



陈文杰, 梁江, 覃夏燕, 郭小红, 陈淑芳, 汤复跃, 韦清源, 韦荣昌, 陈渊. 不同贮存方式对大豆种子活力及相关指标的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(04): 67-80.

CHEN Wenjie, LIANG Jiang, QIN Xiayan, GUO Xiaohong, CHEN Shufang, TANG Fuyue, WEI Qingyuan, WEI Rongchang, CHEN Yuan. Impacts of different storage methods on the vigor and related indicators of soybean seeds[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(04): 67-80.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.04.06

不同贮存方式对大豆种子活力及相关指标的影响

陈文杰 梁江 覃夏燕 郭小红 陈淑芳 汤复跃 韦清源 韦荣昌 陈渊*

(广西农业科学院 经济作物研究所/广西作物遗传改良生物技术重点开放实验室, 南宁 530007)

摘要 为探究南方高温高湿气候条件下不同贮存方式对大豆种子活力及相关指标的影响,以2个春大豆品种‘桂春8号’(GC 8)和‘桂春13号’(GC 13)与1个夏大豆品种‘桂夏1号’(GX 1)为试验材料,设密封干燥(A₁)、密封(A₂)、自然存放(A₃)共3个处理,置于敞开式仓库(日均温8.2~29.9℃,日均湿度55.3%~88.0%)贮存1年,以-18℃贮存作为对照(A₀),测定种子活力、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性及丙二醛(MDA)含量,以及种子浸泡12 h后浸泡液电导率(EC)和渗出固体物重(WDS);采用纸床法测定不同贮存处理后大豆种子的发芽相关指标,及干旱处理(DT)和浸水处理(FT)后的不同贮存处理大豆种子的发芽相关指标。结果表明:1)TTC试验中,A₀、A₁和A₂的3个品种子叶的显色率均在90%以上,A₃的‘GC 8’和‘GC 13’种子子叶显色率分别降至29.46%和26.05%,而‘GX 1’种子子叶显色率降为0。2)与A₀、A₁和A₂相比,3个品种A₃的EC和WDS均为最大,3个品种A₁的WDS较A₀均无显著差异。除‘GC 8’A₁的EC显著高于A₀外,其他2个品种A₁的EC较A₀均无显著差异。3)3个品种A₂的MDA含量均显著高于A₀;3个品种A₀和A₁的SOD活性均显著高于A₃;3个品种A₀和A₁的POD活性均显著高于A₂和A₃;3个品种各处理的种子CAT活性较A₀均无显著差异。4)A₃中3个品种的发芽势(GPP)、发芽率(GP)、正常苗率(NSP)、发芽指数(GI)4个指标均为0,A₂的4个指标均显著低于A₀和A₁,A₁与A₀的4个发芽指标相比,除A₁中的‘GC 13’的NSP和‘GC 8’的GPP和NSP显著低于A₀外,其他均无显著差异。3个品种A₂的发芽后第5天根长(5dRL)、下胚轴长(HL)、根鲜重(FRW)、活力指数(VI)均显著低于A₀,且A₂的5dRL和VI均显著低于A₁。除‘GC 13’A₁的5dRL显著低于A₀外,其他品种的A₁与A₀的5dRL均无显著差异。3个品种A₁和A₂的根伸长速率(RER)较A₀无显著差异。5)3个品种A₁、A₂的FT和DT种子GPP、GP、NSP和GI等4个指标均显著低于A₀。FT和DT的3个品种4个指标降低幅度不同,FT中A₁和A₂的‘GC 13’和‘GX 1’的GPP、GP、NSP和GI降低幅度均高于A₀,DT中A₁和A₂的3个品种的GP和NSP降低幅度均高于A₀。综上,不同贮存处理的大豆种子在自然条件下放置1年后均发生不同程度的老化,其中密封干燥保存(A₁)老化程度最轻,密封保存(A₂)次之,自然存放(A₃)老化程度最高,因此,密封干燥贮存方法可保持南方高温高湿气候条件下大豆生产用种的种子活力。

关键词 贮存; 大豆; 种子老化; 种子活力; 发芽

中图分类号 S379.2

文章编号 1007-4333(2025)04-0067-14

文献标志码 A

Impacts of different storage methods on the vigor and related indicators of soybean seeds

CHEN Wenjie, LIANG Jiang, QIN Xiayan, GUO Xiaohong, CHEN Shufang, TANG Fuyue, WEI Qingyuan, WEI Rongchang, CHEN Yuan*

(Cash Crops Research Institute/Guangxi Crop Genetic Improvement and Biotechnology Laboratory, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

收稿日期: 2024-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(32060490);广西重点研发计划项目(桂科AB24010194);农业生物育种重大项目(2023ZD0403402);国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-CES30);广西农业科学院科研业务专项(2021YT055,桂农科2024YP007);广西大豆油料创新团队(nyeytxgxcxt-2023-22)

第一作者: 陈文杰(ORCID:0000-0002-3317-4205),副研究员,主要从事大豆遗传育种工作,E-mail:cenwenji1030@163.com

通讯作者: 陈渊(ORCID:0000-0003-0876-0154),研究员,主要从事大豆遗传育种及栽培生理研究,E-mail:chenyuan313@163.com

Abstract In order to investigate the impact of different storage methods on the vigor and related indicators of soybean seeds under the high temperature and high humidity climate conditions of the south, two spring soybean cultivars 'Guichun No. 8' (GC 8) and 'Guichun No. 13' (GC 13), and one summer soybean cultivar 'Guixia No. 1' (GX 1) were used as experimental materials. Three treatments, sealed and dried condition (A_1), sealed condition (A_2), and natural storage (A_3) were set up and placed under natural conditions (average daily temperature: 8.2-29.9 °C, average daily humidity: 55.3%-88.0%) for 1 year with storage at -18 °C (A_0) as the control. The seed vigor, enzyme activities of peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD), and catalase (CAT), as well as malondialdehyde (MDA) content were measured. The electrical conductivity (EC) of the soaking solution and the weight of exuded solids (WDS) after soaking the seeds for 12 h were determined. The germination-related indicators of different storage treatment soybean seeds, and germination-related indicator of different storage treatment soybean seeds after drought treatment (DT) and flooding treatment (FT) were measured by using paper bed method. The results indicated that: 1) In the TTC test, the color rendering index (CRI) of cotyledons for three cultivars in A_0 , A_1 , and A_2 were all above 90%. The CRI of cotyledons for 'GC 8' and 'GC 13' seeds treated with A_3 were reduced to 29.46% and 26.05%, respectively, while the CRI of cotyledons for 'GX 1' seeds was reduced to 0. 2) Compared to A_0 , A_1 , and A_2 , the electrical conductivity (EC) and weight of exuded solids (WDS) for A_3 of the three cultivars were the highest. The WDS of the three cultivars in A_1 was not significantly different from those in A_0 . Except for the EC of 'GC 8' in A_1 was significantly higher than that in A_0 , there was no significant difference to EC between A_1 and A_0 for the other two cultivars. 3) The MDA content of three cultivars in A_2 was significantly higher than those in A_0 . The SOD content of three cultivars in A_0 and A_1 was significantly higher than that in A_3 , and the POD content of three cultivars in A_0 and A_1 were significantly higher than those in A_2 and A_3 . The CAT of three cultivars in A_1 , A_2 and A_3 were no significant difference from those in A_0 . 4) The four indices of germination potential percentage (GPP), germination percentage (GP), normal seedling percentage (NSP), and germination index (GI) of three cultivars in A_3 were all reduced to 0. The four indices in A_2 were significantly lower than those in A_0 and A_1 . Compared to A_0 , in the four germination indicators of A_1 , except for the NSP of 'GC 13' and the GPP and NSP of 'GC 8' which were significantly lower than A_0 , there were no significant differences in the others. Compared with A_0 , the 5 d root length (5dRL), hypocotyl length (HL), root fresh weight (FRW), and vigor index (VI) for three cultivars in A_2 were all lower. 5dRL and VI of three cultivars in A_2 were lower than those in A_1 . Except for the 5dRL of 'GC 13' in A_1 , which was significantly lower than that in A_0 , the other cultivars in A_1 showed no significant difference from those in A_0 . The root elongation rate (RER) of the three cultivars in A_1 and A_2 showed no significant difference compared to those in A_0 . 5) Compared with A_0 , the GPP, GP, NSP, and GI of the seeds in A_1 and A_2 after FT and DT stress treatment were reduced significantly, after FT and DT stress treatments, the extent of reduction in the four indicators of the three cultivars was different. In the FT, the reduction in GPP, GP, NSP, and GI for 'GC 13' and 'GX 1' in A_1 and A_2 was higher than that in A_0 . In the DT, the reduction of GP and NSP in A_1 and A_2 for all three cultivars was higher than that in A_0 . In summary, soybean seeds treated with different storage methods all exhibited varying degrees of aging after being stored under natural conditions for 1 year. Among these, sealed and dried conditions, (A_1) showed the least degree of deterioration, followed by sealed storage (A_2), with natural storage (A_3) showing the highest degree of deterioration. Therefore, the sealed dry storage method can maintain the seed vigor of soybean in production under high temperature and high humidity condition in the storage in southern of China.

