

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.06.020

香椿种子人工老化过程中生理生化的变化

方骄阳, 祝 燕, 王彩云*, 叶可可, 高卫东,
张子晗, 闫晶晶, 李庆梅*

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091)

摘要: [目的] 通过测定不同老化程度香椿种子的发芽指标、幼苗形态指标和生理生化指标, 探究香椿种子人工老化过程中种子活力及其生理生化的变化, 为香椿种子老化机制及种子活力修复研究奠定基础。[方法] 采用高温高湿(40℃、相对湿度95%)的人工老化方法对供试种子处理1、2、3、4、5、6、7、8 d, 测定各处理种子发芽指标、幼苗形态指标、相对电导率、MDA含量和抗氧化酶活性等指标。[结果] 香椿种子经老化处理后, 种子活力显著下降, 相对电导率和MDA含量显著上升。在种子老化过程中, 发芽率、发芽指数和活力指数逐渐降低, 相对电导率和MDA含量总体呈上升趋势, SOD活性和POD活性表现为先升高后降低的趋势, 且SOD对于香椿种子的老化更敏感。相关分析表明: 相对电导率、MDA含量与种子发芽指标呈极显著负相关, POD活性与种子发芽指标呈极显著正相关, SOD活性与发芽率呈显著负相关, 与发芽指数和活力指数呈极显著负相关。[结论] 膜脂过氧化作用和抗氧化酶系统功能失调是香椿种子老化的主要原因, 相对电导率、MDA含量和POD活性可用于衡量香椿种子的活力水平。

关键词: 香椿; 人工老化; 种子活力; 抗氧化酶

中图分类号: S644.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)06-0163-07

种子是植物的主要繁殖器官, 种子质量的优劣往往会对种苗的培育以及种质资源的安全贮藏造成影响; 但种子在完成生理成熟之后, 其活力会不断下降直至完全丧失活力, 该过程被称为种子老化^[1-2]。种子老化会直接影响种子的质量, 田间出苗率、出苗整齐度和幼苗质量也会受到一定程度的影响^[3-4]。目前, 关于种子老化的研究对象大多为蔬菜类和农作物的种子, 对林木种子的相关研究数量较少。综合相关文献发现, 在种子老化的同时伴随着众多复杂的理化变化, 包括膜透性、酶活性、贮藏物质含量、有毒有害物质积累等多个方面的变化^[1, 5], 但种子老化真正的机理目前尚无定论。

香椿(*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.)在我国种植广泛, 具有材用、食用、药用和观赏等多种重要价值, 在世界上享有“中国桃心木”的美称^[6-7]。目

前, 香椿苗木的培育主要采用种子繁殖法^[8], 但香椿结实存在“大小年”现象, 且种子在贮藏过程中极易丧失活力, 常温贮藏半年后, 种子发芽率由95%降至50%, 贮藏1年后, 种子完全失活^[9-10], 这严重限制了香椿种子在生产实际中的应用及香椿种质资源的保存。目前, 对于香椿种子活力及种质资源保存的研究主要集中在种源^[11]、贮藏温度和含水量^[12]、植物生长调节剂^[13]等方面, 而对于香椿种子老化过程中生理生化的变化及其老化机理的探究相对较少。本文以香椿种子为试验材料, 研究人工加速老化对于香椿种子萌发的影响以及生理生化的变化, 分析各指标的变化规律及其与种子活力变化的关系, 探究香椿种子老化的主要内因并筛选可用于衡量香椿种子活力水平的理化指标, 以为香椿种子活力修复及种质资源保存的相关研究提供理论依据。

收稿日期: 2020-03-20 修回日期: 2020-08-03

基金项目: 中国林业科学研究院林业研究所林木培育重点实验室专项资金(ZDRIF201701)

* 通讯作者: 王彩云, wangcy528@126.com; 李庆梅, 研究员, 从事林木种苗研究. liqm99@163.com

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验所用香椿种子采集于河南省栾川县, 根据 GB 2772—1999《林木种子检验规程》^[14], 测得种子千粒质量为 9.334 g, 初始含水量为 7.4%, 初始发芽率为 88.5%。

