

水稻种子休眠特性与耐藏性的关系

陈志超^{1,2}, 黄婷婷¹, 王 洋¹, 吴洪恺¹, 陈璋琦¹, 陶若芙¹

(1. 浙江农林大学 农业与食品科学学院 浙江省农产品品质改良技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江省舟山市定海区农林与海洋渔业局, 浙江 舟山 316000)

摘要: 以 2 个具有休眠特性差异的籼稻 *Oryza sativa* subsp. *sativa* 品种[4K58(Ⅱ-32B 休眠), 4K59(Ⅱ-32B)]及其各自与不育系(Ⅱ-32A)的杂交 F₂ 代种子(C178, C179)为材料, 采用人工加速老化方法获得不同老化天数(0, 3, 6, 9 d)的种子。通过测定种子的电导率值、单核苷酸浸出液质量浓度、发芽指标和幼苗生长指标等, 探讨种子休眠特性与耐藏性的关系。结果表明: 经老化后 4K58 种子的电导率值、单核苷酸浸出液质量浓度均显著高于 4K59($P<0.05$), 其中单核苷酸浸出液质量浓度增幅最高, 相差近 14.5 倍; 而其发芽势、发芽指数等均显著低于 4K59($P<0.05$), 平均发芽时间显著高于 4K59($P<0.05$), 推测具有休眠特性的水稻种子更不耐储藏。研究还发现: 老化后 C178 的核苷酸浸出液质量浓度、平均发芽时间显著高于 C179($P<0.05$), 发芽率、发芽指数、幼苗苗高和苗质量均显著低于 C179($P<0.05$)。推测这种储藏特性可遗传至下代。图 4 表 4 参 17

关键词: 植物生理学; 种子; 休眠; 耐藏性; 水稻; 人工加速老化

中图分类号: S330.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2018)03-0490-07

Dormancy characteristics and seed storage tolerance in rice

CHEN Zhichao^{1,2}, HUANG Tingting¹, WANG Yang¹, WU Hongkai¹, CHEN Zhangqi¹, TAO Ruofu¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Products Quality Improvement Technology in Zhejiang Province, School of Agriculture and Food Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Agriculture, Forestry and Oceanic Fisheries Administration of Dinghai District in Zhoushan City, Zhoushan 316000, Zhejiang, China)

Abstract: The relationship between rice seed storage tolerance and dormancy characteristics was determined for two *Oryza sativa* subsp. *sativa* (rice) cultivars with different characteristics of dormancy [4K58 (Ⅱ-32B dormant), 4K59 (Ⅱ-32B)] and their F₂ seeds (C178, C179) hybridized with a sterile line (Ⅱ-32A) as materials. Different aged seeds (0 d, 3 d, 6 d, or 9 d) of these four varieties were acquired by the artificial accelerated aging method. Seed conductivity, single nucleotide extract content, germination indices, and growth parameters of seedlings were measured in a CRD design with treatments of ck, 3, 6, 9 d with 3 replications. All data obtained were statistically analyzed with one-way ANOVA and least significant difference method (LSD) test. Results showed that seed conductivity, and single nucleotide extract content of aged 4K58 seeds were significantly higher than those of 4K59 ($P<0.05$) with maximum discrepancy of single nucleotide extract content in multiples of 14.5. However, germination energy and germination index of 4K58 were significantly lower than those of 4K59 ($P<0.05$) having a mean germination time that was significantly higher than 4K59 ($P<0.05$). Also the single nucleotide extract content and mean germination time of aged C178 seeds were significantly higher than those of C179 ($P<0.05$); whereas, germination percentage, germination index, shoot length, and fresh weight were significantly lower than C179 ($P<0.05$). Thus, storage properties may be passed on to succeeding generations, and rice seed with dormant properties may not be suitable for storage. [Ch, 4 fig. 4 tab.

收稿日期: 2017-05-03; 修回日期: 2017-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31501394); 浙江农林大学科研发展基金人才启动项目(2014FR057)

作者简介: 陈志超, 从事种子生理研究。E-mail: 2274485517@qq.com。通信作者: 王洋, 讲师, 博士, 从事种子科学与作物抗逆等研究。E-mail: wangyanght119@126.com

17 ref.]