Keywords storage; soybean; seed aging; seed vigor; germination

大豆(*Glycine max* [L.] Merrill)是我国重要的粮油饲兼用作物,大豆生产对稳定我国粮食安全有着重要的意义^[1]。南方是我国高蛋白大豆重要的产区

之一,但该地区为高温高湿环境会导致大豆种子在收获过程中易发劣变^[2],影响大豆种子的贮存^[3],使种子易失去发芽力而影响大豆保苗。研究不同贮存方式

对南方自然存放条件下大豆种子活力的影响,对指导我国南方大豆生产有重要意义。

种子活力丧失主要特征有细胞代谢改变、遗传物质完整性和DNA修复机制降低等,包括细胞膜紊乱、核酸等关键生物大分子受损^[4]。目前,活性氧积累及其对生物大分子(DNA、RNA和蛋白质)和生物膜的损伤被认为是种子活力丧失的主要原因之一^[5-7]。作物收获后要保持种子的活力,一方面可挖掘耐贮存、耐劣变的基因,培育耐贮存、耐劣变的品种,如水稻种子耐贮性基因 *qSS-9*^[8] 和 *OsALDH7*^[9]、玉米的 *ZmGOLS2*^[10]、大豆中的 *GmBLH4*^[11] 和 *ACP*^[12] 等,这些工作为选育耐贮存、耐劣变的作物新品种奠定了基础。另一方面也可以通过改变贮存条件来保持作物种子的活力。温度和湿度是影响种子活力的关键环境因素^[13],高温、高湿条件会加速种子的老化^[14-15],降低种子的活力^[16-18],保持低温干燥环境是维持种子活力的关键^[19],种质资源库即是利用低温、干燥、密封条件实现种质资源的长期保存^[20],许多植物的种子,如拟南芥^[21]、水稻^[22]、玉米^[23]、小麦^[24]、大麦^[25]等在冷冻干燥状态下,新陈代谢急剧降低,可长时间保持较高发芽率。种子库一般会建有低温库用于存放商业用种。为给生产上提供更经济简便的种子保存方法,科研人员开展了很多不同贮存方式对种子发芽力影响的研究,如钟吉萍等^[26]通过对包衣棉贮存方式的研究发现,400 g PV型塑料袋包装贮存包衣棉隔年播种发芽率更高;Freire等^[27]发现豆科植物黑木种子在室温干燥保持可长达16个月。大豆是常规作物,相当多的种植户或种植企业有自留种习惯,且种子存储、销售等环节均可能会面临高温高湿的环境,不利于种子活力的保持。目前,关于不同贮存方式的大豆种子在南方自然条件下存放1年后种子活力变化的研究鲜见报道。本研究用生产上耐贮存能力有差异的大豆品种,探究南方高温高湿的气候条件下不同贮存方式对大豆种子活力及相关指标的影响,以期找出适宜南方大豆生产上的种子贮存条件,为南方大豆生产中种子的安全贮存提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

3个供试品种中,‘桂春8号’(GC 8)和‘桂春13

号’(GC 13)为春大豆品种,‘桂夏1号’(GX 1)为夏大豆品种,3个品种均由广西农业科学院经济作物研究所供种。

1.2 试验设计

试验于2018年1月—2019年5月在广西壮族自治区农业科学院明阳基地进行(22°36′30″N, 108°14′11″E,海拔105.64 m,红壤土)。3个大豆品种所用种子均为2017年夏繁所得,收获后30℃烘干,用北京吉天仪器有限公司近红外分析仪SupNIR-1230测定种子含水率为11%时进行不同贮存试验。设置3个种子贮存处理:密封干燥,置于放有干燥剂(按照15 g/kg放入硅胶干燥剂)的10 mL的聚丙烯冷冻管(A₁);密封置于无干燥剂的冷冻管(A₂);置于牛皮纸信封内自然存放(A₃);以置于自封袋, -18℃条件下存放为对照(A₀)。每个处理60粒种子,3次重复。

A₁、A₂和A₃的种子于2018年1月1日—2018年12月31日放至敞开放式仓库(日均温:8.2~29.9℃,日均湿度:55.3%~88.0%)处自然老化。处理完后进行种子活力测定试验和种子抗逆鉴定试验。并从国家气象数据中心的中國气象年鉴专题栏(<http://data.cma.cn/analysis/yearbooks.html>)下载南宁市2011—2023年月均气温(Monthly average temperature MAT)、月均相对湿度(Monthly average relative humidity MARH)、日最高气温和日最低气温,然后计算每年每月的月平均日高温(Monthly average daily high temperature MADHT)和月平均日低温(Monthly average daily low temperature MADLT)。2018年的大气温湿度同近年(2011—2023年)相比,2018年除2月份空气平均相对湿度较2011—2023年其他年份的2月均值低12.00%,12月份空气相对湿度较2011—2023年其他年份的12月均值高14.90%外,各月份的月平均气温(图1(a))、月平均日低温(图1(b))、月平均日高温(图1(c))及月平均相对湿度(图1(d))均正常,因此,2018年的试验条件具有代表性。

1.3 测定指标

1.3.1 大豆种子活力

采用TTC法^[28]检测不同处理大豆品种种子活力。参考潘同等^[29]的方法用Image J软件测量每个处理大豆种子子叶面积S_总和子叶显色部分面积S_显,即先把图像转为8-bit灰度图像,调整背景和子叶的

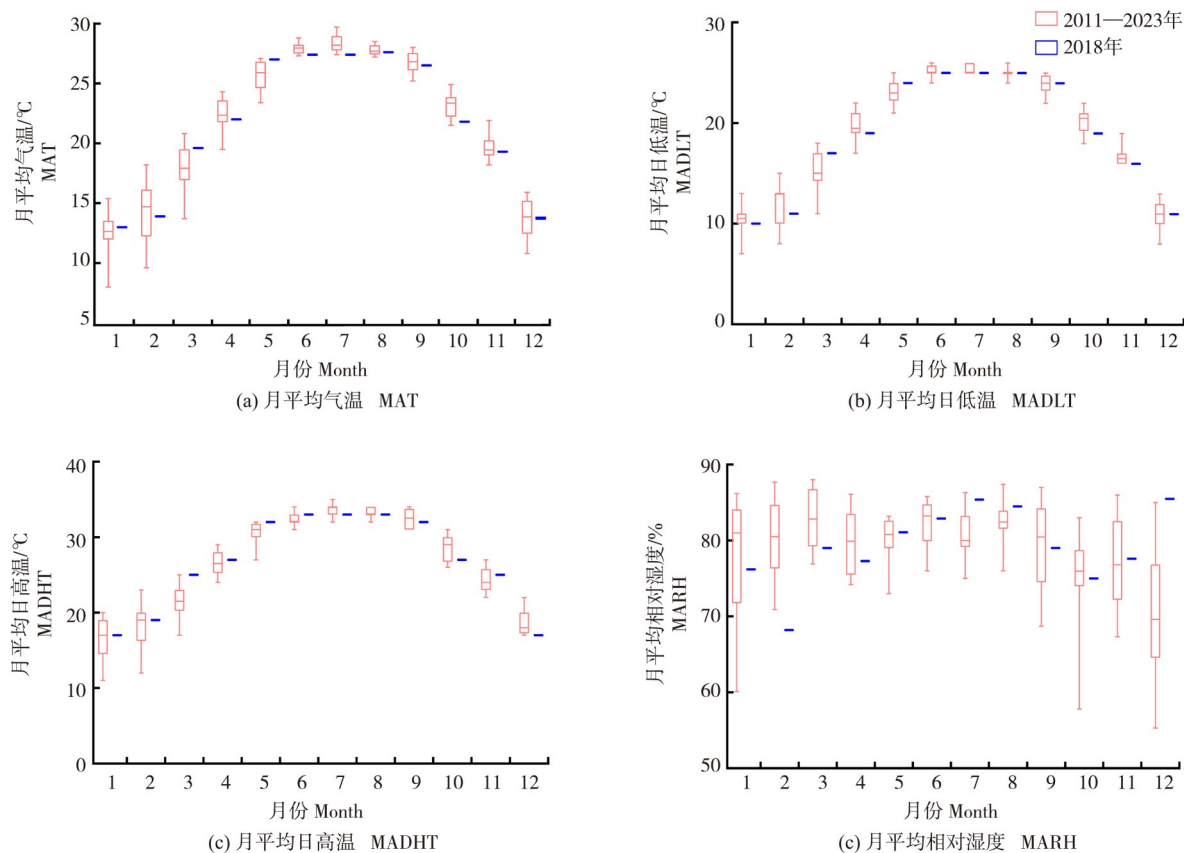


图1 2018年与2011—2023年相同月份气温和湿度的箱图

Fig.1 Box plot of the temperature and humidity in the experimental environment in 2018 and recent years

颜色对比度,用阈值算法测出图片中子叶总面积 $S_{\text{总}}$,继续调整阈值测出显色部分面积,利用公式:显色率(Color rendering index CRI)= $S_{\text{显}}/S_{\text{总}} \times 100\%$,计算TTC处理后种子子叶显色程度,显色率越高,则活力越强。

