

Wx^{mp} 基因型半糯粳稻的耐储藏性评价

赵春芳, 陈涛, 姚姝, 赵庆勇, 赵凌, 周丽慧, 朱镇, 王才林, 张亚东

(江苏省农业科学院粮食作物研究所/国家耐盐碱水稻技术创新中心华东中心/江苏省优质水稻工程技术研究中心, 南京 210014)

摘要: 稻谷储藏过程的陈化变质对水稻生产和经营造成严重损失, 开展稻谷耐储藏性研究对耐储藏水稻品种筛选具有重要意义。本研究利用 197 份半糯粳稻、117 份普通粳稻和 14 份糯稻为试验材料, 采用人工高温高湿陈化方法, 以耐储藏指数陈化前后发芽率降低百分率(SDI)作为评价指标, 分析了半糯粳稻与普通粳稻及糯稻间的耐储藏性差异。根据 SDI 高低, 供试材料可分成 4 类: 第 I 类高耐储型 23 份, $75\% \leq \text{SDI} < 100\%$, 包含半糯粳稻 8 份和普通粳稻 15 份; 第 II 类较耐储型 77 份, $50\% \leq \text{SDI} < 75\%$, 包含半糯粳稻 32 份、普通粳稻 44 份和糯稻 1 份; 第 III 类较不耐储型 118 份, $25\% \leq \text{SDI} < 50\%$, 包含半糯粳稻 82 份、普通粳稻 32 份和糯稻 4 份; 第 IV 类不耐储型 110 份, $0 \leq \text{SDI} < 25\%$, 包含半糯粳稻 75 份、普通粳稻 26 份和糯稻 9 份。结果表明半糯粳稻总体上的耐储藏性低于普通粳稻, 而糯稻更不耐储。对材料生育类型间的耐储藏性分析显示半糯粳稻和普通粳稻中仅早熟中粳稻型表现较低。陈化前后稻谷新鲜度值降低百分率(RPFV)进一步验证半糯粳稻耐储藏性高于糯稻而低于普通粳稻。通过 SDI 和 RPFV 综合评价, 筛选到高耐储藏的半糯粳稻 4 份(BG26、BG69、BG81 和 BG164), 普通粳稻 9 份(南梗晴谷、CG10、CG23、CG25、CG28、CG32、CG38、CG49 和 CG71)。研究将为改良水稻品种的耐储藏特性以及发掘耐储藏基因资源提供材料来源。

关键词: 半糯粳稻; 耐储藏; 发芽率; 新鲜度

Evaluation of Storage Tolerance in Semi-Waxy *Japonica* Rice Varieties (Lines) with the Wx^{mp} Genotype

ZHAO Chunfang, CHEN Tao, YAO Shu, ZHAO Qingyong, ZHAO Ling, ZHOU Lihui, ZHU Zhen, WANG Cailin, ZHANG Yadong

(Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/East China Branch of National Center of Technology Innovation for Saline-Alkali Tolerant Rice/Jiangsu High Quality Rice R&D Center, Nanjing 210014)

Abstract: Grain quality deterioration during rice aging storage has caused serious losses to rice production and management. It is of great significance to carry out research on storage tolerance and identify rice varieties with high storability. In this study, 197 semi-waxy *japonica* varieties, 117 common *japonica* varieties and 14 waxy *japonica* varieties were used. The storage tolerance characteristics was analyzed at the artificial high temperature and high humidity condition using the evaluation index of the storage tolerance index (SDI) that defines based reduction percentage of germination rate before and after aging. According to SDI, these genotypes were divided into four groups: group I was the high storability type, $75\% \leq \text{SDI} < 100\%$, including 8 semi-waxy *japonica* rice and 15 common *japonica* rice; group II was the relative storability type, $50\% \leq \text{SDI} < 75\%$, including 32 semi-waxy *japonica* rice, 44 common *japonica* rice and 1 waxy rice; group III was the less storability type, $25\% \leq \text{SDI} < 50\%$, including 82 semi-waxy *japonica* rice, 32 common *japonica* rice and 4 waxy rice; group IV was non-storability type, $0 \leq \text{SDI} < 25\%$, including 75 semi-waxy *japonica* rice, 26 common *japonica* rice and 9 waxy rice. The storage tolerance of semi-waxy *japonica* rice, which was higher than that of

收稿日期: 2023-02-10 修回日期: 2023-03-20 网络出版日期: 2023-04-21

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230210002>

第一作者研究方向为水稻遗传育种, E-mail: czhao@jaas.ac.cn

通信作者: 张亚东, 研究方向为水稻遗传育种, E-mail: zhangyd@jaas.ac.cn

基金项目: 江苏省自主创新资金[CX(21)3108]; 国家重点研发计划(2022YFE0117800); 现代农业产业技术体系(CARS-01)

Foundation projects: Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund [CX (21) 3108]; National Key Research and Development Programs (2022YFE0117800); The Modern Agricultural Industry Technology System (CARS-01)

the waxy rice, was lower than that of common *japonica* rice. The analysis of storage tolerance among different growth-development types showed that only the early-maturing medium type in both of semi-waxy and common *japonica* rice had the lowest storability value. Using the reduction percentage of freshness value (RPFV), semi-waxy *japonica* rice showing lower storability than common *japonica* rice and higher storability than waxy *japonica* rice was observed. Through the comprehensive evaluation of SDI and RPFV, four semi-waxy *japonica* rice (BG26, BG69, BG81 and BG164) and nine common *japonica* rice (Nanjing-qinggu, CG10, CG23, CG25, CG28, CG32, CG38, CG49 and CG71) were obtained with high storability. Collectively, the research provided germplasm materials applicable for the storability improving of rice varieties and exploring the storage tolerance gene resources.

