

引用格式: 萨日娜, 蔡军火, 魏绪英, 等. 红花石蒜种子脱水过程中的形态与生理变化[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 572–580. SA Rina, CAI Junhuo, WEI Xuying, *et al.* Morphological and physiological changes during the dehydration process of *Lycoris radiata* seeds[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(3): 572–580.

红花石蒜种子脱水过程中的形态与生理变化

萨日娜¹, 蔡军火¹, 魏绪英², 游 欣¹, 温 婷¹, 王 浙¹

(1. 江西农业大学 园林与艺术学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西财经大学 艺术学院, 江西 南昌 330032)

摘要: 【目的】探究红花石蒜 *Lycoris radiata* 种子脱水过程中的细胞形态及生理指标变化规律, 确定种子临界含水量及半致死含水量, 为石蒜属 *Lycoris* 植物种子的长期保存提供理论基础。【方法】以红花石蒜新鲜的成熟种子(含水量 70%)为材料, 采用硅胶脱水法将种子含水量依序降至 60%、50%、40%、30%、20% 和 10% 时, 分别取样测定种子相对电导率、生活力、发芽率、过氧化氢与超氧阴离子质量摩尔浓度及过氧化氢酶、超氧化物歧化酶和过氧化物酶的活性。【结果】①刚采收的成熟新鲜种子平均含水量高达 70%, 但在自然室温(25 ℃)状态下会很快失水(仅 44 h 就会下降至 10%), 其临界含水量和半致死含水量分别为 40% 和 10%。②红花石蒜种子在脱落时, 其胚已基本发育成熟。③在种子失水过程中, 种子外部形态呈逐渐皱缩、干瘪状态, 失水严重的种子细胞内发生明显的质壁分离现象, 胞内淀粉粒也由颗粒状逐渐转为片状, 还伴有大量的细胞降解现象。④随着种子含水量的下降, 种子的生活力和过氧化氢酶活性也显著下降($P<0.05$), 两者呈极显著正相关($P<0.01$)。此外, 相对电导率、超氧阴离子、过氧化氢、超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性却均显著($P<0.05$)上升, 发芽率则呈先升后降的趋势。【结论】红花石蒜种子对脱水极为敏感。轻度脱水有利于种子萌发, 但过度失水会使种子生活力很快丧失。为保证红花石蒜种子发芽率, 在种子储藏时应将其含水量控制在 30%~40%。图 6 表 1 参 30

关键词: 红花石蒜; 脱水敏感性; 顽拗性种子; 生活力; 发芽率; 质壁分离

中图分类号: S718.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2025)03-0572-09

Morphological and physiological changes during the dehydration process of *Lycoris radiata* seeds

SA Rina¹, CAI Junhuo¹, WEI Xuying², YOU Xin¹, WEN Ting¹, WANG Xi¹

(1. College of Landscape Architecture and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China;

2. College of Art, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330032, Jiangxi, China)

Abstract: [Objective] This study is to investigate the changes in cell morphology and physiological indicators during the dehydration of *Lycoris radiata* seeds, and determine their critical and semi-lethal moisture contents, so as to provide a theoretical basis for the long-term seed preservation of *Lycoris* species. [Method] Fresh mature seeds of *L. radiata* (with a moisture content of 70%) were used as materials. The silica gel dehydration method was used to sequentially reduce the moisture content of the seeds to 60%, 50%, 40%, 30%, 20%, and 10%. The samples were taken to measure the relative conductivity, vitality, germination rate, mass molar concentration of hydrogen peroxide and superoxide anions, as well as the activities of catalase, superoxide dismutase, and peroxidase. [Result] (1) The average moisture content of freshly harvested mature seeds was as

收稿日期: 2024-08-06; 修回日期: 2025-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(32360420, 31960327); 江西省花卉产业技术体系专项(JXARS-17); 江西省研究生创新资金项目(YC2023-S353)

作者简介: 萨日娜(ORCID: 0009-0001-4057-6085), 从事球根花卉的开花调控与应用研究。E-mail: SaRina0318@163.com。通信作者: 蔡军火(ORCID: 0000-0002-7731-4492), 教授, 博士, 博士生导师, 从事球根花卉的开花调控与应用研究。E-mail: Cjhuo7692@163.com

high as 70%, but they would quickly lose moisture at natural room temperature (25 °C) (dropping to 10% in just 44 hours), with critical and semi lethal moisture contents of 40% and 10%, respectively. (2) When the seeds of *L. radiata* fell off, the embryonic development was basically mature. (3) During the process of seed dehydration, its external morphology gradually wrinkled and shriveled. When the dehydration was severe, plasmolysis occurred in seed cells, and the starch granules inside the cells gradually changed from granular to flake. At the same time, there would also be a significant amount of cellular degradation. (4) As the seed moisture content decreased, its vitality and catalase activity also significantly decreased ($P < 0.05$), and there was a highly significant positive correlation between the two ($P < 0.01$). In addition, the relative conductivity, superoxide anion, hydrogen peroxide, superoxide dismutase, and peroxidase activities all significantly increased, while the germination rate showed a trend of first increasing and then decreasing. [Conclusion] The seeds of *L. radiata* are extremely sensitive to dehydration. Mild dehydration (moisture content between 30% and 40%) is beneficial for seed germination, whereas excessive dehydration can quickly lead to the loss of seed viability. [Ch, 6 fig. 1 tab. 30 ref.]

