恢复活动,代谢恢复过程和老化过程中产生的 ROS 叠加,将对种子造成氧化胁迫,影响其生理状态<sup>[30]</sup>。本研究结果表明,老化后吸胀 24 h 萌发种子的 O<sub>2</sub>·<sup>-</sup> 产生速率和 MDA 含量较吸胀 0 h 种子持续上升,高活力种子 SOD 和 CAT 活性升高,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含

量降低,而低活力种子则相反,且以抗氧化与活性氧相关指标响应更敏感,表现为老化程度越高,吸胀处理导致的指标劣变幅度越大,证实该类指标是反映老化种子吸胀损伤的核心指标。在人工老化的水稻、向日葵种子吸胀萌发早期也有类似的 ROS 大量产生的报道<sup>[27,31]</sup>,而与其萌发后期不同,可能是种质不同,相同吸胀时间对种子的生理影响产生差异。这一现象表明,种子老化会削弱其应对氧化应激的能力,另外,低活力种子 ROS 含量的增加是导致种子萌发抑制的重要因素<sup>[19]</sup>。种子吸胀后的修复能力随老化程度加剧而降低<sup>[32]</sup>,这与许多器官在成熟过程中再生修复能力下降的现象相似<sup>[33]</sup>。

贮藏物质,如蛋白质、油脂、糖类、淀粉等主要积累在成熟种子的胚乳或子叶中,并在种子后续的萌发过程中被动员<sup>[9]</sup>。此外,老化过程中的呼吸作用也会持续消耗贮藏物质,促使可溶性糖和蛋白质降解,造成种子内部营养成分含量下降,细胞内氧化还原状态失衡,进一步加剧了种子老化过程<sup>[12,34]</sup>。本研究结果表明,未老化处理情况下,黄瓜种子内部组织结构正常,各组织之间结合紧密。经人工老化后,黄瓜种胚细胞出现肿胀和质壁分离,伴随着人工老化的进行,细胞结构疏松且肿胀加剧,细胞内容物降解破裂。这种变化使种子膜结构发生改变,细胞膜能力降低,影响营养物质输送,可能使自由氧更容易进入种子,抗氧化酶系统遭到破坏,子叶中所含的少量脂质同样可能遭受过氧化作用的侵袭,由此生成的过氧化物能够引起蛋白质的变性<sup>[16]</sup>,最终导致种子活力下降,这一结果凸显了种子结构与功能之间的紧密联系和相互依赖性。

综上所述,45 °C、95%相对湿度人工老化 6 d 是黄瓜种子正常萌发的临界时间,老化超过 9 d 会对种子造成严重损伤。随人工老化程度加剧,黄瓜种子 CAT、SOD 活性显著降低,可溶性糖、可溶性蛋白含量下降,ROS 与 MDA 积累增加,表明老化破坏抗氧化防御系统,引发氧化应激与膜脂过氧化,共同导致种子活力下降。种胚细胞结构改变与氧化过程相互作用,但其确切机制还需进一步研究。吸胀 24 h 可促进高活力种子修复酶的激活,因此,后续可通过外源抗氧化剂在老化中期进行干预,以提高种子活力。

### 参考文献

- [1] 程晓欣,闫晋强,翟许玲,等.葫芦科作物遗传多样性研究进展[J].中国瓜菜,2024,37(5):1-11.
- [2] 刘思涵,周椿雨,童子娟,等.中国黄瓜出口贸易结构与国际竞