Key words: plant physiology; seed; dormancy; storage tolerance; rice; artificial accelerated aging

水稻 *Oryza sativa* 是中国最重要的粮食作物之一。中国因储藏问题引起的粮食损失达 350 亿 $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 因此, 如何选育耐藏性好的种子一直是种子科学研究的重点。在杂交水稻制种过程中, 通过选育具有强休眠性的保持系和不育系可以解决杂交稻制种穗发芽的危害, 延长种子的储藏时间。侯雅杰^[1]认为, 休眠种子能通过长时间储藏而保持活力, 适应性较强。但也有学者认为休眠性强的种子可能会影响种子的萌发, 并不一定更耐储藏^[2]。种子休眠性和耐藏性之间的关系研究较少, 仍不明确。种子休眠性与种子活力密切相关。近年来, 已有部分学者对种子休眠性与种子活力的关系进行了研究^[3-6], 普遍认为高活力种子耐藏性好, 通过测定种子活力水平即能反映种子的耐藏性好坏。人工加速老化试验是研究种子老化过程中活力变化和种子耐藏性的最常见的方法之一。董国军等^[7]研究发现, 水稻人工老化方法能较好地模拟种子的自然老化过程。本研究采用 40 °C, 100% 相对湿度(RH)高温高湿人工加速老化法(AA)^[8], 对 2 个具有休眠特性差异的籼稻 *Oryza sativa* subsp. *sativa* 品种 4K58(Ⅱ-32B 休眠)和 4K59(Ⅱ-32B)及其各自与不育系(Ⅱ-32A)的杂交 F₂ 代种子(C178, C179)进行人工加速老化, 获得不同老化天数的水稻种子, 通过测定与种子活力相关指标, 探讨水稻种子休眠特性和耐藏性的关系, 以期选育耐藏性强的水稻品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为籼稻品种 4K58(Ⅱ-32B 休眠), 4K59(Ⅱ-32B), C178 和 C179 的种子。4K58 种子具有休眠性; C178 和 C179 分别是 4K58 和 4K59 与不育系(Ⅱ-32A)杂交获得的 F₂ 代种子。

采用人工加速老化方法对供试材料进行处理: 相对湿度 100%, 温度 40 °C, 老化 3, 6, 9 d。老化结束后将种子放在室温下晾干 24 h, 用纸袋包装, 4 °C 保存备用。以未老化种子为对照(ck)。

1.2 试验方法

1.2.1 种子电导率测定 参照 CAO 等^[9]方法, 分别取不同老化天数处理的种子各 50 粒, 设置重复试验 3 次·组⁻¹, 35 °C 烘 2 h, 取出冷却后称量; 用蒸馏水冲洗 3 次, 去除表面水分后置于 100 mL 烧杯中, 加蒸馏水 100 mL, 保鲜膜封口后, 静置于 25 °C 恒温培养箱 24 h。用电导仪测定种子浸出液电导率。电导率($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)=(样品值-对照值)/样品种子质量(g)。

1.2.2 种子单核苷酸浸出液质量浓度测定 分别取经不同老化天数处理的种子各 1 粒, 设置重复试验 10 次·组⁻¹; 每粒种子置于装有 10 mL 蒸馏水的 20 mL 试管中, 将试管置于 25 °C 恒温培养箱中 24 h。取 3 mL 浸出液测定其在 260 nm 下的吸光度 $D(260)$ 。核苷酸 $D(260)=40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[10]。

1.2.3 种子发芽试验 种子经质量分数为 0.1% 的次氯酸钠溶液消毒 15 min 后, 在垫有 2 层湿润发芽纸的发芽盒中于 20~30 °C 变温条件发芽, 高温 8 h, 低温 16 h, 高温时段有光照, 光合光子照度为 250 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。3 次重复, 种子 100 粒·重复⁻¹。每天记录发芽种子数, 第 5 天计算发芽势, 第 14 天计算发芽率。参照 ZHANG 等^[11]的方法, 计算发芽指数(g_i)= $\sum (n_i/t_d)$, 平均发芽时间($\bar{t}_g$)= $\sum (n_i \times t_d) / \sum n_i$ 。其中: n_i 为第 t 天的发芽种子数, t_d 为发芽日数。发芽结束后, 随机取幼苗 10 株·盒⁻¹, 分别测量苗高和鲜质量。

1.2.4 统计分析 所得数据用 SAS 进行统计分析, 多重比较采用最小显著差(LSD)法, 显著性水平为 $P < 0.05$, 百分率数据在分析前进行反正弦转换, $y = \arcsin [\sqrt{x/100}]$ 。