Key words: *Lycoris radiata*; dehydration sensitivity; recalcitrant seeds; viability; germination rate; plasmolysis

红花石蒜 *Lycoris radiata* 为石蒜科 Amaryllidaceae 石蒜属 *Lycoris* 特色球根花卉^[1]。鳞茎中丰富的生物碱是制药的原材料, 具有催吐、治水肿等功效^[2]。红花石蒜花色艳丽、形态雅致, 在中国民间被称为“魔术花”, 在国外素有“中国郁金香”之美誉, 观赏价值较高^[3], 市场需求量激增^[4-5]。在自然条件下, 由于红花石蒜存在结实率低、种子含水量高、不耐储藏以及随采随播成苗较少等问题^[6], 目前其种球仍然以无性繁殖为主^[7]。已有研究表明: 中国石蒜 *L. chinensis* 和长筒石蒜 *L. longituba* 种子均属于典型的顽拗型种子, 具脱水敏感性^[8]。当种子成熟脱落时含水量分别为 70% 和 50%, 失水后种子逐渐皱缩干瘪, 当失水超过某一临界值时, 种子活力大幅下降, 失水严重时种子无法萌发^[9-10]。硅胶脱水法是开展顽拗性种子脱水敏感性研究的有效方法之一^[11]。随着脱水程度的加重, 种子细胞膜受损^[12], 细胞内大量电解质外渗^[13], 超氧阴离子过度积累^[14]造成种子发芽率和生活力均显著下降^[15]。抗氧化酶系统能够有效清除过度积累的活性氧^[16], 进而保护细胞免受不可逆损伤。

目前, 石蒜属植物种子的相关研究集中在原生鳞茎的形成机制^[9]、萌发特性^[17]和储藏方式^[18]等方面, 鲜见种子脱水敏感性及其机制研究, 这不利于石蒜属植物种子种质资源的保存与利用。鉴于此, 本研究对红花石蒜种子在脱水过程中的细胞形态及生理指标变化进行研究, 以期阐明石蒜属植物种子脱水敏感性生理机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料红花石蒜源自江西九连山, 定植于江西农业大学第五教学楼前。2022 年 10 月 31 日, 选择红花石蒜完全成熟脱落的果实带回实验室, 将种子从种壳中剥出并清除杂质, 随后放入自封袋中备用。

1.2 试验设计

1.2.1 种子含水量 种子含水量采用烘干法测定^[19]。随机选择饱满、大小均匀一致的种子, 称取种子鲜质量 (W_1), 随后将其置于 (103±2) °C 恒温干燥箱烘干, 每隔 2 h 取出称量, 2 次称量不超过 0.003 g 即为种子恒量 (W_2)。每个处理重复 3 次, 每个重复 10 粒种子。种子含水量 = $(W_1 - W_2) / W_1 \times 100\%$ 。

1.2.2 种子脱水速率 将 1.2.1 同批次新鲜的红花石蒜种子放入尼龙网袋称量 (W_1), 转入装有 1 kg 变色硅胶的密闭干燥容器中进行脱水。每 2 h 称取种子质量 (W_2), 计算 t 时间内种子的脱水速率。每个网袋 10 粒种子, 重复 3 次。脱水速率 = $(W_1 - W_2) / t \times 100\%$ 。

1.2.3 脱水设计 采用单因素实验设计和硅胶脱水法^[20], 以 1.2.1 同批次红花石蒜未脱水种子 (含水量为 70%) 为对照 (ck), 将种子均匀埋入硅胶中, 使种子含水量快速脱水至 60% (T1)、50% (T2)、40% (T3)、

30% (T4)、20% (T5)、10% (T6), 共 7 个处理。每个处理 400 粒种子, 重复 3 次。分别测定这 7 个处理的种子生活力、相对电导率及发芽率, 并将用于测定抗氧化酶活性和活性氧的种子投入液氮速冻, 置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱内保存。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 种子生活力测定 种子生活力采用氮蓝四唑法 (TTC 法) 测定^[19]。随机挑选大小均匀一致的成熟种子, 经蒸馏水冲洗后剥除种皮并沿种脐纵向切开。将种子置于培养皿中并倒入质量浓度为 0.5% 的 TTC 溶液, 转入人工气候箱中进行观察, 设置温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 无光照。每个处理 3 次重复, 每个重复 30 粒种子, 以沸水处理的种子作为对照。于 8 h 后统计染色情况, 种胚染为红色视作有生活力种子。种子生活力=(有生活力种子数/供检种子总数) $\times 100\%$ 。

1.3.2 种子萌发试验 萌发试验采用培养皿滤纸法^[21]。随机挑选大小均匀一致的成熟种子, 经质量浓度为 1% 的高锰酸钾溶液消毒 5 min 后再用蒸馏水清洗, 置于培养皿内, 移入人工气候培养箱进行萌发试验。人工气候培养箱设置温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 湿度为 55%, 光周期为光 12 h/暗 12 h。每个处理重复 3 次, 每次重复 30 粒种子。当胚根伸长至 1 mm 时, 视为萌发, 统计时间持续 1 个月, 1 个月后未萌发的种子视为不能发芽。在萌发试验进行期间及时清理污染发霉的种子并更换滤纸, 同时补充蒸馏水保持滤纸湿润。种子萌发率=(发芽种子粒数/供试种子粒数) $\times 100\%$ 。

1.3.3 种子相对电导率测定 参照韩建国等^[22]的研究方法。随机选择大小均匀一致的成熟种子, 经蒸馏水清洗后放入烧杯中, 并加入 100 mL 蒸馏水, 于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下静置 24 h 后用雷磁电导仪 (DDS-307) 测定种子电导率 (S_1); 随后将封口的烧杯转入沸水浴中 30 min, 取出冷却至室温, 测定种子电导率 (S_2)。以不加种子的纯水作为空白对照 (S_0), 每个处理 3 次重复, 每次重复 10 粒。种子相对电导率= $(S_1-S_0)/(S_2-S_0)\times 100\%$ 。