Key words: semi-waxy *japonica* rice; storage tolerance; germination percentage; grain freshness

稻谷收获后在自然条件下储藏,通常会陈化变质,发芽率下降^[1-2]。据调查数据分析,我国每年因稻谷储藏造成的损失大约在5%左右,数量高达2000万吨,远大于西方发达国家的1%~3%^[3]。为了延缓储藏稻谷的陈化变质速度,往往采用高标准低温库、气调库的储藏模式或者改良包装方式等方法,以减低储藏稻谷的呼吸和代谢速率。这不仅导致大量材料和能源的消耗,不利于环境保护,也不能从根本上保证储藏安全和人们对高品质稻米的要求^[4-5]。因此,从水稻品种本身来解决稻谷储藏期间的陈化变质问题无疑是一条经济有效的途径。

水稻耐储藏特性通常是用发芽率、发芽势和发芽指数等指标进行评价^[6],一般在陈化处理一段时间后测定。耐储藏性好的稻谷在进行长期储藏或人工加速陈化后,往往仍能保持较好的发芽情况。耐储藏特性是受遗传和生长发育、成熟期以及收获后的环境等诸多因素影响的一个复杂性状。此外在因素主要包括成熟度、水分含量、加工程度、贮藏件等环境因素;内在因素主要是遗传因素,包括品种类型、淀粉理化与结构特性、蛋白质和脂肪酸含量等^[7-9]。不同水稻品种的耐储藏特性存在明显差异,籼粳形态指数与耐储藏特性存在极显著正相关性,总体上籼稻的耐储藏特性强于粳稻^[10-12]。不同来源的水稻种质资源的耐储藏特性亦存在很大差异^[13-15],吴方喜等^[14-15]通过人工老化,对193份中国水稻微核心种质和3K基因组中的456份世界核心种质进行耐储藏特性鉴定,发现中国核心种质中耐储藏特性较好的种质所占比例较小,籼稻和粳稻中均存在较耐储种质,总体上湖南、湖北、四川、安徽的种质耐储藏性高于黑龙江、上海、云南等地来源的种质;世界核心种质的耐储藏特性有很大差异,热带或亚热带起源的水稻比温带起源的更耐储藏,在籼稻和粳稻中都检测到极端耐储藏的材料。

半糯粳稻是近年来在长江中下游地区推广应用的一种软米型粳稻品种,因食味品质较好,已逐渐发展成为江苏省及周边省/市的地产优质高档粳米的核心品种。研究表明,半糯粳稻在稻米组分、淀粉理化特性、淀粉结构等多个方面与普通粳稻存在明显差异^[16-18]。生产实践发现有些半糯粳稻品种在储藏过程中稻米容易陈化(色泽变暗、产生异味),但是,迄今尚未有对半糯粳稻的耐储藏性进行系统鉴定的报道。本研究通过人工陈化方法,根据人工陈化前后种子的发芽率,计算耐储藏指数作为评价指标,对328份粳稻新品种(系)进行耐储藏性鉴定,筛选高耐储藏材料,并对半糯粳稻与普通粳稻和糯稻之间的耐储藏性差异进行分析,以期耐储藏半糯粳稻品种的选育和耐储藏基因挖掘提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试材料共328份,均为江苏省粳稻品种或遗传稳定的水稻新品系($F_8 \sim F_{10}$)。其中半糯粳稻品种24份、新品系173份;普通粳稻品种9份、新品系108份;糯稻品种1份、新品系13份;材料详细信息见表1。

1.2 半糯基因型检测

低直链淀粉含量突变基因(又称半糯基因) Wx^{mp} 是 Wx^b 基因在第4外显子53 bp处发生G/A替换而产生的一种突变类型。陈涛等^[19]利用四引物扩增受阻突变体系PCR技术(tetra-primer ARMS-PCR, tetra-primer amplification refractory mutation system-PCR),针对该SNP位点开发了四引物分子标记,通过PCR扩增,可获得不同等位基因的DNA片段。利用 Wx^{mp} 四引物标记对314份粳稻材料(糯稻除外)的叶片DNA进行PCR扩增和琼脂糖凝胶电泳,根据条带类型,判定半糯基因型。

表1 供试材料信息

Table 1 The information of materials used in this study

| 类型 Type | 份数 No. | 材料名称 Material name |
|---------------------------------|-----------|--|
| 半糯粳稻 Semi-waxy japonica rice | 197 | 苏香粳100、宁粳8号、徐稻9号、南粳46、南粳5055、丰粳1606、南粳9108、金香玉1号、南粳2728、南粳505、南粳3908、南粳5718、南粳58、南粳晶谷、南粳7718、南粳518、南粳56、南粳5713、南粳5818、南粳66、南粳9308、南粳8911、南粳8917、南粳9719、江苏省农业科学院粮食作物研究所培育的半糯粳稻新品系173份(BG01~BG173) |
| 普通粳稻 Common japonica rice | 117 | 淮稻5号、武育粳3号、泗稻16、泗稻301、南粳5758、南粳晴谷、南粳莹谷、南粳5626、南粳5916、江苏省农业科学院粮食作物研究所培育的普通粳稻新品系108份(CG01~CG108) |
| 糯稻 Waxy japonica rice | 14 | 南粳香糯、江苏省农业科学院粮食作物研究所培育的粳糯稻新品系13份(NG01~NG13) |

Wx^{mp} 四引物序列为:正向外引物 Wx^{mp} -O-F(5'-ATGTTGTGTTCTTGTGTTCTTTGCAGGC-3')、反向外引物 Wx^{mp} -O-R(5'-GTAGATCTTCTCACCGG TCTTTCCCAA-3')、正向内引物 Wx^{mp} -I-F(5'-GGG TGAGTTTTTCCATTGCTACAATCG-3')和反向内引物 Wx^{mp} -I-R(5'-GTCGATGAACACACGGTC GACTCAAT-3')。

1.3 人工陈化方法

2021年正季收获的新鲜稻谷用于耐储藏处理试验。稻谷于室温储藏6个月以打破种子休眠性。将每份稻谷(约200g)装于网纱袋中,置于高温(38℃)高湿(75%)的种子老化箱中,进行人工陈化处理,分别于15d、25d、35d对处理后稻谷进行取样,将处理后和未经处理的稻谷保存于-20℃冰箱中。

陈化处理与未经处理的种子放入种子袋中,每个品种(系)选取100粒,重复3次,先浸种3d,期间每天换水,再湿润培养进行催芽。在恒温培养箱中催芽,培养箱设置温度为30℃,光照/黑暗时间为16h/8h,7d后统计发芽率。以种子露白为发芽标准。

参照黄玮雯等^[20]对稻谷耐储藏的评价方法,将陈化前后种子发芽率降低百分率定义为耐储藏指数(SDI, storage durability index),作为种子耐储藏特性的评价指标,SDI越高表示耐储藏性越好。计

