

稻米储藏品质劣变机制研究进展与展望

费月新 曹玉洁 吴敏 吴洪恺*

(浙江农林大学 农业与食品科学学院, 杭州 311300; * 通讯作者: hongkaiwu@163.com)

摘要:水稻是我国的主要粮食作物,稻谷(米)是我国重要的储备粮品。在稻谷(米)储藏过程中常常会发生品质劣变(陈化),给粮食带来巨大损失,因此,研究稻米陈化的机制已成为热点。本文概述了稻米陈化的谷物化学机理研究进展,这些研究结果表明,稻米储藏过程中淀粉、蛋白质、脂肪等主要成分的含量没有显著的变化,但陈化引起了许多化学成分之间的转变,并且淀粉与非淀粉成分之间的相互作用显著影响了稻米的理化特性。由于储藏过程中稻米品质劣变的遗传机制研究至今还是空白,本文提出了储藏品质劣变的遗传机理研究方法,以期从遗传上改良水稻的储藏特性,从而培育耐储藏的水稻品种。

关键词:水稻;储藏品质;陈化

中图分类号:S511.093 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-8082(2018)05-0022-05

水稻是我国的主要粮食作物,全国近三分之二的人口以稻米为主食。基于稻谷生产的季节性,为了满足人们的常年需求以及粮食安全的需要,不得不进行相当规模的储备。另外,从战略和防灾角度考虑,国家必须实施国储制度,强化宏观调控能力。长期以来,国家、地方粮食储备在以丰补欠、平抑粮食价格等方面起了积极的作用,为我国社会稳定、经济发展做出了积极贡献。据统计,目前我国稻谷库存量约占全年稻谷产量的40%,每年超过千亿公斤的稻谷需要储藏,平均储藏时间约16个月。稻谷作为一个有生命的活体,在储藏期间会进行呼吸作用等生化反应,并且受储藏条件的影响,稻谷本身也会发生一系列的变化,导致品质下降,即为大米的陈化。我国每年稻米储藏过程中因陈化造成的损失占总储存量的3%以上,在高温高湿地区(如浙江省)陈化尤为严重,损失更大,给国家造成了重大经济损失。国内外学者对稻米陈化的原因进行了广泛深入的研究,并取得了重要进展。

1 稻米储藏过程中化学组成的变化

稻米主要由淀粉、蛋白质和脂肪等物质组成。陈化过程中,这3类物质总量上变异不显著,但它们的化学组成发生了明显的变化^[1]。淀粉是稻米的主要成分,占精米干质量的90%左右^[2],因此,稻米的淀粉含量及其特性对稻米储藏品质起至关重要的作用。稻米淀粉特性和直链淀粉含量对稻米含水量的影响很大,而含水量是影响稻米储藏品质的最重要环境因素之一。因此,稻米淀粉的构成类型可在一定程度上决定储藏品质^[3]。

张淑娟等^[4]认为,储藏1年后,稻米的总直链淀粉含量无显著变化,但不溶性直链淀粉含量则逐渐增加。邱明发等^[5]认为,不溶性直链淀粉含量增加的原因是稻米在储藏过程中淀粉脱分支酶仍保持其活性,并作用于1,6-糖苷键使支链淀粉脱支,所以储藏后不溶性直链淀粉含量增加,支链淀粉含量减少。Rehman等^[6-7]研究发现,陈化稻米中的还原糖含量略有增加。Patindol等^[8]研究表明,陈化稻米的支链淀粉的短链(DP=6-12)比例增加。Huang等^[9]研究了内源性淀粉酶对糯米淀粉精细结构的影响,发现在较高温度条件下,储藏较长一段时间后,长链比例下降,短链比例增加。这些研究结果都一致表明,稻米储藏期间可能发生了淀粉的降解。

