



贮藏条件对菘蓝种子萌发和幼苗生理特性的影响

王宏霞, 蔡子平*, 王国祥, 张立军, 武伟国

(甘肃省农业科学院经济作物与啤酒原料研究所/甘肃省农业科学院中药材研究所/甘肃省中药材种质改良与质量控制工程实验室, 甘肃兰州 730070)

摘要:【目的】明确贮藏条件对菘蓝种子萌发和幼苗生理特性的影响,掌握贮藏期间萌发能力与生理特性的变化规律,为菘蓝种子的科学贮藏及高效利用提供参考依据。【方法】以贮藏前种子为对照(CK),设4种贮藏条件:C为自然常温干藏(20~25℃)、CG为自然常温硅胶混合贮藏(20~25℃)、D为低温贮藏(0~4℃)、DG为低温硅胶混合贮藏(0~4℃),分别在贮藏的第0、90、180和270 d时取样,测定种子的发芽率、发芽势和发芽指数,以及幼苗中渗透调节能力、酶促抗氧化系统酶活力和丙二醛(MDA)等指标,并进行各测定指标间的相关分析。【结果】随着贮藏时间的延长,菘蓝种子的发芽率、发芽势和发芽指数均下降,至贮藏结束,C、CG、D和DG条件下的种子发芽率较CK分别显著下降26.50%、14.53%、31.63%和27.35% ($P < 0.05$,下同),发芽势分别下降14.28%、3.06%、22.44%和23.47%,发芽指数分别显著下降32.31%、23.28%、38.90%和45.33%,且CG条件下各指标明显高于其他贮藏条件。此时,酶促抗氧化系统逐渐失去活性,超氧化物歧化酶(SOD)活性逐渐下降,过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性先升后降,而MDA含量在初期下降较明显、后期下降趋于平缓,可溶性糖含量表现出先降后升的变化趋势,可溶性蛋白含量则呈现一直下降趋势。相关分析结果表明,种子萌发特性与幼苗的抗氧化酶系统和贮藏物质呈正相关,但与MDA含量无显著相关性 ($P > 0.05$);在整个贮藏期,种子的萌发指标与SOD和CAT活性变化的相关性更高。【结论】菘蓝种子适宜贮藏的条件为20~25℃下与硅胶1:1混合,SOD和CAT活性可反映出菘蓝种子的活力状况,适用于菘蓝种子活力水平的判断。

关键词: 菘蓝; 贮藏; 种子萌发; 生理特性

中图分类号: S567.209.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-1191(2022)04-1161-09

Effects of storage conditions on seed germination and seedling physiological characteristics of *Isatis indigotica* Fort.

WANG Hong-xia, CAI Zi-ping*, WANG Guo-xiang, ZHANG Li-jun, WU Wei-guo

(Economic Crops and Beer Raw Materials Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences/Chinese Herbal Medicine Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences/Gansu Chinese Herbal Medicine Germplasm Improvement and Quality Control Engineering Laboratory, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract:【Objective】To investigate the effects of storage conditions on seed germination and seedling physiological characteristics of *Isatis indigotica* Fort., and to investigate the changes of germination capacity and physiological characteristics during storage were investigated to provide theoretical and technical basis for scientific storage and efficient utilization of *I. indigotica* seeds.【Method】The seeds before storage as control (CK), designed with four storage conditions: C was natural dry storage at room temperature (20-25℃), CG was natural normal temperature storage (20-25℃) with silica gel, D was low temperature storage (0-4℃) and DG was low temperature storage (0-4℃) with silica gel. Sample seeds for analyses were taken after 0, 90, 180 and 270 days of storage. to determine the germination rate, germination vigor and germination index of seed. Seedlings were grown from the stored seed samples and their capacity for osmotic regulation, their enzyme activities of the enzymatic antioxidant system, malondialdehyde (MDA) content and other indicators measured. The correlations between these measured indicators were determined and analyzed.【Result】The germination rate,

收稿日期: 2021-06-16

基金项目: 中央引导地方创新平台项目(2016-A-02); 甘肃省农业科技创新项目(2020GAAS12, 2021GAAS30)

通讯作者: 蔡子平(1982-), <https://orcid.org/0000-0002-6226-009X>, 研究员, 主要从事药用植物驯化栽培及良种繁育研究与示范推广工作, E-mail: gsczpz@163.com

第一作者: 王宏霞(1980-), <https://orcid.org/0000-0002-2247-9716>, 副研究员, 主要从事西北特色药用植物品种选育与生态种植研究工作, E-mail: 313535864@qq.com

germination vigor and germination index of *I. indigotica* seeds decreased with the extension of storage time. By the end of storage, the percentage germination rate of C, CG, D, and DG significantly decreased by 26.50%, 14.53%, 31.63%, and 27.35%, respectively, compared with CK ($P < 0.05$, the same below). The germination vigor decreased by 14.28%, 3.06%, 22.44%, and 23.47%, respectively. The germination index also significantly decreased by 32.31%, 23.28%, 38.90%, and 45.33%, respectively. The indexes under the CG condition were higher than under the other storage conditions. The enzymatic antioxidant system gradually lost its activity, which was manifested as a gradual decrease in SOD, an initial rise then fall in POD and CAT, with a significant decrease in MDA in the early stage, followed by a gentle decrease in the later stages. Soluble sugar content appeared to decrease first and then increase, while soluble protein consistently decreased. Correlation analysis results showed that germination characteristics of seeds were positively correlated with the antioxidant enzyme system and storage substances of seedling, but had no significant correlation with MDA content ($P > 0.05$). During the whole storage period, the correlation between seed germination and SOD and CAT activities was the highest. 【Conclusion】The most suitable storage condition for *I. indigotica* seeds is 1:1 mixed with silica gel at 20-25 °C. The activities of SOD and CAT can be used as a reliable indicator of the vitality of *I. indigotica* seeds.