算公式为: $SDI(\%) = 100 - [(未陈化种子的发芽率 - 陈化种子的发芽率) / 未陈化种子的发芽率] \times 100$ 。

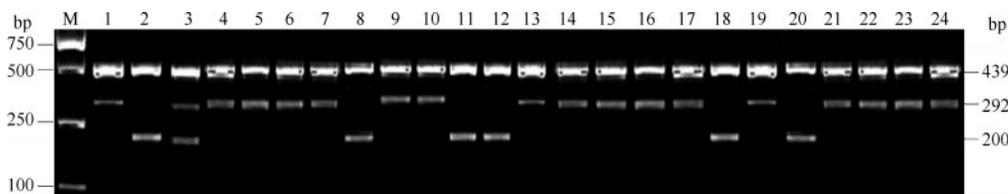
1.4 稻谷新鲜度值测定

利用稻谷新鲜度测定仪(JXCD10,北京东孚久恒仪器技术有限公司),按照LS/T6118-2017(粮油检验 稻谷新鲜度测定与判别),对陈化处理前后稻谷的新鲜度值进行测定。以新鲜度值降低百分率(RPFV, reduction percentage of freshness value)为指标,表示陈化前后稻谷新鲜度变化,反映稻谷的耐储藏特性。其计算公式为: $RPFV(\%) = [(陈化前稻谷新鲜度值 - 陈化后稻谷新鲜度值) / 陈化前稻谷新鲜度值] \times 100$ 。

2 结果与分析

2.1 半糯粳稻的基因型鉴定

利用 Wx^{mp} 半糯基因检测标记,对314份供试材料(无糯稻)进行基因型检测。PCR扩增产物经2.0%琼脂糖凝胶电泳后,显示为439bp、292bp和200bp的3种带型。根据 Wx^{mp} 突变位点等位基因型的设计原理,同时具有扩增位点439bp和292bp的,为携带 Wx^{mp} 等位基因的半糯粳稻品种(系),而同时具有扩增位点439bp和200bp的,则为普通粳稻品种(系),图1显示了携带和未携带 Wx^{mp} 等位基



M: DL2000 标记; 1: 携带 Wx^{mp} 对照(南粳46); 2: 未携带 Wx^{mp} 对照(淮稻5号); 3: 基因型杂合材料; 4~7、9~10、13~17、19、21~24: Wx^{mp} 基因型半糯粳稻品种(系); 8、11~12、18、20: 普通粳稻品种(系)

M: DL2000 Marker; 1: Control variety with Wx^{mp} (Nanjing 46); 2: Control variety without Wx^{mp} (Huaidao 5); 3: Material with heterozygous genotype; 4-7, 9-10, 13-17, 19, 21-24: Semi-waxy japonica varieties (lines); 8, 11-12, 18, 20: Common japonica varieties (lines)

图1 利用 Wx^{mp} 分子标记检测部分粳稻品种(系)中的半糯基因型

Fig.1 Detection of semi-waxy genotypes in partial japonica varieties (lines) using Wx^{mp} molecular markers

因对照品种以及部分供试材料的基因型检测结果。根据 314 份粳稻材料基因型检测结果,共检测到 197 份为半糯粳稻,117 份为普通粳稻。

2.2 不同陈化时间的耐储性差异分析

统计 328 份供试材料陈化处理 15 d、25 d、35 d 后的种子发芽率,结合对照组发芽率计算每份材料的耐储指数,分别比较 3 个处理时间下的耐储藏指数(SDI)差异(图 2)。结果表明,陈化处理 15 d 后的 SDI 表现出偏峰分布,SDI \geq 70.0% 的耐储材料有 180

份,占比 54.9%,而 SDI \leq 30.0% 的不耐储材料仅有 24 份,说明陈化处理 15 d 没有实现对耐储材料的筛选效果。陈化处理 25 d 后的 SDI 表现出正态分布,鉴定到 SDI $>$ 70.0% 的耐储材料 35 份,占比 10.7%。当陈化处理时间增至 35 d 时,供试材料的 SDI 集中分布于 0~30.0%,SDI \geq 70.0% 的耐储材料仅有 2 份,而 SDI \leq 30.0% 的不耐储材料有 219 份,说明处理时间过长,大部分稻谷已经失去发芽活性。因此,25 d 为本研究材料耐储性鉴定的最适处理时间。

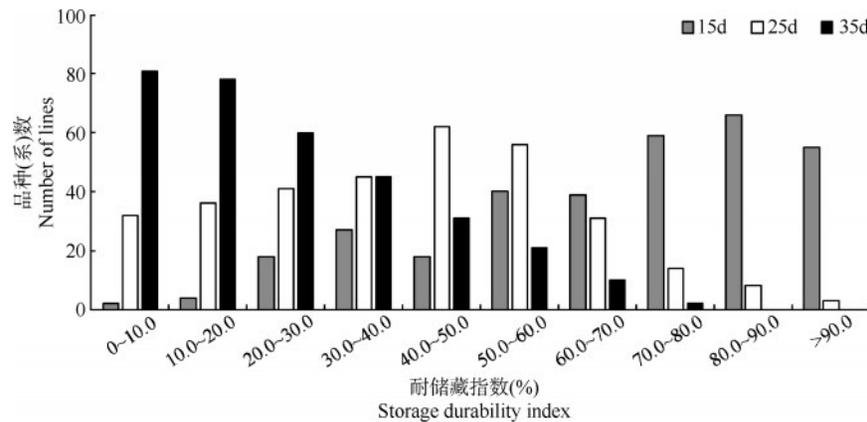


图 2 人工陈化不同处理的耐储藏指数频率分布

Fig.2 Frequency distribution of storage durability index at different artificial aging treatments

2.3 不同品种类型间的耐储性差异分析

以 25 d 为人工陈化处理时间,分析半糯粳稻、普通粳稻和糯稻 3 种品种(系)类型间的 SDI 差异。结果表明,在普通粳稻中 SDI 表现为正态分布,集中分布于 30.0%~70.0%;在半糯粳稻中 SDI 表现为偏态分布,集中分布于 0~60.0%;在糯稻集中在 0~30.0% (图 3)。将 SDI 按 0~25%、25%~50%、50%~75% 和 75%~100% 进行材料耐储藏性的等级划分,分别对应:不耐储型、较不耐储型、较耐储型和高耐储型。半糯粳稻在不耐储型和较不耐储型上分别

