

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.013

引用格式:严小连,王珂,何春梅,等.赤霉素协同发芽基质促进紫云英陈种萌发及幼苗生长[J].草地学报,2026,34(7):2483-2492

YAN Xiao-lian, WANG Ke, HE Chun-mei, et al. Gibberellin Cooperating with Germination Medium to Promote the Germination and Seedling Growth of Long-term Stored Chinese Milk Vetch Seeds[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2483-2492

赤霉素协同发芽基质促进紫云英陈种萌发 及幼苗生长

严小连¹, 王珂², 何春梅², 刘彩玲², 王俊宏², 李清华², 黄毅斌², 杨晓枫³, 王飞^{2*}

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省农业科学院资源环境与土壤肥料研究所, 福建 福州 350013; 3. 福建农林大学国际菌草学院, 福建 福州 350002)

摘要:紫云英(*Astragalus sinicus* L.)陈种发芽率低是限制生产的重要因子,本研究旨在探究促进紫云英陈种萌发的方法,以提高其利用率和生产率。以贮藏17年和3年的紫云英种子为试验材料,用蒸馏水(CK)或400 mg·L⁻¹赤霉素[GA₃(400)]溶液浸种后,将种子置于发芽纸(FZ)、椰糠(YK)、蛭石(ZS)3种发芽基质中,测定种子的发芽率和幼苗生长情况。结果表明:赤霉素和发芽基质及其交互作用对紫云英陈种发芽率和幼苗株高、主根长、根鲜重有显著促进作用,蛭石基质与赤霉素交互促进效果最优。GA₃浸种后,贮藏17年和3年种子的发芽率分别提高1.5倍和0.9倍,株高分别提高42.6%和76.5%,主根长分别提高19.1%和45.1%,地上部鲜重分别提高12.4%和32.3%,根鲜重分别提高7.8%和62.8%。对于贮藏17年和3年的种子,GA₃浸种后,株高、主根长、根鲜重在ZS处理下显著比FZ和YK高。利用隶属函数法对各处理进行综合评价,赤霉素浸种后播种在蛭石中是促进紫云英陈种子萌发和幼苗生长的适宜方法。

关键词:紫云英陈种;赤霉素;发芽基质;发芽率;幼苗生长

中图分类号:S551+.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2483-10

Gibberellin Cooperating with Germination Medium to Promote the Germination and Seedling Growth of Long-term Stored Chinese Milk Vetch Seeds

YAN Xiao-lian¹, WANG Ke², HE Chun-mei², LIU Cai-ling², WANG Jun-hong²,

LI Qing-hua², HUANG Yi-bin², YANG Xiao-feng³, WANG Fei^{2*}

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian Province 350002, China;

2. Institute of Resources, Environment and Soil Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian Province 350013, China;

3. International College of Juncao Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian Province 350002, China)

Abstract: The low germination rate of long-term stored seed of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) is an important factor limiting production, and exploring methods to promote the germination can improve their utilization and productivity. In this study, Chinese milk vetch seeds stored for 17 years and 3 years were used as materials. After soaking in distilled water (CK) and 400 mg·L⁻¹ gibberellin (GA₃(400)) solution, the seeds were placed in different germination substrates, including paper bed (FZ), coconut coir (YK), and vermiculite (ZS), and the germination rate and seedling growth were measured. GA₃, germination substrate and the inter-

收稿日期:2025-09-16;修回日期:2025-11-06

基金项目:国家绿肥产业技术体系建设专项(CARS-22-G01);福建省农业科学院科技专项(ZYTS2023013);省属公益类科研专项(2022R1021007)资助

作者简介:严小连(1998-),女,汉族,广西梧州人,硕士研究生,主要从事绿肥种质资源评价研究,E-mail:y1478088401@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:fjwangfei@163.com

action between the two treatments significantly promoted the germination and seedling growth of Chinese milk vetch. Compared with CK, after soaking in GA_3 , the germination rate of seeds stored for 17 years and 3 years was increased by 1.5 fold and 0.9 fold, the plant height increased by 42.6% and 72.5%, the primary root length increased by 19.1% and 45.1%, the fresh weight of aboveground increased by 12.4% and 32.3%, the fresh weight of roots increased by 7.8% and 62.8%, respectively. After soaking in GA_3 , for seeds stored for 17 years and 3 years, the plant height, main root length, and root fresh weight was significantly higher under ZS than under FZ and YK. Using the membership function method to comprehensively evaluate each treatment, soaking seeds in GA_3 and planting in ZS was a suitable method to promote seed germination and seedling growth of long-term stored seed of Chinese milk vetch.

Key words: Long-term stored seed of Chinese milk vetch; GA_3 ; Germination substrate; Germination rate; Seedling growth

紫云英 (*Astragalus sinicus* L.) 又名红花草、翘摇, 属豆科黄芪属, 具有固氮作用, 是我国南方稻区主要的冬绿肥^[1]。冬闲田种植紫云英, 能够实现土地、光、水、热等自然资源的充分利用; 同时紫云英翻压还田后, 能够增加土壤有机质, 改善土壤结构, 培肥地力, 减少后茬作物氮肥施用量^[2-6]。但是, 紫云英种子细小、易脱落, 同时紫云英种子收获季, 也是南方梅雨天气, 种子难以收集晒干, 种子贮藏后, 发芽率明显降低^[7]。上世纪 80 年代, 老一辈育种专家林多胡先生等人开展了紫云英选择育种和杂交育种的研究^[8-9], 创制了大量的中间株系, 种子也被保存了下来, 这些育种材料为紫云英新品种的创制提供了丰富的基础。从上世纪 80 年代到本世纪初, 我国紫云英的研究基本处于停滞状态, 一直到 2007 年才重新开启紫云英的生产与研究^[10]。但是, 一些科研院所和高校还保留着上世纪 80 年代至 90 年代繁育的紫云英材料, 提高这些陈种的发芽率为紫云英新品种的创制提供了丰富的基础, 具有重要的科研价值。

种子在长时间贮藏过程中, 会因温度、水分、病虫害及种子表面和内部微生物等多因素影响而发生自然老化, 导致细胞膜系统降解, 细胞内物质渗出, 种胚内有害物质和丙二醛含量增加, 致使种子活力降低^[11]。播种后出现发芽率低、出苗迟缓、幼苗生长异常等现象。随着贮藏年限增加, 种子发芽率逐渐降低^[12]。例如, 紫云英新收获的种子发芽率约为 90%, 而贮藏 23 年的紫云英种子发芽率降低至 3%^[13]。因此, 提高陈种子的发芽率是解决紫云英生产中生产效率和产量下降的重要方法。

陈种因生理活性较低, 其发芽条件与新种存在明显差异, 需优化条件以达到最大发芽率。一方面, 外源添加适宜浓度的赤霉素 (Gibberellin, GA_3), 可加快种子内贮藏物质的分解和能量的释放, 促进