1.3.2 浸泡液电导率和浸泡液中渗出物含量

5 g种子加80 mL蒸馏水,浸泡12 h,用电导率测定仪(上海雷磁DDS-307A)测定浸泡液电导率(EC),然后取出浸泡液8 mL于10 mL的离心管5 000 r/min离心10 min,取出上清液,烘干离心管称重计算渗出固体物重量(Weight of exuded solids, WDS)。

1.3.3 大豆种子老化相关指标

取各处理种子30粒,分别放于铺有2层湿润发芽纸的培养皿中,然后再覆1层湿润的发芽纸,盖上培养皿盖置于25 °C发芽室24 h后,用苏州科铭生物技术有限公司的POD、SOD、CAT、MDA试剂盒测定各个处理种子的POD、SOD、CAT等酶活性及MDA含量。

1.3.4 大豆发芽率相关性状

参照GB/T 3543.4—1995《农作物种子检验规程-发芽试验》^[30]中的纸床法进行大豆种子发芽试验。取30粒完好的种子放于铺有两层湿润发芽纸的发芽盒(长×宽×高:12 cm×12 cm×6 cm)中,覆上两层湿润的发芽纸,盖上盖置于25 °C的发芽室中发芽。发芽第2天开始,每天统计各处理种子发芽数目,并测量发芽后第3和第5天种子的根长(3dRL、5dRL)。取发芽的种子测定下胚轴长(Hypocotyl length, HL),然后用天平分别测定下胚轴鲜重(Fresh hypocotyl weight, FHW)和根鲜重(Fresh root weight, FRW)。种子发芽相关指标计算方法如下^[2, 31]:

发芽种子数:种子胚根长度 ≥ 1 cm的种子个数。

正常苗数:子叶、真叶芽、下胚轴和根均无明显损伤的苗数^[31]。

发芽势(Germination potential percentage, GPP)=(第3天发芽种子数/供试种子数) $\times 100\%$

发芽率(Germination percentage, GP)=(第5天发芽种子数/供试种子数) $\times 100\%$

正常苗率(Normal seedling percentage, NSP)=(正常苗数/供试种子数)×100%

根伸长速率(Root elongation rate, RER)=(第5天种子根长-第3天种子根长)/2

发芽指数(Germination index, GI)=Σ(G_t/D_t)
式中:G_t为第t日发芽种子数;D_t为发芽试验第t日。

活力指数(Vigor index, VI)=S×Σ(G_t/D_t)
式中:S为幼苗根长,cm。

简化活力指数(GS)=S×GP

1.3.5 大豆种子耐旱和耐浸水能力鉴定

生产上,大豆播种时易遭遇干旱和浸水胁迫,因此用于旱处理(DT)和浸水处理(FT)后种子的GPP、GP、NSP和GI来衡量种子的抗逆能力。其中各处理种子的抗旱能力鉴定采用张海平等^[32]的方法;耐浸水

能力鉴定采用陈文杰等^[31]的方法。

1.4 数据处理

用Excel 2019 和 GraphPad Prism 9.0.0 整理试验数据、作图,用SPSS 17.0 进行方差分析、差异比较分析,处理间的差异显著性采用Duncan法进行单因素多重比较。

2 结果与分析

2.1 测定指标的方差分析

由表1可知,不同贮存处理的种子发芽势(GPP)、发芽率(GP)、正常苗率(NSP)、发芽指数(GI)、显色率(CRI)、发芽第3天种子根长(3dRL)、发芽第5天种子根长(5dRL)、根鲜重(FRW)、下胚轴长(HL)、下胚轴鲜重(FHW)、活力指数(VI)、根伸长速率(RER)、

表1 贮存处理后表型数据方差分析表
Table 1 Variance analysis table of phenotypic data after storage processing

指标 Index	均方 MS			F			P		
	品种(C) Cultivar	贮存(S) Storage	C×S	品种(C) Cultivar	贮存(S) Storage	C×S	品种(C) Cultivar	贮存(S) Storage	C×S
GPP	193.83	16 848.87	109.05	6.10	530.00	3.43	0.007 8	0.000 0	0.015 2
GP	97.53	18 267.80	27.98	3.15	590.27	0.90	0.062 6	0.000 0	0.509 7
NSP	111.42	15 322.12	104.84	1.43	196.22	1.34	0.261 4	0.000 0	0.280 9
GI	3.15	392.74	1.31	6.08	758.90	2.54	0.007 9	0.000 0	0.050 9
CRI	137.17	13 195.46	201.42	14.29	1 374.59	20.98	0.000 1	0.000 0	0.000 0
3dRL	0.31	44.62	0.33	0.44	63.71	0.47	0.650 7	0.000 0	0.825 4
5dRL	0.44	165.74	0.26	0.60	223.99	0.36	0.558 2	0.000 0	0.897 9
5dHL	2.96	68.30	1.15	2.18	50.24	0.85	0.137 0	0.000 0	0.546 3
FRW	0.00	2.84	0.01	0.19	168.66	0.67	0.825 1	0.000 0	0.675 3
HL	2.96	64.69	1.11	1.87	40.85	0.70	0.180 2	0.000 0	0.652 5
FHW	1.37	103.96	0.34	9.63	730.17	2.38	0.001 0	0.000 0	0.063 3
VI	341.84	35 601.39	106.22	2.15	223.50	0.67	0.140 8	0.000 0	0.677 2
RER	0.27	10.43	0.04	1.61	62.65	0.25	0.222 6	0.000 0	0.952 8
WDS	0.07	0.88	0.04	8.30	106.44	4.68	0.002 1	0.000 0	0.003 3
EC	82 775.42	5 376 825.69	2 5401.50	48.77	3 168.13	14.97	0.000 0	0.000 0	0.000 0
MDA	1 463.40	3 895.74	611.46	4.14	11.02	1.73	0.029 8	0.000 1	0.161 3
SOD	724.75	6 324.53	807.36	1.80	15.68	2.00	0.189 3	0.000 0	0.108 8
CAT	13 715.33	11 564.05	1 823.56	1.54	1.30	0.20	0.237 0	0.300 4	0.971 7
POD	484 811.11	6 280 040.74	1 622 885.19	40.24	521.27	134.71	0.000 0	0.000 0	0.000 0

注:GPP,发芽势;GP,发芽率;NSP,正常苗率;GI,发芽指数;CRI,显色率;3dRL和5dRL分别为第3和第5天发芽种子根长;FRW,根鲜重;HL,下胚轴长;FHW,下胚轴鲜重;VI,活力指数;RER,根伸长速率;WDS,渗出固体物重量;EC,电导率;MDA,丙二醛;SOD,超氧化物歧化酶;CAT,过氧化氢酶;POD,过氧化物酶。下同。

Note: GPP, germination potential percentage; GP, germination percentage; NSP, normal seedling percentage; GI, germination index; CRI, color rendering index; 3dRL and 5dRL are root length at the 3rd and 5th day of germination, respectively; FRW, fresh root weight; HL, hypocotyl length; FHW, fresh hypocotyl weight; VI, vigor index; RER, root elongation rate; WDS, weight of exuded solids; EC, electrical conductivity; MDA, malonic dialdehyde; SOD, superoxide dismutase; CAT, catalase; POD, peroxidase. The same below.

渗出固体物重量(WDS)、电导率(EC),种子的丙二醛(MDA)含量及过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)等指标均存在显著差异;品种间的GPP、GI、CRI、FHW、WDS、EC、MDA、POD均存在显著差异;除GPP、CRI、WDS、EC和POD 5个指标的品种与贮存处理间交互显著外,其他指标的则不显著。

由表2可知,种子浸水处理(FT)和干旱处理(DT)对GPP、GP、NSP、GI等指标均产生极显著影响。FT和DT后不同贮存方式的种子GPP、GP、NSP、GI均存在显著差异。GPP、GP、NSP、GI等4个性状的FT与不同贮存处理间交互、DT与不同贮存处理间的交互均达到极显著水平。

表2 FT和DT后表型数据方差分析

Table 2 Variance analysis table of phenotypic data of seed-flooding and drought treatment

胁迫类型 Stress type	变异来源 Sources of variation	F				P			
		GPP	GP	NSP	GI	GPP	GP	NSP	GI
干旱 Drought	干旱(D) Drought	90.67	342.15	152.09	134.22	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	品种(C) Cultivar	0.23	2.06	0.11	5.76	0.7963	0.137 4	0.892 9	0.005 5
	贮存(S) Storage	26.77	95.29	48.45	89.13	0.000 0	0.000 0	0.0000	0.000 0
	D×C	0.25	2.07	0.07	4.63	0.776 8	0.136 9	0.935 5	0.014 1
	D×S	25.13	91.44	38.14	43.48	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	C×S	0.80	2.37	0.51	2.82	0.571 7	0.042 5	0.798 2	0.018 8
浸水 Flooding	浸水(F) Flooding	2 975.99	4 759.22	72.52	893.35	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	品种(C) Cultivar	4.49	2.99	0.22	1.18	0.015 8	0.059 2	0.805 1	0.316 3
	贮存(S) Storage	393.86	567.01	21.65	198.05	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	F×C	4.46	2.99	0.26	1.29	0.016 3	0.058 9	0.772 7	0.284 9
	F×S	384.56	552.64	22.35	125.16	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	C×S	2.57	0.87	0.58	1.03	0.029 5	0.520 7	0.741 0	0.418 2