1.3.4 种子解剖结构观察 将 7 个处理的红花石蒜种子沿种脐纵切, 转入体积分数为 50% 的 FAA 溶液中固定, FAA 溶液为 $V(\text{甲醛}):V(\text{冰醋酸}):V(\text{体积分数为 } 50\% \text{ 乙醇})=1:1:18$ 。随后采用常规石蜡切片法制作样品切片, 切片厚度为 $8\text{ }\mu\text{m}$, 采用番红-固绿进行染色, 将获得的永久切片在正置荧光显微镜 (ZEISS-Axio Imager.A2) 下观察并拍摄图片。

1.3.5 种子细胞质壁分离程度 采用 ImageJ 软件对 7 个不同含水量红花石蒜种子的永久切片进行测量, 测量每个处理组胚乳细胞壁至细胞质之间的距离 (mm), 胚轴部分亦进行相同操作。每个处理重复 3 次, 每次重复 30 个视野。

1.3.6 生理指标测定方法 ①活性氧: 过氧化氢 (H_2O_2)、超氧阴离子 ($\text{O}_2^{\cdot-}$) 质量摩尔浓度分别采用硫酸钛比色法及 α -萘胺比色法 (苏州科铭生物技术有限公司试剂盒) 进行测定。②抗氧化酶: 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性分别采用 WST-8 法、愈创木酚及钼酸铵比色法 (苏州科铭生物技术有限公司试剂盒) 进行测定。

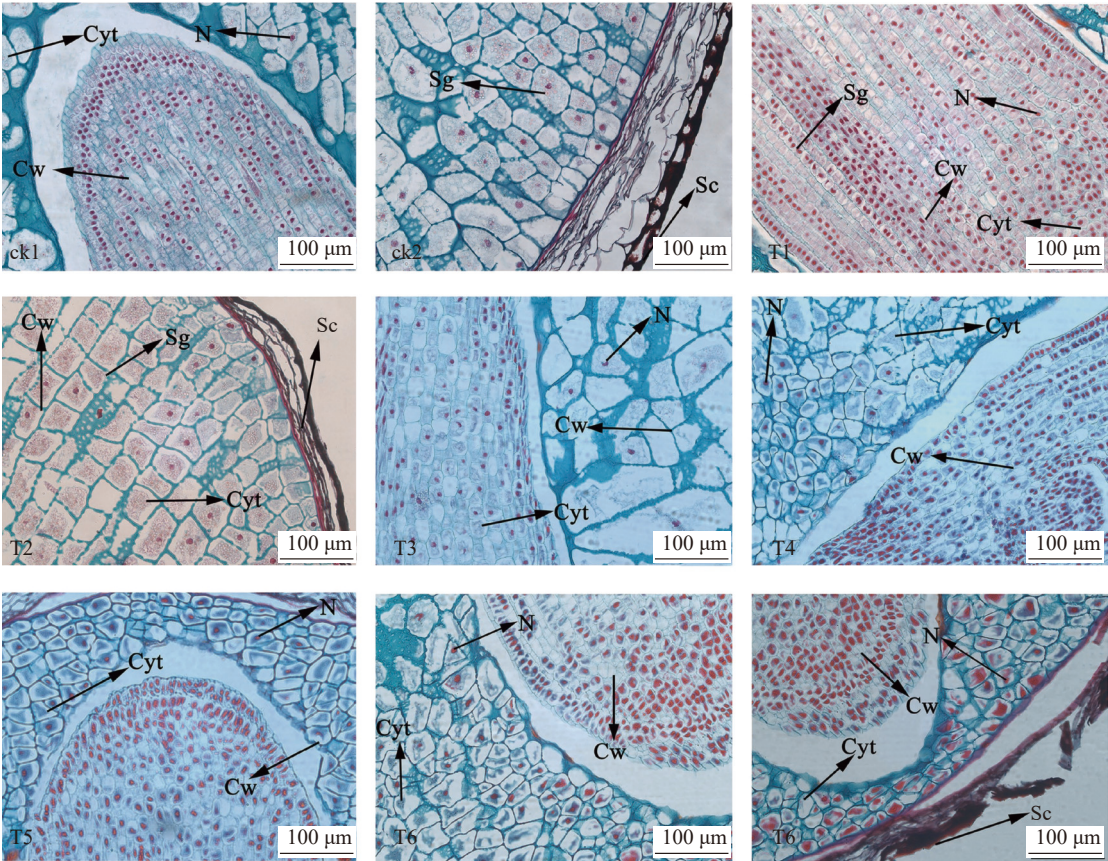
1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2019 进行数据整理, 采用 SPSS 22.0 进行方差分析和多重比较, 用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 红花石蒜种子脱水过程中的形态变化

2.1.1 种子形态解剖与细胞学观察 从图 1 可见: 新鲜成熟脱落的红花石蒜种子含水量为 70%, 外部圆润饱满, 内部结构 (种皮、胚乳、胚轴) 完整, 种胚发育完全, 胚乳与胚轴的间隙较小, 胚乳细胞明显大于胚轴细胞且结构更为清晰、紧密。种子石蜡切片经番红-固绿染色后, 种子的细胞壁 (绿色)、细胞质、淀粉粒及细胞核 (均为红色) 等结构清晰可见。当种子含水量失水至 60% (T1) 时, 种皮、胚轴与胚乳的细胞均无明显变化; 当种子含水量失水至 50% (T2) 时, 胚轴与胚乳的间隙开始变大; 而当种子含水量失水至 40% 时, 种皮会出现明显的破裂和皱缩堆叠现象, 胚乳与胚轴细胞的间隙继续变宽, 个别还会质壁分离。



ck1、ck2分别表示胚轴、胚乳；处理ck、T1、T2、T3、T4、T5、T6分别表示种子含水量为70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%。Cw. 细胞壁；Cyt. 细胞质；N. 细胞核；Sc. 种皮；Sg. 淀粉粒。