胚根伸长和胚芽突破种皮, 提高种子的萌发率; 发芽后, GA_3 还可增加细胞分生区长度, 促进幼苗的长度增加^[14-15]。同时, GA_3 刺激胚乳或子叶中贮藏物质水解, 间接促进幼苗生长^[16]。研究表明, GA_3 对水稻 (*Oryza sativa* L.)、玉米 (*Zea mays* L.) 等陈种的发芽都有良好的促进作用^[17]。另一方面, 发芽基质也影响种子发芽。在不同基质处理下, 种子发芽率存在明显差异。种子萌发过程中主要是利用种子内部贮存的营养物质, 萌发条件主要受限于水分、温度和通气条件^[18]。在相同温度条件下, 保水又透气的基质更有助于种子萌发。椰糠和蛭石, 疏松、透气又保水, 有助于植物根系延伸, 是常用的发芽基质。研究表明, 蛭石有助于提高紫云英种子萌发速率和发芽率; 蛭石和椰糠在促进幼苗生长方面表现良好^[1, 19]。

近年来有研究开展了温度、PEG、发芽基质等不同方法对紫云英种子萌发和幼苗生长的影响, 但是这些研究主要以紫云英新种为试验材料, 缺乏针对紫云英陈种萌发的促发芽方法。因此, 本研究中, 以贮藏 17 年和贮藏 3 年的紫云英种子为试验材料, 分别利用蒸馏水和 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ GA_3 溶液浸种后, 将种子置于发芽纸、椰糠和蛭石等发芽基质中, 比较不同处理对紫云英陈种萌发、幼苗生长的影响, 以期筛选出提高紫云英陈种子生活力的最佳处理方法, 为进一步推动陈种子生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究中所用贮藏 17 年的种子 (17Y, ‘闽紫 5 号’, 2007 年收获) 和贮藏 3 年的种子 (3Y, ‘闽紫 5 号’, 2021 年收获) 均来自于福建省农业科学院资源环境与土壤肥料研究所绿肥种子库。种子收获后

自然晒干,常温贮藏。‘闽紫5号’是福建省农业科学院资源环境与土壤肥料所选育的紫云英品种^[20],在福建省广泛应用;贮藏17年的种子,是2007年全国绿肥生产恢复以后^[10],我所保存最早的紫云英种子。

本研究中所用的发芽基质有3种,分别是发芽纸(FZ)、蛭石(ZS)和椰糠(YK)。发芽纸和蛭石购买于晋安区博恒实验经营部;椰糠购买自江平企业有限公司。试验过程中,椰糠和蛭石的含水量保持在65%~75%之间(质量比)。前期,研究了不同浓度 GA_3 (200,400和600 $mg \cdot L^{-1}$)对紫云英陈种萌发和幼苗生长的影响,结果表明, GA_3 浓度为400 $mg \cdot L^{-1}$ 时,对种子发芽率和幼苗生长有最好的促进作用,因此,本试验中 GA_3 浓度设置为400 $mg \cdot L^{-1}$ (本文章未提供该数据)。

1.2 种子表皮颜色及生活力测定

每个贮藏年份的种子分别随机选取300粒,分为3个重复,每重复100粒,统计每个重复中表皮深、浅的种子数目。浅色种子是指种子表皮呈现浅绿色或浅棕色,深色种子是指种子表皮颜色呈现红色,紫红色和黑色。种子生活力是指种子发芽的潜在能力和种胚具有的生命力,通常指一批种子中具有生活力的种子数占种子总数的百分率。TTC(2,3,5-氯化三苯基四氮唑)能与种胚活细胞中的脱氢酶反应,被还原生成稳定不易扩散的三苯基甲,若种子被染成红色或粉红色则视为有生活力种子,反之则视为无生活力种子。取深色、浅色种子各10粒,分别用无菌水浸泡12 h,清水洗净后用滤纸吸干水分,用尖头镊子去除种皮后放入50 mL离心管中,加入10 mL 0.5%的TTC染液,放入37℃水浴锅中避光染色30 min,染色结束后观察记录种子着色情况。

有生活力种子比例(%)=有生活力的浅色种子比例×浅色种子比例+有生活力的深色种子比例×深色种子比例

1.3 发芽试验处理

每个贮藏年限的浅色种子随机选取300粒,用5%的次氯酸钠溶液消毒种子10 min,再用无菌水冲洗5次。随后,将种子浸入蒸馏水(CK)或400 $mg \cdot L^{-1}$ [GA_3 (400)]赤霉素溶液中,浸泡12 h后洗净擦干种子表面水分,置于FZ,ZS和YK等发芽基

质中,每个处理3个重复,每重复100粒种子。将发芽盒置于人工气候箱,培养条件设置为22℃,相对湿度为60%,6:00至20:00光照,光照强度1000 lx;20:00至次日6:00,黑暗。每日上午9:00—10:00观察记录种子的萌发和幼苗生长情况,至第14 d结束试验。

1.4 种子萌发测定

依据《农作物种子检验规程第4部分:播种质量发芽试验》的规定,在第14 d,将幼苗从不同发芽基质中取出,记录幼苗数。地上部有子叶长出,有胚根,即视为发芽。发芽率的计算公式如下:

$$\text{发芽率}(\%) = (\text{14 d总发芽数} / \text{供试种子数}) \times 100$$

1.5 紫云英幼苗生长指标的测定

第14 d时各处理选取长势一致的紫云英幼苗6株,植株冲洗干净后,用吸水纸吸干幼苗表面水分,将根部和地上部分离,分别测量主根长、苗长、根鲜重、苗鲜重,记录数据。

1.6 叶绿素含量测定

在第14 d各处理称取紫云英真叶0.1 g,加入少量石英砂和无水乙醇研磨成匀浆后放到暗处静置提取30 min,之后过滤到10 mL的比色管中,用无水乙醇定容、摇匀,利用分光光度计测定提取液在663 nm和645 nm波长下的吸光度并计算叶绿素含量($mg \cdot g^{-1}$)^[21],每个处理重复3次。

$$C = (8.04 \times A_{663} + 20.29 \times A_{645}) \times V / m$$

式中, C 为叶绿素含量, A_{663} , A_{645} 分别为提取液在663 nm,645 nm波长下的吸光度, V 为提取液体积, m 为幼苗质量。

1.7 抗氧化酶活性和丙二醛含量的测定

过氧化氢酶(Catalase,CAT)活性采用紫外分光光度法,利用CAT活性检测试剂盒测定;过氧化物酶(Peroxidase,POD)活性采用愈创木酚法,利用POD活性测定试剂盒测定;超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase,SOD)活性采用黄嘌呤氧化酶-氮蓝四唑法,利用SOD活性检测试剂盒测定;丙二醛(Malondialdehyde,MDA)含量采用硫代巴比妥酸法氧化比色法,利用MDA含量试剂盒测定。以上所有试剂盒购于北京索莱宝科技有限公司,根据试剂盒内的操作步骤完成CAT活性、POD活性、