2 结果

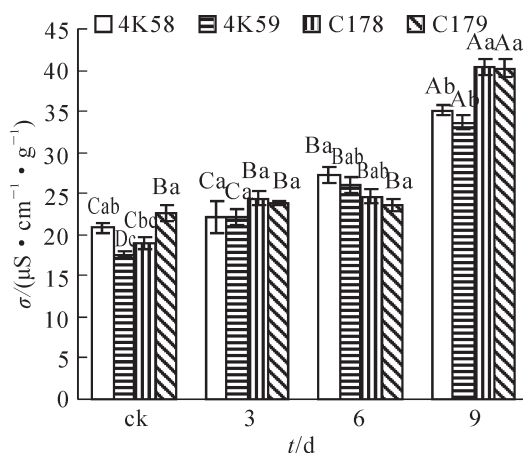
2.1 不同老化天数处理对种子电导率的影响

未经老化处理的种子(ck)中, C179 的电导率值显著高于 4K59 和 C178; 4K58 显著高于 4K59, 约比 4K59 高 18.8%(图 1)。老化 3 d 后, 4 个水稻品种的电导率值无显著差异; 老化 6 d 后, 4K58 的电导率值显著高于 C179; 老化 9 d 后, C178 和 C179 的电导率值显著高于 4K58 和 4K59; C178 和 C179 之

间, 4K58 和 4K59 之间均无显著差异。随老化时间的延长, 4 个品种的种子电导率值均呈增加的趋势; 其中 4 个品种老化 9 d 的种子电导率值均显著高于老化 6 d, 增幅达 29.0%~71.1%; 4K58 和 4K59 老化 6 d 的电导率值显著高于老化 3 d; 4K59 和 C178 老化 3 d 的电导率值显著高于 ck。

2.2 不同老化天数处理对种子核苷酸浸出液质量浓度的影响

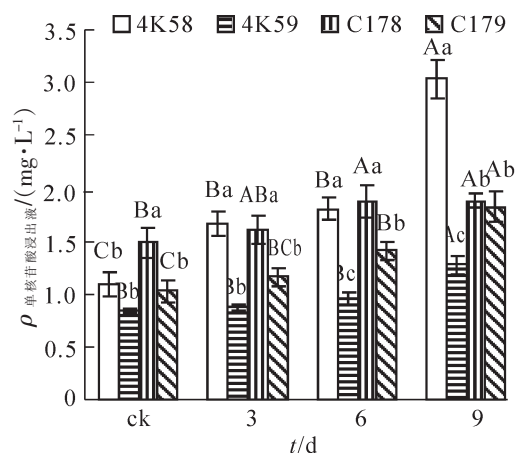
未老化的 C178 种子核苷酸浸出液质量浓度显著高于其他 3 个品种(图 2), 而 3 个品种间无显著差异。老化 3 d 后, 4K58 和 C178 的种子核苷酸浸出液质量浓度分别显著高于 4K59 和 C179; 4K58 和 C178 之间, 4K59 和 C179 之间均无显著差异。老化 3 d 后 4K58 和 4K59 的种子核苷酸浸出液分别比对照增加了 52.3% 和 3.6%, 两者相差近 14.5 倍。老化 6 d 后, 4K59 的核苷酸浸出液质量浓度显著低于其余 3 个品种; C179 显著低于 4K58 和 C178; 4K58 和 C178 之间无显著差异。老化 9 d 后, 4K59 的核苷酸浸出液质量浓度显著低于其他 3 个品种; 4K58 显著高于其他 3 个品种; C178 和 C179 之间无显著差异。随老化时间的延长, 4 个品种的种子核苷酸浸出液质量浓度均呈增加的趋势; 4K58, 4K59 和 C179 老化 9 d 的种子核苷酸浸出液显著高于老化 6 d, 4 个品种老化 6 d 的核苷酸浸出液与老化 3 d 无显著差异; 老化 3 d 的 4K58 种子核苷酸浸出液质量浓度显著高于 ck。



ck 是指未经老化处理的种子。不同小写字母表示不同水稻品种经相同老化天数处理后的种子电导率值差异显著; 不同大写字母表示同一水稻品种经不同老化天数处理后的种子电导率值差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 不同水稻品种老化处理后种子的电导率值

Figure 1 Conductivity of accelerated aging seeds of four rice cultivars



ck 是指未经老化处理的种子。不同小写字母表示不同水稻品种经相同老化天数处理后的种子单核苷酸浸出液质量浓度值差异显著; 不同大写字母表示同一水稻品种经不同老化天数处理后的种子单核苷酸浸出液质量浓度值差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 不同水稻品种老化处理后种子核苷酸浸出液质量浓度比较

Figure 2 Single nucleotide extract content of accelerated aging seeds of four rice cultivars