Key words: *Isatis indigotica* Fort.; storage; seed germination; physiological characteristics

Foundation items: Central-government-guided Local Government Science and Technology Innovation Platform Project (2016-A-02); Gansu Agricultural Science and Technology Innovation Project (2020GAAS12, 2021GAAS30)

0 引言

【研究意义】种子作为一切植物的根源,在植物的生长发育过程中发挥着至关重要的作用。种子质量是保证作物出苗早、齐、壮、健的先决条件,而贮藏期间自身的含水量、贮藏温度和时间是影响种子安全贮藏的主要因素(刘娟等,2016)。不同贮藏条件下,随着贮藏时间的延长,种子逐渐老化,使得种子的萌发能力[发芽率(王玉娇等,2018;金小雯等,2019)、发芽势(常海文等,2015)、发芽指数(陈玲玲等,2017)、活力指数(龙金飞等,2017;熊毅等,2020)等]降低甚至丧失,同时伴随着种子内部复杂的生理生化特性变化,包括酶促抗氧化系统、细胞膜透性、贮藏物质含量及有害物质积累等一系列的变化(Ghive et al., 2007; Kaewnaree et al., 2011; Parkhey et al., 2012),从而给农业生产带来巨大的经济损失(Groot et al., 2012)。但不同种子经贮藏后萌发能力和内部理化性质的变化存在差异,且目前对引起种子老化的真正机理尚无定论。菘蓝(*Isatis indigotica* Fort.)为十字花科菘蓝属植物,其干燥根称为板蓝根,干燥叶为大青叶,二者均为常用中药,具有清热解毒、凉血利咽之功效(王茜等,2020)。在生产中,菘蓝采用有性繁殖。然而,由于菘蓝种子不耐贮藏,不当的贮藏方式会加速其老化进程,严重影响板蓝根和大青叶的产量与品质。因此,研究贮藏条件对菘蓝种子萌发及生理生化特性的影响,对保证其药材的产量与品质具有重要意义。【前人研究进展】前人在结缕草(*Zoysia japonica*)(钱俊芝等,2000)、羊草(*Leymus chinensis*)(张晓媛等,2012)、披碱草(*Elymus dahuricus*)(张蕊思等,2016)、狗尾草(*Setaria viridis*)(马向丽等,2017)等种子老化研究

中发现,将种子在自然条件下贮藏2~3年后,其活力急剧下降,基本丧失利用价值;而低温条件下贮藏鸭茅(*Dactylis glomerata*)种子5年(张旭等,2018)和台湾肖楠[*Calocedrus formosana* (Florin) Florin]种子150 d(陈义堂,2021)仍保持较高的种子活力。张海波等(2019)研究表明,温度不超过15 °C、含水量低于12.2%和温度在15~20 °C、含水量低于9.1%时,更有利于香椿[*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.]种子活力的保持。贮藏条件不当尤其是高温高湿环境会使种子的老化程度不断加重,同时,种子因老化而面对外界逆境胁迫挑战的脆弱性增加,导致种子活力降低,种子内部也发生一系列的生理生化反应(刘娟等,2016)。杨忠仁等(2021)研究发现,沙葱种子老化过程中,呼吸速率变弱,呼吸关键酶活性整体降低,导致种子萌发能力下降;赵凯等(2021)研究表明,花生种子自然老化过程中,随着种子老化程度加深,其发芽指标和油酸含量、油亚比(O/L)、含油量和粗蛋白含量均下降。关于菘蓝种子的研究,近年来主要集中在调亏灌溉等逆境胁迫(贺永斌和王宏霞,2020;王泽义等,2020;周晨莉等,2020)及缓解逆境胁迫(吕婷婷等,2013;贾海凤和张海艳,2014;韩多红等,2020,2021)等方面。【本研究切入点】目前有关贮藏条件下菘蓝种子老化过程及其萌发、生理生化特性变化方面的研究鲜见报道。【拟解决的关键问题】分析菘蓝种子在不同贮藏条件下萌发能力与生理生化特性的变化规律,旨在探索出延长菘蓝种子寿命的有效贮藏方法,为菘蓝种子的科学贮藏及高效利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试菘蓝种子为甘肃省农业科学院选育的菘蓝新品系LL13-5。在甘肃省榆中县定远镇繁种,种子采收后用牛皮纸袋包装,带回实验室自然阴干备用。

1.2 试验方法

1.2.1 种子贮藏温度设计 设4种贮藏条件,分别为:C:自然常温干藏(20~25 ℃);CG:自然常温硅胶混合贮藏(20~25 ℃);D:低温贮藏(0~4 ℃);DG:低温硅胶混合贮藏(0~4 ℃)。以贮藏前种子为对照(CK)。供试种子装入自封袋中,常温样品置于室内自然温度下贮藏,硅胶混合贮藏为种子与硅胶按1:1比例混合贮藏,低温贮藏样品置于0~4 ℃冰箱内贮藏。

1.2.2 测定指标及方法

1.2.2.1 种子发芽指标测定 贮藏后分别在第0、90、180和270 d时将每种贮藏条件下的种子随机取出150粒,每处理设3个重复,置于25 ℃恒温箱中进行发芽试验,统计其发芽势、发芽率和发芽指数。

发芽率(%)=已发芽种子数/供试种子总数×100

发芽势(%)=规定天数发芽种子数/供试种子总数×100

发芽指数= $\sum(G_i/D_i)$

式中, G_i 为*t*时间内的发芽种子数, D_i 为对应的发芽日数。

1.2.2.2 生理指标测定 发芽结束后,取幼苗叶片迅速冲洗干净,用滤纸吸干水分,液氮速冻后放置超低温冰箱中,用于生理指标测定。采用紫外吸收

法测定可溶性蛋白含量;采用蒽酮比色法测定可溶性总糖含量;分别采用NBT光还原法、愈创木酚显色法和比色法测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性;采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定丙二醛(MDA)含量(邹琦,2000)。

1.3 统计分析

采用Excel 2010整理统计数据和制图,SPSS 17.0对试验数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 贮藏条件对菘蓝种子萌发的影响

由表1可看出,在不同贮藏条件(C、CG、D和DG)下,随着贮藏时间的延长,菘蓝种子的发芽率、发芽势和发芽指数均呈下降趋势。贮藏前期90 d时,各条件下种子的发芽率、发芽势和发芽指数与对照(CK)相比,下降差异均不显著($P>0.05$,下同)。在270 d贮藏结束时,各贮藏条件下种子发芽率较CK分别显著下降26.50%、14.53%、31.63%和27.35% ($P<0.05$,下同),其中D条件下种子发芽率最低(53.33%);各贮藏条件下种子发芽势较CK分别下降14.28%、3.06%、22.44%和23.47%,但在CG条件下,整个贮藏期种子发芽势与CK相比均未达显著差异,而贮藏至270 d时,CG条件下种子发芽势为63.33%,明显高于其他贮藏条件的发芽势。在菘蓝种子的整个贮藏期,种子的发芽指数下降明显,贮藏至180 d时,D条件下种子的发芽指数与CK相比显著下降37.21%;贮藏结束时,所有贮藏条件下种子的发芽指数较CK分别显著下降32.31%、23.28%、38.90%和45.33%,其中DG条件下种子的发芽指数最低,仅为

表 1 不同贮藏条件对菘蓝种子萌发的影响

Table 1 Effects of different storage conditions on seed germination of *I. indigotica* Fort.