SOD 活性和 MDA 含量的测定。

1.8 数据分析

试验数据采用 Excel 和 SPASS 26 软件进行分析整理,采用三因素方差分析和 Duncan 多重比较检验数据差异的显著性($P < 0.05$),利用 Graphpad prism 8.02 进行绘图。采用隶属函数法,综合评价不同处理对紫云英陈种萌发和幼苗生长的促进效果,公式参考文献^[22]:

$$U(ij) = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min})$$

式中: $U(ij)$ 为第*i*个处理第*j*项指标的隶属函数值, X_{ij} 为第*i*个处理第*j*项指标的平均值, $X_{j\max}$, $X_{j\min}$ 为第*i*个处理第*j*项指标平均值中的最大值和最小值,将各项测定指标的隶属函数值累加起来,为该处理的综合评价值,综合评价值越大,说明该方法对紫云英陈种萌发和幼苗生长越有利。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏年限紫云英种皮颜色和生活力的变化

紫云英表皮颜色,有深色和浅色之分(图 1a);贮藏 17 年紫云英种子中,深色种子比例为 73%,浅

色种子比例为 27%;而对于贮藏 3 年的紫云英种子,深色种子比例只有 10%,浅色种子比例为 90%(表 1)。表皮颜色不同,其种子生活力也可能不同,用 TTC 染液分别检测不同年份表皮深、浅种子的生活力,结果发现:不同贮藏年份深色种子基本无生活力(图 1b),贮藏 17 年和 3 年的浅色种子中有生活力种子比例分别为 50% 和 90%(表 1)。种子生活力代表种子潜在的发芽能力,贮藏 17 年和 3 年种子中有生活力的种子比例为 13.5%,81.0%(表 1)。

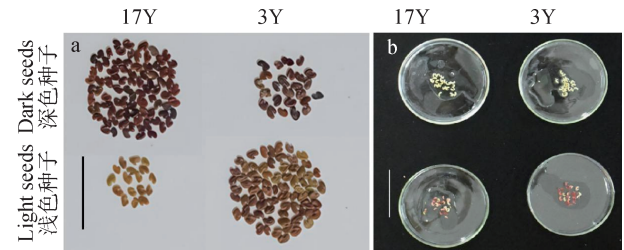


图 1 不同贮藏年限紫云英种子的种皮颜色及生活力变化
Fig. 1 Different storage years affected the color and viability of seeds of Chinese milk vetch

注:(a)代表贮藏 17 年(17Y)和贮藏 3 年(3Y)的种子颜色变化;标尺为 1 cm;(b)代表用 TTC 染液测定深色和浅色种子的生活力;标尺为 5 cm

Note: (a) The color changes of seeds stored for 17 years and 3 years. Scale bar, 1 cm. (b) To determine the viability of dark-colored and light-colored seeds with TTC staining solution. Scale bar, 5 cm

表 1 不同贮藏年限紫云英种子深浅种子的比例及生活力

Table 1 The viability and the ratio of dark or light-colored Chinese milk vetch seeds with different storage years

贮藏年限 The storage time	浅色种子 Light-colored seeds		深色种子 Dark-colored seeds		总体 Whole
	占种子群体比例 The ratio of light-colored seeds among whole/%	种子生活力 The ratio of viable seeds among light-colored seeds/%	占种子群体比例 The ratio of dark-colored seeds among whole/%	种子生活力 The ratio of viable seeds among dark-colored seeds/%	种子生活力 The ratio of viable seeds among all seeds/%
17 年	27±5	50±8	73±5	0±0	13.5±2.4
3 年	90±1	90±8	10±1	0±0	81.0±0.7

注:有生活力种子的比例(%)=有生活力的浅色种子比例×浅色种子比例+有生活力的深色种子比例×深色种子比例

Note: The ratio of viable seeds among all seeds (%)=The ratio of light-colored seeds among whole×The ratio of viable seeds among light-colored seeds + The ratio of dark-colored seeds among whole×The ratio of viable seeds among dark-colored seeds

2.2 赤霉素和发芽基质对紫云英陈种萌发的影响

贮藏年限对种子的发芽率有显著影响(图 2,表 2)。GA₃未浸种时,贮藏 17 年种子的平均发芽率为 4.3%,贮藏 3 年种子的平均发芽率为 40.7%;GA₃浸种后,贮藏 17 年种子的平均发芽率为 10.7%,贮藏 3 年种子的平均发芽率为 79.1%。GA₃对种子的发芽率也具有显著影响(图 2,表 2)。与 GA₃未浸种相比,浸种后,贮藏 17 年和 3 年种子的发芽率分别显著提高 1.5 倍和 0.9 倍(图 2)。GA₃未浸种时,贮藏 17 年的种子,种植在 YK 和 ZS 相比 FZ 发芽率分

别提高 1.8 倍和 1.7 倍;贮藏 3 年的种子,种植在 YK 和 ZS 的发芽率均比 FZ 提高 1.2 倍(图 2a-b)。GA₃浸种后,贮藏 17 年或 3 年的种子,YK,ZS 和 FZ 处理之间,种子发芽率无显著差异(图 2a-b)。

2.3 赤霉素和发芽基质对紫云英幼苗生长的影响

由图 3 和表 2 可以看出,贮藏年限对株高、主根长、地上部鲜重有显著影响。与贮藏 17 年的种子相比,贮藏 3 年种子的株高、主根长、地上部鲜重分别显著增加 19.1%,19.4%,10.6%(图 3,表 2)。GA₃

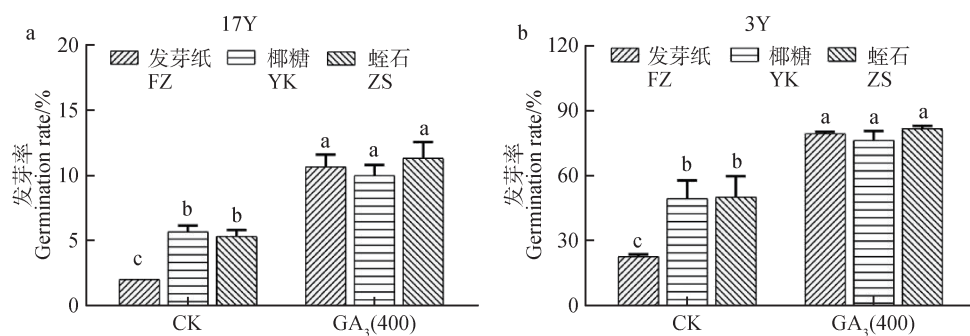


图2 不同赤霉素浓度和发芽基质对紫云英陈种发芽率的影响

Fig. 2 GA₃ and germination substrate affected the germination of the long term stored seed of Chinese milk vetch