图 1 脱水对红花石蒜种子解剖结构性的影响
Figure 1 Effect of dehydration on the anatomical structure of *L. radiata* seeds

当种子含水量降至 30% 时，种皮进一步皱缩且无明显分层，胚轴与胚乳之间的间隙变宽，质壁分离现象明显。随着种子含水量的进一步减小，胚细胞降解加剧，细胞质内的淀粉粒也由颗粒状逐步转为片状(种子含水量为 20%)，分布密度明显增大，种皮细胞进一步堆叠成带状(10%)，质壁分离现象更为普遍。

2.1.2 种子脱水过程中的质壁分离现象 由表 1 可以看出：脱水会导致红花石蒜种子不同部位(胚乳和胚轴)的细胞发生质壁分离，质壁分离随脱水程度的增加而加剧。新鲜未经脱水处理(ck)的种子胚轴及

胚乳细胞质壁分离程度明显低于其他处理，至种子含水量降至 10% (T6) 时，胚乳及胚轴细胞质壁分离程度均达到最大值。此外，在相同的脱水条件下，胚乳细胞的质壁分离程度通常高于胚轴，这可能是因为胚乳细胞含有更高的含水量，且细胞壁结构更容易在脱水过程中发生变化，从而导致明显的质壁分离现象。这一结果说明红花石蒜种子不耐脱水，且胚乳细胞对脱水更为敏感，严重的质壁分离会导致细胞活性降低甚至细胞死亡，进而影响种子的萌发。

2.2 脱水过程中红花石蒜种子生理生化变化

2.2.1 种子含水量与相对电导率的变化 从图 2 可见：成熟脱落的红花石蒜种子平均含水量为 70%，且会随着脱水时间的延长显著下降 ($P<0.05$)，而相对电导率则随着种子含水量的降低呈上升趋势。

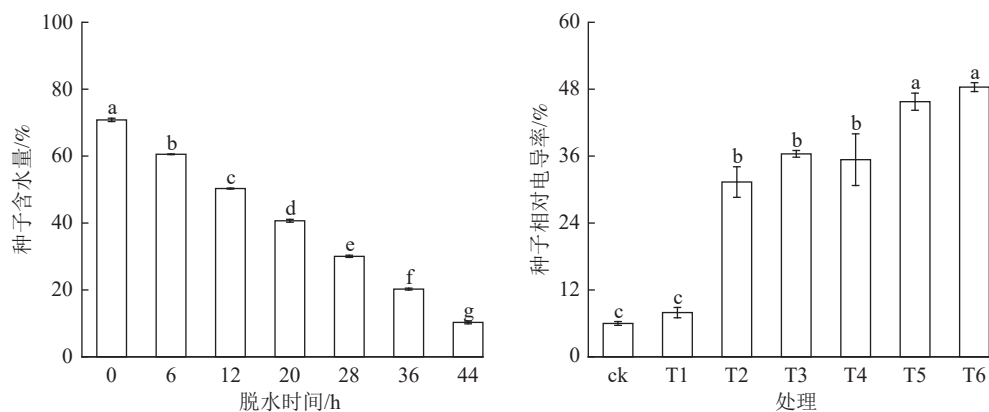
表 1 脱水对红花石蒜种子细胞质壁分离程度的影响

Table 1 Effect of dehydration on the degree of cytoplasmic wall separation of *L. radiata* seed cells

处理	细胞壁至细胞质之间的距离/mm	
	胚乳	胚轴
ck	14.79±0.49 f	20.19±0.64 e
T1	16.44±0.50 f	20.89±0.63 e
T2	21.40±0.59 e	21.59±0.64 e
T3	36.88±0.95 d	28.26±0.81 d
T4	45.44±1.26 c	31.85±0.90 c
T5	50.99±1.40 b	34.10±0.71 b
T6	60.24±1.86 a	36.47±0.79 a

说明：不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。处理 ck、T1、T2、T3、T4、T5、T6 分别表示种子含水量为 70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%。

当种子含水量降至 10% (T6) 时, 电导率升至最大; 当含水量从 30% (T4) 降至 20% (T5) 时, 电导率显著上升 ($P<0.05$)。在整个脱水期间, 相对电导率随含水量的下降显著上升 ($P<0.05$)。可知, 红花石蒜种子不耐脱水, 脱水时间的延长使种子细胞膜结构受到破坏, 细胞内的电解质大量外渗。

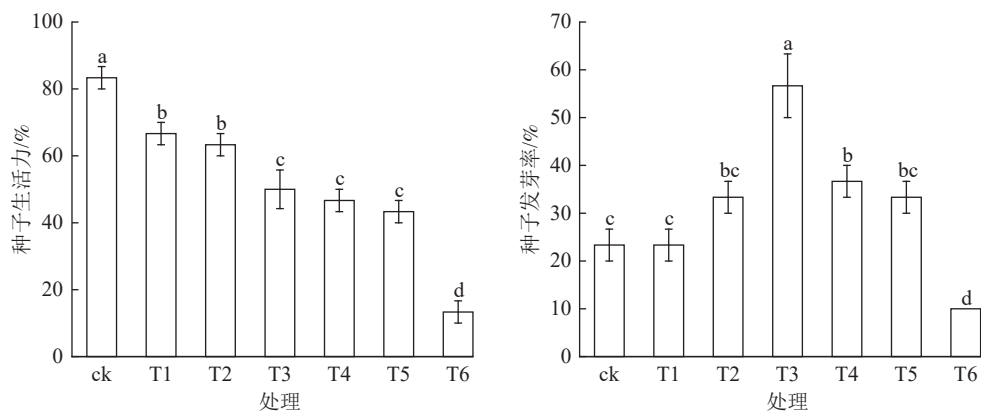


不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。处理ck、T1、T2、T3、T4、T5、T6分别表示种子含水量为70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%。