贮藏时间(d) Storage time	贮藏条件 Storage condition	发芽率(%) Germination rate	发芽势(%) Germination energy	发芽指数 Germination index
0(CK)		78.00±0.04ab	65.33±0.06ab	6.53±0.38a
90	C	77.33±0.06abc	72.00±0.05a	6.10±0.36ab
	CG	78.67±0.04a	73.33±0.04a	6.49±0.38a
	D	79.33±0.01a	73.33±0.08a	6.56±0.77a
	DG	77.33±0.04abc	69.33±0.08ab	6.04±0.67ab
180	C	62.67±0.08de	61.33±0.07abc	5.94±0.74ab
	CG	67.33±0.08bcd	63.33±0.04abc	5.74±0.45ab
	D	58.00±0.04de	55.33±0.04bc	4.10±0.40cde
	DG	64.67±0.11de	62.00±0.10abc	5.18±0.58bc
270	C	57.33±0.04de	56.00±0.02bc	4.42±0.26cde
	CG	66.67±0.05cd	63.33±0.07abc	5.01±0.47bcd
	D	53.33±0.03e	50.67±0.01c	3.99±0.36de
	DG	56.67±0.08de	50.00±0.14c	3.57±1.24e

同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters in the same column represented significant difference($P<0.05$)

3.57,与CG条件下的发芽指数(5.01)存在显著差异。贮藏结束时,CG条件下种子的发芽率、发芽势和发芽指数均明显高于其他贮藏条件。

2.2 贮藏条件对菘蓝幼苗生理特性的影响

2.2.1 贮藏条件对幼苗SOD、POD和CAT活性的影响

由图1-A可知,不同贮藏条件下菘蓝幼苗的SOD活性随贮藏时间延长均呈下降趋势,贮藏前180 d,各个贮藏条件下幼苗SOD活性均无显著差异,贮藏至270 d时,D和DG条件下SOD活性急剧下降,与C和CG条件下SOD活性达显著性差异。由图1-B可看出,随着贮藏时间的延长,各贮藏条件下菘蓝幼苗的POD活性呈现不同的变化规律。在C条件下,POD活性呈先降后升的变化趋势,在180 d时最低;在CG条件下则呈先升后降的抛物线型变化趋势,在90 d时达最大值,并与其他贮藏条件下的幼苗POD活性存在显著差异;在D条件下,POD活性呈降—升—降的变化趋势,且在90 d时活性最低,180 d时达最大值,并与其他贮藏条件下的幼苗POD活性存在显著差异;在DG条件下,幼苗的POD活性随贮藏时间的延长则呈一直递减的变化趋势。从图1-C可看出,在不同贮藏条件下,随着贮藏时间的延长,菘蓝幼苗的CAT活性也呈现不同的变化趋势。在C贮藏条件下,CAT活性随贮藏时间的延长呈递增的变化趋势,而在CG条件下,幼苗CAT活性在前90 d逐渐增加并达最大值,且显著高于其他贮藏条件下幼苗的CAT活性;在D和DG条件下,幼苗的CAT活性在整个贮藏期内均呈升—降—升的变化趋势,即二者在前90 d时,CAT活性均逐渐增加并达最大值,之后迅速下降,至180 d时,幼苗的CAT活性与C和CG条件相比均达显著差异水平,之后随着贮藏时间的延长CAT活性又增加,且在270 d时,DG条件下幼苗的CAT活性回升迅速,并与D条件有显著差异。

2.2.2 贮藏条件对幼苗MDA含量的影响 由图2可看出,不同贮藏条件下菘蓝幼苗的MDA含量随着贮藏时间的延长均呈下降趋势。在贮藏前期(0~90 d),各贮藏条件下幼苗的MDA含量急剧下降,但各条件之间差异不显著;之后直至贮藏结束,各条件下幼苗的MDA含量继续下降,但下降幅度不明显,且在贮藏中期(90~180 d)时各条件之间差异也不显著;在贮藏后期,CG与DG条件之间差异显著,但二者与C和D条件均未达显著差异水平。

2.2.3 贮藏条件对幼苗可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响 由图3-A可看出,在贮藏期间,各贮藏条件下菘蓝幼苗的可溶性糖含量总体呈下降趋势;在