2.3 不同老化天数处理对种子萌发的影响

2.3.1 发芽势 由表 1 可知: 4 个品种未经老化处理(ck)的种子发芽势均无显著差异。老化 3 d 和 6 d 后, 4K58 种子的发芽势显著低于其余 3 个品种, 其他 3 个品种均无显著差异; 老化 9 d 后, C179 种子的发芽势显著高于其他 3 个品种, 4K58 的发芽势显著低于其他 3 个品种, 4K59 和 C178 之间无显著差异。与未老化种子相比, 老化 9 d 后 4K58 的发芽势下降幅度约为 4K59 的 2.1 倍, C178 约为 C179 的 2.5 倍。随老化时间的延长, 4 个品种的种子发芽势呈下降趋势, 但 4 个品种老化 3 d 的发芽势与 ck 无显著差异。4K58 老化 9 d 的发芽势显著低于老化 6 d, 老化 6 d 的发芽势显著低于老化 3 d; 其他 3 个品种老化 9 d 的发芽势显著低于老化 6 d, 老化 6 d 的发芽势与老化 3 d 无显著差异。

2.3.2 发芽率 未经老化处理的 4 个品种种子发芽率均无显著差异(表 2)。老化 3 d 后, C178 种子的发芽率显著低于其余 3 个品种, 而 3 个品种之间均无显著差异; 老化 6 d 后, C178 的发芽率显著低于 C179, 与 4K58 和 4K59 无显著差异; 老化 9 d 后, 4K58 的发芽率显著低于 C179, 与 4K59 和 C178 无显著差异。与未老化种子相比, 老化 9 d 后 4K58 的发芽率下降幅度约为 4K59 的 1.4 倍, C178 约为

表 1 不同水稻品种老化处理后种子发芽势比较

Table 1 Germination energy of accelerated aging seeds of four rice cultivars

品种	不同老化处理后的发芽势/%			
	ck	3	6	9 d
4K58	A 96.33 ± 2.03 a	A 97.50 ± 0.00 b	B 91.50 ± 1.00 b	C 65.00 ± 2.00 c
4K59	A 99.00 ± 0.58 a	A 99.00 ± 0.00 a	A 97.00 ± 1.00 a	B 83.50 ± 4.34 ab
C178	A 98.67 ± 0.88 a	A 99.00 ± 1.00 a	A 98.00 ± 0.00 a	B 80.00 ± 3.00 b
C179	A 99.00 ± 0.58 a	A 99.00 ± 0.50 a	A 98.00 ± 1.50 a	B 91.50 ± 2.61 a

说明：ck 是指未经老化处理的种子。数值后不同小写字母表示不同水稻品种经相同老化天数处理后的种子发芽率差异显著；数值前不同大写字母表示同一水稻品种经不同老化天数处理后的种子发芽率差异显著 ($P<0.05$)

表 2 不同水稻品种老化处理后种子发芽率比较

Table 2 Germination percentage of accelerated aging seeds of four rice cultivars

品种	不同老化处理后的发芽率/%			
	ck	3	6	9 d
4K58	A 96.33 ± 2.03 a	A 99.00 ± 0.00 a	A 98.00 ± 1.00 ab	B 80.50 ± 8.50 b
4K59	A 99.33 ± 0.33 a	A 99.00 ± 0.00 a	A 97.00 ± 1.00 ab	B 88.00 ± 5.00 ab
C178	A 98.67 ± 0.88 a	A 98.00 ± 0.00 b	A 95.50 ± 0.50 b	B 87.00 ± 4.00 ab
C179	A 99.00 ± 0.58 a	A 99.00 ± 0.10 a	A 98.50 ± 1.00 a	A 95.00 ± 4.00 a

说明：ck 是指未经老化处理的种子。数值后不同小写字母表示不同水稻品种经相同老化天数处理后的种子发芽率差异显著；数值前不同大写字母表示同一水稻品种经不同老化天数处理后的种子发芽率差异显著 ($P<0.05$)

C179 的 3.0 倍。4 个品种的未老化种子、老化 3 d 和老化 6 d 种子的发芽率之间均无显著差异；老化 9 d 后，4K58，4K59 和 C178 种子的发芽率均分别显著低于老化 6 d 的发芽率。