有 75 份和 82 份,占比分别为 38.1% 和 41.6%,明显高于普通粳稻的 22.2% 和 27.4% (分别有 26 份和 32 份),而在较耐储型和高耐储型上有 32 份和 8 份,占比分别为 16.2% 和 4.1%,明显低于普通粳稻的 37.6% 和 12.8% (分别有 44 份和 15 份)。14 个糯稻品种(系)主要为不耐储型和较不耐储型,占比分别为 64.3% 和 28.6%,仅 1 份材料属于较耐储型。结果表明半糯粳稻的耐储藏性低于普通粳稻,而糯稻更不耐储(表 2)。

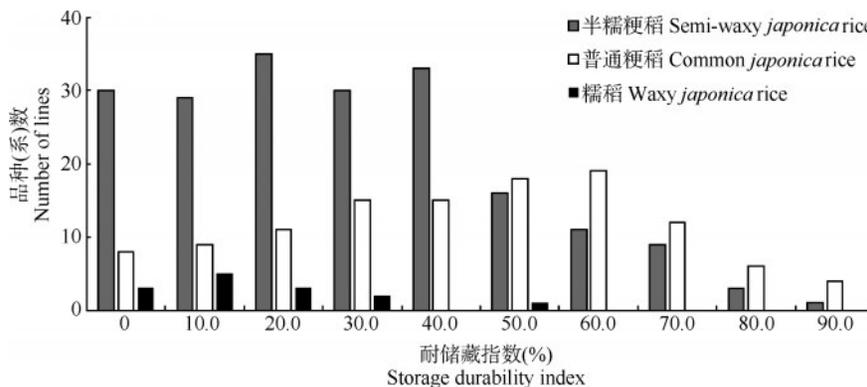


图 3 耐储藏指数在不同品种类型中的分布

Fig.3 Distribution of storage durability index in different types of rice varieties

表2 不同品种类型的耐储藏性比较

Table 2 Comparison of storage resistance of different types of rice varieties

| 类型 Type | 份数 No. | 不耐储型 Not resistant to storage 0≤SDI<25% | | 较不耐储型 Less resistant to storage 25%≤SDI<50% | | 较耐储型 More resistant to storage 50%≤SDI<75% | | 高耐储型 High resistant to storage 75%≤SDI<100% | |
|------------------------------|-----------|---|----------------|---|----------------|--|----------------|---|----------------|
| | | 份数 No. | 比率(%) Ratio | 份数 No. | 比率(%) Ratio | 份数 No. | 比率(%) Ratio | 份数 No. | 比率(%) Ratio |
| | | 半糯粳稻 Semi-waxy japonica rice | 197 | 75 | 38.1 | 82 | 41.6 | 32 | 16.2 |
| 普通粳稻 Common japonica rice | 117 | 26 | 22.2 | 32 | 27.4 | 44 | 37.6 | 15 | 12.8 |
| 糯稻 Waxy japonica rice | 14 | 9 | 64.3 | 4 | 28.6 | 1 | 7.1 | 0 | 0 |

2.4 不同生育类型间的耐储性差异分析

按生育类型供试材料可分为5类:早熟中粳稻型、中熟中粳稻型、迟熟中粳稻型、早熟晚粳稻型和迟熟晚粳稻型。耐储藏指数均值在普通粳稻的中熟中粳稻型中表现最高,而在半糯粳稻和普通粳稻的早熟中粳稻型中表现较低;糯稻品种(系)的迟熟

中粳稻型和早熟晚粳稻型的耐储藏指数也表现较低。通过多重比较,各类型中仅极端值间达到显著性差异,其余类型间的差异均未达到显著水平(表3)。表明半糯粳稻的耐储性受生育类型影响不大,而普通粳稻中仅早熟中粳稻类型表现相对较低。

表3 不同生育类型品种(系)的耐储藏指数比较

Table 3 Comparison of storage durability index of different growth-development types of rice varieties (lines)

| 类型 Type | 生育类型 Growth duration type | 份数 No. | 平均值±标准差(%) Mean±SD | 变异系数 (%)CV | 区间 Range | 偏度 Skewness | 峰度 Kurtosis |
|---------------------------------|------------------------------|-----------|-----------------------|---------------|-------------|----------------|----------------|
| 半糯粳稻 Semi-waxy japonica rice | 早熟中粳稻 | 19 | 25.8±23.2b | 89.9 | 1.7~79.2 | 0.15 | 0.93 |
| | 中熟中粳稻 | 85 | 31.5±19.9ab | 63.2 | 0.7~86.5 | 0.67 | 0.17 |
| | 迟熟中粳稻 | 35 | 35.4±21.8ab | 61.6 | 0.3~83.7 | 0.35 | -0.25 |
| | 早熟晚粳稻 | 51 | 38.4±22.1ab | 57.6 | 0.2~90.9 | 0.46 | -0.41 |
| | 中熟晚粳稻 | 7 | 32.5±15.5ab | 47.7 | 9.7~47.6 | -0.88 | -1.21 |
| 普通粳稻 Common japonica rice | 早熟中粳稻 | 2 | 22.8±12.5b | 54.8 | 13.9~31.6 | — | — |
| | 中熟中粳稻 | 47 | 56.1±23.1a | 41.2 | 2.7~90.8 | -0.61 | -0.37 |
| | 迟熟中粳稻 | 37 | 44.2±25.6ab | 57.9 | 0.2~91.5 | -0.03 | -0.85 |
| | 早熟晚粳稻 | 31 | 41.0±21.0ab | 51.2 | 2.4~71.9 | -0.02 | -1.20 |
| 糯稻 Waxy japonica rice | 迟熟中粳稻 | 7 | 20.5±19.7b | 96.1 | 1.3~53.3 | 0.87 | -0.65 |
| | 早熟晚粳稻 | 7 | 21.7±9.1b | 41.9 | 10.7~37.3 | 0.71 | 0.02 |

不同字母表示在0.05水平上的差异显著性

Different letters show significantly different at 0.05 level

2.5 稻谷新鲜度值进一步验证

通过检测陈化前后稻谷新鲜度值的变化,以新鲜度值降低百分率(RPFV)为指标,进一步分析了半糯粳稻、普通粳稻及糯稻之间的耐储藏性差异。结果表明,供试材料中RPFV的变化区间为0~24.8%,RPFV在普通粳稻中主要分布于0~15.0%,在半糯粳稻中主要分布于0~20.0%(图4、表4)。以