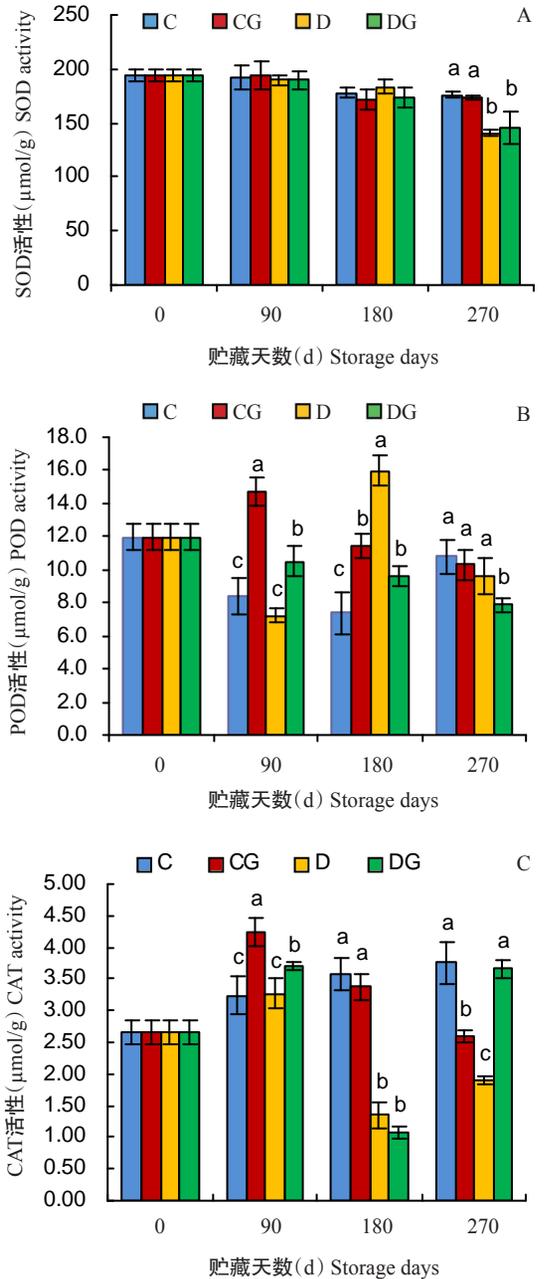


图1 不同贮藏条件对菘蓝幼苗SOD、POD和CAT活性的影响

Fig.1 Effects of different storage conditions on activity of SOD,POD and CAT of *I. indigotica* Fort. seedlings

图柱上不同小写字母表示同一贮藏天数不同贮藏条件之间差异显著(P<0.05)。图2和图3同

Different lowercase letters on the column represented significant differences among storage conditions for the same storage days (P<0.05). The same was applied in Fig.2 and Fig.3

C和CG条件下,随着贮藏时间的延长,幼苗的可溶性糖含量呈先升后降的变化趋势,且在贮藏180 d时降至最低,并与D条件差异达显著水平;在D条件下,可溶性糖含量呈降—升—降的变化趋势,在90 d时最低,180 d时达最大值,并与其他贮藏条件差异显著,之后迅速下降,在贮藏后期与CG条件存在显著差异;在DG条件下,可溶性糖含量则呈一直下降的变

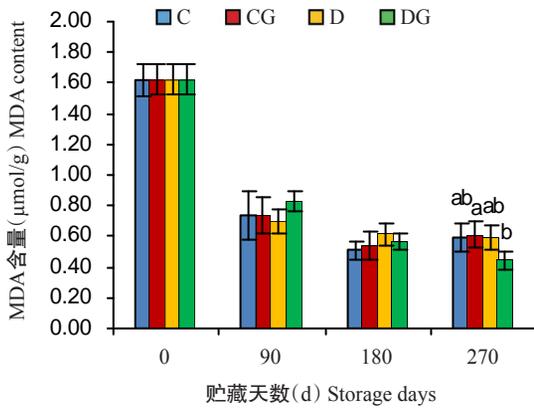


图2 不同贮藏条件对菘蓝幼苗MDA含量的影响

Fig.2 Effects of different storage conditions on MDA content of *I. indigotica* Fort. seedlings

化趋势。由图3-B可看出,随着贮藏时间的延长,各贮藏条件下菘蓝幼苗的可溶性蛋白含量总体也呈下降趋势;其中C和CG条件下,幼苗可溶性蛋白含量持续下降,而D和DG条件下的幼苗可溶性蛋白含量呈降—升—降的变化趋势。

2.3 菘蓝种子贮藏过程中各指标间的相关分析结果

根据表1的结果,选取最优的贮藏CG条件下的发芽和生理数据进行相关分析,结果(表2)显示,菘蓝种子在贮藏前(0 d)种子的萌发特性与SOD和CAT活性呈显著或极显著($P < 0.01$,下同)正相关,而与可溶性糖和可溶性蛋白含量呈极显著负相关,与POD活性和MDA含量无显著相关性;菘蓝种子贮藏270 d后,种子的萌发特性与SOD活性、CAT活性和可溶性糖含量呈极显著正相关,而与POD活性、MDA含量和可溶性蛋白含量无显著相关性。由此可知,菘蓝种子在贮藏过程中,种子的萌发特性与种子的抗氧化酶系统和贮藏物质密切相关,将菘蓝种子贮藏后,种子的萌发特性与抗氧化酶系统和贮藏物质的相关性高于贮藏前。

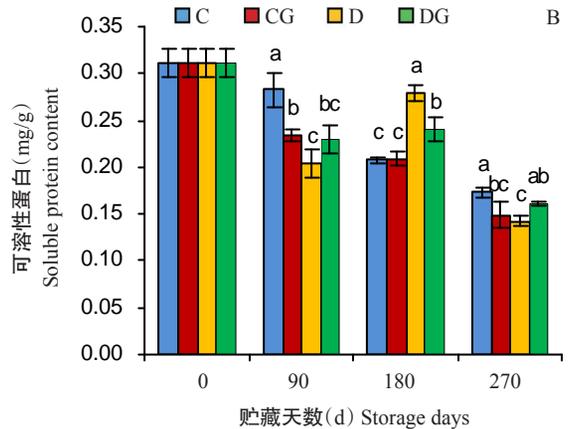
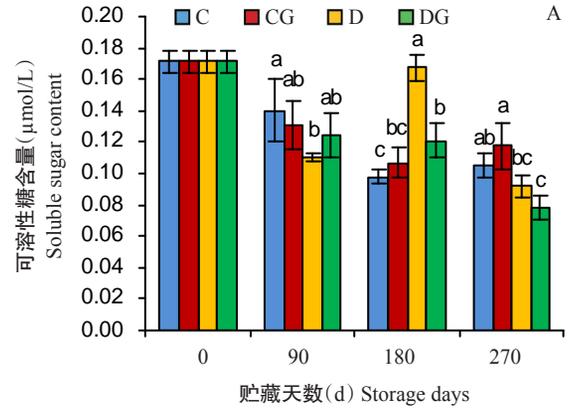


图3 不同贮藏条件对菘蓝幼苗贮藏物质含量的影响

Fig.3 Effects of different storage conditions on storage substance contents of *I. indigotica* Fort. seedlings

3 讨论

种子的萌发状况可直观地反映出种子的活力水平。当种子完成后熟达完全生理性成熟时,随着贮藏时间的延长,其活力逐渐下降,萌发能力也随之下降(方矫阳等,2020)。在本研究中,菘蓝种子在贮藏过程中,随着贮藏时间的延长,4种贮藏条件下发芽率、发芽势和发芽指数较CK均明显下降,说明种

表2 贮藏0 d(右上)及270 d(左下)菘蓝种子各指标间的相关分析结果

Table 2 Correlation analysis of indexes of *I. indigotica* Fort. seeds at 0 day(top right) and 270 days(bottom left) of storage