2.2 不同贮存方式对大豆种子活力的影响

由表3可知,TTC法检测,3个品种A₀、A₁和A₂叶CRI降低至29.46%和26.05%,‘GX 1’种子子叶CRI则降为0.00。

表3 TTC法检测各处理种子的显色率变化

Table 3 Changes of seeds color rendering index of processed cultivar after TTC treatment %

处理 Treatment	品种 Cultivar		
	GC 8	GC 13	GX 1
A ₀	92.17±1.72 ^b	94.58±1.86 ^b	95.62±2.20 ^a
A ₁	94.87±1.89 ^{ab}	98.49±0.80 ^a	96.72±2.20 ^a
A ₂	96.36±1.38 ^a	97.96±0.65 ^a	96.84±1.50 ^a
A ₃	29.46±5.70 ^c	26.05±3.15 ^c	0.00 ^b

注:A₁,密封+硅胶干燥剂;A₂,密封无干燥剂;A₃,牛皮纸信封内;A₁~A₃均为自然存放;A₀,自封袋,-18℃。不同小写字母代表0.05水平上显著差异。下同。

Note: A₁, sealed and dried condition; A₂, sealed condition; A₃, natural storage; A₁~A₃ were all naturally stored; A₀, self-sealing bag, -18℃. Different lowercase letters represent significant differences at the 0.05 level. The same below.

2.3 不同贮存方式对大豆浸泡液渗出固体物重及电导率的影响

由图2可知,3个品种中, A_3 的种子浸泡液的渗出固体物重(WDS)和电导率(EC)均显著高于其他贮存方式,说明 A_3 的种子老化程度最大,‘GX 1’、‘GC 8’和‘GC 13’3个品种 A_3 浸泡液的WDS分别

较 A_0 增加345.91%、269.10%和261.36% ($P < 0.05$),EC较 A_0 分别增加528.71%、567.36%和473.28% ($P < 0.05$)。‘GX 1’和‘GC 13’的 A_1 的种子浸泡液的WDS和EC均与 A_0 无显著差异,3个品种 A_2 的EC均显著高于 A_0 和 A_1 ,‘GX 1’和GC 8’ A_2 的WDS均显著高于 A_0 。

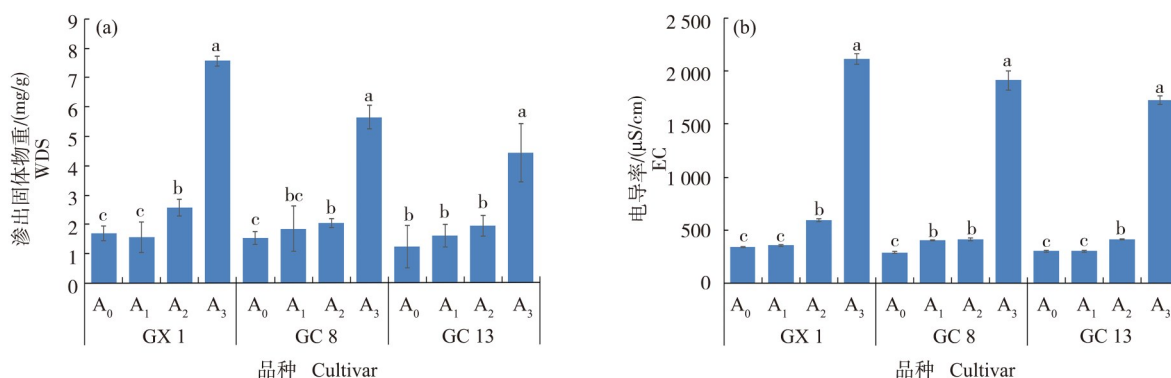


图2 不同贮存条件下大豆种子的浸泡液渗出固体物重(a)和电导率(b)

Fig. 2 The weight of exuded solids (a) and electrical conductivity (b) of soybean seed soaking solutions under different storage condition

2.4 不同贮存方式对大豆种子老化相关指标的影响

由图3可知,不同贮存处理的大豆种子MDA含

量及SOD、POD的酶活均存在显著差异,CAT活性则无显著差异。3个品种 A_0 的MDA含量最低, A_3 和 A_2 的MDA均显著高于 A_0 。3个品种 A_0 和 A_1 种

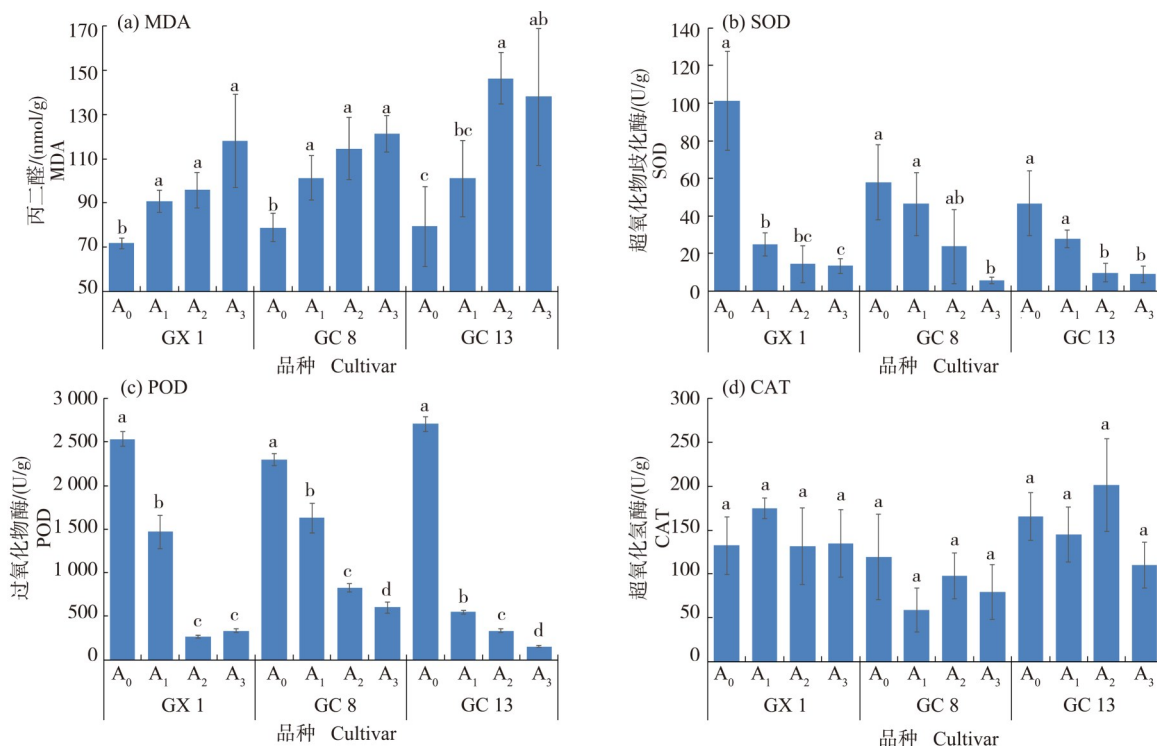


图3 不同贮存条件下大豆种子老化相关指标的变化

Fig. 3 Changes in enzyme activity in soybean seeds under different storage condition

子SOD活性均显著高于 A_3 ,其中‘GX 1’ A_1 种子SOD活性显著低于 A_0 ;3个品种的 A_1 、 A_2 、 A_3 的种子POD活性均显著低于 A_0 , A_1 的种子POD活性显著高于 A_2 和 A_3 。

2.5 不同贮存方式对大豆发芽相关指标的影响

由图4可知,不同贮存条件对大豆发芽势(GPP)、发芽率(GP)、正常苗率(NSP)、发芽指数(GI)等均有显著影响。 A_3 中3个品种的GPP、GP、NSP、GI均为0。 A_2 中3个品种的4个指标较 A_0 均

显著降低,分别降低39.69%、22.81%、53.94%和33.70% ($P<0.05$),但不同品种降低程度不同,如在 A_2 中‘GC 8’的4个指标分别较 A_0 降低51.68%、29.21%、62.07%和23.00% ($P<0.05$),而‘GC 13’分别降低27.06%、12.36%、48.86%和6.00% ($P<0.05$)。 A_1 中3个品种GP、GI较 A_0 均无显著差异,‘GC 8’、‘GC 13’的NSP均显著低于 A_0 。3个品种 A_2 的4个指标分别比 A_1 降低34.60%、19.44%、48.00%和30.01% ($P<0.05$)。