2.3.2 发芽指数 从表 3 可知：未经老化处理的 4 个品种种子发芽指数均无显著差异。老化 3 d 后，C179 种子的发芽指数显著高于 4K58 和 4K59，与 C178 无显著差异。老化 6 d 后，4K59 和 C179 的发芽指数均显著高于 4K58 和 C178；4K59 和 C179 之间，4K58 和 C178 之间均无显著差异。老化 9 d 后，C179 的发芽指数显著高于 C178；C178 显著高于 4K59；4K59 显著高于 4K58。随老化时间的延长，4 个品种种子的发芽指数均呈显著下降趋势，即 4 个品种的未老化种子发芽指数显著低于老化 3 d；老化 3 d 的发芽指数显著低于老化 6 d；老化 6 d 显著低于老化 9 d。与未老化种子相比，老化 9 d 后 4K58 的发芽指数下降幅度约为 4K59 的 1.1 倍，C178 约为 C179 的 1.1 倍。

表 3 不同水稻品种老化处理后种子发芽指数比较

Table 3 Germination index of accelerated aging seeds of four rice cultivars

品种	不同老化时间处理后的发芽指数			
	ck	3	6	9 d
4K58	A 72.61 ± 4.97 a	B 61.79 ± 1.54 b	C 40.56 ± 1.21 b	D 23.97 ± 1.03 d
4K59	A 75.89 ± 3.51 a	B 62.25 ± 0.58 b	C 46.46 ± 1.23 a	D 28.97 ± 1.64 c
C178	A 81.11 ± 2.06 a	B 63.42 ± 4.42 ab	C 40.38 ± 1.69 b	D 32.94 ± 0.84 b
C179	A 83.17 ± 1.42 a	B 68.08 ± 1.92 a	C 48.00 ± 0.10 a	D 38.34 ± 2.06 a

说明：ck 是指未经老化处理的种子。数值后不同小写字母表示不同水稻品种经相同老化天数处理后的种子发芽指数差异显著；数值前不同大写字母表示同一水稻品种经不同老化天数处理后的种子发芽指数差异显著 ($P<0.05$)

2.3.3 平均发芽时间 4 个品种的未老化种子平均发芽时间无显著差异(表 4)。老化 3 d 后，4 个品种的种子平均发芽时间也无显著差异。老化 6 d 后，4K58 的平均发芽时间显著高于 C178；C178 显著高于 4K59；4K59 显著高于 C179。与未老化种子相比，老化 6 d 后 4K58 的平均发芽时间上升幅度约为 4K59 的 1.5 倍，C178 约为 C179 的 1.4 倍。老化 9 d 后，4K58 和 4K59 的种子平均发芽时间均显著高于 C178 和 C179；4K58 和 4K59 之间，C178 和 C179 之间均无显著差异。随老化时间的延长，4 个品种的种子平均发芽时间均呈增加的趋势；其中 4 个品种老化 9 d 的种子平均发芽时间显著高于老化 6 d；老化 6 d 显著高于老化 3 d；C178 和 C179 老化 3 d 的种子平均发芽时间显著高于未老化处理的种子。

表4 不同水稻品种老化天数处理后种子平均发芽时间比较

Table 4 Mean germination time of accelerated aging seeds of four rice cultivars

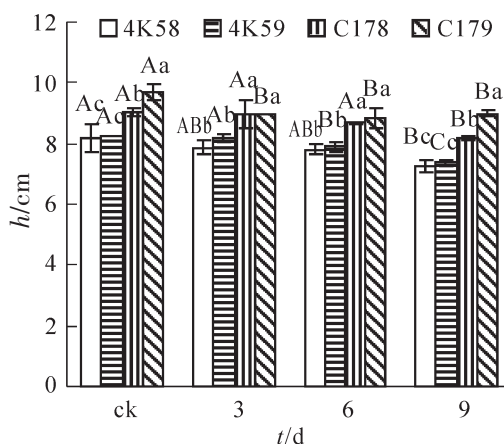
品种	不同老化天数处理后的平均发芽时间/d			
	ck	3	6	9 d
4K58	C 1.55 ± 0.11 a	C 1.76 ± 0.04 a	B 2.74 ± 0.01 a	A 4.18 ± 0.43 a
4K59	C 1.44 ± 0.08 a	C 1.75 ± 0.02 a	B 2.20 ± 0.03 c	A 3.83 ± 0.33 a
C178	D 1.36 ± 0.03 a	C 1.73 ± 0.08 a	B 2.52 ± 0.03 b	A 3.08 ± 0.07 b
C179	D 1.31 ± 0.04 a	C 1.67 ± 0.10 a	B 2.10 ± 0.02 d	A 2.78 ± 0.05 b

说明: ck 是指未经老化处理的种子。数值后不同小写字母表示不同水稻品种经相同老化天数处理后的种子平均发芽时间差异显著; 数值前不同大写字母表示同一水稻品种经不同老化天数处理后的种子平均发芽时间差异显著 ($P < 0.05$)