注:FZ-发芽纸;YK-椰糠;ZS-蛭石。CK,GA₃(400)分别代表用蒸馏水和400 mg·L⁻¹的GA₃溶液对贮藏17年或3年的紫云英种子进行浸种。a,b分别代表贮藏17年和3年紫云英种子的发芽率。不同小写字母代表不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: FZ, YK and ZS represented that seeds were planted on paper bed, coir and vermiculite. CK and GA₃(400) represented using distilled water or 400 mg·L⁻¹ GA₃ solution to soak seeds stored for 17 years or 3 years. (a) germination rate of seeds stored for 17 years; (b) germination rate of seeds stored for 3 years. Different letters indicated significant differences ($P < 0.05$)

对株高、主根长、地上部鲜重和根鲜重有显著影响。与GA₃未浸种相比,浸种后,贮藏17年和3年种子的株高分别提高42.6%和76.5%,主根长分别提高19.1%和45.1%,地上部鲜重分别提高12.4%和32.3%,根鲜重分别提高7.8%和62.8%(图3,表2)。贮藏年限、GA₃和发芽基质三者交互作用对株高、主根长和根鲜重有显著影响(表2)。对于株高,17Y-GA₃(400),3Y-CK和3Y-GA₃(400)处理下,FZ,YK和ZS之间有显著的差异性。17Y-GA₃(400)处理下,YK和ZS处理下株高显著比FZ分别高3.3倍、3.8倍;3Y-CK处理下,YK和ZS处理下株高显著比FZ分别高0.5倍、0.9倍;3Y-GA₃(400)处理下,YK和ZS处理下株高显著比FZ分别高1.7倍、2.0倍(图3b)。对于主根长,17Y-CK,17Y-GA₃(400)和3Y-CK处理下,FZ,YK和ZS之间有显著的差异性。17Y-CK处理下,YK和ZS处理下主根长显著比FZ分别高5.1倍、7.6倍;17Y-GA₃(400)处理下,YK和ZS处理下主根长显著比FZ分别高1.7倍、3.2倍;3Y-CK处理下,YK和ZS处理下主根长显著比FZ分别高4.8倍、6.7倍(图3c)。对于根鲜重,17Y-CK,17Y-GA₃(400)和3Y-GA₃(400)处理下,FZ,YK和ZS之间有显著的差异性。17Y-CK处理下,YK和ZS处理下根鲜重显著比FZ分别高8.0倍、11.4倍;17Y-GA₃(400)处理下,YK和ZS处理下根鲜重显著比FZ分别高1.9倍、4.6倍;3Y-GA₃(400)处理下,YK和ZS处理下根鲜重显著比FZ分别高1.6倍、2.5倍(图3e)。

2.4 赤霉素和发芽基质对紫云英幼苗生理生化指标的影响

由图4和表2可知,贮藏年限、赤霉素和发芽基质对紫云英幼苗叶绿素含量有显著影响。相比贮藏17年的种子,贮藏3年种子的叶绿素含量显著提高了39.4%。与GA₃未浸种相比,浸种后,贮藏17年和3年种子叶绿素含量分别提高了56.7%和85.3%。GA₃未浸种时,对于贮藏17年或3年的种子,叶绿素含量在FZ,YK和ZS处理之间无显著差异性;GA₃浸种后,对于贮藏17年和3年的种子,叶绿素含量在ZS处理下分别比FZ显著提高2.0倍、0.9倍(图4)。

为研究不同处理对紫云英幼苗生理特性的影响,测定了新鲜幼苗的CAT活性、POD活性、SOD活性和MDA含量,由图5和表2可知,赤霉素和发芽基质及二者交互作用对紫云英幼苗CAT活性、POD活性、SOD活性和MDA含量有显著性影响。与GA₃未浸种相比,浸种后,贮藏17年和3年种子CAT活性分别提高了40.7%和133.7%,POD活性分别提高了64.3%和89.3%,SOD活性分别提高了38.4%和19.3%,MDA含量分别降低了32.7%和8.2%。GA₃未浸种时,对于贮藏17年或3年种子,CAT活性和SOD活性在FZ,YK和ZS处理之间无显著差异;GA₃浸种后,对于贮藏17年或3年种子,CAT活性在ZS处理下分别比FZ提高37.5%和284.8%;SOD活性在ZS处理下分别比FZ高41.2%和69.8%(图5a,c)。

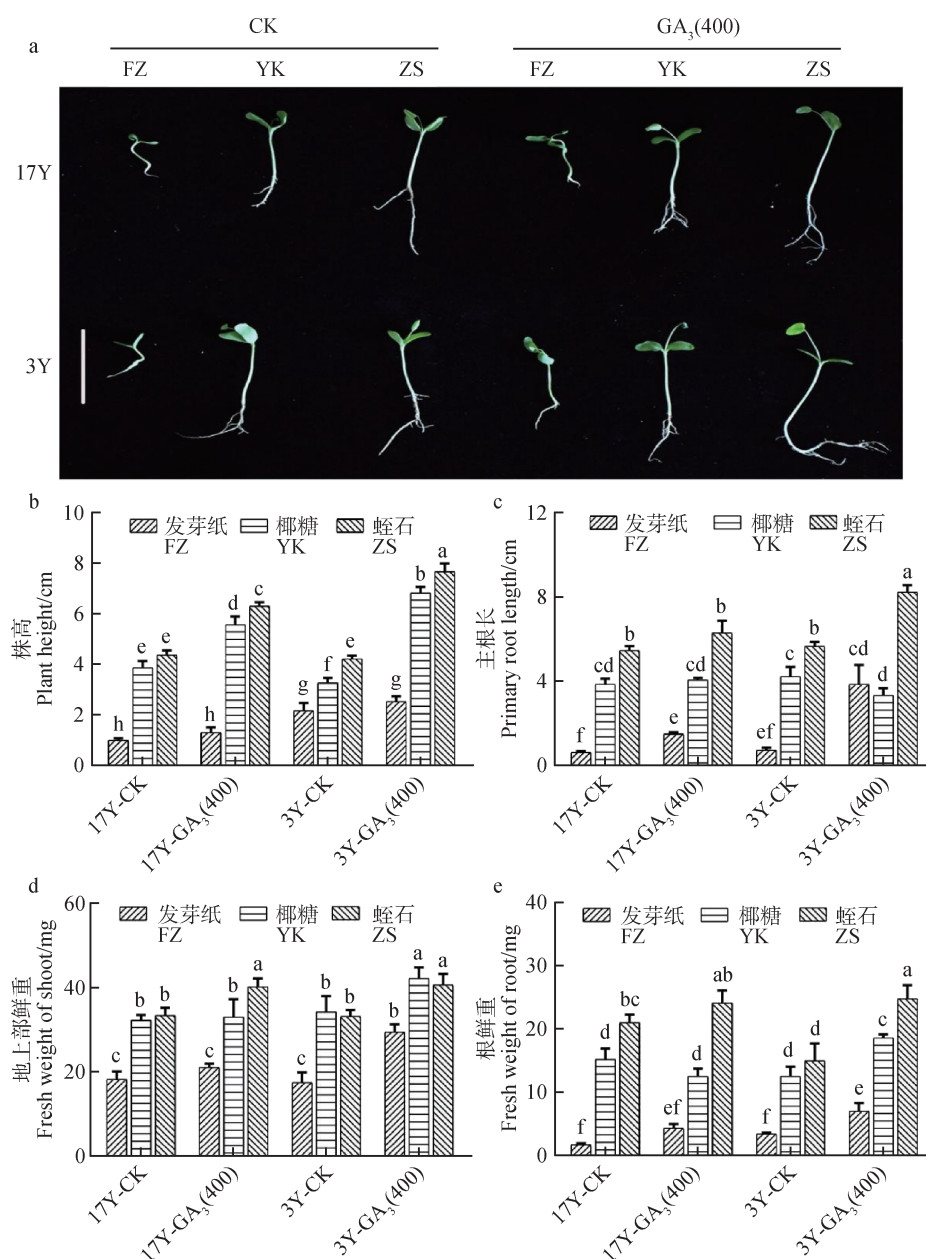


图3 不同处理对紫云英陈种萌发后幼苗生长指标的影响

Fig. 3 GA₃ and germination substrate affected the seedling growth of the long term stored seed of Chinese milk vetch