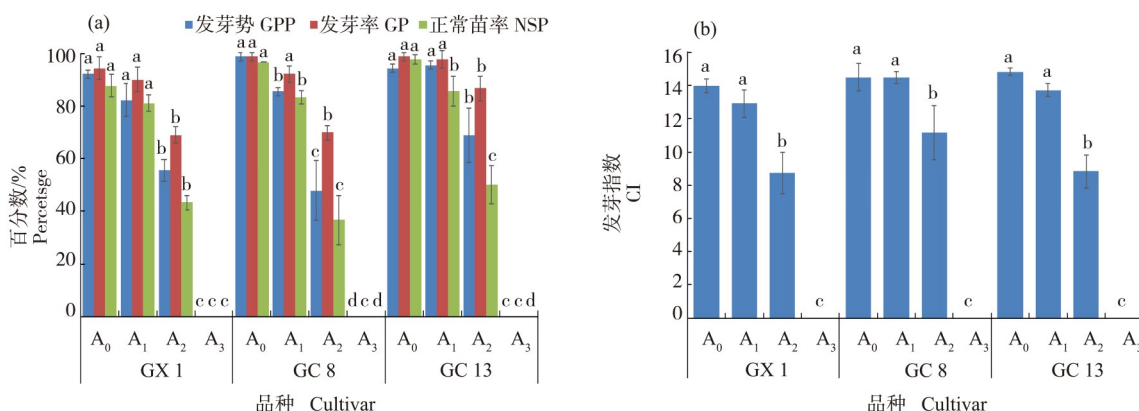


图4 不同贮存方式下大豆种子的发芽势、发芽率、正常苗率(a)和发芽指数(b)的变化

Fig. 4 Changes in germination potential percentage, germination percentage and normal seedling percentage (a) and germination index (b) of soybean under different storage condition treatment

2.6 不同贮存方式对大豆幼苗生长速度指标的影响

由图5可知,3个品种 A_1 的5dRL较 A_0 仅有‘GC 13’达到显著水平,3个品种 A_2 的5dRL较 A_0 均显著变短。3个品种 A_1 的HR均较 A_0 无显著差异,3个品种 A_2 的HR较 A_0 显著变短。3个品种 A_1 和 A_2 的FWH较 A_0 均无显著差异,3个品种 A_1 的FRW较 A_0 均无显著差异,而 A_2 的FRW均显著低于 A_0 。3个品种 A_0 、 A_1 、 A_2 的RER差异不显著。3个品种 A_2 的幼苗VI显著低于 A_0 ,分别降低83.95%、74.21%、78.46% ($P<0.05$)。

2.7 不同贮存方式对大豆种子耐浸水和耐旱能力的影响

由图6可知,浸水处理(FT)中, A_2 ‘GX 1’的GPP、GP、NSP、GI等4个发芽指标均降为0,3个品种的 A_0 和 A_1 的4个发芽指标均显著高于 A_2 ,且‘GX 1’和‘GC 13’的 A_1 的4个发芽指标均显著低于 A_0 ,但‘GC 8’的 A_0 和 A_1 的4个发芽指标均无显著差异。干旱处理(DT)中,3个品种 A_0 和 A_1 的4个发芽

指标均显著高于 A_2 。‘GX 1’和‘GC 8’两品种 A_1 的GP、NSP和GI均显著低于 A_0 ,‘GC 13’则无显著差异;‘GX 1’和‘GC 13’的GPP无显著差异,但‘GC 8’的GPP显著增高(图7)。

由表4可知,FT和DT后,除 A_3 外的其他处理的3个品种种子的4个发芽指标较胁迫处理前均降低,但不同品种的不同贮存方式降低的程度不同。FT中,‘GX 1’和‘GC 13’的 A_1 与 A_2 的4个发芽相关指标较 A_0 的降低幅度大;DT中,3个品种的 A_1 和 A_2 的GP和NSP较 A_0 的降低幅度大,但3个品种 A_1 和 A_2 的GPP较 A_0 的降低幅度小。

3 讨论

3.1 不同贮存方式对大豆种子活力的影响

种子活力的保持可通过改变贮存环境的温湿度条件等来实现^[33]。温度和湿度是影响种子活力的主要外界因素^[12],其中湿度是决定贮存种子活力的关键因素^[34-35]。Harrington等^[36]认为0~50℃,种子含水率在5%~14%,种子含水率每降低1%或温

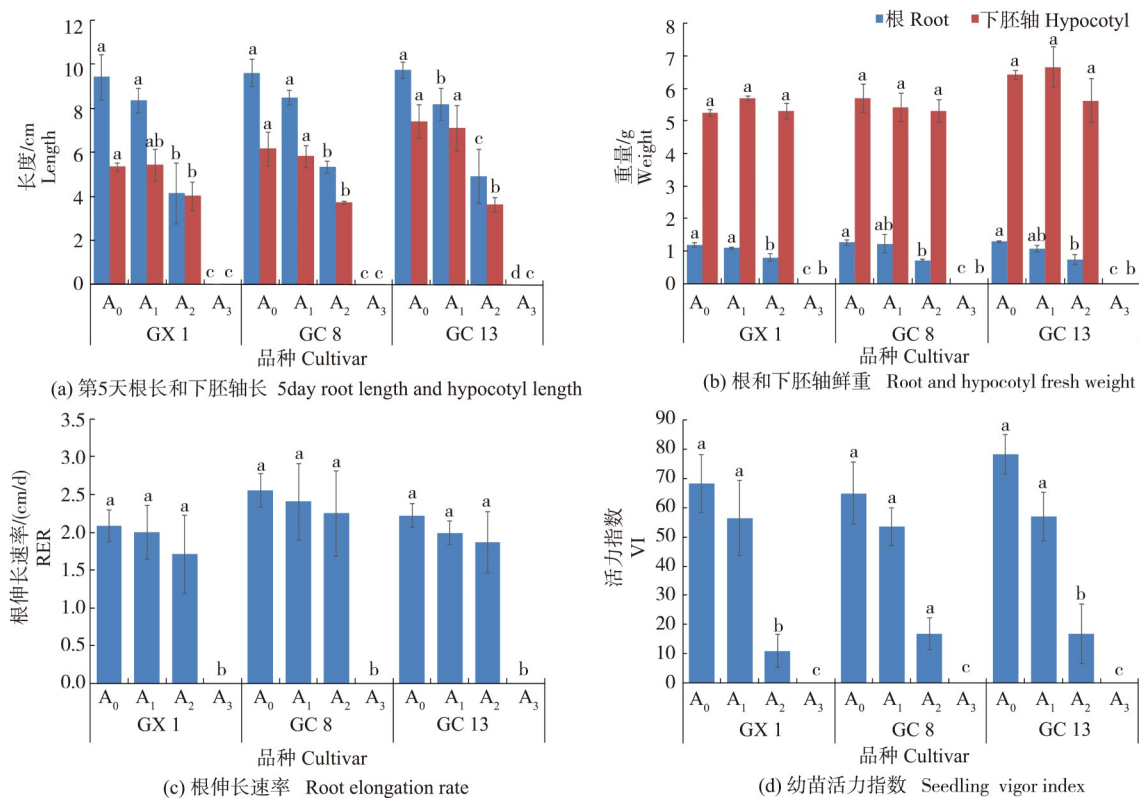


图5 不同贮存处理的大豆幼苗生长速度指标

Fig. 5 Growth speed indicators of soybean seedlings under different storage treatment

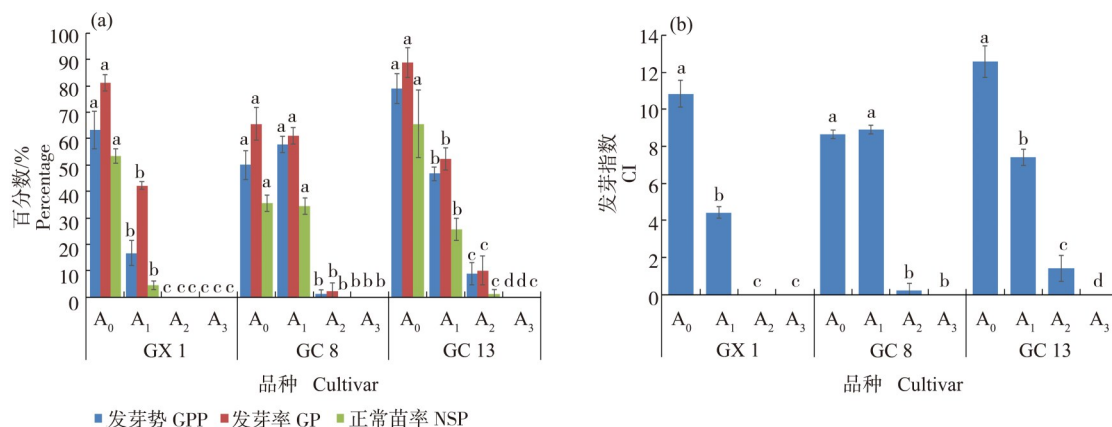


图6 浸水处理后不同贮存条件下种子的发芽势、发芽率和正常苗率(a)及发芽指数(b)变化

Fig. 6 After flooding treatment, the changes in germination potential, germination rate, and normal seedling rate (a) as well as germination index (b) of seeds under different storage condition

度每降低 5℃,种子的寿命可延长 1 倍。胡小荣等^[37]研究发现,种子含水量与贮藏寿命之间呈对数回归关系,种子含水量每降低 1%,其寿命延长 1.3 倍。水分含量降至 10% 以下的种子会达到一种玻璃或玻璃化状态,在此状态下,细胞活动和新陈代谢会大大减慢,进而延长种子寿命^[38-40]。但对种子贮存寿命而言,并非含水量越低越好,已有研究表