2.4 不同老化天数处理对幼苗生长的影响

2.4.1 苗高 种子发芽试验结束后, 分别测定了幼苗的苗高和鲜质量。结果显示: 未老化和老化 9 d 的 C179 幼苗苗高显著高于其余 3 个品种(图 3); C178 的幼苗苗高显著高于 4K58 和 4K59; 4K58 和 4K59 之间无显著差异。老化 3 和 6 d 后, C178 和 C179 的苗高均显著高于 4K58 和 4K59; C178 和 C179 之间, 4K58 和 4K59 之间均无显著差异。随老化时间的延长, 4 个品种的幼苗苗高均呈下降趋势。其中 4K58 和 C178 老化 9 d 的幼苗苗高显著低于未老化幼苗, 而老化 6 d, 3 d 和 ck 之间均无显著差异。4K59 的幼苗苗高随老化处理时间延长下降较明显, 老化 9 d 的苗高显著低于老化 6 d, 老化 6 d 显著低于老化 3 d 和 ck。未老化的 C179 幼苗苗高显著高于老化 3, 6 和 9 d; 后三者间无显著差异。

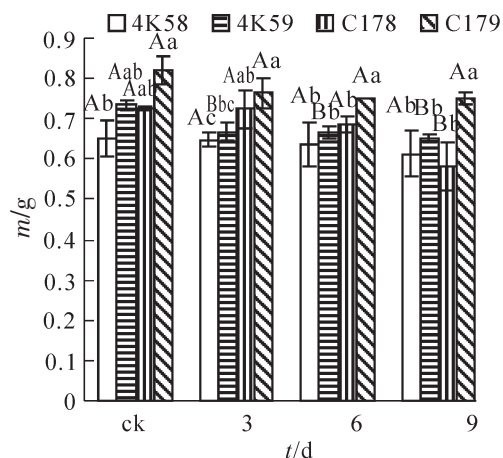
2.4.2 鲜质量 未老化处理的种子中, C179 品种的幼苗鲜质量显著高于 4K58, 与 4K59 和 C178 无显著差异(图 4)。老化 3 d 后, C179 的幼苗鲜质量显著高于 4K59 和 4K58; C178 的鲜质量显著高于 4K58; 4K58 和 4K59 之间无显著差异。老化 6 d 和 9 d 后, C179 的幼苗鲜质量显著高于其他 3 个品种, 而 3 个品种之间均无显著差异。随老化时间的延长, 4 个品种的幼苗鲜质量均呈下降趋势, 但 4K58 和 C179 品种不同老化处理后的幼苗鲜质量均无显著差异。C178 老化 9 d 的幼苗鲜质量显著低于其他 3 个处理, 而 3 个处理之间均无显著差异。4K59 未老化处理的幼苗鲜质量显著高于老化 3, 6 和 9 d, 后三者之间均无显著差异。



ck 是指未经老化处理的种子。不同小写字母表示不同水稻品种经相同老化天数处理后的种子发芽 14 d 的幼苗苗高值差异显著; 不同大写字母表示同一水稻品种经不同老化天数处理后的种子发芽 14 d 的幼苗苗高值差异显著 ($P < 0.05$)

图3 不同水稻品种老化处理后发芽 14 d 的幼苗苗高

Figure 3 Shoot lengths of accelerated aging seeds of four rice cultivars



ck 是指未经老化处理的种子。不同小写字母表示不同水稻品种经相同老化天数处理后的种子发芽 14 d 的幼苗鲜质量值差异显著; 不同大写字母表示同一水稻品种经不同老化天数处理后的种子发芽 14 d 的幼苗鲜质量值差异显著 ($P < 0.05$)

图4 不同水稻品种老化处理后发芽 14 d 的幼苗鲜质量

Figure 4 Fresh weights of accelerated aging seeds of four rice cultivars

3 讨论

种子休眠是指有生活力的种子在适宜的萌发条件下不能萌发的现象，是植物生长发育过程中的一个暂停生长的阶段^[12]。种子休眠是影响种子耐藏性的原因之一。一般认为，休眠种子具备更高的抵抗能力，通过长时间储藏仍能保持活力。然而，关于种子休眠性和耐藏性之间的关系研究仍旧较少，且在不同的物种研究中存在着相反的结论。