注: FZ-发芽纸; YK-椰糠; ZS-蛭石。17Y-CK, 17Y-GA₃(400), 3Y-CK, 3Y-GA₃(400) 分别代表用蒸馏水和400 mg·L⁻¹的GA₃溶液对贮藏17年或3年的紫云英种子进行浸种。a代表在GA₃和发芽基质处理下, 紫云英幼苗生长14d的形态。标尺为4 cm。b, c, d, e 分别代表紫云英幼苗的株高、主根长、地上部鲜重和根鲜重。不同小写字母代表不同处理间差异显著(P < 0.05)

Note: FZ, YK and ZS represented that seedling growth on paper bed, coir and vermiculite. 17Y-CK, 17Y-GA₃(400), 3Y-CK, 3Y-GA₃(400) represented using distilled water or 400 mg·L⁻¹ GA₃ solution to soak seeds stored for 17 or 3 years; (a) Phenotype of seedling under different treatments; Scale bar, 4 cm; (b) plant height; (c) primary root length; (d) fresh weight of shoot; (e) fresh weight of root. Different letters indicated significant differences (P < 0.05)

2.5 不同发芽处理的指标隶属函数分析

对6种处理下紫云英陈种的发芽率、生长指标(4个)和生理指标(5个)进行综合隶属函数值排序, 结果表明: 对贮藏17年的种子, 各处理的综合隶属数值的大小依次为: GA₃(400)-ZS > GA₃(400)-YK

> GA₃(400)-FZ > CK-ZS > CK-FZ > CK-YK; 对贮藏3年的种子, 各处理的综合隶属数值的大小依次为 GA₃(400)-ZS > GA₃(400)-YK > CK-FZ > CK-YK > CK-ZS > GA₃(400)-FZ。综合评价指数结果表明, 两种贮藏年限下, 经GA₃(400)-ZS处理的紫

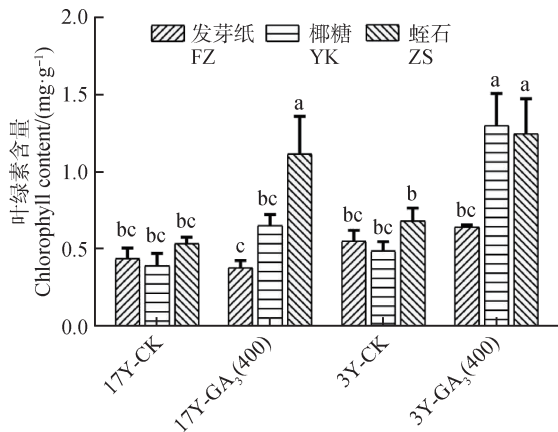


图 4 不同处理对紫云英幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 4 GA_3 and germination substrate affected the chlorophyll content of seedling of Chinese milk vetch

注: FZ-发芽纸; YK-椰糠; ZS-蛭石。17Y-CK, 17Y- GA_3 (400), 3Y-CK, 3Y- GA_3 (400) 分别代表用蒸馏水和 400 $mg \cdot L^{-1}$ 的 GA_3 溶液对贮藏 17 年或 3 年的紫云英种子进行浸种。不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: FZ, YK and ZS represented that seedling growth on paper bed, coir and vermiculite. 17Y-CK, 17Y- GA_3 (400), 3Y-CK and 3Y- GA_3 (400) represented using distilled water or 400 $mg \cdot L^{-1}$ GA_3 solution to soak seeds stored for 17 years or 3 years. Different letters indicated significant differences ($P < 0.05$)

云英萌发和幼苗生长状况最好, 该处理下发芽率高、幼苗生物量大、根系发达、叶绿素含量和酶活性高, 有利于紫云英幼苗健壮生长。

3 讨论

3.1 赤霉素浸种和发芽基质对紫云英陈种萌发和幼苗生长的影响

紫云英种子的发芽率随贮藏时间增长而下降。种子在贮藏过程中受温度、水分、内部营养物质消

耗等多因素影响, 生活力不断下降, 且为不可逆的变化^[12]。黄媛等^[23]发现, 广金钱草 (*Desmodium styracifolium* (Osbeck) Merr.) 种子的发芽率和发芽势与老化时间均呈极显著负相关。在本研究中, 贮藏 17 年的紫云英种子生活力、发芽率均显著低于贮藏 3 年的种子 (图 2)。适宜的处理方法能提高陈种子的发芽能力并促进幼苗生长, 且不同方法对植物的发芽指标、生长指标等表现出不同效应^[24]。 GA_3 能够激活种子细胞以及多种水解酶, 促进新陈代谢和其它酶的合成, 打破植物种子休眠、加速种子的发芽进程^[25]。本研究中, 用 400 $mg \cdot L^{-1}$ GA_3 浸种后显著提高紫云英陈种的发芽率 (图 2)。 GA_3 未浸种时, YK 和 ZS 处理下紫云英陈种的发芽率显著高于 FZ; GA_3 浸种后, 在 FZ、YK 和 ZS 处理下, 紫云英陈种的发芽率没有显著差异 (图 2); 这可能是 GA_3 对陈种萌发的促进作用显著高于 YK 和 ZS。在 GA_3 (400)-ZS 处理下, 贮藏 17 年和 3 年的陈种发芽率为 11.3% 和 81.6%, 两种贮藏年限种子中有生活力种子的比例为 13.5% 和 81.0% (表 1, 图 2), 这表明 GA_3 (400)-ZS 处理下不同贮藏年限中有生活力的种子基本萌发。 GA_3 和发芽基质及其交互作用对紫云英幼苗株高、主根长、根鲜重有显著的促进效果, ZS 与 GA_3 交互促进效果最优 (图 3, 表 2)。一方面 GA_3 打破种子休眠, 促进种子萌发和根茎叶伸长的作用^[26]; 另一方面, ZS 的透气性、保水性及其孔隙结构利于根系延伸, 加快幼苗生长^[27]。