RPFV=10.0%为新鲜度显著降低的临界点,在RPFV≥10.0%的材料中,半糯粳稻占比为48.2%,高于普通粳稻的比例(23.9%)。表明半糯粳稻的新鲜度值降低比普通粳稻更严重,验证了半糯粳稻的耐储性低于普通粳稻。糯稻材料在RPFV<10.0%和≥10.0%中的占比分别为21.4%和78.6%,进一步证实糯稻耐储性较差。将耐储藏指数SDI与稻谷新鲜度

值降低百分率 RPFV 进行相关性分析,检测到二者的相关系数在普通粳稻和糯稻中分别为-0.206 和 -0.568,表现出显著相关性,而在半糯粳稻中相关系数(-0.103)较低,未达到显著水平。经过 RPFV 进一步评估,最终从高耐储型材料(8 份半糯粳稻和 15 份普通粳稻)中,筛选获得陈化处理稻谷新鲜度值在 75 以上(新鲜度值降低百分率 $\leq 10.0\%$)的综合高耐储材料 13 份,其中 4 份半糯粳稻:BG26、BG69、BG81 和 BG164,9 份普通粳稻:南粳晴谷、CG10、CG23、CG25、CG28、CG32、CG38、CG49 和 CG71。

表 4 不同品种类型的新鲜度值降低百分率比较

Table 4 Comparison of reduction percentage of freshness value in different rice types

| 类型 Type | 份数 No. | 新鲜度降低百分率 Reduction percentage of freshness value (RPFV) | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|--|-------|------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| | | 0~5.0% | | 5.0%~10.0% | | 10.0%~15.0% | | 15.0%~20.0% | | 20.0%~25.0% | |
| | | 份数 | 比率(%) | 份数 | 比率(%) | 份数 | 比率(%) | 份数 | 比率(%) | 份数 | 比率(%) |
| | | No. | Ratio | No. | Ratio | No. | Ratio | No. | Ratio | No. | Ratio |
| 半糯粳稻 Semi-waxy japonica rice | 197 | 41 | 20.8 | 61 | 30.0 | 71 | 36.0 | 20 | 10.2 | 4 | 2.0 |
| 普通粳稻 Common japonica rice | 117 | 28 | 23.9 | 61 | 52.1 | 26 | 22.2 | 2 | 1.7 | 0 | 0 |
| 糯稻 Waxy japonica rice | 14 | 0 | 0 | 3 | 21.4 | 2 | 14.3 | 9 | 64.3 | 0 | 0 |

3 讨论

种子发芽率是指在规定时间内正常发芽种子数占供试种子数的百分率,测定方法简单且贴近生产,常被作为稻谷耐储藏性研究的直接指标^[6]。本研究将陈化处理前后种子发芽率下降百分率定义为耐储藏指数,作为衡量稻谷耐储藏特性的指标,兼顾了处理前后不同材料间发芽率的差异性,评价指标准确性更高,也常被用于水稻耐储藏机理研究中^[20]。多数研究者认为,作物种子耐储藏性鉴定时人工老化技术能与自然老化相吻合,并完全可替代自然老化^[20-22]。本研究采用高温高湿(38 °C/75%)的人工陈化方法,对 328 份江苏省栽培粳稻新品种(系)进行耐储藏性的筛选鉴定,通过对 15 d、25 d、35 d 不同处理时间的耐储藏指数统计分析,发现 25 d 时,供试材料耐储藏性的筛选效果最好,可作为最适处理时间。该处理时间稍高于前人研究中选用的人工陈化处理时间^[15],这可能与供试材料类型和地理来源有关^[14-15]。通过耐储藏指数和稻谷新鲜度值双指标筛选,最终从供试材料中鉴定到高耐储藏粳

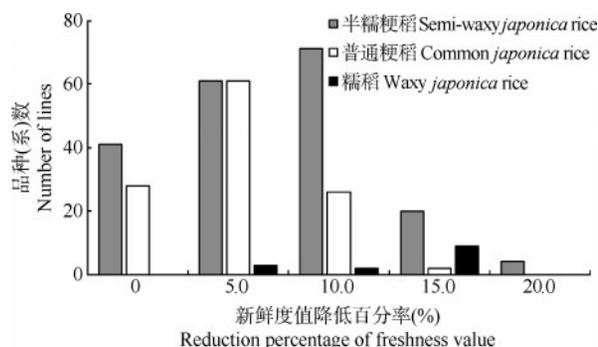


图 4 新鲜度值降低百分率在不同类型品种(系)中的分布
Fig.4 Distribution of reduction percentage of freshness value in different types of rice varieties (lines)

稻材料 13 份,其中半糯粳稻 4 份(BG26、BG69、BG81 和 BG164)和普通粳稻 9 份(南粳晴谷、CG10、CG23、CG25、CG28、CG32、CG38、CG49 和 CG71)。

3.1 半糯粳稻与普通粳稻间的耐储藏性差异

已有研究表明,不同品种间耐储藏性存在显著差异,一般来说粳稻的耐储藏性强于籼稻,非糯稻强于糯稻^[11,23-24]。半糯粳稻隶属于粳稻生态型,属于一种介于普通粳稻和糯稻之间的特殊类型,因具有较低的直链淀粉含量而得名^[25-26]。本研究首次研究了半糯粳稻与普通粳稻间的耐储藏性差异,统计分析表明,半糯粳稻的平均耐储藏指数为 33.5%,而普通粳稻的平均耐储藏指数为 47.8%,耐储藏指数在 0~50.0% 的半糯粳稻有 157 份,占半糯粳稻总数的 79.7%,而耐储藏指数在 0~50.0% 的普通粳稻有 58 份,占普通粳稻总数的 49.6%。说明半糯粳稻的耐储藏特性总体上低于普通粳稻,而糯稻低于非糯粳稻(半糯粳稻和普通粳稻)。半糯粳稻的直链淀粉含量,一般在 5%~10%,而普通粳稻一般在 15%~22%^[16-17,26],并且半糯粳稻和糯粳稻种子中脂质含量一般高于普通粳稻^[18]。非淀粉脂质是半糯粳稻和