指标 Index	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	CAT 活性 CAT activity	MDA 含量 MDA content	可溶性糖 含量 Soluble sugar content	可溶性蛋白 含量 Soluble protein content	发芽率 Germination rate	发芽势 Germination energy	发芽指数 Germination index
SOD活性 SOD activity	1.000	-0.634*	-0.914**	0.746*	-0.335	0.701*	0.892**	0.616*	0.895**
POD活性 POD activity	0.727*	1.000	0.266	0.042	0.941**	0.107	0.154	0.218	0.226
CAT活性 CAT activity	0.962**	0.512	1.000	-0.952	-0.075	-0.930**	0.655*	0.882**	0.617*
MDA含量 MDA content	0.242	-0.490	0.498	1.000	0.377	0.998**	-0.255	-0.384	-0.415
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.996**	0.784*	0.935**	0.158	1.000	0.436	-0.803**	-0.835**	-0.999**
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	0.225	0.832*	-0.050	-0.891**	0.308	1.000	-0.887**	-0.994**	-0.874**
发芽率 Germination rate	0.849**	0.254	0.961**	0.319	0.800**	-0.325	1.000	0.933	0.827
发芽势 Germination energy	0.993**	0.643	0.987**	0.353	0.980**	-0.110	0.904**	1.000	0.871
发芽指数 Germination index	0.899**	0.353	0.984**	0.242	0.858**	-0.224	0.995**	0.944**	1.000

*表示显著相关($P < 0.05$), **表示极显著相关($P < 0.01$)

* represented significant correlation($P < 0.05$), ** represented extremely significant correlation($P < 0.01$)

子的活力降低,种子逐渐开始老化,与燕麦(金小雯等,2019)、香椿(方骄阳等,2020)等种子随贮藏时间延长其萌发能力均下降的研究结果一致。通过对测定的6项生理指标与该条件下的种子萌发指标进行相关分析,结果表明,种子贮藏270 d后,各生理指标与发芽势和发芽指数的相关性更高。由此可知,相较于发芽率,发芽势和发芽指数对于贮藏期菘蓝种子的老化程度更敏感,也更能反映出菘蓝种子的活力状况。

SOD、POD和CAT作为植物体内重要的抗氧化酶,通过其抗氧化特性且相互协调来消除植物体内的活性氧(ROS)物质,对植物种子贮藏和保持较高的萌发率,以及早期幼苗的生长状态具有至关重要的作用(徐田军等,2012;赵颖等,2019;赵嫚等,2021)。本研究结果表明,将菘蓝种子在不同的条件下贮藏,其幼苗生理活性差异较大。不同的贮藏条件下,SOD活性呈逐渐下降趋势,而POD活性先升后降,分析原因可能是在贮藏初期产生大量的过氧化物,POD产生应激反应,通过迅速提升其活性以清除过氧化物维持代谢平衡。在CG条件下,在贮藏初期POD和CAT活性迅速上升高于CK,表明在贮藏初期通过提高POD和CAT活性来清除H₂O₂。随着贮藏时间的延长,POD和CAT活性逐渐降低,其原因可能是贮藏期积累了大量的ROS,使细胞中自由基的产生与清除之间平衡关系破灭,影响细胞的正常代谢活动,进而影响种子的萌发能力(宋正熊等,2014)。对菘蓝早期幼苗的抗氧化酶活性与种子的萌发指标进行相关分析,结果显示整个贮藏期种子萌发指标与幼苗SOD和CAT活性变化的相关性更高。由此可见,早期幼苗的SOD和CAT活性在很大程度上可反映菘蓝种子的活力水平。

种子贮藏期间,种子的内含物质随着贮藏时间的延长而发生变化,导致种子的活力降低甚至丧失。究其原因有很多,其中种子体内氧化还原酶活性、有害物质含量及细胞膜透性的变化是导致种子活力降低的共性之一(刘娟等,2016;张海波等,2019)。MDA是种子中膜脂氧化的最终产物,其含量通常反映机体内膜脂的过氧化程度,通过测定早期幼苗MDA含量变化趋势,可了解种子贮藏条件的差异(常海文等,2015)。在本研究中,随着贮藏时间的延长,各贮藏条件下菘蓝幼苗MDA含量均下降,之后趋于稳定,从相关分析结果也可看出,菘蓝种子的萌发特性与幼苗中MDA含量无显著相关性,充分说明在整个贮藏期间,菘蓝幼苗中MDA无过多积累,故MDA并未加剧早期幼苗内膜脂的过氧化程度,

MDA含量降低不是导致菘蓝种子老化及萌发能力降低的主要原因,但是否因为贮藏期太短还需进一步研究。

可溶性糖和可溶性蛋白是种子的主要贮藏物质。在贮藏过程中可溶性糖和可溶性蛋白缓慢分解成小分子物质,植物体通过调控这些小分子物质来减缓由于外界环境条件变化引起的伤害(祝煜中等,2018)。种子萌发率的高低是种子活力的直接表现,通常情况下种子活力与贮藏物质合成量呈正相关,故种子活力下降时,种子萌发率降低,相应的贮藏物质合成量减少(王玉娇等,2018)。因此,随着种子贮藏时间的延长,种子活力下降,种子中的贮藏物质可溶性糖和可溶性蛋白含量会呈下降趋势(彭健等,2013;成广雷等,2015)。在本研究中,早期幼苗的可溶性糖含量出现波浪式下降趋势,与沙葱(常海文等,2015)、芥蓝(屈煜莹等,2020)种子在贮藏陈化过程中可溶性糖呈持续下降的变化趋势不一致,可能是由于贮藏时间不充足,稳定的变化趋势未表现出来。本研究中,菘蓝幼苗可溶性蛋白含量整体上呈下降趋势,与在罗布麻(张永娟等,2011)、燕麦(金小雯等,2019)上的研究结果一致。虽然不同的贮藏条件下,菘蓝幼苗的可溶性蛋白含量出现先降后升再降的变化趋势,但整体仍表现出下降趋势。究其原因可能在贮藏初期,种子经过短暂的自我修复,使膜的伤害程度降低,幼苗体内贮藏物质的合成量增加,而在贮藏后期,由于膜的伤害程度增大,导致贮藏物质损耗增大。从相关分析结果来看,在贮藏后期,可溶性糖与菘蓝种子萌发指标的相关性明显高于可溶性蛋白,表明菘蓝种子中可溶性蛋白在贮藏期间的损耗较大,对后期种子的萌发影响较小。