图2 脱水对红花石蒜种子含水量及相对电导率的影响

Figure 2 Effect of dehydration on moisture content and relative electrical conductivity of *L. radiata*

2.2.2 种子生活力、发芽率与含水量的关系 由图3可知: 红花石蒜不同含水量种子的生活力及发芽率存在差异。随着种子含水量的下降, 种子发芽率呈先升后降的变化趋势, 种子生活力则呈下降趋势。其中, 当种子含水量为 40% (T3) 时, 种子发芽率最佳, 与其他处理差异显著 ($P<0.05$)。当种子含水量降至 30% 时, 种子发芽率降至 20%, 与种子含水量为 40% 的处理相比, 种子发芽率下降了 20%, 说明红花石蒜种子活力开始下降的临界含水量为 30%~41%; 当种子含水量降至 10% 时, 种子发芽率降至 10%, 大部分种子失去萌发能力。



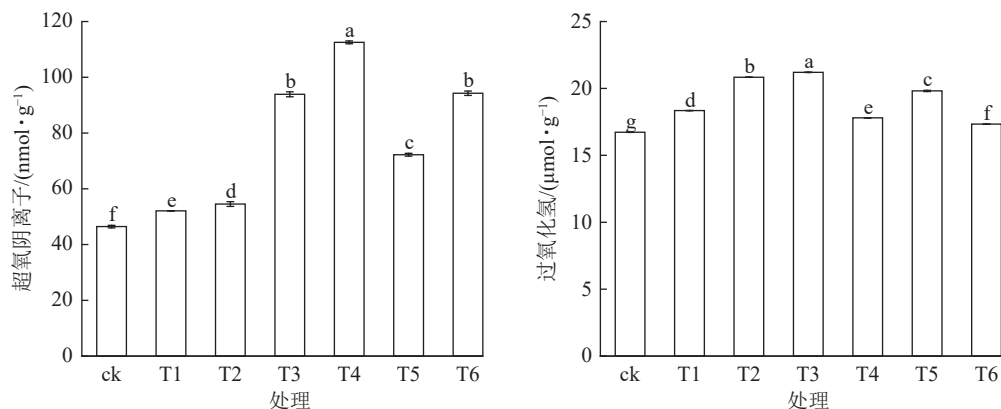
不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。处理ck、T1、T2、T3、T4、T5、T6分别表示种子含水量为70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%。

图3 红花石蒜种子生活力、发芽率与含水量的关系

Figure 3 Relationship between seed viability, germination rate and moisture content of *L. radiata*

2.2.3 种子活性氧质量摩尔浓度的变化 活性氧质量摩尔浓度在红花石蒜种子脱水过程中总体呈波动式上升趋势 (图4)。当种子含水量从 70% (T1) 降至 40% (T3) 时, 过氧化氢和超氧阴离子质量摩尔浓度均显著上升 ($P<0.05$), 变化趋势较为一致。而当种子含水量从 40% (T3) 降至 10% (T6) 时, 过氧化氢和超氧阴离子质量摩尔浓度的变化规律恰好相反。当超氧阴离子质量摩尔浓度达到峰值时, 过氧化氢质量摩尔浓度出现谷值, T5、T6 处理变化趋势亦如此。

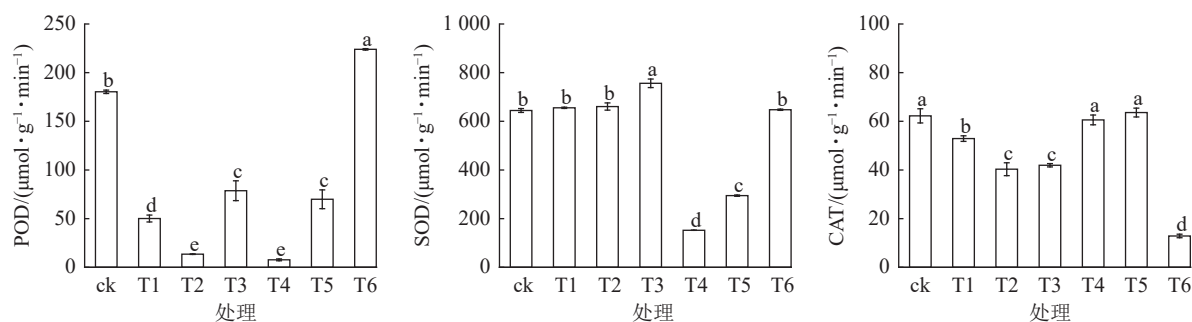
2.2.4 抗氧化酶活性的变化 从图5可见: 3种抗氧化酶活性在种子脱水过程中的变化较复杂。其中, POD 和 SOD 的活性总体均呈上升趋势, 而 CAT 活性则呈下降趋势。当种子含水量从 70% (ck) 降至 40% (T3) 时, SOD 活性显著上升 ($P<0.05$), 而 POD、CAT 活性则显著下降 ($P<0.05$); 当种子含水量从 30%



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。处理ck、T1、T2、T3、T4、T5、T6分别表示种子含水量为70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%。

图 4 脱水对红花石蒜种子活性氧质量摩尔浓度的影响

Figure 4 Effect of dehydration on reactive oxygen content of *L. radiata* seeds



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。处理ck、T1、T2、T3、T4、T5、T6分别表示种子含水量为70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%。

图 5 脱水对红花石蒜种子抗氧化酶活性的影响

Figure 5 Effect of dehydration on the activity of antioxidant enzymes of *L. radiata* seeds