糯稻中脂质的主要存在形式,可以产生更高的游离不饱和脂肪酸,在储藏过程中易被快速氧化。相反,普通粳稻因种子中具有较高的直链淀粉含量,脂质往往以淀粉脂质形式存在,储藏过程中脂质则不易被快速氧化分解,可以保持恒定的脂肪酸组分和含量。以往研究同样证实,腊质水稻种子中的非淀粉脂质比非腊质水稻种子中淀粉脂质产生更高的游离脂肪酸,在储藏过程中更易被氧化^[27]。因此,由于直链淀粉含量低导致的脂质存在形式变化和脂质的快速氧化,极可能是导致半糯粳稻和糯稻的耐储藏性低于普通粳稻的主要原因。

本研究通过对不同生态类型水稻材料的耐储藏性比较,发现早熟中粳稻的耐储藏指数在半糯粳稻和普通粳稻中均表现较低,其余生育类型间表现差异不大。可能的原因是该生育类型抽穗期始于8月初,抽穗期和灌浆期处于该地区最高温度,高温胁迫导致了籽粒灌浆和成熟度差,淀粉合成及晶体结构形成受到阻碍,淀粉含量特别是直链淀粉含量偏低,糯性加重,由此间接导致了稻谷耐储藏的降低。高辉等^[28]发现生育期越短的水稻品种,其直链淀粉含量和食味值越低。另一可能的原因是,早熟中粳稻稻谷收获早,晾晒期高温、干燥的气候条件导致稻谷含水量过低,从而影响了稻谷耐储藏性。已有研究证实,过度干燥会损伤种子发芽率,降低贮藏寿命^[29]。

3.2 耐储藏指数与新鲜度值的相关性

稻谷新鲜度值作为一个快速检测稻谷仓储状态的指标,可以准确地反映稻谷真实的新鲜程度,预判种用品质和储藏品质的变化^[30]。研究表明,新鲜度值与现行标准中反映稻谷新鲜程度的脂肪酸值和食味品尝值均呈极显著相关关系^[30-32],但是,目前关于种子发芽率与新鲜度值间的相关性研究较少。本研究在不同类型品种(系)中分析了两个筛选指标(耐储藏指数和新鲜度降低百分率)间的相关性,发现二者在普通粳稻和糯稻中相关性达到显著性水平,而半糯粳稻中相关性不显著。根据已有研究,不同类型品种在长期储藏或者受到湿热处理后稻米组分和理化特性变化存在显著差异,如糯稻和非糯稻品种在耐储藏特性上的差异主要由于糯稻中含有的高比例支链淀粉具有更强的吸水性而导致的^[9,23-24]。此外,种子衰老过程中其生理特性会发生显著变化,如丙二醛、可溶性糖含量逐渐降低,过氧化物酶活性升高^[33-34]。由此推测,半糯粳稻由于直链淀粉含量较低,湿热处理后的稻米理化组分

变化不同于普通粳稻,从而导致不同类型品种中新鲜度值的差异变化。

3.3 水稻耐储藏性的主要影响因素

研究表明,种子中脂质变化是影响其储藏性的主要因素,其中不饱和脂肪酸的氧化是导致脂质变化的最主要原因,而稻谷中脂肪氧化酶主要负责催化不饱和脂肪酸氧化^[35]。水稻脂肪氧化酶存在LOX1、LOX2和LOX3三种同工酶,其中以LOX3为主。对LOX3基因缺失突变的水稻研究发现,LOX3活性丧失可以显著延缓稻谷的陈化,增加耐储藏能力^[36]。此外,研究发现增强脂肪酸羟化酶基因*OsFAH2*表达可以显著降低脂质氧化,提高种子耐储藏性^[37]。黄祎雯等^[20]利用双单倍体群体定位到一些耐储藏性QTL,多数与脂质氧化相关基因的基因座邻近,说明脂质氧化基因可能是影响水稻耐储藏性的重要遗传因子。因此,本研究认为这4个品种的高耐储藏性与其自身的基因型有关,其耐储藏性差异极可能是由脂质氧化相关基因存在功能差异而导致的。目前课题组已经开展对13份高耐储藏材料和15份不耐储藏极端材料进行基因组重测序,拟对参与脂质氧化的关键酶如脂肪酶、脂肪氧化酶、脂氢过氧化物裂解酶、脂氢过氧化物异构酶等合成及调控基因,以及种子抗过氧化物酶如超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶等合成及调控基因,进行关键序列变异位点的发掘,为揭示水稻耐储藏性分子机理奠定基础。本研究鉴定到的高耐储藏品种(系)可直接应用于本地区,也可后续用作耐储藏水稻新品种选育的亲本材料及耐储藏基因挖掘的重要种质资源。

参考文献

- [1] 许惠滨,江敏榕,连玲,朱永生,蒋家煊,谢鸿光,谢华安,张建福. 稻谷耐储性研究进展. 福建农业科技, 2017(11): 41-44
Xu H B, Jiang M R, Lian L, Zhu Y S, Jiang J H, Xie H G, Xie H A, Zhang J F. Research process on rice grain storability. Fujian Agricultural Science and Technology, 2017(11): 41-44
- [2] 张安鹏,钱前,高振宇. 水稻种子活力的研究进展. 中国水稻科学, 2018, 32(3): 296-303
Zhang A P, Qian Q, Gao Z Y. Research advances on rice seed vigor. Chinese Journal of Rice Science, 2018, 32(3): 296-303
- [3] 万拯群. 我国农村储粮若干问题的意见和建议. 黑龙江粮食, 2009, 95(5): 47-51
Wan Z Q. Opinions and suggestions on some problems of rural grain storage in China. Heilongjiang Grain, 2009, 95(5): 47-51
- [4] 吴跃进,卢义宣,吴敬德,余增亮,张瑛,童继平,郑乐娅,余德