4 结论

随着贮藏期的延长,菘蓝种子萌发能力逐渐下降;同时幼苗中SOD和CAT活性可反映出菘蓝种子的活力状况,适用于菘蓝种子活力水平的判断。在自然常温(20~25℃)条件下,种子与硅胶1:1混合可减缓种子萌发下降速度,该条件可用于菘蓝种子常温贮藏,在生产中推广应用。

参考文献:

- 常海文,张凤兰,杨忠仁,孔德娟,郑清岭,郝丽珍. 2015. 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, 51(7): 1075-1081. [Chang H W, Zhang F L, Yang Z R, Kong D J, Zheng Q L, Hao L Z. 2015. Physiological and biochemical responses of *Allium mongolicum* seeds to storage aging[J]. Plant Physiology Journal, 51(7):

- 1075-1081.] doi:10.13592/j.cnki.pj.2015.0110.
- 陈玲玲,程航,张阳阳,张晔,王思琪,毛培胜. 2017. 不同贮藏年限菘蓝苜蓿种子活力及生理特性的研究[J]. 种子, 36(3):23-27. [Chen L L, Cheng H, Zhang Y Y, Zhang Y, Wang S Q, Mao P S. 2017. Study on viability and physiological characteristics of Aohan alfalfa seeds with different storage time[J]. Seed, 36(3):23-27.] doi:10.16590/j.cnki.1001-4705.2017.03.023.
- 陈义堂. 2021. 贮藏方法和时间对台湾肖楠种子发芽率的影响[J]. 福建林业科技, 48(2):73-75. [Chen Y T. 2021. Effect of storage method and time on germination rate of *Calocedrus formosana* seeds[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 48(2):73-75.] doi:10.13428/j.cnki.fjlk.2021.02.015.
- 成广雷,张海娇,赵久然,刘春阁,王元东,王晓光,王荣焕,陈传永,徐田军. 2015. 临界胁迫贮藏条件下不同基因型玉米种子活力及生理变化[J]. 中国农业科学, 48(1):33-42. [Cheng G L, Zhang H J, Zhao J R, Liu C G, Wang Y D, Wang X G, Wang R H, Chen C Y, Xu T J. 2015. Vigor and physiological changes of different genotypes of maize seed (*Zea mays* L.) under critical stress storage conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 48(1):33-42.] doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.01.04.
- 方骄阳,祝燕,王彩云,叶可可,高卫东,张子晗,闫晶晶,李庆梅. 2020. 香椿种子人工老化过程中生理生化的变化[J]. 林业科学研究, 33(6):163-169. [Fang J Y, Zhu Y, Wang C Y, Ye K K, Gao W D, Zhang Z H, Yan J J, Li Q M. 2020. Physiological and biochemical changes of *Toona sinensis* seeds during artificial aging[J]. Forest Research, 33(6):163-169.] doi:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.06.020.
- 韩多红,王恩军,张勇,王红霞,王艳,王富. 2021. 干旱胁迫下外源亚精胺、甜菜碱对菘蓝种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 作物杂志, (1):118-123. [Han D H, Wang E J, Zhang Y, Wang H X, Wang Y, Wang F. 2021. Effects of exogenous spermidine and glycine betaine on seed germination and physiological characteristics of *Isatis indigotica* Fort. seedlings under drought stress[J]. Crops, (1):118-123.] doi:10.16035/j.issn.1001-7283.2021.01.017.
- 韩多红,王恩军,张勇. 2020. 稀土微肥对盐胁迫下菘蓝种子萌发及幼苗抗氧化系统的影响[J]. 南方农业学报, 51(12):2927-2935. [Han D H, Wang E J, Zhang Y. 2020. Effects of rare earth micronutrients on seed germination and antioxidant system of *Isatis indigotica* Fort. under salt stress[J]. Journal of Southern Agriculture, 51(12):2927-2935.] doi:10.3969/j.issn.2095-1191.2020.12.008.
- 贺永斌,王宏霞. 2020. 全生育期水分胁迫对菘蓝形态特征和生理特性的影响[J]. 中兽医医药杂志, 39(4):23-28. [He Y B, Wang H X. 2020. Morphology and physiological characteristics of *Isatis indigotica* Fort. under water stress in the whole growth period[J]. Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine, 39(4):23-28.] doi:10.13823/j.cnki.jtvcvm.2020.04.004.
- 贾海凤,张海艳. 2014. 外源NO对NaCl胁迫下板蓝根种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 中草药, 45(1):118-124. [Jia H F, Zhang H Y. 2014. Effects of exogenous nitric oxide on seed germination and seedling physiological characteristics of *Isatis indigotica* under NaCl stress[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 45(1):118-124.] doi:10.7501/j.issn.0253-2670.2014.01.023.
- 金小雯,张炜炜,赵桂琴,柴继宽,王苗苗,焦润安,孙浩洋,黎蓉. 2019. 贮藏年限对燕麦种子生理生化特性的影响[J]. 草地学报, 27(2):356-363. [Jin X W, Zhang W W, Zhao G Q, Chai J K, Wang M M, Jiao R A, Sun H Y, Li R. 2019. Effects of storage years on seed physiological and biochemical characteristics of oat[J]. Acta Agrestia Sinica, 27(2):356-363.] doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2019.02.012.
- 刘娟,归静,高伟,马俊峰,王佳珍. 2016. 种子老化的生理生化与分子机理研究进展[J]. 生态学报, 36(16):4997-5006. [Liu J, Gui J, Gao W, Ma J F, Wang Q Z. 2016. Review of the physiological and biochemical reactions and molecular mechanisms of seed aging[J]. Acta Ecologica Sinica, 36(16):4997-5006.] doi:10.5846/stxb201502040289.
- 龙金飞,郑清岭,杨忠仁,郝丽珍,张凤兰,常瑞青,张红霞,王艳慧. 2017. 不同年限对沙芥属植物种子寿命及贮藏物质的影响[J]. 种子, 36(10):15-20. [Long J F, Zheng Q L, Yang Z R, Hao L Z, Zhang F L, Chang R Q, Zhang H X, Wang Y H. 2017. Effect of seed longevity and storage material in *Pugionium Gaertn* at different storage years[J]. Seed, 36(10):15-20.] doi:10.16590/j.cnki.1001-4705.2017.10.015.
- 吕婷婷,肖云华,吴群,唐晓清,王康才. 2013. 外源5-氨基乙酰丙酸对盐胁迫下菘蓝种子萌发及幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 33(10):2037-2042. [Lü T T, Xiao Y H, Wu Q, Tang X Q, Wang K C. 2013. Effect of exogenous 5-aminolevulinic acid on seed germination and antioxidase activities of *Isatis indigotica* seedlings under salt stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 33(10):2037-2042.]
- 马向丽,何超,罗富成,许文花,段新慧. 2017. 水引发对不同贮藏年限纳罗克非洲狗尾草种子活力的影响[J]. 中国草地学报, 39(5):16-23. [Ma X L, He C, Luo F C, Xu W H, Duan X H. 2017. Effects of hydro-priming on the vigor of *Setaria sphacelata* cv. Narok's seeds in different storage period[J]. Chinese Journal of Grassland, 39(5):16-23.] doi:10.16742/j.zgdx.2017-05-03.
- 彭健,李在留,李磊,王成,李樱花,郭宏伟. 2013. 不同贮藏条件对掌叶木种子生理特性的影响[J]. 北方园艺, (7):63-66. [Peng J, Li Z L, Li L, Wang C, Li Y H, Guo H W. 2013. Effects of different storage condition on physiological characteristics of *Handeliendron bodinieri* seeds[J]. Northern Horticultural, (7):63-66.]
- 钱俊芝,韩建国,倪小琴,孙洁峰. 2000. 贮藏期对结缕草种子生理生化的影响[J]. 草地学报, 8(3):177-185. [Qian J