1.2 试验方法

1.2.1 种子处理 采用高温高湿(温度 40℃, 相对湿度 95%)的环境条件对种子进行人工加速老化。选取干净饱满的香椿种子置于网纱袋中, 均匀放置在预先平衡好的老化箱内, 处理 1、2、3、4、5、6、7、8 d 后, 分期取出种子, 进行发芽指标、幼苗形态指标和生理生化指标的测定, 以未经老化处理贮藏于-20℃冰箱内的种子作为对照。

1.2.2 发芽试验 随机选取老化处理后的种子, 用始温 45℃的清水浸种 12 h 后, 置于蛭石基质的发芽盒中进行发芽试验, 每处理 4 个重复, 每重复 50 粒种子, 于环境温度 25℃, 每天光照 8 h 的人工气候箱中培养。从置床次日起每日透气 30 min, 及时补充水分, 观察记录发芽种子数并剔除发霉种子, 于 21 d 后结束发芽试验。

1.2.3 发芽指标 发芽试验结束后, 统计计算发芽率(G_r)、发芽指数(G_i)和活力指数(V_i), 公式如下:

$$\text{发芽率 } (G_r) = (\sum G_t / NT) \times 100\%$$

$$\text{发芽指数 } (G_i) = \sum (G_t / D_t)$$

$$\text{活力指数 } (V_i) = S \times G_i$$

式中: G_t 为在 t 天时的发芽种子数, NT 为 50 (每重复的种子总数), D_t 为相应的发芽天数, S 为幼苗平均干质量。

1.2.4 幼苗形态指标 于发芽试验结束后随机选取 10 株幼苗(老化后期幼苗萌发数量较少, 以实际测量株数为准), 用直尺分别测量幼苗的苗高和根长, 精度 0.1 cm, 每处理 4 个重复。

1.2.5 生理生化指标 试验测定的生理生化指标包括电导率、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性。电导率的测定采用电导率仪法^[15], 用相对电导率表示, 每处理 4 个重复, 每重复 20 粒种子。MDA 含量、SOD 活性和 POD 活性分别使用苏州科铭生物技术有限公司(江苏, 中国)丙二醛(MDA)含量试剂盒、

超氧化物歧化酶(SOD)试剂盒和过氧化物酶(POD)试剂盒进行测定, 每处理 4 个重复。

1.2.6 数据分析 采用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 处理试验数据, 对数据进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较(在 0.05 水平上检验不同处理间差异的显著性), 并进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 人工老化对香椿种子萌发的影响

表 1 表明: 高温高湿(温度 40℃, 相对湿度 95%)的环境条件下, 香椿种子活力明显降低。发芽率、发芽指数和活力指数变化一致, 3 个发芽指标在种子老化过程中均表现为逐步下降的变化规律。在老化初期 1~4 d 发芽率的降速较缓慢, 后期 5~7 d 发芽率快速下降; 发芽指数和活力指数的快速下降期为老化初期 1~2 d, 后期下降变缓, 这表明香椿种子在老化初期活力虽然有所下降, 但种子在发芽试验过程中仍然可以萌发。由表 1 中数据可得, 老化后的香椿种子活力显著下降, 老化 4 d 的种子发芽率较对照下降 36%, 发芽指数和活力指数的降幅分别为 52% 和 50%; 老化 8 d 的种子发芽率较对照下降 98%, 发芽指数和活力指数的降幅分别为 98% 和 99%, 种子活力基本完全丧失。分析数据可得, 香椿种子老化天数相同时, 发芽指数和活力指数的降幅(与对照相比)高于发芽率的降幅(与对照相比), 这说明发芽指数和活力指数

表 1 人工老化对香椿种子萌发的影响

Table 1 Effect on seed germination of *T. sinensis* in artificial aging

老化时间 Artificial aging time/d	发芽率 Germination rate/%	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
0	88.50±2.06 a	3.99±0.04 a	48.50±0.69 a
1	78.00±0.82 b	3.32±0.08 b	38.48±0.41 b
2	71.50±1.50 c	2.45±0.10 c	26.77±1.35 c
3	61.00±1.29 d	2.38±0.05 c	26.71±1.30 c
4	56.50±1.71 d	1.91±0.10 d	24.46±0.26 d
5	37.00±2.52 e	1.45±0.13 e	17.36±0.50 e
6	16.50±2.06 f	0.43±0.07 f	4.05±0.41 f
7	4.00±0.82 g	0.20±0.02 g	2.02±0.20 fg
8	1.50±0.50 g	0.06±0.00 g	0.57±0.01 g

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Data with different lowercase letters in the same column are highly significantly different ($P < 0.05$).