- 争力分析[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(3): 188-196.
- [3] MURTHY H N, DEWIR Y H, DALAWAI D, et al. Comparative physicochemical analysis of seed oils of wild cucumber [*Cucumis sativus* var. *hardwickii* (Royle) Alef.], cucumber (*Cucumis sativus* L. var. *sativus*), and gherkin (*Cucumis anguria* L.) [J]. South African Journal of Botany, 2022, 145: 186-191.
- [4] 刘娟, 归静, 高伟, 等. 种子老化的生理生化与分子机理研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 4997-5006.
- [5] XIA F S, CHEN L L, YAN H F, et al. Antioxidant and ultrastructural responses to priming with PEG in aged, ultra-dry oat seed [J]. Seed Science and Technology, 2016, 44(3): 556-568.
- [6] 彭云松, 任浩, 刘婷, 等. 高温胁迫对食用百合生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2025(12): 66-73.
- [7] PIRREDDA M, PUEYO I F, SÁNCHEZ L O, et al. Seed longevity and ageing: A review on physiological and genetic factors with an emphasis on hormonal regulation [J]. Plants, 2023, 13(1): 41.
- [8] MALVIYA R, GAYEN D. Seed deterioration: Unraveling the role of phytohormones on seed germination under aging condition [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2024, 44(5): 1-17.
- [9] YAO R R, LIU H, WANG J L, et al. Cytological structures and physiological and biochemical characteristics of covered oat (*Avena sativa* L.) and naked oat (*Avena nuda* L.) seeds during high-temperature artificial aging [J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 530.
- [10] FU Y B, AHMED Z, YANG H, et al. TUNEL assay and DAPI staining revealed few alterations of cellular morphology in naturally and artificially aged seeds of cultivated flax [J]. Plants, 2018, 7(2): 34.
- [11] 魏永胜, 彭琪朗, 黄滢澳, 等. 植物种子衰老机制研究进展[J]. 西北农业学报, 2024, 33(5): 775-786.
- [12] ZHANG K L, ZHANG Y, SUN J, et al. Deterioration of orthodox seeds during ageing: Influencing factors, physiological alterations and the role of reactive oxygen species [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 158: 475-485.
- [13] RATAJCZAK E, MAŁECKA A, BAGNIEWSKA-ZADWORNA A, et al. The production, localization and spreading of reactive oxygen species contributes to the low vitality of long-term stored common beech (*Fagus sylvatica* L.) seeds [J]. Journal of Plant Physiology, 2015, 174: 147-156.
- [14] EBONE L A, CAVERZAN A, CHAVARRIA G. Physiologic alterations in orthodox seeds due to deterioration processes [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2019, 145: 34-42.
- [15] PATIL S S, SAJJAN A S, BIRADARPATIL N K, et al. Accelerated ageing mediated seed longevity prediction and assessment of seed deterioration pattern through 2D-Gel electrophoresis in chickpea (*Cicer arietinum* L.) [J]. Legume Research, 2021, 47(6): 927-936.
- [16] TIAN P P, LV Y Y, YUAN W J, et al. Effect of artificial aging on wheat quality deterioration during storage [J]. Journal of Stored Products Research, 2019, 80: 50-56.
- [17] SILVA M F D, SOARES J M, XAVIER W A, et al. The role of the biochemical composition of soybean seeds in the tolerance to deterioration under natural and artificial aging [J]. Heliyon, 2023, 9(12): e21628.
- [18] WANG B Q, WANG S Y, TANG Y Q, et al. Transcriptome-wide characterization of seed aging in rice: Identification of specific long-lived mRNAs for seed longevity [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 857390.
- [19] 刘备, 宋玉梅, 孙铭, 等. 燕麦劣变种子吸胀过程中线粒体 AsA-GSH 循环的生理响应 [J]. 草地学报, 2021, 29(2): 211-219.
- [20] 夏方山. 不同老化处理对燕麦种子线粒体结构及抗氧化系统的影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [21] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 农作物种子检验规程 第4部分: 播种质量 发芽试验: GB/T 3543.4-2025 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
- [22] 刘菁戈. 电导率和胚根突破法用于3种禾草种子活力测定的适用性研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [23] 姚瑞瑞, 刘欢, 赵桂琴, 等. 贮藏时间对皮、裸燕麦种子萌发及细胞学结构的影响 [J]. 草业学报, 2024, 33(2): 154-163.
- [24] SANO N, RAJJOU L, NORTH H M, et al. Staying alive: Molecular aspects of seed longevity [J]. Plant and Cell Physiology, 2016, 57(4): 660-674.
- [25] DIAZ-VIVANCOS P, BARBA-ESPÍN G, HERNÁNDEZ J A. Elucidating hormonal/ROS networks during seed germination: Insights and perspectives [J]. Plant Cell Reports, 2013, 32(10): 1491-1502.
- [26] AHMAD M A, JAVED R, ADEEL M, et al. PEG 6000-stimulated drought stress improves the attributes of in vitro growth, steviol glycosides production, and antioxidant activities in *Stevia rebaudiana* bertoni [J]. Plants, 2020, 9(11): 1552.
- [27] GOEL A, GOEL A K, SHEORAN I S. Changes in oxidative stress enzymes during artificial ageing in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seeds [J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(9): 1093-1100.
- [28] MISHRA S N, KUMARI N, MISHRA N N, et al. Estimation of hormonal seed treatments on enzyme activities after accelerated ageing (artificial ageing) in chickpea (*Cicer arietinum* L.) [J]. Legume Research, 2023, 46(4): 421-427.
- [29] KRANNER I, MINIBAYEVA F V, BECKETT R P, et al. What is stress? Concepts, definitions and applications in seed science [J]. New Phytologist, 2010, 188(3): 655-673.
- [30] GARA L D, DE PINTO M C, MOLITERNI V M C, et al. Redox regulation and storage processes during maturation in kernels of *Triticum durum* [J]. Journal of Experimental Botany, 2003, 54(381): 249-258.
- [31] 宋超. 水稻种子人工老化过程中抗氧化系统的变化 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [32] 刘田田, 古瑜, 杨子锐, 等. 人工老化处理对菜豆种子性状和苗期生长的影响 [J]. 中国瓜菜, 2025, 38(1): 137-142.
- [33] BEAULIEU M O, RAIBLE D W. Losing the license to regenerate hair cells [J]. Developmental Cell, 2021, 56(17): 2402-2404.
- [34] YUE G H, YANG R C, LEI D, et al. Physiological, biochemical, and ultrastructural changes in naturally aged sweet corn seeds [J]. Agriculture, 2024, 14(7): 1039.