(T4) 降至 10% (T6) 时, SOD、POD 变化趋势一致, 均为先降后升的变化趋势, 而 CAT 活性则呈先升后降的变化趋势。

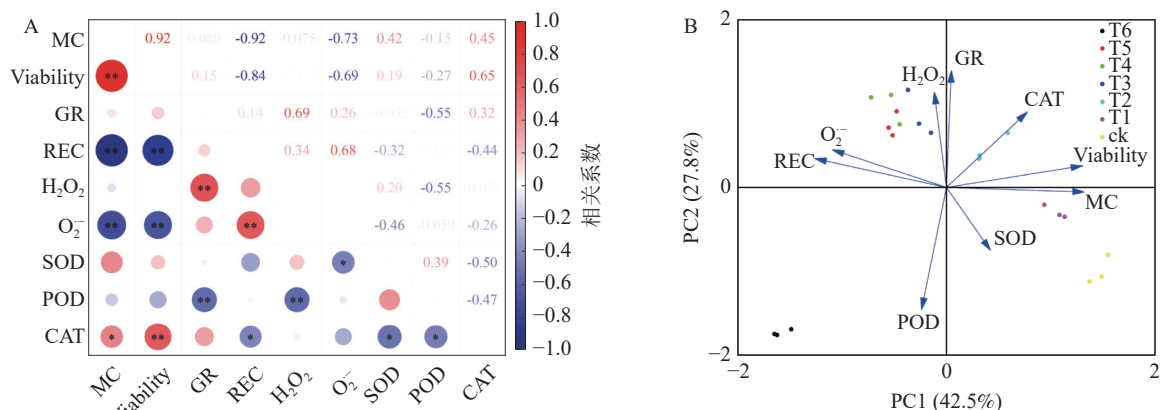
2.2.5 脱水过程中各指标的相关性分析 为进一步探析红花石蒜种子脱水敏感性特征, 将种子脱水过程中的含水量与种子生活力、萌发率、相对电导率、过氧化氢、超氧阴离子、POD、SOD、CAT 等生理指标进行相关性分析。图 6A 表明: 种子含水量与种子生活力呈极显著的正相关性 ($P < 0.01$), 与 CAT 活性也呈显著正相关 ($P < 0.05$), 而与相对电导率、过氧化氢质量摩尔浓度呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。另外, 种子发芽率与过氧化氢质量摩尔浓度呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而与 POD 活性呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

主成分分析 (图 6B) 表明: 种子含水量对红花石蒜种子的脱水敏感性影响最大 (即第 1 主成分, 贡献率为 42.5%, 权重为 0.496 4), 其次为种子发芽率 (即第 2 主成分, 贡献率为 27.8%, 权重为 0.522 0)。由此得知, 种子的含水量和发芽率可作为衡量红花石蒜种子脱水敏感性的重要指标。

3 讨论

3.1 红花石蒜种子的临界含水量与半致死含水量

相对电导率是评价植物遭受逆境胁迫时电解质外渗率的重要指标, 能够直接反映植物细胞组织受伤害的程度^[23]。本研究表明: 红花石蒜种子成熟脱落时含水量高达 70%, 在整个脱水期间含水量显著下降、电解质浓度显著上升, 这与桑寄生 *Taxillus chinensis*^[12] 和桢楠 *Phoebe zhennan*^[24] 顽拗型种子对脱水胁迫的反应一致。说明红花石蒜种子在母株上并未经过成熟脱水阶段, 在脱水进程中细胞膜的损伤程度较高, 对脱水行为极为敏感。此外, 当红花石蒜种子含水量降至 40%~50% 时发芽率显著增加, 而含水量进一步降低至 30% 时, 发芽率却显著下降, 当含水量降至 10% 时, 种子发芽率低至新鲜种子发芽率



MC. 种子含水量; Viability. 种子生活力; GR. 种子发芽率; REC. 相对电导率; H₂O₂. 过氧化氢; O₂⁻. 超氧阴离子; POD. 过氧化物酶; SOD. 超氧化物歧化酶; CAT. 过氧化氢酶.**表示在0.01水平(双侧)上显著相关;*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。处理ck、T1、T2、T3、T4、T5、T6分别表示种子含水量为70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%。

图6 脱水过程中各指标相关性主成分分析

Figure 6 Correlation and principal component analysis of various indexes in the process of dehydration

的一半,这与正常种子的现象截然不同,正常种子能够忍受脱水至5%~10%的含水量,且不影响发芽率。说明轻度脱水有助于提高红花石蒜种子的发芽率,但种子活力存在明显的临界含水量阈值,当该阈值低于40%时,种子活力会显著减弱。可见,含水量是调控红花石蒜种子萌发过程的关键因素,同时也是影响种子有效保存的重要限制条件之一。因此,为保持红花石蒜种子的最佳保存状态,种子含水量应维持在30%~40%,含水量降至10%时,种子活力已达到半致死状态。

3.2 红花石蒜种子脱水敏感性特征

顽拗型种子在脱水过程中活性氧自由基过度积累,对种子造成脱水损伤^[25-26],抗氧化酶系统能够有效保护种子的结构和功能完整性。其中,SOD的主要作用是将有害的超氧阴离子歧化为过氧化氢,从而保护植物免受氧化应激的损害,但过氧化氢水平亦取决于POD和CAT的分解程度^[27]。在本研究中,SOD活性在种子脱水过程中呈先升后降的变化趋势。这与见血封喉 *Antiaris toxicaria*^[28]和南洋杉 *Araucaria bidwillii*^[29]种子脱水过程中SOD活性变化的趋势一致。当红花石蒜种子含水量降至30%时,SOD和POD活性均降至最低值,超氧阴离子质量摩尔浓度达到峰值,细胞结构表现出明显的受损特征。这说明种胚在遭遇脱水胁迫时CAT活性虽有显著上升,但依靠单一抗氧化酶并不能有效抵御活性氧的氧化伤害作用,细胞仍会出现质壁分离等不可逆损伤,进而影响其细胞功能。在红花石蒜种子含水量降至10%~20%时,细胞间隙逐渐变宽,质壁分离现象加剧,细胞质内的淀粉粒由颗粒状转为片状,细胞中的红色面积明显变大。这与板栗 *Castanea mollissima*种子经历重度失水后出现细胞降解,最终导致种胚活力完全丧失的研究结果一致^[30]。由此可知,红花石蒜种子过度脱水使抗氧化酶系统和细胞的调控力下降,最终导致种子失去活力。