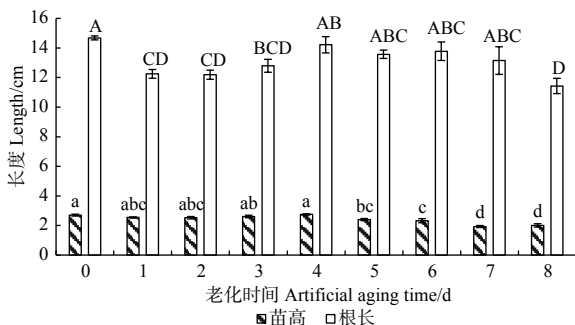
可以更好的反映香椿种子的质量,对于香椿种子老化程度的变化更敏感。在人工加速老化的条件下,香椿种子发芽率在8 d内从88.50%降至1.50%,发芽指数和活力指数分别从3.99、48.50降至0.06、0.57,这表明老化会对香椿种子造成严重损害,种子活力降低,萌发能力减弱,整齐度下降。

2.2 人工老化对香椿幼苗苗高和根长的影响

由图1可看出:在人工老化过程中,香椿幼苗根长呈先下降后上升再下降的趋势,苗高在老化初期保持稳定,后期呈逐渐下降趋势。在老化初期1~3 d,幼苗根长显著降低,根部的生长受到抑制,根长较对照显著降低17%;老化末期8 d时,幼苗根长较对照显著下降22%;在老化3~7 d过程中,相邻两天幼苗根长无显著变化。在老化5 d时,幼苗苗高显著降低,幼苗的高生长受到抑制,苗高较对照显著下降11%;随着老化程度的加深,幼苗高生长受抑制程度不断加深,在老化7 d时,幼苗苗高较对照显著下降29%。由此可见,随着香椿种子活力的下降,幼苗的高生长和根部的生长均受到抑制,在老化前期,受到影响的主要是幼苗根部,表现为幼苗根长变短,而苗高的变化相对滞后,在老化后期,幼苗苗高显著降低,幼苗的高生长受到抑制。

2.3 老化过程中香椿种子浸出液相对电导率的变化

由图2可看出:经人工老化处理后的香椿种子浸出液相对电导率均高于对照,表明膜系统可能在



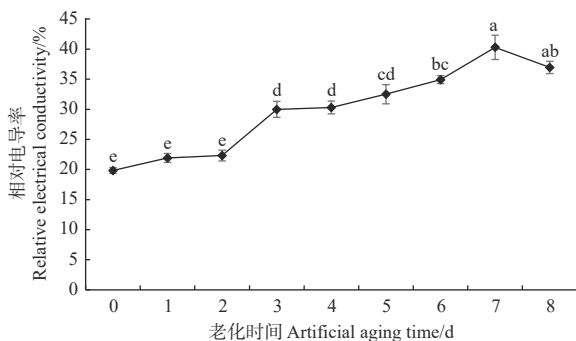
注:不同大写字母表示不同老化时间幼苗根长差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示不同老化时间幼苗苗高差异显著($P < 0.05$)。

Notes: Different capital letters mean significantly different in root length of seedlings at different aging times ($P < 0.05$), different lowercase letters mean significantly different in stem height of seedlings at different aging times ($P < 0.05$).

图1 人工老化对香椿幼苗苗高和根长的影响

Fig. 1 Effects on the seedling growth of stem height and root length of *T. sinensis* in artificial aging

人工老化过程中受损。随着老化处理时间的延长,香椿种子浸出液相对电导率逐渐升高,与种子活力的变化规律相反,说明种子浸出液相对电导率的变化可能与香椿种子的活力水平有关。老化1~2 d的种子相对电导率与对照相比无显著差异,说明在老化初期膜系统受损程度较轻的情况下,香椿种子内部可能存在修复机制。随着老化天数增加,相对电导率显著升高,老化3 d的香椿种子浸出液相对电导率为30%,显著高于对照,增幅为51%;老化6 d时,种子浸出液相对电导率为35%,增幅为76%;老化7 d时,种子浸出液相对电导率达到峰值40%,是对照的2倍。这可能是由于在老化过程中,膜系统持续受损,生物膜透性不断增大,内含物质外渗量增加所致。



注:不同字母表示不同老化时间间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Notes: Different letters mean significantly different on the data among different aging times ($P < 0.05$). The same below.