3.2 赤霉素浸种和发芽基质对紫云英幼苗生理的影响

生理指标反映了植物的新陈代谢状况和对外界环境的适应能力。叶绿素是光合作用的主要色

表 2 三因素分析不同赤霉素浓度和发芽基质对紫云英陈种发芽和幼苗生长的影响

Table 2 Three factor analysis of the effects of GA_3 and germination substrate on the germination and seedling growth of long stored Chinese milk vetch seeds

因子 Factor	发芽率 Germination rate	株高 Plant height	主根长 Primary root length	地上部鲜重 Fresh weight of shoot	根鲜重 Fresh weight of root	叶绿素 Chlorophyll content	CAT	POD	SOD	MDA
Y	0.000	0.000	0.000	0.004	0.509	0.000	0.006	0.210	0.928	0.089
GA_3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005
JZ	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.001	0.003
$Y \times GA_3$	0.000	0.000	0.005	0.008	0.000	0.035	0.002	0.237	0.090	0.046
$Y \times JZ$	0.009	0.003	0.002	0.084	0.006	0.166	0.015	0.922	0.300	0.135
$GA_3 \times JZ$	0.001	0.000	0.000	0.400	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$Y \times GA_3 \times JZ$	0.008	0.002	0.000	0.198	0.043	0.083	0.000	0.021	0.781	0.130

注: 表中数据为贮藏年限 (Y)、赤霉素 (GA_3) 及发芽基质 (JZ)、两因素和三因素的交互作用的 P 值

Note: The values in the table are the P-values of the storage time, gibberellin, germination substrate and interaction between the two or three factors

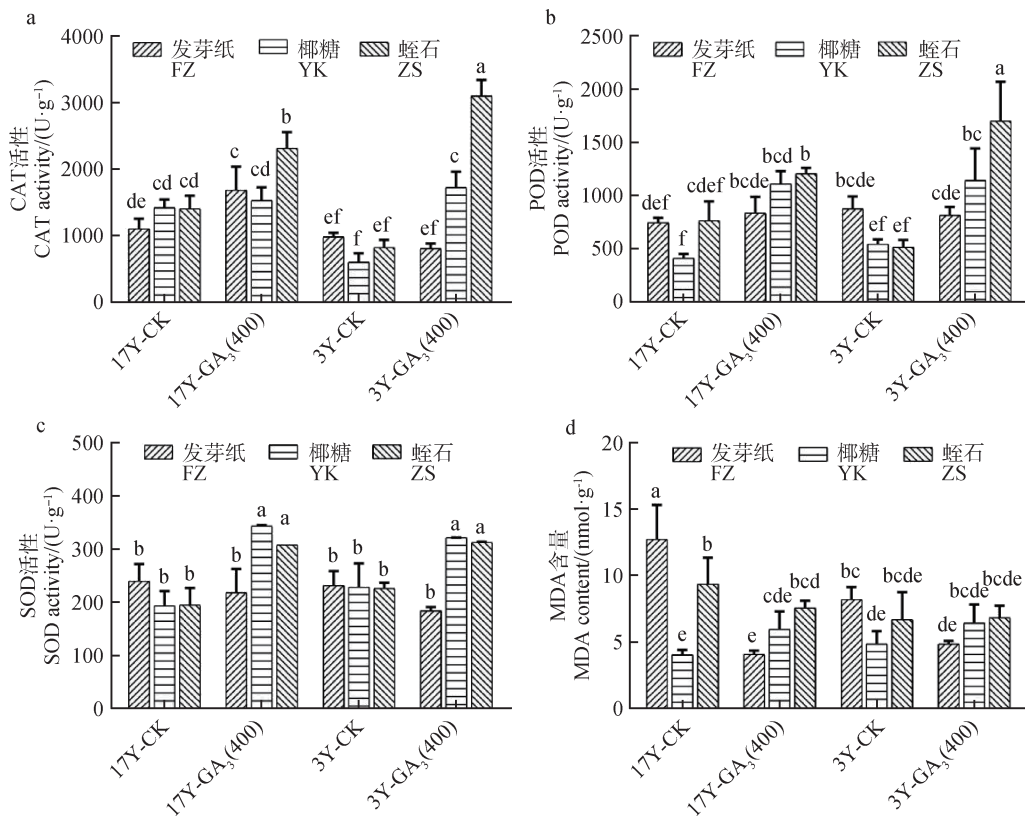


图5 不同处理对紫云英幼苗抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

Fig. 5 GA_3 and germination substrate affected the antioxidant enzyme activity and

注:FZ-发芽纸;YK-椰糠;ZS-蛭石。17Y-CK,17Y- GA_3 (400),3Y-CK,3Y- GA_3 (400)分别代表用蒸馏水和400 mg·L⁻¹的 GA_3 的对贮藏17年或3年的紫云英种子进行浸种。a,b,c,d分别代表紫云英幼苗CAT活性、POD活性、SOD活性和MDA含量。不同小写字母代表不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Note:MDA content of seedling FZ, YK and ZS represented that seedling growth on paper bed, coir and vermiculite. 17Y-CK, 17Y- GA_3 (400), 3Y-CK and 3Y- GA_3 (400) represented using distilled water or 400 mg·L⁻¹ GA_3 solution to soak seeds stored for 17 years or 3 years. (a) The CAT activity; (b) The POD activity; (c) The SOD activity; (d) The MDA content. Different letters indicated significant differences ($P < 0.05$)

素,一定范围内,叶绿素含量与光合作用正相关^[25]。本研究发现, GA_3 和发芽基质显著影响紫云英幼苗叶绿素含量(图3,表2), GA_3 (400)-ZS处理下紫云英幼苗叶绿素含量最高,表明该处理对叶绿素的合成有刺激作用,高含量的叶绿素增强光合效率,为后期植物生长发育提供更多的能量。由SOD,CAT和POD组成的抗氧化酶促系统可清除机体内过量的活性氧(ROS)和自由基^[28],其活性越高,越有利于维持植物体内生理平衡,抵御外界环境因素的不利影响,增强植株抗逆性^[29]。本研究表明,两种贮藏年限下, GA_3 (400)-ZS处理的紫云英幼苗CAT,POD和SOD活性最高(图5)。植物在种子萌发和幼苗生长阶段呼吸代谢活动较为强烈,往往伴随着ROS大量产生^[30],易对细胞造成氧化损伤。适宜浓度的 GA_3 通过上调抗氧化酶基因表达,或通过调节植物体内渗透物质的累积等途径,有助于修复受损伤的细胞^[31]。同时,ZS的保水性和透气性能