储藏蛋白是稻米的第二大成分,占精米干质量的7%~10%,根据溶解度的不同可分为4种蛋白,即清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白^[10]。在大多数谷物中,醇溶谷蛋白是主要的贮藏蛋白,而在水稻中谷蛋白是主要的储藏蛋白,占总储藏蛋白的60%~80%^[11]。有研究提出,与新鲜稻米相比,陈化稻米的贮藏蛋白(丙醇提取的醇溶蛋白)含量减少,推测陈化过程中贮藏蛋白通过二硫键或其他活性基团形成了更大的蛋白分子^[12],或改变了蛋白质结构,进而影响蛋白质的性质,如溶解性、热性能和亲水性/亲油性等^[13]。Teo等^[14]研究表明,新鲜稻米分离出的淀粉中添加谷蛋白,其糊化特性和老

收稿日期:2018-05-27

基金项目:浙江省农业(粮食)新品种选育重大科技专项(2016C02050-2)

化稻米相似。对老化大米样品进行 β -巯基乙醇处理后与未处理的样品相比, 峰值黏度显著增加($P < 0.01$), 可能是由于 β -巯基乙醇处理后蛋白质二硫键断裂, 导致更多的水渗透和淀粉颗粒的肿胀, 从而增加糊化程度^[15]。同样, 谢新华等^[16]用二硫苏糖醇处理打破稻米中蛋白质的二硫键后, 发现稻米淀粉完全糊化的时间缩短, 糊化温度降低, 推测二硫键结合形成的蛋白质网络的变化引起了稻米吸水性改变。

稻米中脂肪约占精米干质量的 0.8% 左右。脂肪酶 (Lipases, E. C. 3. 1. 1. 3) 是一种甘油酯水解酶, 可以水解脂肪分子中的甘油酯键, 将脂肪甘油三酯水解为甘油及游离脂肪酸, 是脂肪分解代谢中第一步反应的关键酶^[17]。Takano 等^[18-19]证实, 稻米在储藏过程中发生了脂肪的降解, 产生大量的游离脂肪酸 (包括饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸)。Tsuzuki 等^[20]研究表明, 陈化稻米的饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸总含量与新鲜稻米的差异不显著, 但陈化稻米的不饱和脂肪酸含量显著低于新鲜稻米; 新鲜稻米中亚油酸占脂肪酸总量的 50% 左右, 而陈化的稻米中油酸含量较高, 亚麻二烯酸和亚麻三烯酸含量较少^[21], 表明在高温储藏条件下不饱和脂肪酸是不稳定的, 会发生氧化。有研究证实, 储存期间脂肪的氧化对稻米的陈化起重要作用, 脂肪氧化酶-3 (Lox-3) 作为关键酶催化这个反应^[22]。Hatanaka 等^[23-24]研究表明, 稻米中脂肪氧化酶 (lipoxygenase, E. C. 1. 13. 11. 12, 简称 Lox) 主要以亚油酸和亚麻酸为底物, 降解生成亚油酸氢过氧化物和亚麻酸氢过氧化物, 并且在反应过程中产生醛、酮等挥发性腥臭难闻的物质。基于生物信息学分析, 水稻基因组编码 14 个 Lox 蛋白^[25], 但是只有 *Lox1*、*Lox2*、*Lox3* 三种同工酶^[26-28]和 *HI-Lox*^[29-30]被克隆和证实。Huang 等^[28]研究表明, 与野生型种子相比, 过表达 *OsLox2* 的种子在正常环境下能快速发芽, 但是在人工老化的环境下发芽会变慢; RNA 干涉后, 结果却相反, 说明 *Lox2* 和种子的寿命密切相关。日本科学家于 1992 年用单克隆抗体鉴定出能提高水稻耐储藏性的脂肪氧化酶 *Lox-3* 缺失体, 可在一定程度上提高稻米的耐储藏性。Xu 等^[31]对水稻 *Lox3* 反义抑制的研究发现, 降低 *Lox3* 表达水平能延长水稻储藏时间, 进一步表明 *lox-3* 基因的耐储藏功能。中国科学家对 *lox-3* 基因的生产应用进行了大量的研究, 但至今未有大面积推广的报道。