4 结论

红花石蒜的种子在脱落时,胚已基本发育成熟,种子含水量和生活力均较高。在密闭条件下,采用硅胶脱水法将种子的含水量从70%降至10%仅需44 h,其临界含水量和半致死含水量分别是40%和10%。在失水过程中,种子外部形态呈逐渐皱缩、干瘪状态,失水严重时种子细胞内还会发生明显的质壁分离现象,胞内淀粉粒也由颗粒状逐渐转为片状,还会伴有大量的细胞降解现象,种子内的CAT活性、含水量和生活力均显著下降,活性氧质量摩尔浓度、POD和SOD活性则显著上升。红花石蒜的种子含水量与发芽率显著相关,轻度脱水有利于其种子萌发,但过度失水会使种子生活力很快丧失。为保证种子发芽率,在种子储藏时应将含水量控制在30%~40%。综上,红花石蒜种子在形态与生理方面,均表现出明显的脱水敏感性特征。

5 参考文献

- [1] 张瑶,蔡军火,魏绪英,等.红花石蒜开花过程中不同部位糖类和蛋白质含量变化[J].江西农业大学学报,2022,44(6):

- 1419–1427.
- ZHANG Yao, CAI Junhuo, WEI Xuying, *et al.* Changes of carbohydrate and protein contents in different parts of *Lycoris radiata* during flowering [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, **44**(6): 1419–1427.
- [2] 杨玉, 张芸, 魏绪英, 等. 应用¹³C 示踪技术研究红花石蒜非结构性碳水化合物分配及转运模式[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(2): 252–261.
- YANG Yu, ZHANG Yun, WEI Xuying, *et al.* Distribution and transport patterns of NSC in *Lycoris radiata* based on ¹³C tracing [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(2): 252–261.
- [3] CAI Junhuo, FAN Junjun, ZHANG Yao, *et al.* Relationship among changes in nonstructural carbohydrate content, metabolic enzyme activity, and growth rhythm in *Lycoris radiata*[J/OL]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2022, **69**(5): 85[2024-08-01]. DOI: [10.1134/S1021443722050041](https://doi.org/10.1134/S1021443722050041).
- [4] JIANG Xueru, CHEN Huiting, WEI Xuying, *et al.* Proteomic analysis provides an insight into the molecular mechanism of development and flowering in *Lycoris radiata*[J/OL]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2021, **43**(1): 4[2024-08-01]. DOI: [10.1007/s11738-020-03179-w](https://doi.org/10.1007/s11738-020-03179-w).
- [5] 温婷, 吴靖, 蔡军火, 等. 丛枝菌根真菌对红花石蒜植株及根际土壤养分影响[J]. *江西农业大学学报*, 2023, **45**(5): 1196–1207.
- WEN Ting, WU Jing, CAI Junhuo, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant and rhizosphere soil nutrients of *Lycoris radiata* [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2023, **45**(5): 1196–1207.
- [6] 秦卫华, 周守标, 汪恒英, 等. 石蒜属植物的研究进展[J]. *安徽师范大学学报 (自然科学版)*, 2003, **26**(4): 385–390.
- QIN Weihua, ZHOU Shoubiao, WANG Hengying, *et al.* Advances in *Lycoris* herb [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2003, **26**(4): 385–390.
- [7] 许俊旭, 李青竹, 杨柳燕, 等. 石蒜属植物鳞茎发育机理及调控研究进展[J]. *中国农学通报*, 2021, **37**(17): 39–44.
- XU Junxu, LI Qingzhu, YANG Liuyan, *et al.* *Lycoris*: a review on bulb development mechanism and regulation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, **37**(17): 39–44.
- [8] JOËT T, OURCIVAL J M, DUSSERT S. Ecological significance of seed desiccation sensitivity in *Quercus ilex* [J]. *Annals of Botany*, 2013, **111**(4): 693–701.
- [9] 肖潇, 夏宜平, 崔柳, 等. 石蒜同源基因沉默体系构建及鳞茎发生基因功能验证[J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 2025, **51**(1): 89–101.
- XIAO Xiao, XIA Yiping, CUI Liu, *et al.* Establishment of a homologous gene silencing system and gene function verification of bulb formation in *Lycoris* Herb. [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2025, **51**(1): 89–101.
- [10] 陈依宁, 雷雪, 李欣, 等. 石蒜体胚发生过程的细胞学和生理特性[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(2): 243–251.
- CHEN Yining, LEI Xue, LI Xin, *et al.* Cytological and physiological characteristics of somatic embryogenesis in *Lycoris* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(2): 243–251.
- [11] 李磊, 孙雪婷, 张广辉, 等. 脱水速率对顽拗性三七种子脱水敏感性和抗氧化酶活性的影响[J]. *种子*, 2014, **33**(12): 1–5.
- LI Lei, SUN Xueting, ZHANG Guanghui, *et al.* Effect of drying rates on the desiccation sensitivity and antioxidant enzyme activities of recalcitrant *Panax notoginseng* seeds [J]. *Seed*, 2014, **33**(12): 1–5.
- [12] 韦树根. 桑寄生顽拗性种子生物学特性及脱水敏感性机理研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2017.
- WEI Shugen. *Study on Biological Characteristics and Dehydration Sensitivity Mechanism of Stubborn Seeds of Mulberry Parasite*[D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2017.
- [13] 金孝芳. 茶树种子脱水敏感性机制及 LEA 蛋白的鉴定与表达分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
- JIN Xiaofang. *Mechanism of Dehydration Sensitivity of Tea Seeds and Identification and Expression Analysis of LEA Protein*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019.
- [14] 贺贝, 蔡璇, 曾祥玲, 等. ‘潢川金桂’花瓣衰老过程中细胞程序性死亡的生理机制[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(3): 475–480.
- HE Bei, CAI Xuan, ZENG Xiangling, *et al.* Programmed cell death events during the petal senescence of *Osmanthus fragrans* ‘Huangchuan Jingui’ [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(3): 475–480.
- [15] 朱力, 王华磊, 赵致, 等. 脱水对万寿竹种子发芽及部分抗逆生理指标的影响[J]. *种子*, 2017, **36**(5): 6–10, 14.