图2 人工老化过程中香椿种子浸出液相对电导率的变化
Fig. 2 Changes in relative electrical conductivity of *T. sinensis* seeds leachate during artificial aging

2.4 老化过程中香椿种子MDA含量的变化

图3表明:香椿种子MDA含量总体表现出上升的变化趋势,这与种子浸出液相对电导率的变化规律相一致,与种子活力的变化规律相反,意味着MDA含量或许可以在一定程度上反应香椿种子的活力水平。老化后的香椿种子MDA含量均高于对照,老化2 d的香椿种子MDA含量显著高于对照25%,老化6 d时,MDA含量显著高于对照52%,老化8 d时,MDA含量达到顶峰,显著高于对照62%。图3的变化趋势显示,在种子老化的过程中,随着种子活力的下降,MDA含量升高,而MDA是脂质过氧化的主要产物,因此,推测伴随着种子的老化,种子内不饱和脂肪酸可能受到活性氧攻击,脂质过氧化程度逐渐加深,致使MDA含量升高。

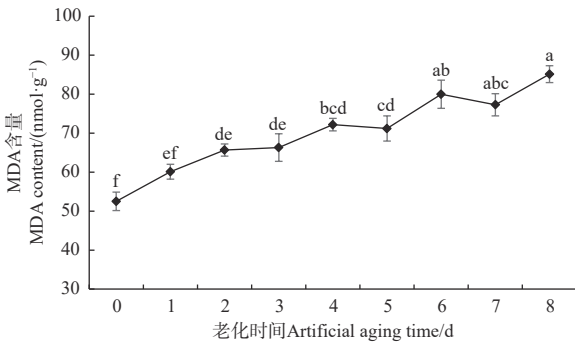


图3 人工老化过程中香椿种子 MDA 含量的变化

Fig. 3 Changes in MDA content of *T. sinensis* seeds during artificial aging

2.5 老化过程中香椿种子抗氧化酶 (SOD 和 POD) 活性的变化

从图4可看出：随着香椿种子老化程度的加深，种子 SOD 活性呈先上升后下降的变化趋势。老化 1 d 时，种子 SOD 活性显著升高，为对照的 3 倍；老化 4 d 时，种子 SOD 活性达到最大，为对照的 6 倍；在老化后期 7~8 d 时，SOD 活性较老化 4 d 时显著下降；与老化 4 d 相比，老化 7 d 的种子 SOD 活性显著下降 20%，老化 8 d 的种子 SOD 活性降低更多，显著下降 53%，但老化后的香椿种子 SOD 活性均显著高于对照。这表明在高温高湿的环境条件下，香椿种子内的抗氧化酶系统可能产生了一定程度的应激反应，随着种子的老化，

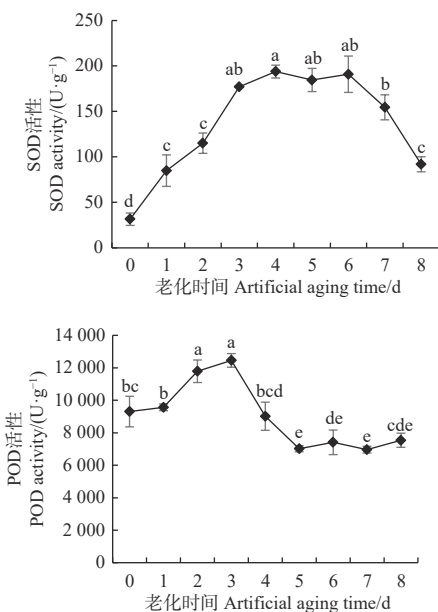


图4 人工老化过程中香椿种子 SOD 和 POD 活性的变化

Fig. 4 Changes in SOD and POD activity of *T. sinensis* seeds during artificial aging