- Z, Han J G, Ni X Q, Sun J F. 2000. A study on physiological and biochemical changes in storing zoysiagrass seed [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 8(3):177-185. doi:10.3969/j.issn.1007-0435.2000.03.004.
- 屈煜莹, 黄鑫, 徐强辉, 何绍恒, 柴喜荣, 康云艳, 杨暹, 赵普艳. 2020. 人工老化处理对芥蓝种子生理生化特性的影响[J]. *种子*, 39(8):24-29. [Qu Y Y, Huang X, Xu Q H, He S H, Chai X R, Kang Y Y, Yang X, Zhao P Y. 2020. Effects of artificial aging on physiological and biochemical characteristics of *Brassica alboglabra* Bailey seeds[J]. *Seed*, 39(8):24-29.] doi:10.16590/j.cnki.1001-4705.2020.08.024.
- 宋正熊, 朱列书, 尹佳, 王祖富, 郭东海, 岳伦勇, 廖雪芳. 2014. 低温胁迫对烟草幼苗生化指标的影响及相关性分析[J]. *江西农业学报*, 26(2):99-101. [Song Z X, Zhu L S, Yin J, Wang Z F, Guo D H, Yue L Y, Liao X F. 2014. Effects of chilling stress on biochemical indexes of tobacco seedlings and correlation analysis[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 26(2):99-101.] doi:10.19386/j.cnki.jxnyxb.2014.02.026.
- 王茜, 黄勇, 李斌, 李贺敏, 周艳, 高致明, 张红瑞. 2020. 不同菘蓝种质主要表型性状对品质和产量的影响[J]. *河南农业科学*, 49(7):44-52. [Wang Q, Huang Y, Li B, Li H M, Zhou Y, Gao Z M, Zhang H R. 2020. Effects of main phenotypic characters on quality and yield of *Isatis indigotica* Fort. [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 49(7):44-52.] doi:10.15933/j.cnki.1004-3268.2020.07.006.
- 王玉娇, 吴薇, 郭忠军, 常旭虹, 王德梅, 陶志强, 石书兵, 赵广才. 2018. 小麦种子老化处理对发芽指标及根系的影响[J]. *核农学报*, 32(12):2423-2430. [Wang Y J, Wu W, Guo Z J, Chang X H, Wang D M, Tao Z Q, Shi S B, Zhao G C. 2018. Effects of aging treatment on germination index and root system of wheat[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 32(12):2423-2430.] doi:10.11869/j.issn.100-8551.2018.12.2423.
- 王泽义, 张恒嘉, 王玉才, 张万恒, 高佳. 2020. 膜下滴灌调亏绿洲菘蓝农艺性状与产量的通径分析[J]. *水资源与水工程学报*, 31(5):248-254. [Wang Z Y, Zhang H J, Wang Y C, Zhang W H, Gao J. 2020. Path analysis of agronomic traits and yield of oasis *Isatis indigotica* with regulated deficit irrigation under mulched drip irrigation [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 31(5):248-254.] doi:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.05.36.
- 熊毅, 熊艳丽, 杨晓鹏, 赵文达, 雷雄, 余青青, 马啸, 张新全. 2020. 外源褪黑素对盐胁迫下老化燕麦种子萌发及幼苗的影响[J]. *中国草地学报*, 42(1):7-14. [Xiong Y, Xiong Y L, Yang X P, Zhao W D, Lei X, Yu Q Q, Ma X, Zhang X Q. 2020. Effects of exogenous melatonin on seeds germination and seedling of aged oat under salt stress[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 42(1):7-14.] doi:10.16742/j.zgdx.20190162.
- 徐田军, 董志强, 兰宏亮, 裴志超, 高娇, 解振兴. 2012. 低温胁迫下聚糠萘合剂对玉米幼苗光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. *作物学报*, 38(2):352-359. [Xu T J, Dong Z Q, Lan H L, Pei Z C, Gao J, Xie Z X. 2012. Effects of PASP-KT-NAA on photosynthesis and antioxidant enzyme activities of maize seedlings under low temperature stress[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 38(2):352-359.] doi:10.3724/SP.J.1006.2012.00352.
- 杨忠仁, 郭霏, 张东, 宋晓青, 宋煜静, 秦怡, 张凤兰, 郝丽珍. 2021. 不同贮藏年限沙葱种子萌发及呼吸生理的变化[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 49(11):91-96. [Yang Z R, Guo F, Zhang D, Song X Q, Song Y J, Qin Y, Zhang F L, Hao L Z. 2021. Changes of germination and respiration physiology of *Allium mongolicum* seeds under different storage times[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 49(11):91-96.] doi:10.13207/j.cnki.jnwf.2021.11.012.
- 张海波, 杨桂娟, 高卫东, 祝燕, 黄放, 裴昊斐, 李庆梅. 2019. 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*, 32(2):152-159. [Zhang H B, Yang G J, Gao W D, Zhu Y, Huang F, Pei H F, Li Q M. 2019. Study on the seed vigor of *Toona sinensis* under specific storage conditions[J]. *Forest Research*, 32(2):152-159.] doi:10.13275/j.cnki.lykxyj.2019.02.022.
- 张蕊思, 安沙舟, 卡斯达尔·努尔旦别克, 施宠. 2016. 高温处理对披碱草种子内生真菌的杀灭效果及发芽活力的影响[J]. *草业科学*, 33(9):1651-1657. [Zhang R S, An S Z, Kasidaer·Nuerdanbieke, Shi C. 2016. Effect of high temperature treatments on viability of *Epichloë* seeds of *Elymus dahuricus*[J]. *Pratacultural Science*, 33(9):1651-1657.] doi:10.11829/j.issn.1001-0629.2015-0588.
- 张晓媛, 赵利, 阿那尔, 毛培胜. 2012. 控制劣变对不同含水量羊草种子生理特性的影响[J]. *草地学报*, 20(5):899-906. [Zhang X Y, Zhao L, A N R, Mao P S. 2012. Effect of controlling deterioration on physiological characteristics of *Leymus chinensis* seed with different moisture contents[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 20(5):899-906.]
- 张旭, 聂刚, 黄琳凯, 周洲, 唐露, 张新全. 2018. 低温贮藏不同年限的鸭茅种子活力变化[J]. *草业科学*, 35(10):2450-2456. [Zhang X, Nie G, Huang L K, Zhou Z, Tang L, Zhang X Q. 2018. Effect of different cold storage periods on *Dactylis glomerata* seed vigor[J]. *Pratacultural Science*, 35(10):2450-2456.] doi:10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0239.
- 张永娟, 韩蕊, 原焯, 梁虹, 冯子蓉, 戎郁萍. 2011. 罗布麻种子老化过程中的生理生化特性[J]. *草业科学*, 28(12):2130-2135. [Zhang Y J, Han R, Yuan Y, Liang H, Feng Z R, Rong Y P. 2011. Physiological and biochemical characteristics of *Apocynum venetum* seeds in the process of artificial aging[J]. *Pratacultural Science*, 28(12):2130-2135.]
- 赵凯, 李珊珊, 马倩, 周帆, 李忠峰, 马兴立, 张幸果, 殷冬梅. 2021. 花生种子自然老化对品质及发芽的影响[J]. *核农*