酚酸是稻米中的一种微量成分, 在储藏中表现出一定的功能。在稻米储藏期间, 结合酚酸含量没有显著

变化, 而陈化稻米中游离酚酸含量比新鲜稻米低 ($P < 0.05$), 推测在陈化过程中, 游离酚酸和不饱和脂肪酸之间发生了化学反应^[32]。Juliano 等^[33]以 10 个国际水稻研究所育成的水稻品种为材料, 研究发现谷壳的抗氧化物质酚的组成水平与耐储性呈正相关, 而且这些酚对于水稻种子抗衰老所起的作用甚至超过维生素 E 和维生素 B。

Khov Kuong 等^[34]对水稻中的锌、铁、维生素 A 在高温高湿环境储藏后发生的变化研究表明, 高温高湿储藏环境下, 锌、铁含量没有变化, 但是维生素 A 的含量减少了 90%。

2 稻米储藏过程中淀粉和非淀粉成分之间的相互作用

Shibuya 等^[35]研究表明, 陈化稻米与新鲜稻米的米粉糊化特征是不同的, 但相应的淀粉糊化特征相似, 暗示淀粉和非淀粉成分之间的相互作用影响了稻米理化特性。他们进一步研究认为, 储存过程中稻米胚乳细胞壁被内源木聚糖酶分解, 导致淀粉谱特征发生了变化。因此, 仅对单一组分研究难以解释稻米在陈化过程中质构特性的变化, 而且稻米作为一个有机体, 其各种组分是不可能孤立存在, 而是相互作用, 相互影响。Zhou 等^[36-37]研究发现, 新鲜稻米样品用半纤维素酶处理后, 峰值粘度 (RVA) 和峰值温度 (DSC) 有所下降, 然而, 通过对老化稻米样品半纤维素酶处理前后的对比发现, 整个糊化曲线无显著性差异; 用纤维素酶处理陈化水稻样品, 与未经处理的样品相比, RVA 和 DSC 曲线的特征均产生显著差异。Briffaz 等^[38-39]推测, 水稻的细胞壁对稻米结构和蒸煮特性有至关重要的作用, 细胞壁残留参与了陈化过程, 纤维素酶处理改良了老化水稻细胞壁结构并增强了 RVA 和 DSC 在运行时水的渗透性。

Baldwin 等^[40]用二次离子质谱发现了小麦和大米淀粉表面脂质的存在。姜培彦^[41]认为, 淀粉表面脂质会使淀粉溶胀性降低, 并导致直链淀粉含量溶出减少, 降低糊化温度和热焓值 (enthalpy), 并且对淀粉流变性质也会产生影响。谷物在陈化时, 脂质过氧化会产生大量的活性丙二醛 (MDA)^[42]。Wu 等^[43]以脂质过氧化的产物 MDA 作为对蛋白质结构特性影响的指标, 发现 MDA 含量增加, 则蛋白质的溶解度、表面疏水性降低。

3 稻米储藏过程中物性学变化

表 1 稻米储藏品质评价指标及其效果

检测指标	试验材料	储藏条件	储藏后品质的变化	参考文献
电导率	杂交稻威优 6	密闭加硅胶储藏 1 年 10 个月、2 年 1 个月、3 年 1 个月	电导率与储藏时间呈正相关	陈信波 ^[59]
维生素含量			维生素含量与储藏时间呈负相关	
不溶性蛋白含量			不溶性蛋白含量减少	
巯基含量		当年收获自然储藏至次年 3 月	巯基含量下降,二硫键含量上升;巯基含量和黏度与硬度比值呈正相关。	
电导率	粳稻、杂交粳稻	自然储藏 1~5 年	随储藏时间的增加电导率值变大	
丙二醛含量			储藏 1 年和储藏 3 年至 5 年差异显著,储藏 1~3 年差异不显著。	卞科 ^[61]
RVA 谱特征值	籼稻、粳稻、粳糯稻	避光、自然温度储藏 1~7 个月。	不同类型稻米淀粉黏度特征值均有明显的变化,各特征值在储藏 1~5 个月内变化较小,而 6~7 个月期间变化较大,大部分特征值变化差异达到显著或极显著水平。	周显清 ^[54]
RVA 谱特征值	籼稻和粳稻	20℃和 35℃,相对湿度 60%,储藏 6 个月	峰值黏度、最低黏度、最终黏度和回生值都增大,而衰减值下降,峰值时间和糊化温度变化不显著。	王新其 ^[60]
				雷玲 ^[56]