SOD 活性显著升高，对超氧自由基的清除能力加强，同时产生大量过氧化氢。之后随着种子老化程度的加剧，SOD 活性也随之降低，可能导致超氧自由基大量产生并发生积累，加重对种子的毒害。在香椿种子老化初期，SOD 活性即出现显著升高，可见 SOD 对香椿种子老化反应灵敏，可能在香椿种子抗氧化酶系统中起主要作用。

POD 活性随着种子老化时间的延长，同样呈先上升后下降的变化趋势。老化 2 d 时，种子 POD 活性比对照显著升高 27%；在种子老化 3 d 时 POD 活性达到顶峰，显著高于对照 34%，随后开始下降；与老化 3 d 相比，老化 4 d 的种子 POD 活性显著下降 28%，老化 5 d 时，种子 POD 活性显著下降 44%；在老化后期 5~8 d，种子 POD 活性存在微波动，但差异不显著，与对照相比，老化 5 d 的种子 POD 活性显著下降 25%。综上分析可得，在香椿种子轻度老化的情况下，POD 可能对其具有保护效应，表现为种子内 POD 活性在一定程度上有所上升，但随着种子老化时间的延长，POD 活性显著下降，清除过氧化氢的能力降低，种子内过氧化氢可能大量积累，加速种子死亡。

2.6 香椿种子生理生化指标与发芽指标的相关性

表2表明：不同老化程度的香椿种子浸出液相对电导率和 MDA 含量与各发芽指标呈极显著负相关 ($\alpha=0.01$ (双侧))；相对电导率与发芽率的相关性最高，相关系数为-0.919，MDA 含量与发芽指数的相关性最高，相关系数为-0.884；POD 活性与各发芽指标呈极显著正相关 ($\alpha=0.01$)，相关系数分别为 0.599、0.546、0.508，SOD 活性与发芽率呈显著负相关 ($\alpha=0.05$)，相关系数为-0.393，与发

表2 香椿种子生理生化指标与发芽指标的相关性分析

Table 2 The correlation analysis on the vigor of *T. sinensis* seeds and physiological and biochemical indexes in artificial aging

	发芽率 Germination rate	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
相对电导率 Relative electrical conductivity	-0.919**	-0.906**	-0.888**
MDA 含量 MDA content	-0.840**	-0.884**	-0.877**
SOD 活性 SOD activity	-0.393*	-0.485**	-0.491**
POD 活性 POD activity	0.599**	0.546**	0.508**

注：*和**分别表示在0.05水平(双侧)和0.01水平(双侧)上显著相关。
Note: * and ** mean that correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed), 0.01 level (2-tailed), respectively.

芽指数和活力指数呈极显著负相关($\alpha=0.01$),相关系数分别为 -0.485 、 -0.491 。综合结果表明:相对电导率、MDA含量和POD活性这3个理化指标与香椿种子各发芽指标均呈极显著相关,适用于香椿种子活力评价。

3 讨论

3.1 人工老化对种子萌发的影响

种子在完成生理成熟之后,活力开始下降,而种子的萌发情况可以直观反映种子的活力水平。本研究中,香椿种子在老化过程中,种子发芽率呈逐渐下降趋势,发芽指数和活力指数也表现出相同规律,这与朱世东等^[8]对香椿种子老化的研究结果相符。老化后香椿种子萌发能力减弱,发芽率、发芽指数和活力指数显著降低,这表明香椿种子经人工老化后活力明显衰退。相同处理天数的香椿种子,发芽指数和活力指数的降幅(较对照)均高于发芽率的降幅(较对照),变化规律与毛竹^[16]、大豆^[17]等试验结果相似。将种子老化相关的4个生理生化指标与各发芽指标进行相关性分析表明,各理化指标与发芽指数和活力指数的相关性更好。由此可见,相较于发芽率,发芽指数和活力指数对于种子的老化反应更敏感,可以更好的反映香椿种子的活力水平。