- 学报, 35(2): 490-497. [Zhao K, Li S S, Ma Q, Zhou F, Li Z F, Ma X L, Zhang X G, Yin D M. 2021. Effects of natural aging on quality and germination characteristics of peanut[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 35(2): 490-497.] doi: 10.11869/j.issn.100-8551.2021.02.0490.
- 赵嫒, 陈仕勇, 李亚萍, 周青平, 陈有军, 常馨丹. 2021. 外源GABA对盐胁迫下金花菜种子萌发及幼苗抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业学报, 37(2): 310-316. [Zhao M, Chen S Y, Li Y P, Zhou Q P, Chen Y J, Chang X D. 2021. Influence of exogenous γ -aminobutyric acid (GABA) on seed germination and antioxidant protection of *Medicago polymorpha* under salt stress[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 37(2): 310-316.] doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.02.005.
- 赵颖, 魏小红, 赫亚龙, 赵泉飞, 韩厅, 岳凯, 辛夏青, 宿梅飞, 马静文, 骆巧娟. 2019. 混合盐碱胁迫对藜麦种子萌发和幼苗抗氧化特性的影响[J]. 草业学报, 28(2): 156-167. [Zhao Y, Wei X H, Hao Y L, Zhao X F, Han T, Yue K, Xin X Q, Su M F, Ma J W, Luo Q J. 2019. Effects of complex saline-alkali stress on seed germination and seedling antioxidant characteristics of *Chenopodium quinua*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 28(2): 156-167.] doi: 10.11686/cyxb2018181.
- 周晨莉, 张恒嘉, 巴玉春, 李福强, 王璐. 2020. 调亏灌溉对膜下滴灌苕蓝生长发育和产量的影响[J]. 水土保持学报, 34(4): 193-200. [Zhou C L, Zhang H J, Ba Y C, Li F Q, Wang L. 2020. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of *Isatis indigotica* under mulched drip irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 34(4): 193-200.] doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.04.029.
- 祝煜中, 夏黎明, 竺思仪, 刘继辉, 杨瑞春, 王青峰, 李小琴, 冯发强. 2018. 人工老化的甜玉米种子活力、生理特性和遗传多样性的变化[J]. 华南农业大学学报, 39(1): 27-32. [Zhu Y Z, Xia L M, Zhu S Y, Liu J H, Yang R C, Wang Q F, Li X Q, Feng F Q. 2018. Changes of vigor, physiological characteristics and genetic diversities of artificially aged sweet corn seeds[J]. Journal of South China Agricultural University, 39(1): 27-32.]
- 邹琦. 2000. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社. [Zuo Q. 2000. Experimental guidance of plant physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press.]
- Ghive D V, Barabde N P, Pote S R. 2007. Seed viability and factors affecting seed storage[J]. Asian Journal of Bio Science, 2: 1-2.
- Groot S P C, Surki A A, de Vos R C H, Kodde J. 2012. Seed storage at elevated partial pressure of oxygen, a fast method for analysing seed ageing under dry conditions [J]. Annals of Botany, 110(6): 1149-1159. doi: 10.1093/aob/mcs198.
- Kaewnaee P, Vichitphan S, Klanrit P, Siri B, Vichitphan K. 2011. Effect of accelerated aging process on seed quality and biochemical changes in sweet pepper (*Capsicum annuum* Linn.) seeds[J]. Biotechnology(Faisalabad), 10(2): 175-182. doi: 10.3923/biotech.2011.175.182.
- Parkhey S, Naithani S C, Keshavkant S. 2012. ROS production and lipid catabolism in desiccating *Shorea robusta* seeds during aging[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 57: 261-267. doi: 10.1016/j.plaphy.2012.06.008.

(责任编辑 罗 丽)