明,高温条件下种子含水量低于干燥临界点对种子的寿命不利^[41-43]。本研究中,密封干燥保存(A₁)的种子含水率为 8% 左右,密封保存(A₂)的种子含水率为 11% 左右,而信封装的种子(A₃)含水率则随着外界环境的变化而变化。南方大部分地区雨热同期,如 2011—2023 年南宁全年降雨主要集中在 3—8 月,雨热同期所致的高温高湿不利于作物种子的保

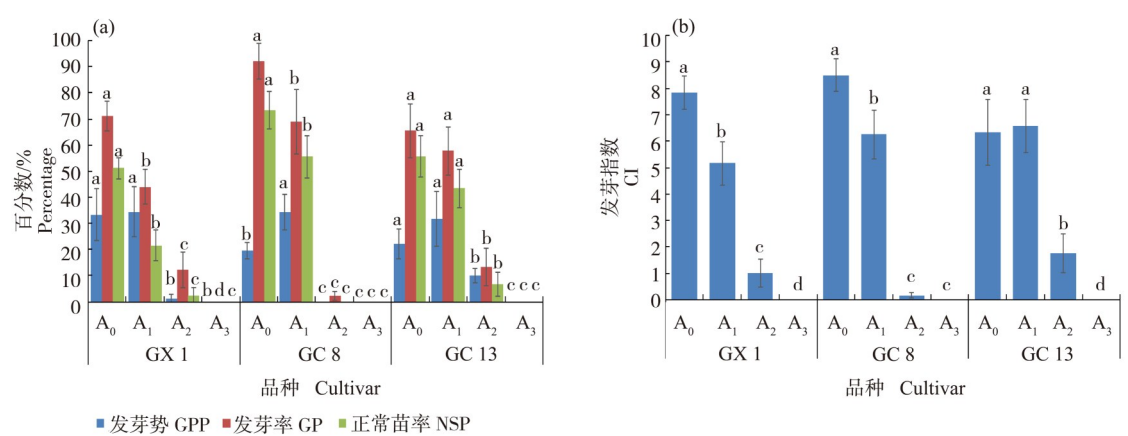


图7 干旱处理后不同贮存条件下种子的发芽势、发芽率和正常苗率(a)及发芽指数(b)变化

Fig. 7 After drought treatment, the changes in germination potential, germination rate, and normal seedling rate (a) as well as germination index (b) of seeds under different storage conditions

表4 浸水和干旱处理后大豆种子发芽相关指标较胁迫前的变化

Table 4 Changes in germination related indexes of soybean seeds after seed-flooding and drought treatment compared to before the stress treatment

品种 Cultivar	处理 Treatment	浸水处理 Flooding treatment				干旱处理 Dry treatment			
		发芽势/% GPP	发芽率/% GP	正常苗率/% NSP	发芽指数 GI	发芽势/% GPP	发芽率/% GP	正常苗率/% NSP	发芽指数 GI
GX 1	A ₀	-28.89 *	-13.33	-34.44*	-3.17	-58.89**	-23.33*	-36.67*	-6.17*
	A ₁	-65.56 **	-47.78**	-76.67**	-8.50*	-47.78**	-46.00**	-59.56**	-7.75**
	A ₂	-55.56**	-68.89**	-43.33*	-8.75**	-54.44**	-56.67**	-41.11**	-7.75**
	A ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
GC 8	A ₀	-48.89 **	-33.33 *	-61.11**	-5.83	-79.33**	-6.67	-23.33	-6.00*
	A ₁	-27.78 *	-31.11 *	-48.89**	-5.58*	-51.11	-23.33**	-27.78*	-8.25**
	A ₂	-46.67 **	-67.78 **	-36.67*	-10.92*	-47.78**	-67.78**	-36.67*	-11.00**
	A ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
GC 13	A ₀	-15.56	-10.00	-32.22 *	-2.25	-72.22**	-33.33*	-41.22*	-8.50**
	A ₁	-48.89**	-45.56**	-60.00 **	-6.32*	-63.78**	-40.00*	-42.22*	-7.15**
	A ₂	-60.00 **	-76.67 **	-48.89**	-7.42**	-58.89**	-73.33**	-43.33*	-7.08**
	A ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注：“+”表示逆境胁迫后的指标值较胁迫前增加，“-”表示逆境胁迫后的指标值较胁迫前降低。*表示在0.05水平上显著，**表示在0.01水平上显著。

Note: + indicates that the indicator values after stress exposure have increased compared to before the stress exposure, - indicates that the indicator values after stress exposure have decreased compared to before the stress exposure. * indicates significance at the 0.05 level, ** indicates significance at the 0.01 level.

存,尤其是广西和广东等地2—3月还易出现“回南天”天气,种子极易回潮。A₁、A₂在自然条件下存放,温度条件相同而种子含水量不同,A₁和A₂种子含水量相差3%左右,但A₁的3个品种发芽势(GPP)、发芽率(GP)、正常苗率(NSP)、发芽指数

(GI)等4个发芽指标较A₂分别提高34.60%、19.44%、48.00%和30.01%;A₂和A₀种子含水量相同而保存温度不同,3个品种A₀较A₂的4个发芽指标分别提高39.69%、22.81%、53.94%和33.70%(图4),说明种子在自然条件下适当控制湿

度存放1年后活力同在一18℃下的活力相当,但会降低保存成本。自然存放(A₃)的3个品种的发芽率相关指标均为0,说明在长期高温高湿的南方气候条件下,有必要对大豆种子采取适当的保存措施,大豆种子在密封干燥的条件下自然存放1年后活力仍可满足生产需要,这种保存措施可用于指导生产上的种子保存。

3.2 不同贮存方式对种子老化程度的影响

种子成熟后便会进入老化的过程,不同贮存条件影响到种子老化的速度^[44]。种子老化是一个不可逆转的生理生化过程,其伴随着活性氧(ROS)的积累、脂质过氧化、膜磷脂的损失等^[44-46],鉴定种子老化程度需要借助不同的指标进行评价^[47]。在本研究中,A₁、A₂和A₃的种子均发生了不同程度的老化。尽管A₃的3个品种GPP、GP、NSP、GI等指标均降为0,但通过TTC法发现,‘GC 8’和‘GC 13’的子叶中依然有部分TTC被还原成TTF,而‘GX 1’的子叶中无TTF形成,说明‘GC 8’和‘GC 13’的种子依然具有一定的活力,而‘GX 1’已完全失活。TTC法中3个品种的A₁和A₂种子子叶中均有大量TTF形成,且A₁和A₂子叶显色率无显著差异(表3),但A₂种子的EC较A₁显著增加,GPP、GP、NSP、GI、VI等指标显著降低,说明A₂的种子老化程度显著高于A₁。‘GX 1’的A₁与A₀种子的RC、WDS、EC、GPP、GP、NSP、GI、RL、SL、FRW、FHW和VI等指标均无显著差异,但A₁较A₀的POD活性显著降低,说明‘GX 1’的A₁种子活力较A₀显著降低。因此对大豆种子活力评价时,应通过多个角度的活力指标综合评价,才能得到大豆种子更准确的活力数据。

Rahul等^[48]研究发现在42℃和RH 100%的条件下人工加速大豆种子老化时,随着处理时间延长,大豆种子的CAT、POD及SOD酶活逐渐降低,Puntarulo等^[49]发现自然老化的大豆种子也存在相似的情况。本研究中A₀的POD及SOD最高,其次为A₁,且A₂和A₃的POD和SOD均显著低于A₁,说明A₂和A₃老化程度高于A₁。但本研究中3个处理的CAT无显著差异。在种子老化过程中,因抗氧化系统效能下降而导致活性氧(ROS)的积累,进而引发脂质过氧化产生MDA,因此种子老化越严重MDA的含量越高^[50-51]。本研究中3个品种A₃和A₂种子的MDA含量均显著高于A₀,也说明了A₂、A₃

的种子发生了不同程度的老化。

老化的种子抗氧化酶活性降低,导致抗氧化能力下降,使得种子遭受干旱等逆境胁迫环境时,更容易受到氧化应激的损伤^[44],Delouche等^[52]提出老化的种子逆境抗性减弱。生产上有些种子做发芽试验时发芽率≥85%,但播种时一旦遇到干旱或水渍情况,田间出苗率大大降低,这一方面可能和种子抗逆境能力有关,另一方面也可能是种子已发生一定程度的老化。本研究利用浸水(FT)和干旱(DT)胁迫测定了不同贮存处理后的种子耐逆境能力,除A₃发芽相关指标均为0外,A₁和A₂的3个品种在胁迫后4个发芽指标较胁迫处理前均降低(表4),但不同品种对逆境胁迫的反应不同,‘GX 1’和‘GC 13’2个品种A₁的种子FT后4个发芽指标降低幅度均显著大于A₀,但‘GC 8’的发芽指标降低幅度却显著小于A₀;DT中‘GX 1’和‘GC 8’两个品种GP、NSP、GI降低幅度均大于A₀,但‘GC 13’的GP、NSP、GI降幅与A₀相差不大。