3.2 人工老化对幼苗生长的影响

不同种类的种子经不同老化方式处理后,其幼苗所发生的变化也有所不同。王玉娇等^[18]对老化处理下春小麦种子发芽指标和幼苗根系的研究发现,高温高湿的环境条件会延缓幼苗的生长发育,并对幼苗的根系造成伤害。何学青等^[19]研究发现,老化并未对柳枝稷幼苗的生长造成影响,且提高了幼苗的根冠比。本研究中,老化后的香椿幼苗高和根长均小于对照,说明香椿种子在老化后,其幼苗的生长受到了一定程度的影响。分析发现,在老化前期,受到影响的主要是幼苗的根部,即幼苗的根长减小,而幼苗高生长的变化相对滞后;在老化后期,幼苗苗高显著减小。这可能是由于根是植物用于吸收水分和养分的器官,且胚根表皮细胞和内部的细胞器可能遭受破坏^[20]。在老化4 d时,幼苗根长有所上升,可能是由于老化后存活下来的种子生活力较强,且在适宜环境下发芽,种子活力得到了一定程度的恢复^[21-22]。老化4~7 d,幼苗根

长无显著变化,可能是由于幼苗在萌发过程中抗氧化酶活性有所上升,抗性增强,且对于老芒麦的研究也发现,老化对于其幼苗根长的影响比苗高小^[22-23]。本研究未测定幼苗的理化指标,因此,香椿种子老化后幼苗形态指标变化的具体原因仍有待探究。同时在老化后期萌发幼苗数减少,选取完整幼苗的代表性相对降低,在后续试验中将控制基质含水量并将相同处理下的幼苗混合后选取用于测定的幼苗,尽量减少干扰因素。

3.3 人工老化对种子膜系统的影响

种子浸出液相对电导率是反应种子膜系统是否完整的重要指标,老化可导致种子生物膜结构受损,膜透性增大,细胞内含物质外渗,种子浸出液电导率随之增大^[24-25]。脂质过氧化会导致生物膜受活性氧的攻击而功能受损,MDA作为膜脂过氧化的主要产物可以在一定程度上反应细胞膜上不饱和脂肪酸被攻击的程度^[26-27]。朱世东等^[8]探究香椿种子衰老机理发现,随着种子老化程度加深,MDA含量增大,膜透性增加,超氧阴离子发生明显积累,认为香椿种子老化与活性氧的毒害相关,推测膜脂过氧化为香椿种子衰老的主要原因之一。张海波等^[12]对香椿种子安全贮藏条件的探究发现,种子浸出液电导率和MDA含量与其老化程度密切相关,且随贮藏时间的延长逐渐升高。本研究中,香椿种子在老化过程中,种子浸出液相对电导率和MDA含量均呈逐渐上升趋势,与种子各发芽指标均呈极显著负相关,表明相对电导率和MDA含量与种子的活力水平相关,可用于评价香椿种子的活力水平。在种子不断老化的过程中,活性氧大量产生,促使不饱和脂肪酸发生过氧化反应,而构成生物膜的磷脂中含有大量不饱和脂肪酸,因此,细胞膜在种子老化过程中极易受到活性氧的攻击发生脂质过氧化,从而导致细胞膜受损。在脂质发生过氧化的同时会产生大量脂质自由基和有毒产物MDA,其中,MDA还可以结合抗氧化酶,使抗氧化酶活性下降,清除自由基能力减弱,导致自由基累积,进一步加速生物膜受损,致使膜内矿物质及无机物质外渗,浸出液电导率升高^[28-29]。由此可见,膜脂过氧化会引起种子内部新陈代谢紊乱,进而加重香椿种子的老化。

3.4 人工老化对种子抗氧化酶系统的影响

SOD和POD是植物细胞及各细胞器内重要的抗氧化酶,通过相互协作清除自由基和过氧化物,

维持自由基产生和清除的平衡^[30-32]。张海波等^[12]发现,随着贮藏时间的延长,香椿种子 SOD 活性先上升后下降,POD 活性呈逐渐下降趋势。孙春青等^[33]对不结球白菜的研究发现,抗氧化酶(SOD 和 POD)的活性随种子活力的下降而降低。本研究中,老化初期的香椿种子 SOD 活性显著上升,可能是由于种子在高温高湿的条件下产生了大量自由基,SOD 产生应激反应,迅速提升活性以清除自由基维持代谢平衡。POD 活性在种子老化初期也同样出现显著上升,这可能与植物两种 POD 机制中的保护效应有关^[34]。活性氧随着种子的老化大量产生,抗氧化酶无法及时清除,细胞内活性氧产生和清除的平衡被打破,同时 MDA 作为过氧化产物与酶结合抑制酶活,导致 POD 活性和 SOD 活性分别在种子老化 3 d 和 4 d 后不断降低。SOD 和 POD 活性的下降可能导致种子内超氧自由基和 H₂O₂ 发生积累,加速种子老化^[34]。综合香椿种子老化过程中 SOD 活性和 POD 活性的变化规律发现,SOD 对于香椿种子的老化最敏感,可能是香椿种子抗氧化酶系统的第一道防线。进一步结合相关性分析的结果可得,SOD 活性和 POD 活性可以在一定程度上反映香椿种子的活力水平。