人工加速老化是研究种子耐藏性常用的方法。人工加速老化的原理是在人工创造的条件下加速种子的劣变，使种子活力出现差异，通过测定种子活力相关指标的变化来判断种子的耐藏性^[13]。由于能在短时间内获得不同老化程度的种子，因而人工加速老化广泛应用于种子耐藏性研究。

细胞膜是维持细胞内环境稳态的一道屏障，细胞膜系统的生理生化变化与种子活力密切相关。种子老化后，细胞膜功能受损，膜透性增加，大量可溶性营养物质及生理活性物质外渗，电导率增大^[14]。本研究发现：随老化时间延长，4 个品种的种子电导率值均呈增加趋势，说明种子老化时间越长，劣变越严重，活力越低，这与 SWAMY 等^[15]的结果一致。此外，未老化的 4K58 的电导率值显著高于 4K59；老化后 4K58 的电导率值也高于 4K59，表明老化后 4K58 的种子活力比 4K59 低，耐藏性更差。

核苷酸浸出液质量浓度的高低反映细胞膜的裂变程度，核苷酸浸出液质量浓度越高，说明种子细胞膜裂变越严重，活力越低^[16]。本研究发现，随老化时间的延长，4 个品种的核苷酸浸出液质量浓度均呈增加趋势，也说明种子活力随老化程度加深而逐渐降低。未老化处理的 4K58 和 4K59 种子核苷酸浸出液无显著差异；但老化处理(3, 6, 9 d)后，4K58 的核苷酸浸出液均显著高于 4K59，说明老化后 4K58 种子活力比 4K59 更低，不耐储藏。此外，C178 种子的核苷酸浸出液质量浓度也显著低于 C179，似乎表明这种储藏特性可遗传。

张瑛等^[13]指出，通常可采用发芽率、发芽势、发芽指数、平均发芽时间等指标作为判断种子耐藏性的标准。本研究发现，随老化时间的延长，4 个品种种子的发芽势、发芽率、发芽指数均逐渐下降，平均发芽时间逐渐增加，这与陈良碧^[17]的研究结果一致。未经老化处理的种子，4 个品种的发芽势、发芽率、发芽指数和平均发芽时间等均无显著差异。随着老化程度加深，4 个品种的发芽指标逐渐出现显著差异。例如老化 9 d 后，4K58 的发芽势显著低于 4K59，C178 也显著低于 C179；老化 6 d 后，C178 的发芽率显著低于 C179；老化 6 和 9 d 后，4K58 和 C178 种子的发芽指数均分别显著低于 4K59 和 C179；老化 6 d 后，4K58 和 C178 种子的平均发芽时间均分别显著高于 4K59 和 C179。以上这些结果均表明，经老化后 4K58 的种子活力比 4K59 更低，说明 4K58 的储藏性更差，且其杂交后代也保留了这种特性。同时，本研究也发现：4K58 和 4K59 的杂交 F₂ 种子(C178 和 C179)活力均比 4K58 和 4K59 更高，说明这些种子更耐储藏。

种子发芽结束后的幼苗生长指标表明，随老化程度加深，幼苗的苗高和鲜质量均逐渐下降，说明种子活力逐渐下降。所有处理的 4K58 幼苗苗高和鲜质量均与 4K59 无显著差异；老化 9 d 后的 C178 幼苗苗高和老化 6 和 9 d 的幼苗鲜质量均显著低于 C179。这些结果说明幼苗的生长指标不能明显反映 4K58 的储藏性比 4K59 更差，但两者的杂交 F₂ 种子耐藏性存在差异。

综上所述，经人工加速老化处理后，具有休眠特性的 4K58 种子由于其电导率值和核苷酸浸出液质量浓度均高于无休眠特性的 4K59 种子；而其发芽指标均低于 4K59，推测具有休眠特性的水稻种子更不耐储藏。同时，4K58 与不育系的杂交 F₂ 种子的耐藏性也低于 4K59 与不育系的杂交 F₂ 种子，表明这种储藏特性可遗传至下代。由于本研究采用的是人工加速老化方法来测定种子的耐藏性，并不能完全反映自然储藏过程中的变化，且只选用了 2 个供试材料。因此，有关种子休眠特性与耐藏性关系研究还需在更多类型的植物种子以及自然老化的种子材料中进行。

4 参考文献

[1] 侯雅杰. 种子休眠与耐藏关系探析[J]. 现代农业科技, 2015(23): 51.

HOU Yajie. Study on relationship between seed dormancy and storage tolerance [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2015 (23): 51.