4 结 论

密封+硅胶干燥剂(A₁)、密封无干燥剂(A₂)和牛皮纸信封(A₃)3种贮存处理的3个大豆品种种子在自然条件(日均温8.2~29.9℃,日均湿度55.3%~88.0%)下存放1年后,均发生不同程度的老化,不同大豆品种对自然老化的抗性不同。3个品种的发芽势(GPP)、发芽率(GP)、正常苗率(NSP)、发芽指数(GI)、活力指数(VI)均表现为A₁>A₂>A₃($P<0.05$),即在南方高温高湿的条件下保存种子用A₁最好、其次为A₂,A₃最差。综上,密封干燥贮存方法可保持南方高温高湿条件下大豆生产用种的种子活力。

参考文献 References

- [1] 王文月,姚志鹏,于洋,葛毅强.我国大豆种业科技创新发展现状及对策建议[J].中国农业科技导报,2024,26(3):1-6
Wang W Y, Yao Z P, Yu Y, Ge Y Q. Scientific and technological innovation of soybean seed industry in China: current situation and strategy[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(3):1-6 (in Chinese)
- [2] 王芳,王丽群,田鑫,顾卫红,麻浩.中国南方春大豆收获前后种子劣变的抗性研究[J].中国农业科学,2007,40(11):2637-2647
Wang F, Wang L Q, Tian X, Gu W H, Ma H. Pre-harvest and post-harvest seed deterioration resistance of 92 spring soybean germplasm in South China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11): 2637-2647

- (in Chinese)
- [3] 唐善德,黄敏珍,成金莲. 春大豆种子劣变的研究[J]. 大豆科学, 1994, 13(3): 230-236
Tang S D, Huang M Z, Cheng J L. Study on seed deterioration of spring soybean[J]. *Soybean Science*, 1994, 13(3): 230-236 (in Chinese)
 - [4] Lei X, Liu W H, Zhao J M, You M H, Xiong C H, Xiong Y, Xiong Y L, Yu Q Q, Bai S Q, Ma X. Comparative physiological and proteomic analysis reveals different involvement of proteins during artificial aging of *Siberian wildrye* seeds[J/OL]. *Plants*, (2020-10-15). DOI: 10.3390/plants9101370
 - [5] Yin X J, He D L, Gupta R, Yang P F. Physiological and proteomic analyses on artificially aged *Brassica napus* seed[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2015-02-25). DOI:10.3389/fpls.2015.00112
 - [6] Kurek K, Plitta-Michalak B, Ratajczak E. Reactive oxygen species as potential drivers of the seed aging process[J]. *Plants*, (2019-06-14). DOI:10.3390/plants8060174
 - [7] Sano N, Rajjou L, North H M, Debeaujon I, Marion-Poll A, Seo M. Staying alive: Molecular aspects of seed longevity[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2016, 57(4): 660-674
 - [8] Lin Q Y, Jiang Y M, Sun A L, Cao P H, Li L F, Liu X, Tian Y L, He J, Liu S J, Chen L M, Jiang L. Fine mapping of *qSS-9*, a major and stable quantitative trait locus, for seed storability in rice (*Oryza sativa* L)[J]. *Plant Breeding*, 2015, 134(3): 293-299
 - [9] Shin J H, Kim S R, An G. Rice aldehyde dehydrogenase7 is needed for seed maturation and viability[J]. *Plant Physiology*, 2009, 149(2): 905-915
 - [10] Li T, Zhang Y M, Wang D, Liu Y, Dirk L M A, Goodman J, Downie A B, Wang J M, Wang G Y, Zhao T Y. Regulation of seed vigor by manipulation of raffinose family oligosaccharides in maize and *Arabidopsis thaliana*[J]. *Molecular Plant*, 2017, 10(12): 1540-1555
 - [11] Tao Y, Chen M, Shu Y J, Zhu Y J, Wang S, Huang L Y, Yu X W, Wang Z K, Qian P P, Gu W H, Ma H. Identification and functional characterization of a novel BEL1-LIKE homeobox transcription factor *GmBLH4* in soybean[J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2018, 134(2): 331-344
 - [12] Liu J, Qin W T, Wu H J, Yang C Q, Deng J C, Iqbal N, Liu W G, Du J B, Shu K, Yang F, Wang X C, Yong T W, Yang W Y. Metabolism variation and better storability of dark-versus light-coloured soybean (*Glycine max* L Merr) seeds[J]. *Food Chemistry*, 2017, 223: 104-113
 - [13] Zinsmeister J, Leprince O, Buitink J. Molecular and environmental factors regulating seed longevity[J]. *Biochemical Journal*, 2020, 477(2): 305-323
 - [14] Paravar A, Maleki Farahani S, Rezazadeh A. How storage circumstance alters the quality of seeds of *Lallemantia iberica* and *Lallemantia royleana* produced under maternal drought stress[J/OL]. *Environmental and Experimental Botany*, (2023-11-04). DOI:10.1016/j.envexpbot.2023.105537
 - [15] Lv H X, Xu H, Yang K, Yan M. Comparative metabolomic analyses reveal metabolites associated with seed deterioration in Chinese cabbage[J/OL]. *Scientia Horticulturae*, (2024-05-01). DOI: 10.1016/j.scienta.2024.113170
 - [16] Zhang G Y, Bahn S C, Wang G L, Zhang Y R, Chen B B, Zhang Y L, Wang X M, Zhao J. PLDα1-knockdown soybean seeds display higher unsaturated glycerolipid contents and seed vigor in high temperature and humidity environments[J/OL]. *Biotechnology for Biofuels*, (2019-01-04). DOI:10.1186/s13068-018-1340-4
 - [17] Wei J P, Liu X L, Li L Z, Zhao H H, Liu S S, Yu X W, Shen Y Z, Zhou Y L, Zhu Y J, Shu Y J, Ma H. Quantitative proteomic, physiological and biochemical analysis of cotyledon, embryo, leaf and pod reveals the effects of high temperature and humidity stress on seed vigor formation in soybean[J/OL]. *BMC Plant Biology*, (2022-03-26). DOI: 10.1186/s12870-020-02335-1
 - [18] Shu Y J, Zhou Y L, Mu K B, Hu H M, Chen M, He Q Y, Huang S C, Ma H, Yu X W. A transcriptomic analysis reveals soybean seed pre-harvest deterioration resistance pathways under high temperature and humidity stress[J]. *Genome*, 2020, 63(2): 115-124
 - [19] Waterworth W, Balobaid A, West C. Seed longevity and genome damage[J/OL]. *Bioscience Reports*, (24-02-28). DOI: doi. org/10.1042/BSR20230809
 - [20] 蒋海玉,杜燕,刘其宁. 贮藏年限对油菜种子发芽特性的影响[J]. 种子, 2001, 20(3): 13-15
Jiang H Y, Du Y, Liu Q N. Effects of storage period on seed germinating characteristics of rape (*B. napus* L)[J]. *Seed*, 2001, 20(3): 13-15 (in Chinese)
 - [21] Bentsink L, Alonso-Blanco C, Vreugdenhil D, Tesnier K, Groot S P, Koornneef M. Genetic analysis of seed-soluble oligosaccharides in relation to seed storability of *Arabidopsis* [J]. *Plant Physiology (Bethesda)*, 2000, 124(4): 1595-1604
 - [22] Manjunath Prasad C T M, Kodde J, Angenent G C, de Vos R C H, Diez-Simon C, Mumm R, Hay F R, Siricharoen S, Yadava D K, Groot S P C. Experimental rice seed aging under elevated oxygen pressure: Methodology and mechanism[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2022-12-1). DOI:10.3389/fpls.2022.1050411
 - [23] Revilla P, Butrón A, Rodríguez V M, Malvar R A, Ordás A. Identification of genes related to germination in aged maize seed by screening natural variability[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(14): 4151-4157
 - [24] Calucci L, Capocchi A, Galleschi L, Ghiringhelli S, Pinzino C, Saviozzi F, Zandomenighi M. Antioxidants, free radicals, storage proteins, purindolines, and proteolytic activities in bread wheat (*Triticum aestivum*) seeds during accelerated aging[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(13): 4274-4281
 - [25] Roach T, Nagel M, Börner A, Eberle C, Kranner I. Changes in tocochromanols and glutathione reveal differences in the mechanisms of seed ageing under seedbank conditions and controlled deterioration in barley[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 156: 8-15
 - [26] 钟吉萍,彭凡嘉. 自然条件下不同贮存方式对包衣棉种发芽率的影响[J]. 湖南农业科学, 2003, 5: 66-44
Zhong J P, Peng F J. Effects of different storage treatment in natural environment to germination percentage of coating cotton seeds[J], *Hunan Agricultural Sciences*, 2003, 5: 66-44 (in Chinese)
 - [27] Freire J M, Rouws J R C, Breier T B, Ataide G M. Drying and storage of *Melanoxylon brauna* Schott. seeds[J]. *Brazilian Journal of Biology*, 2021, 81(2): 464-473
 - [28] 舒英杰,王爽,陶源,宋利茹,黄丽燕,周玉丽,麻浩. 生理成熟期高温高湿胁迫对春大豆种子活力、主要营养成分及种皮结构的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1380-1386
Shu Y J, Wang S, Tao Y, Song L R, Huang L Y, Zhou Y L, Ma H. Effects of high temperature and humidity stress at the physiological maturity