4 结 论

在高温高湿(温度 40℃、相对湿度 95%)的环境条件下,香椿种子活力显著降低,幼苗生长也受到一定程度的影响,相对电导率和 MDA 含量显著升高。在种子老化过程中,发芽率、发芽指数和活力指数逐渐下降,相对电导率和 MDA 含量总体呈逐渐上升趋势,SOD 活性和 POD 活性则表现为先上升后下降的变化规律。表明随着香椿种子的老化,种子活力逐渐下降,种子膜系统不断受损,膜脂过氧化作用以及抗氧化酶系统功能失调是香椿种子老化的重要原因。综合相关分析认为,相对电导率、MDA 含量和 POD 活性可以反映香椿种子的老化程度,适用于香椿种子活力水平的评价。

参 考 文 献:

[1] 刘 娟,归 静,高 伟,等.种子老化的生理生化与分子机理研究进展[J].生态学报,2016,36(16): 4997-5006.
[2] 祝煜中,夏黎明,竺思仪,等.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,2018,39(1): 25-30.

[3] Groot S P C, Surki A A, de Vos R C H, et al. Seed storage at elevated partial pressure of oxygen, a fast method for analysing seed ageing under dry conditions[J]. Annals of Botany, 2012, 110(6): 1149-1159.
[4] 薛梅真.人工老化对玉米种子萌发初期可溶性糖类代谢关键酶及相关基因表达的影响[D].郑州:河南农业大学,2017.
[5] Kaewnaaree P, Vichitphan S, Klanrit P, et al. Effect of accelerated aging process on seed quality and biochemical changes in sweet pepper (*Capsicum annuum* Linn.) seeds[J]. Biotechnology, 2011, 10(2): 175-182.
[6] 彭方仁,梁有旺.香椿的生物学特性及开发利用前景[J].林业科技开发,2005,19(3): 3-6.
[7] 高鸚铭,李凤玉,肖祥希,等.香椿叶、花和种子的挥发性化学成分研究[J].福建师范大学学报(自然科学版),2016,32(5): 59-65.
[8] 朱世东,斐孝伯,张志伟.香椿种子衰老机理[J].安徽农业科学,1999,27(1): 62-63.
[9] 金 波,东惠茹.香椿种子及贮藏过程中的生理变化[J].上海农业学报,1991,7(4): 38-42.
[10] 梁有旺,彭方仁,陈德平.香椿不同种源和优良单株的种子品质差异性分析[J].植物资源与环境学报,2006,15(04): 42-47.
[11] 郝明灼,陈德根,彭方仁,等.8个种源香椿种子性状及芽苗菜产量和品质比较[J].浙江农林大学学报,2012,29(2): 180-184.
[12] 张海波,桂杨娟,高卫东,等.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.
[13] 康 冰,陈彦生,张小红.GA₃、6-BA及IAA对香椿种子发芽及幼苗生长的影响(简报)[J].植物生理学通讯,2001,37(5): 399-400.
[14] GB 2772-1999 林木种子检验规程[S].北京,2000.
[15] 刘子凡.种子学实验指南[M].北京:化学工业出版社,2011.
[16] 蔡春菊,范少辉,刘 凤,等.毛竹种子人工老化过程中生理生化变化[J].林业科学,2013,49(8): 29-34.
[17] 乔燕祥,周建萍,田齐建,等.大豆种子老化过程中生理特性变化的研究[J].植物遗传资源学报,2010,11(5): 616-620.
[18] 王玉娇,吴 薇,郭志军,等.小麦种子老化处理对发芽指标及根系的影响[J].核农学报,2018,32(12): 2423-2430.
[19] 何学青,陶奇波,亚·海拉提,等.柳枝稷种子活力及幼苗生长对人工老化处理的响应[J].草地学报,2016,24(4): 834-840.
[20] 刘旭欢,贾永红,阿里别里根·哈孜太,等.人工老化对春小麦种子萌发及根尖超微结构的影响[J].西北植物学报,2015,35(4): 761-765.
[21] 武彦芳,张 建,祈 茜,等.不同老化处理对蒲公英种子以及幼苗质量的影响[J].种子,2017,36(4): 32-35.
[22] 韩 瑞.人工老化水稻种子生理生化变化、DNA损伤及活力恢复的研究[D].杭州:浙江大学,2012.
[23] 周国栋.种子老化对老芒麦种质生理特性及遗传完整性变化的影响[D].北京:中国农业科学院,2012.
[24] 孔治有,刘叶菊,覃 鹏.40℃加速老化处理对小麦种子生理生化特性的影响[J].安徽农业科学,2010,38(12): 6155-6157.
[25] 张永娟,韩 蕊,原 焯,等.罗布麻种子老化过程中的生理生化特性[J].草业科学,2011,28(12): 2130-2135.