- 红. 耐储藏专用型水稻选育及相关技术研究. 中国稻米, 2004, 10(3): 6-7
- Wu Y J, Lu Y X, Wu J D, Yu Z L, Zhang Y, Tong J P, Zheng L Y, She D H. Study on the breeding and related technology of special storage-tolerant rice. *China Rice*, 2004, 10(3): 6-7
- [5] Zeng D L, Guo L B, Xu Y B, Yasukumi K, Zhu L H, Qian Q. QTL analysis of seed storability in rice. *Plant Breeding*, 2006, 125: 57-60
- [6] 张瑛, 滕斌, 吴敬德, 吴跃进, 宣红, 朱学桂. 水稻种子高温高湿人工加速老化试验方法研究. 中国粮油学报, 2010, 25(10): 8-12
- Zhang Y, Teng B, Wu J D, Wu Y J, Xuan H, Zhu X G. Study on accelerated aging test of rice seeds with high temperature and humidity. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2010, 25(10): 8-12
- [7] 高瑀珑, 鞠兴荣, 姚明兰, 吴定. 稻米储藏期间陈化机制研究. 食品科学, 2008, 29(1): 470-474
- Gao Y L, Ju X R, Yao M L, Wu D. Study on aging mechanism of stored rice. *Food Science*, 2008, 29(1): 470-474
- [8] 施利利, 张欣, 丁得亮, 王松文, 崔晶. 陈化稻米的主要品质指标的变化研究. 食品科技, 2014, 39(10): 166-169
- Shi L L, Zhang X, Ding D L, Wang S W, Cui J. Comparison of physicochemical properties between new rice and stored rice varieties. *Food Science and Technology*, 2014, 39(10): 166-169
- [9] 张玉荣, 梁彦伟, 刘敬婉. 高温高湿储藏条件对粳稻淀粉微观结构及挥发性物质的影响. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2018, 39(6): 8-15, 35
- Zhang Y R, Liang Y W, Liu J W. Effect of high temperature and humidity storage conditions on microstructure and volatiles of *japonica* rice starch. *Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition*, 2018, 39(6): 8-15, 35
- [10] Miura K, Lin Y, Yano M, Nagamine T. Mapping quantitative trait loci controlling seed longevity in rice (*Oryza sativa* L.). *Theoretical Applied Genetics*, 2002, 104: 981-986
- [11] 曾大力, 钱前, 国广泰史, 滕胜, 藤本宽. 稻谷储藏特性及其与籼粳特性的关系研究. 作物学报, 2002, 28(4): 551-554
- Zeng D L, Qian Q, Guo G T S, Teng S, Teng B K. Study on storability and morphological index in rice (*Oryza sativa* L.) under artificial ageing. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(4): 551-554
- [12] 刘霞, 杜雅荣, 李喜宏, 马文, 王威, 刘香军, 高玉敏, 李丽秀. 水稻贮藏特性与籼粳基因型的关系. 中国粮油学报, 2015, 30(11): 1-5, 11
- Liu X, Du Y R, Li X H, Ma W, Wang W, Liu X J, Gao Y M, Li L X. Relationship between storage stability and genotype of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2015, 30(11): 1-5, 11
- [13] 江川, 李书柯, 李清华, 王金英. 水稻耐储藏性研究进展. 江西农业学报, 2011, 23(10): 39-43
- Jiang C, Li S K, Li Q H, Wang J Y. Research progress in storability of rice. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2011, 23(10): 39-43
- [14] 吴方喜, 朱永生, 谢鸿光, 张建福, 谢华安. 中国水稻微核心种质的耐储藏特性初步研究. 中国粮油学报, 2010, 25(10): 124-128
- Wu F X, Zhu Y S, Xie H G, Zhang J F, Xie H A. Preliminary study on storability of Chinese micro-core collections of rice. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2010, 25(10): 124-128
- [15] 吴方喜, 罗曦, 魏毅东, 郑燕梅, 林强, 谢国生, 谢华安, 张建福. 世界水稻核心种质的耐储藏特性鉴定. 福建稻麦科技, 2021, 39(1): 1-5
- Wu F X, Luo X, Wei Y D, Zheng Y M, Lin Q, Xie G S, Xie H A, Zhang J F. Identification of seed storability in rice core collections from 47 countries worldwide. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2021, 39(1): 1-5
- [16] 赵春芳, 岳红亮, 黄双杰, 周丽慧, 赵凌, 张亚东, 陈涛, 朱镇, 赵庆勇, 姚姝. 南粳系列水稻品种的食味品质与稻米理化特性. 中国农业科学, 2019, 52(5): 909-920
- Zhao C F, Yue H L, Huang S J, Zhou L H, Zhao L, Zhang Y D, Chen T, Zhu Z, Zhao Q Q, Yao S. Eating quality and physicochemical properties in Nanjing rice varieties. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(5): 909-920
- [17] 赵春芳, 岳红亮, 田铮, 顾明超, 赵凌, 赵庆勇, 朱镇, 陈涛, 周丽慧, 姚姝, 梁文化, 路凯, 张亚东, 王才林. 江苏和东北粳稻稻米理化特性及 *Wx* 和 *OsSSIIa* 基因序列分析. 作物学报, 2020, 46(6): 878-888
- Zhao C F, Yue H L, Tian Z, Gu M C, Zhao L, Zhao Q Y, Zhu Z, Chen T, Zhou L H, Yao S, Liang W H, Lu K, Zhang Y D, Wang C L. Physicochemical properties and sequence analysis of *Wx* and *OsSSIIa* genes in *japonica* rice cultivars from Jiangsu province and northeast of China. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(6): 878-888
- [18] 田铮, 赵春芳, 张亚东, 赵庆勇, 朱镇, 赵凌, 陈涛, 姚姝, 周丽慧, 梁文化, 路凯, 王才林, 张红生. 江苏省半糯型粳稻蒸煮食味品质性状的差异分析. 中国水稻科学, 2021, 35(3): 249-258
- Tian Z, Zhao C F, Zhang Y D, Zhao Q Y, Zhu Z, Zhao L, Chen T, Yao S, Zhou L H, Liang W H, Lu K, Wang C L, Zhang H S. Differences in eating and cooking quality traits of semi-waxy *japonica* rice cultivars in Jiangsu province. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021, 35(3): 249-258
- [19] 陈涛, 骆名瑞, 张亚东, 朱镇, 赵凌, 赵庆勇, 周丽慧, 姚姝, 于新, 王才林. 利用四引物扩增受阻突变体系 PCR 技术检测水稻低直链淀粉含量基因 *Wx-mq*. 中国水稻科学, 2013, 27(5): 529-534
- Chen T, Luo M R, Zhang Y D, Zhu Z, Zhao L, Zhao Q Y, Zhou L H, Yao S, Yu X, Wang C L. Detection of *Wx-mq* gene for low-amylose content by tetra-primer amplification refractory mutation system PCR in rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(5): 529-534
- [20] 黄玮雯, 孙滨, 程灿, 牛付安, 周继华, 张安鹏, 涂荣剑, 李瑶, 姚瑶, 代雨婷, 谢开珍, 陈小荣, 曹黎明, 储黄伟. 对水稻种子耐储性 QTL 的研究. 作物学报, 2022, 48(9): 2255-2264
- Huang Y W, Sun B, Cheng C, Niu F A, Zhou J H, Zhang A P, Tu R J, Li Y, Yao Y, Dai Y T, Xie K Z, Chen X R, Cao