- [2] 鱼小军, 徐长林, 王芳, 等. 草玉梅种子休眠原因及解除休眠方法[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(1): 65 – 70.
YU Xiaojun, XU Changlin, WANG Fang, *et al.* The cause of *Anemone rivularis* seed dormancy and the methods for breaking dormancy [J]. *Chin J Ecol*, 2004, **33**(1): 27 – 29.
- [3] 李振华, 王建华. 种子活力与萌发的生理与分子机制研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(4): 646 – 660.
LI Zhenhua, WANG Jianhua. Advances in research of physiological and molecular mechanism in seed vigor and germination [J]. *Sci Agric Sin*, 2015, **48**(4): 646 – 660.
- [4] 徐保钦, 陆作楣. 籼稻强休眠保持系 II 112B 与双亲休眠性的比较[J]. 南京农业大学学报, 2008, **31**(4): 8 – 12.
XU Baoqin, LU Zuomei. Comparison on seed dormancy between high dormancy maintainer line II 112B and its parents in indica rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *J Nanjing Agric Univ*, 2008, **31**(4): 8 – 12.
- [5] 李金华, 王丰, 廖亦龙, 等. 水稻种子活力的生理生化及遗传研究[J]. 分子植物育种, 2009, **7**(4): 772 – 777.
LIN Jinhua, WANG Feng, LIAO Yilong, *et al.* Advance on seed vigor physiological-biochemical and genetic mechanisms in rice [J]. *Mol Plant Breed*, 2009, **7**(4): 772 – 777.
- [6] 兰海, 冷亦峰, 周树峰, 等. 强休眠玉米种子休眠前后的蛋白差异表达[J]. 植物遗传资源学报, 2015, **16**(1): 23 – 28.
LAN Hai, LENG Yifeng, ZHOU Shufeng, *et al.* Proteomic analysis of storage substances during after-ripening of dormant seeds with dry ripening process in maize inbred line 08-641 [J]. *J Plant Genet Resour*, 2015, **16**(1): 23 – 28.
- [7] 董国军, 胡兴明, 曾大力, 等. 水稻种子人工老化和自然老化的比较研究[J]. 浙江农业科学, 2004(1): 27 – 29.
DONG Guojun, HU Xingming, ZENG Dali, *et al.* Research on comparison between artificial aging and natural aging of rice seed [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 2004(1): 27 – 29.
- [8] DELOUCHE J C, BASKIN C C. Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seeds lots [J]. *Seed Sci Technol*, 1973, **1**(2): 427 – 452.
- [9] CAO Dongdong, HU Jin, GAO Canhong, *et al.* Chilling tolerance of maize (*Zea mays* L.) can be improved by seed soaking in putrescine [J]. *Seed Sci Technol*, 2008, **36**(1): 191 – 197.
- [10] DESWAL D P, SHEORAN I S. A simple method for seed leakage measurement: applicable to single seeds of any size [J]. *Seed Sci Technol*, 1993, **21**(1): 179 – 185.
- [11] ZHANG Sheng, HU Jin, ZHANG Yin, *et al.* Seed priming with brassinolide improves lucerne (*Medicago sativa* L.) seed germination and seedling growth in relation to physiological changes under salinity stress [J]. *Austr J Agric Res*, 2007, **58**(8): 811 – 815.
- [12] XU Shengchun, LI Yongping, HU Jin, *et al.* Responses of antioxidant enzymes to chilling stress in tobacco seedlings [J]. *Agric Sci China*, 2010, **9**(11): 1594 – 1601.
- [13] 张瑛, 滕斌, 吴敬德, 等. 水稻种子高温高湿人工加速老化试验方法研究[J]. 中国粮油学报, 2010, **25**(10): 8 – 13.
ZHANG Ying, TENG Bin, WU Jingde, *et al.* Study on accelerated aging test of rice seeds with high temperature and humidity [J]. *J Chin Cereal Oil Ass*, 2010, **25**(10): 8 – 13.
- [14] 胡晋. 种子学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [15] SWAMY Y M I, SOWBHAGYA C M, BHATTACHARYA K R. Changes in the physicochemical properties of rice with aging [J]. *J Sci Food Agric*, 1978, **29**(7): 627 – 639.
- [16] HAMPTON J G, LEEKS C R F, McKENZIE B A. Conductivity as a vigour test for *Brassica* species [J]. *Seed Sci Technol*, 2009, **37**(1): 214 – 221.
- [17] 陈良碧. 杂交水稻种子生理特点及耐贮藏性的研究[J]. 种子, 1994(4): 19 – 24.
CHEN Liangbi. Research on physiological characteristics and storage tolerant of hybrid rice [J]. *Seed*, 1994(4): 19 – 24.