减少氧化胁迫,降低ROS的生成,且ZS能吸附 NH_4^+ , K^+ , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} 等离子,在供植物生长所需的同时还能作为含金属元素抗氧化酶(SOD和CAT)的辅酶因子,使其活性明显提高^[32-33]。因此,400 mg·L⁻¹ GA_3 和ZS两者耦合通过生理和物理的双重作用减少氧化损伤并增强抗氧化防御系统,维持植物体内的生理平衡,增强紫云英幼苗的抗逆性。此外,与 GA_3 (400)-FZ相比, GA_3 400-YK显著增强紫云英幼苗的抗氧化酶活性(图5),这可能是在 GA_3 的促进基础上,YK通过改善容重、孔隙度、气水比、EC值等理化特性,优化植株生长的微环境^[34],进一步增强紫云英幼苗的抗逆性。MDA是植物细胞膜脂过氧化的产物,其含量是衡量植物细胞膜脂过氧化和质膜受损伤程度的重要指标^[35]。本研究中 GA_3 浸种后降低了紫云英幼苗MDA含量(图5d),表明 GA_3 处理有效缓解了膜脂过氧化损伤,保护了细胞膜的完整性,使幼苗能够适应所处环境。

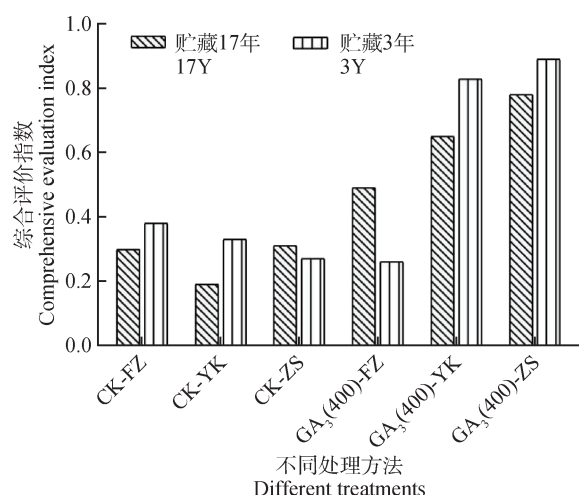


图6 不同处理下紫云英陈种萌发和幼苗生长的综合评价指数

Fig. 6 Comprehensive evaluation index of germination and seedling growth of long stored seeds under different treatments
注: 17Y-贮藏17年的种子; 3Y-贮藏3年的种子。FZ-发芽纸; YK-椰糠; ZS-蛭石。CK, GA₃(400)分别代表用蒸馏水和400 mg·L⁻¹的GA₃溶液对贮藏17年或贮藏3年的紫云英种子进行浸种
Note: 17Y and 3Y represented seeds stored for 17 years or 3 years. FZ, YK and ZS represented that seedling growth on paper bed, coir and vermiculite. CK and GA₃(400) represented using distilled water or 400 mg·L⁻¹ GA₃ solution to soak seeds

4 结论

通过综合分析得出, 400 mg·L⁻¹赤霉素浸种后播种在蛭石发芽基质中是促进紫云英陈种子萌发和幼苗生长的适宜方法。在GA₃(400)-ZS处理下, 有生活力的种子基本萌发, 且幼苗株高、主根长、地上部鲜重及根系鲜重最高; 幼苗体内的叶绿素含量和抗氧化酶活性高, 细胞膜脂过氧化伤害程度低。

参考文献

- [1] 崔瑶, 张青瑞, 施卫省. 育苗基质对紫云英种子萌发成苗的影响[J]. 土壤与作物, 2016, 5(1): 36-41
CUI Y, ZHANG Q R, SHI W S. Effects of seedlings substrates on seed germination and seedling growth in *Astragalus* L [J]. Soils and Crops, 2016, 5(1): 36-41
- [2] 曹卫东, 周国朋, 高嵩涓. 绿肥内源驱动土壤健康的作用与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1274-1283
CAO W D, ZHOU G P, GAO S J. Effects and mechanisms of green manure on endogenous improving soil health [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(7): 1274-1283
- [3] 高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2115-2126
GAO S J, ZHOU G P, CAO W D. Effects of milk vetch (*Astragalus sinicus*) as winter green manure on rice yield and rate of fertilizer application in rice paddies in south China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(12): 2115-2126

- [4] YANG L, ZHOU X, LIAO Y L, et al. Co-incorporation of rice straw and green manure benefits rice yield and nutrient uptake [J]. Crop Science, 2019, 59(2): 749-759
- [5] 高嵩涓, 曹卫东, 白金顺, 等. 长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 902-910
GAO S J, CAO W D, BAI J S, et al. Long-term application of winter green manures changed the soil microbial biomass properties in red paddy soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 902-910
- [6] CHEN D M, YUAN L R, LIU Y, et al. Long-term application of manures plus chemical fertilizers sustained high rice yield and improved soil chemical and bacterial properties [J]. European Journal of Agronomy, 2017, 90: 34-42
- [7] 王加明. 信阳紫云英高产高效栽培及采种技术[J]. 河南农业, 2025, 5: 19
WANG J M. High yield and efficient cultivation and seed collection techniques of *Astragalus* L. in Xinyang county [J]. Agriculture of Henan, 2025, 5: 19
- [8] 林多胡, 陈云平, 叶永泰, 等. 紫云英新品种闽紫1号的选育和丰产栽培技术研究[J]. 福建省农科院学报, 1993, 8(4): 16-20
LIN D H, YE Y Q, CHEN Y P, et al. The breeding of a new Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus*) cultivar mingzi no. 1 and its cultivation for high yield [J]. Journal of Fujian Academy of Agricultural Science, 1993, 8(4): 16-20
- [9] 林多胡, 顾荣申. 中国紫云英[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 2000: 90-95
LIN D H, GU R S. Milk vetch in China [M]. Fuzhou: Fujian Science and Technology Publishing House, 2000: 90-95
- [10] 曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 等. 中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1450-1461
CAO W D, BAO X G, XU C X, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(6): 1450-1461
- [11] 张玲, 曹磊, 蔡诚, 等. 自然老化条件下冬小麦种子活力及生理指标变化[J]. 中国农业科学, 2025, 58(5): 877-899
ZHANG L, CAO L, CAI C, et al. Changes in seed vigor and physiological index of winter wheat under natural aging condition [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(5): 877-889
- [12] 覃初贤. 不同含水量的紫云英种子库存20年后活力研究[J]. 种子, 2009, 28(3): 38-40, 44
QIN C X. Research *Astragalus Sinicus* seed vigor with different water content conserved in the gene bank of 20 years [J]. Seeds, 2009, 28(3): 38-40, 44
- [13] 聂素梅, 保平. 贮藏23年牧草种子对萌发特性及寿命的影响[J]. 内蒙古草业, 2007(3): 5-6
NIE S M, BAO P. The effect of storing grass seeds for 23 years on germination characteristics and lifetime [J]. Inner Mongolia Prataculture, 2007(3): 5-6
- [14] 王佳楠, 商桑, 田丽波, 等. 3种药剂处理对苦瓜陈种子发芽及幼苗生理的影响[J]. 种子, 2016, 35(3): 81-84
WANG J N, SHANG S, TIAN L B, et al. The effects of three kinds of chemicals on germination and seedling physiology of aged Bitter [J]. Seeds, 2016, 35(3): 81-84
- [15] 王浩妃, 李玉珊, 杜崇, 等. 不同浓度赤霉素药剂处理对西瓜苗期生长的影响[J]. 现代园艺, 2024, 47(17): 6-9