- L M, Chu H W. QTL mapping of seed storage tolerance in rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(9): 2255-2264
- [21] 董国军, 胡兴明, 曾大力, 藤本宽, 滕胜国, 广泰史, 郭龙彪, 钱前. 水稻种子人工老化和自然老化的比较研究. *浙江农业科学*, 2004(1): 27-29
Dong G J, Hu X M, Zeng D L, Teng B K, Teng S G, Guang T S, Guo L B, Qian Q. Comparative study on artificial aging and natural aging of rice seeds. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2004(1): 27-29
- [22] 付艺峰, 李鸿雁, 黄帆, 王桂花. 人工老化对老芒麦种子活力和生理生化变化的影响. *植物遗传资源学报*, 2014, 15(6): 1360-1363
Fu Y F, Li H Y, Huang F, Wang G H. Physiological and seed vigor changes of *Elymus sibiricus* L. seeds during artificial aging. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2014, 15(6): 1360-1363
- [23] Kameswara N, Jackson M T. Variation in seed longevity of rice cultivars belonging to different isozyme groups. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 1997, 44: 159-164
- [24] Juliano B O, Perez C, Chang T T. Varieties differences in longevity of tropical rough rice stored under ambient conditions. *Seed Science and Technology*, 1990, 18: 361-369
- [25] 王才林, 张亚东, 陈涛, 朱镇, 赵庆勇, 姚姝, 赵凌, 赵春芳, 周丽慧, 魏晓东. 姊妹系间杂交快速培育优良食味半糯粳稻新品种的育种效果. *中国水稻科学*, 2021, 35(5): 455-465
Wang C L, Zhang Y D, Chen T, Zhu Z, Zhao Q Y, Yao S, Zhao L, Zhao C F, Zhou L H, Wei X D. Rapid breeding of new semi-glutinous *japonica* rice varieties with good eating quality by crossing between sister lines. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021, 35(5): 455-465
- [26] 王才林, 张亚东, 赵春芳, 魏晓东, 姚姝, 周丽慧, 朱镇, 陈涛, 赵庆勇, 赵凌. 江苏省优良食味粳稻的遗传与育种研究. *遗传*, 2021, 43(5): 442-458
Wang C L, Zhang Y D, Zhao C F, Wei X D, Yao S, Zhou L H, Zhu Z, Chen T, Zhao Q Y, Zhao L. Inheritance and breeding of *japonica* rice with good eating quality in Jiangsu province. *Hereditas*, 2021, 43(5): 442-458
- [27] 高瑀珑, 鞠兴荣, 姚明兰, 吴定. 稻米储藏期间陈化机制研究. *食品科学*, 2008, 29(4): 470-473
Gao Y L, Ju X R, Yao M L, Wu D. Study on ageing mechanism of stored rice. *Food Science*, 2008, 29(4): 470-473
- [28] 高辉, 马群, 李国业, 杨雄, 李雪侨, 殷春渊, 李敏, 张庆, 张洪程, 戴其根. 氮肥水平对不同生育类型粳稻米蒸煮食味品质的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(21): 4543-4552
Gao H, Ma Q, Li G Y, Yang X, Li X Q, Yin C Y, Li M, Zhang Q, Zhang H C, Dai Q G. Effect of nitrogen application rate on cooking and eating qualities of different growth-development types of *japonica* rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(21): 4543-4552
- [29] 胡群文. 延长水稻种子室温贮藏寿命的生物学机理研究. 北京: 中国农业科学院, 2009
Hu Q W. Studies on the biological mechanism of extending the longevity of rice seeds stored at room temperature. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009
- [30] 于素平, 石翠霞, 杨冬平, 高岩, 闵国春. 稻谷新鲜度快速检测技术研究进展. *粮食科技与经济*, 2015, 40(6): 26-28
Yu S P, Shi C X, Yang D P, Gao Y, Min G C. Research progress in rapid detection technology of grain freshness. *Grain Science and Technology and Economy*, 2015, 40(6): 26-28
- [31] 石翠霞, 张越, 高岩, 于素平. 不同储藏条件下稻谷新鲜度指标变化规律研究. *粮食储藏*, 2018, 47(2): 39-42
Shi C X, Zhang Y, Gao Y, Yu S P. Study on change of paddy fresh degree in different storage conditions. *Grain Storage*, 2018, 47(2): 39-42
- [32] 黄冬, 黄晓赞, 滕显发. 籼稻谷新鲜度与脂肪酸值的相关性研究. *粮食与饲料工业*, 2018(8): 3-6
Huang D, Huang X Z, Teng X F. Correlation between freshness of *indica* rice and fatty acid value. *Cereal & Feed Industry*, 2018(8): 3-6
- [33] 乔燕祥, 周建萍, 田齐建, 穆志新. 大豆种子老化过程中生理特性变化的研究. *植物遗传资源学报*, 2010, 11(5): 616-620
Qiao Y X, Zhou J P, Tian Q J, Mu Z X. Changing of physiological characteristics of soybean seeds in aging course. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2010, 11(5): 616-620
- [34] 辛霞, 陈晓玲, 张金梅, 卢新雄. 小麦种子在不同保存条件下的生活力丧失特性研究. *植物遗传资源学报*, 2013, 14(4): 588-593
Xin X, Chen X L, Zhang J M, Lu X X. Viability loss of wheat seeds under different storage conditions. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013, 14(4): 588-593
- [35] Aibara S, Ismail I A, Honami Y, Hiroyuki O, Futoshi S, Yuhei M. Changes in rice bran lipids and free amino acids during storage. *Agricultural and Biological Chemistry*, 2014, 50: 665-673
- [36] Lei M, Zhu F, Li Z, Zhang J, Li X, Dong J. Talen-based mutagenesis of lipoxygenase *lox3* enhances the storage tolerance of rice (*Oryza sativa*) seeds. *PLoS ONE*, 2015, 10: e0143877
- [37] Yuan Z, Fan K, Xia L, Ding X, Tian L, Sun W. Genetic dissection of seed storability and validation of candidate gene associated with antioxidant capability in rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 20: 4442