- stage on seed vigor, main nutrients and coat structure of spring soybean [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(5): 1380-1386 (in Chinese)
- [29] 潘同, 吴伟锋, 侯浩楠, 许亚男, 涂柯玲, 顾日良, 王建华, 孙群. 机器视觉技术对氯化三苯基四氮唑染色法鉴定玉米种子生活力的改进[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 106-113
- Pan T, Wu W F, Hou H N, Xu Y N, Tu K L, Gu R L, Wang J H, Sun Q. Improvement of machine vision technology for determination of maize seed viability by tetrazole staining [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(5): 106-113 (in Chinese)
- [30] GB/T 3543.4-1995 农作物种子检验规程-发芽试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996
- GB/T 3543.4-1995, Crop seed inspection regulations - germination test [S]. Beijing: Standards Press of China, 1996
- [31] 陈文杰, 梁江, 汤复跃, 韦清源, 郭小红, 陈渊. 不同大豆种质种子耐浸水能力鉴定[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(3): 381-390
- Chen W J, Liang J, Tang F Y, Wei Q Y, Guo X H, Chen Y. Analysis of seed-flooding tolerance of soybean germplasms [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2018, 40(3): 381-390 (in Chinese)
- [32] 张海平, 张俊峰, 陈妍, 张海生, 闫凯, 穆志新. 大豆种质资源萌发期耐旱性评价[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(1): 130-138
- Zhang H P, Zhang J F, Chen Y, Zhang H S, Yan K, Mu Z X. Identification and evaluation of soybean germplasm resources for drought tolerance during germination stage [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(1): 130-138 (in Chinese)
- [33] 华国栋, 李冠喜, 浦汉春, 王多明, 相华. 小麦种子活力的影响因素与控制及种子贮藏技术[J]. 作物杂志, 2009 (6): 89-91
- Hua G D, Li G X, Pu H C, Wang D M, Xiang H. Influencing factors and control techniques on wheat seed vitality and its storage technique [J]. *Crops*, 2009, 6: 89-91 (in Chinese)
- [34] Hay F R, Rezaei S, Buitink J. Seed moisture isotherms, sorption models, and longevity [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2022-06-02). DOI: 10.3389/fpls.2022.891913
- [35] Pirredda M, Fañanás-Pueyo I, Onate-Sánchez L, Mira S. Seed longevity and ageing: A review on physiological and genetic factors with an emphasis on hormonal regulation [J/OL]. *Plants*, (2023-12-21). DOI: 10.3390/plants13010041
- [36] Harrington J F. Seed storage and longevity [J]. *Seed Biology*, 1972, (3): 145-245
- [37] 胡小荣, 陶梅, 卢新雄, 辛萍萍, 周红立. 大葱种子贮存最适含水量与贮藏寿命研究[J]. 江西农业学报, 2006, 18(6): 62-66
- Hu X R, Tao M, Lu X X, Xin P P, Zhou H L. Studies on optimal moisture content and longevity of Chinese onion seed stored at different temperature [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2006, 18(6): 62-66 (in Chinese)
- [38] Gerna D, Ballesteros D, Arc E, Stöggli W, Seal C E, Marami-Zonouz N, Na C S, Kranner I, Roach T. Does oxygen affect ageing mechanisms of *Pinus densiflora* seeds A matter of cytoplasmic physical state [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2022, 73(8): 2631-2649
- [39] Ballesteros D, Walters C. Detailed characterization of mechanical properties and molecular mobility within dry seed glasses: Relevance to the physiology of dry biological systems [J]. *Plant Journal*, 2011, 68(4): 607-619
- [40] Buitink J, Leprince O. Glass formation in plant anhydrobiotes: Survival in the dry state [J]. *Cryobiology*, 2004, 48(3): 215-228
- [41] Li Y, Qu J N, Yang X M, An L. A report on ultra-dry storage experiment of *Zygophyllum xanthoxylon* seeds [J]. *Botanical Studies*, 2008, 49(3): 243-251
- [42] Niedzielski M, Walters C, Luczak W, Hill L M, Wheeler L J, Puchalski J. Assessment of variation in seed longevity within rye, wheat and the intergeneric hybrid triticale [J]. *Seed Science Research*, 2009, 19(4): 213-224
- [43] Mira S, Estrelles E, González-Benito M E. Effect of water content and temperature on seed longevity of seven Brassicaceae species after 5 years of storage [J]. *Plant Biology*, 2015, 17(1): 153-162
- [44] 韩沛霖, 李月明, 刘梓毫, 周万里, 杨帆, 王竞红, 阎秀峰, 蔺吉祥. 植物种子老化的生理学研究进展 [J]. 生物工程学报, 2022, 38(1): 77-88
- Han P L, Li Y M, Liu Z H, Zhou W L, Yang F, Wang J H, Yan X F, Lin J X. The physiology of plant seed aging: a review [J]. *Sheng Wu Gong Cheng Xue Bao*, 2022, 38(1): 77-88 (in Chinese)
- [45] Mira S, Hill L M, González-Benito M E, Ibáñez M A, Walters C. Volatile emission in dry seeds as a way to probe chemical reactions during initial asymptomatic deterioration [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2016, 67(6): 1783-1793
- [46] Waterworth W M, Bray C M, West C E. The importance of safeguarding genome integrity in germination and seed longevity [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(12): 3549 - 3558
- [47] 鲜萱, 齐传东, 陈琦, 覃思嘉, 郑禾, 辛燕, 陶增蛟, 郭仰东. 人工老化处理对菠菜种子生理生化指标及萌发相关基因表达量的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(3): 45-53
- Xian X, Qi C D, Chen Q, Qin S J, Zheng H, Xin Y, Tao Z J, Guo Y D. Effect of artificial aging treatment on vitality of spinach seeds [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(3): 45-53 (in Chinese)
- [48] Chandel R K, Geetanly, Khan Z, Radhamani J. Changes in enzyme activity during accelerated ageing in soybean (*Glycine max* (L) Merrill) [J/OL]. *Legume Genomics and Genetics*, (2016-8-24). DOI: 10.5376/lgg.2016.07.0009
- [49] Puntarulo S, Boveris A. Effect of natural and accelerated aging on the hydroperoxide metabolism of soybean embryonic axes [J]. *Plant Science*, 1990, 68(1): 27-32
- [50] 张海波, 杨桂娟, 高卫东, 祝燕, 黄放, 裴昊斐, 李庆梅. 香椿种子特定贮藏条件下活力变化的研究 [J]. 林业科学研究, 2019, 32(2): 152-159
- Zhang H B, Yang G J, Gao W D, Zhu Y, Huang F, Pei H F, Li Q M. Study on the seed vigor of *Toona sinensis* under specific storage conditions [J]. *Forest Research*, 2019, 32(2): 152-159 (in Chinese)
- [51] 常海文, 张凤兰, 杨忠仁, 孔德娟, 郑清岭, 郝丽珍. 沙葱种子贮藏陈化过程中的生理生化应答反应 [J]. 植物生理学报, 2015, 51(7): 1075-1081
- Chang H W, Zhang F L, Yang Z R, Kong D J, Zheng Q L, Hao L Z. Physiological and biochemical responses of *Allium mongolicum* seeds to storage aging [J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(7): 1075-1081 (in Chinese)
- [52] Delouche J C, Baskin C C. Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seed lots [J]. *Seed Science And Technology*, 1973, 1(2): 427-452

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 陈文杰, 硕士, 广西壮族自治区农业科学院经济作物研究所副研究员, 广西大学校外硕士生导师, 毕业于南京农业大学农学院遗传学专业, 主要从事大豆遗传育种研究。主持和参与国家及省部级项目 16 项; 获广西壮族自治区科技进步奖二、三等奖各 1 项; 主持或参与培育大豆新品种 12 个; 获国家发明专利授权 8 件; 以第一作者身份先后在《中国农业科学》《南方农业学报》等期刊上发表学术论文 18 篇。



通讯作者简介: 陈渊, 广西壮族自治区农业科学院经济作物研究所研究员, 主要从事大豆遗传育种及栽培生理研究。现任国家大豆产业技术体系南宁综合试验站站长、全国大豆技术集成创新南宁分中心主任等职。主要从事大豆栽培及遗传育种研究, 曾先后参与国家“十二五”至“十四五”大豆育种攻关、抗逆高效转基因大豆新品系(种)培育等项目研究, 承担国家公益性行业(农业)专项、国家科技支撑重点项目等多项国家级课题, 以及参加“九五”至“十四五”期间广西多项省级项目研究。参与育成优良大豆新品种 30 多个, 并在广西及周边省区得到大面积应用, 取得显著的社会和经济效益。获广西壮族自治区科技进步二等奖 3 项, 广西科技进步三等奖 4 项, 广西农科院科技进步一等奖 5 项, 大北农科技促进奖 1 项。授权国家发明专利 7 件, 先后在 *BMC Plant Biology*、《中国农业科学》等期刊上发表学术论文 30 多篇。