- WANG H F, LI Y S, DU C, et al. The effect of different concentrations of gibberellin treatment on the growth of watermelon seedlings[J]. Contemporary Horticulture, 2024, 47(17): 6-9
- [16] 庞静, 常恩福, 刘娇, 等. 赤霉素对虎尾草种子休眠破除及幼苗生长的影响[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20241206.1553.012>, 2024-12-09/2025-11-05
- PANG J, CHANG E F, LIU J, et al. Effects of gibberellin on seedling dormancy disruption and seedling growth of *Chloris virgata* [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20241206.1553.012>, 2024-12-09/2025-11-05
- [17] 刘海艳. 玉米种子活力与赤霉素和脱落酸的关系研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010: 23-24
- LIU H Y. Studies on relationship of gibberellins, abscisic acid and seed vigor in maize [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010: 23-24
- [18] 张鑫, 曹帮华, 史峻峰, 等. 发芽基质对垂柳种子发芽能力的影响[J]. 林业科技通讯, 2019(7): 69-71
- ZHANG X, CAO B H, SHI J F, et al. The effect of germination substrate on the germination ability of *Salix babylonica* L seeds[J]. Forest Science and Technology, 2019(7): 69-71
- [19] 张艳利. 不同基质配比对鸡冠花种子发芽率的影响[J]. 现代农业科技, 2016(2): 175
- ZHANG Y L. The effect of different substrate ratios on the germination rate of *Celosia cristata* L. seeds[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(2): 175
- [20] 尤良标. 紫云英新品种“闽紫5号”高产栽培技术[J]. 福建农业科技, 2012, 43(6): 33-34
- YOU L B. High-yielding cultivation techniques of milk vetch varieties ‘Minzi No. 5’ [J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2012, 43(6): 33-34
- [21] 魏强华, 洗翠芝, 张薇珠, 等. 西洋菜中叶绿素提取工艺研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(11): 275-277, 282
- WEI Q H, XIAN C Z, ZHANG W Z, et al. Study on extracting process of chlorophyll from watercress[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(11): 275-277, 282
- [22] 刘敏婷, 赵心笛, 李振华, 等. 不同栽培基质对无芒隐子草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草原与草坪, 2024, 44(2): 200-206
- LIU M T, ZHAO X D, LI Z H, et al. Effects of different culture substrates on seed germination and seedling growth of *Cleistogenes songorica* [J]. Grassland and Turf, 2024, 44(2): 200-206
- [23] 黄媛, 朱艳霞. 人工老化和引发处理对广金钱草种子活力和生理特性的影响[J/OL]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.S.20230711.0940.002.html>, 2023-07-11/2025-11-05
- HUANG Y, ZHU Y X. Effects of artificial aging and priming treatment on seed vigor and physiological characteristics of *Desmodium styracifolium* (Osbeck) Merr. [J/OL]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.S.20230711.0940.002.html>, 2023-07-11/2025-11-05
- [24] 李兴桃, 杨若彤. 不同处理方式对6种植物种子发芽的影响[J]. 农村科学实验, 2025, (3): 163-165
- LI X T, YANG R T. The effect of different treatment methods on seed germination of six plant species [J]. Rural Scientific Experiment, 2025, (3): 163-165
- [25] 王丽清. 赤霉素对刺槐种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 山西林业科技, 2024, 53(3): 33-36
- WANG L Q. Effects of gibberellin on seed germination and seedling physiological characteristics of *Robinia pseudoacacia* [J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2024, 53(3): 33-36
- [26] 黄镜瑜, 曾庆群, 文柳璿, 等. 赤霉素对苕子种子发芽率的影响[J]. 现代农业科技, 2021(23): 95-96
- HUANG J Y, ZENG Q Q, WEN L Y, et al. The effect of gibberellin on the germination *Vicia villosa* seeds [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2021, (23): 95-96
- [27] 戴海根, 吴宏伟, 吴尚卫, 等. 干旱胁迫对鹰嘴紫云英种子萌发及幼苗叶绿素荧光特性的影响[J]. 草原与草坪, 2022, 42(5): 95-105
- DAI H G, WU H W, WU S W, et al. Effects of drought stress on seed germination and chlorophyll fluorescence characteristics of seedling of *Astragalus cicer* [J]. Grassland and Turf, 2022, 42(5): 95-105
- [28] 梁艳荣, 胡晓红, 张颖力, 等. 植物过氧化物酶生理功能研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2003, 24(2): 110-113
- LIANG Y R, HU X H, ZHANG Y L, et al. Progress on physiological function research of plant peroxidase [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2003, 24(2): 110-113
- [29] REN M, TAN B, XU J, et al. Priming methods affected deterioration speed of primed rice seeds by regulating reactive oxygen species accumulation, seed respiration and starch degradation[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1267103
- [30] JATANA B S, GROVER S, RAM H, et al. Seed priming: molecular and physiological mechanisms underlying biotic and abiotic stress tolerance[J]. Agronomy, 2024, 14(12): 2901
- [31] 朱秀红, 杨会焕, 于宏, 等. GA₃对NaCl胁迫下‘泡桐1201’幼苗生理代谢及离子吸收的影响[J]. 广西植物, 2023, 43(4): 688-698
- ZHU X H, YANG H H, YU H, et al. Effects of GA₃ on physiological metabolism and ion absorption of ‘Paulownia 1201’ seedlings under NaCl stress [J]. Guihaia, 2023, 43(4): 688-698
- [32] ZHU W L, CUI L H, OUYANG Y, et al. Kinetic adsorption of ammonium nitrogen by substrate materials for constructed wetlands[J]. Pedosphere, 2011, 21(4): 454-463
- [33] 邓家军, 胡继伟, 李继新, 等. 重金属离子对烤烟叶片中铜锌超氧化物歧化酶活性的影响[J]. 中国烟草学报, 2010, 16(3): 1-6
- DENG J J, HU J W, LI J X, et al. Effects of heavy metal ions on copper-zinc superoxide dismutase activity in flue-cured tobacco leaves [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2010, 16(3): 1-6
- [34] 陈艺群, 严生仁, 杨玉凯, 等. 栽培基质对丝瓜幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 亚热带农业研究, 2017, 13(1): 24-29
- CHEN Y Q, YAN S R, YANG Y K, et al. The effects of culture substrates on towel gourd seedling growth and characteristics of chlorophyll fluorescence [J]. Subtropical Agriculture Research, 2017, 13(1): 24-29
- [35] 赵天宏, 孙加伟, 付宇. 逆境胁迫下植物活性氧代谢及外源调控机理的研究进展[J]. 作物杂志, 2008(3): 10-13
- ZHAO T H, SUN J W, FU Y. Advance of research on metabolism of plant reactive oxygen species and exogenous regulation under abiotic stresses [J]. Crops, 2008(3): 10-13