- [26] Parkhey S, Naithani S C, Keshavkant S. ROS production and lipid catabolism in desiccating *Shorea robusta* seeds during aging[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 57: 261-267.
- [27] Roach T, Beckett R P, Minibayeva F V, *et al.* Extracellular superoxide production, viability and redox poise in response to desiccation in recalcitrant *Castanea sativa* seeds[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2010, 33(1): 59-75.
- [28] Yin H, Xu L, Porter N A. Free radical lipid peroxidation: mechanisms and analysis[J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(10): 5944-5972.
- [29] Niki E, Yoshida Y, Saito Y, *et al.* Lipid peroxidation: Mechanisms, inhibition, and biological effects[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2005, 338(1): 668-676.
- [30] Goel A, Goel A K, Sheoran I S. Changes in oxidative stress enzymes during artificial ageing in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seeds[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(9): 1093-1100.
- [31] Balaban R S, Nemoto S, Finkel T. Mitochondria, oxidants, and aging[J]. *Cell*, 2005, 120(4): 483-495.
- [32] 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.
- [33] 孙春青, 杨伟, 戴忠良, 等. 人工老化处理对结球甘蓝种子生理生化特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2012, 32(8): 1615-1620.
- [34] 杨淑慎, 高俊凤. 活性氧、自由基与植物的衰老[J]. *西北植物学报*, 2001, 21(2): 215-220.

Physiological and Biochemical Changes of *Toona sinensis* Seeds During Artificial Aging

FANG Jiao-yang, ZHU Yan, WANG Cai-yun, YE Ke-ke, GAO Wei-dong,
ZHANG Zi-han, YAN Jing-jing, LI Qing-mei

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] To investigate the seed vigor and physiological and biochemical changes of *Toona sinensis* seeds during artificial aging by measuring the germination indexes, seedling morphological indexes, physiological and biochemical indexes of *T. sinensis* seeds at different aging degrees. [Method] *T. sinensis* seeds were treated with artificial aging at high temperature (40°C) and high humidity (RH 95%) for 1 to 8 days respectively. The seed germination indexes, seedling morphological indexes, relative electrical conductivity, MDA content, and antioxidant enzyme activity were measured after treatment. [Result] After the aging treatment, the seed vigor of *T. sinensis* decreased significantly, the relative electrical conductivity and MDA content increased significantly. During the aging process of seeds, the germination rate, germination index, and vigor index gradually decreased, the relative electrical conductivity and MDA content showed an increasing tendency, the activity of SOD and POD went up at initial and then went down along the seeds aging, and SOD was more sensitive to the aging of *T. sinensis* seeds. The correlation analysis indicated the relative electrical conductivity and MDA content had extremely and significantly negative correlation with seed germination indexes, while the POD activity showed a extremely and significantly positive correlation with seed germination indexes, the SOD activity was significantly and negatively correlated with germination rate, and extremely and significantly positive correlated with germination index and vigor index. [Conclusion] The peroxidation of membrane lipids and the dysfunction of the antioxidant enzyme system are the main reasons causing the aging of *T. sinensis* seeds. The relative electrical conductivity, MDA content and POD activity can be used to measure the vigor level of *T. sinensis* seeds.

Keywords: *Toona sinensis*; artificial aging; seed vigor; antioxidant enzyme

(责任编辑: 张研)