- ZHU Li, WANG Hualei, ZHAO Zhi, *et al.* The effect of dehydration on germination percentage and some indexes of resistance of *Disporum cantoniense* seeds [J]. *Seed*, 2017, **36**(5): 6–10, 14.
- [16] GEORGIEVA K, RAPPARINI F, BERTAZZA G, *et al.* Alterations in the sugar metabolism and in the vacuolar system of mesophyll cells contribute to the desiccation tolerance of *Haberlea rhodopensis* ecotypes [J]. *Protoplasma*, 2017, **254**(1): 193–201.
- [17] 李娜, 李子璇, 曹小勇. 忽地笑种子萌发研究[J]. *种子*, 2012, **31**(10): 18–21.
LI Na, LI Zixuan, CAO Xiaoyong. Study on seed germination of *L. aurea* [J]. *Seed*, 2012, **31**(10): 18–21.
- [18] 穆红梅, 夏冰, 汪仁, 等. 顽拗性种子——中国石蒜种子的贮藏特性研究[J]. *种子*, 2011, **30**(12): 43–45.
MU Hongmei, XIA Bing, WANG Ren, *et al.* Study on seed germination and storage characteristics of *Lycoris chinensis* [J]. *Seed*, 2011, **30**(12): 43–45.
- [19] 国家质量技术监督局. 林木种子检验规程: GB/T 2772—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. *Rules for Forest Tree Seed Testing: GB/T 2772—1999*[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [20] 韩彪. 板栗种子顽拗性特征解析及贮藏研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
HAN Biao. *Analysis on Stubborn Characteristics and Storage of Chestnut Seeds*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [21] 沈起栋, 李欣音, 庞程, 等. 糖芥种子萌发特性的研究[J]. *种子*, 2021, **40**(10): 110–113, 120.
SHEN Qidong, LI Xinyin, PANG Cheng, *et al.* Study on seed germination characteristics of *Erysimum bungei* [J]. *Seed*, 2021, **40**(10): 110–113, 120.
- [22] 韩建国, 钱俊芝, 刘自学. PEG 渗透处理改善结缕草种子活力的研究[J]. *中国草地*, 2000, **22**(3): 22–28.
HAN Jianguo, QIAN Junzhi, LIU Zixue. A study on improving seed vigour by PEG treatment in zoysiagrass [J]. *Grassland of China*, 2000, **22**(3): 22–28.
- [23] 郑甲成, 尤依锦, 刘婷, 等. 花期高温胁迫下 *TaERECTA* 基因对小麦生理特性和光合作用的影响[J]. *麦类作物学报*, 2019, **39**(1): 35–41.
ZHENG Jiacheng, YOU Yijin, LIU Ting, *et al.* Effect of *TaERECTA* on physiological traits and photosynthesis in wheat under high-temperature stress at anthesis [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, **39**(1): 35–41.
- [24] 李佳琦, 薛晓明, 高捍东. 桢楠种子脱水过程中的生理响应[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, **45**(3): 130–136.
LI Jiaqi, XUE Xiaoming, GAO Handong. Physiological responses of *Phoebe zhennan* seeds during dehydration [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2021, **45**(3): 130–136.
- [25] PRITCHARD H W, DAWS M I, FLETCHER B J, *et al.* Ecological correlates of seed desiccation tolerance in tropical African dryland trees [J]. *American Journal of Botany*, 2004, **91**(6): 863–870.
- [26] KENZO T, ICHIE T, NINOMIYA I, *et al.* Photosynthetic activity in seed wings of Dipterocarpaceae in a masting year: does wing photosynthesis contribute to reproduction? [J]. *Photosynthetica*, 2003, **41**(4): 551–557.
- [27] VARGHESE B, SERSHEN, BERJAK P, *et al.* Differential drying rates of recalcitrant *Trichilia dregeana* embryonic axes: a study of survival and oxidative stress metabolism [J]. *Physiologia Plantarum*, 2011, **142**(4): 326–338.
- [28] CHENG Hongyan, SONG Songquan. Possible involvement of reactive oxygen species scavenging enzymes in desiccation sensitivity of *Antiaris toxicaria* seeds and axes [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, **50**(12): 1549–1556.
- [29] LIU M S, CHANG C Y, LIN T P. Comparison of phospholipids and their fatty acids in recalcitrant and orthodox seeds [J]. *Seed Science and Technology*, 2006, **34**(2): 443–452.
- [30] 韩彪, 张萍, 郭素娟, 等. 失水对板栗种子超微结构与生理变化及萌发的影响[J]. *基因组学与应用生物学*, 2021, **40**(增刊 2): 2785–2792.
HAN Biao, ZHANG Ping, GUO Sujuan, *et al.* Effects of water loss on ultrastructure, physiological changes and germination of chestnut seeds[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2021, **40**(suppl 2): 2785–2792.