有研究指出, 陈化稻米更难与水结合、膨胀, 并且在热水裂解时淀粉颗粒对水破坏性表现高抗, 导致糊化过程中大米滤出更少的淀粉成分^[37,44]。陈化导致了淀粉微晶束结构加强, 即在加热过程中当水分子渗入到淀粉的结晶区和非定形区时, 膨胀力不足以使这一部分具有加强结构的淀粉分子发生结构破裂和转移(糊化以及溶出)^[45]。稻米的蒸煮特性和流变性能的表现十分广泛, 很大程度上是由膨胀、淀粉糊化和回生特性决定^[1,46]。陈化过程中稻米的最敏感指标之一是糊化特性的变化^[47-49]。快速粘度分析仪(RVA)已广泛用于稻米糊化特性的评价。RVA 谱一般用 7 个特征值来描述, 分别是峰值黏度 (peak viscosity, PKV)、热浆粘度 (hot paste viscosity, HPV)、冷胶粘度 (cool paste viscosity, CPV)、崩解值 (breakdown viscosity, BDV, 最高粘度-热浆粘度)、消减值 (setback viscosity, SBV, 冷胶粘度-最高粘度)、糊化温度 (pasting temperature, PaT) 和峰值时间 (peak time, PeT)。研究表明, 峰值粘度 (PKV) 和崩解值 (BDV) 是评价大米陈化最敏感的指标^[9,50]。RVA 分析表明, 高温储藏后, 稻米的 PKV 和 BDV 增加^[8,51]。宋伟等^[52]以粳稻为材料研究表明, 储藏温度和时间对峰值粘度的影响均达极显著水平, 峰值粘度随着储藏时间的延长呈上升趋势, 储藏温度越高, 上升趋势越明显。RVA 和 DSC 数据表明, 高温储存引起的稻米陈化导致淀粉颗粒与水化合和膨胀更加困难^[50]。

4 储藏品质劣变机制研究展望

如上所述, 前人对稻米陈化的谷物化学和物性学进行了大量的研究, 表明稻米陈化是一个复杂的过程, 淀粉、蛋白质、脂类以及各成分互作对储藏品质均有重要作用。稻米陈化过程中不同品种之间的糊化特性变

化明显不同, 一般表现为籼稻比粳稻耐储藏^[8-9,53], 说明稻米储藏特性存在基因型差异, 是由遗传控制的。但是, 稻米陈化的遗传学机理研究未见报道。要研究稻米储藏品质的遗传机理, 首先必须明确储藏品质的评价指标^[54]。

许斌等^[55]研究表明, 脂肪酸值与储粮品质有很好的相关性, 是反映粮食储藏品质变化的灵敏指标。储藏温度高、时间长, 脂肪酸含量增加^[56]。因此, 脂肪酸值是粮食储存品质的重要指标。GB/T20569-2006 规定, 籼稻不宜存的脂肪酸值阈值为 37 mg/100 g, 粳稻为 30 mg/100 g^[57]。GB/T20569-2006 的测定方法中, 脂肪酸值的测量很容易产生误差。例如, 在利用无水乙醇作为萃取剂时会有醇溶性蛋白萃取出来, 醇溶性蛋白属于酸性蛋白质, 因而测得的脂肪酸值偏高^[58]。除脂肪酸值外, 电导率^[54,59]、丙二醛含量^[54]、淀粉 RVA 谱特征值^[56,60]、巯基含量^[61]等指标都可以用来评价稻米的储藏品质, 这些指标反应了稻米储藏前后的变化, 呈现了非常复杂的相关关系(表 1)。可见, 稻米储藏品质是一个复杂的遗传性状。

遗传性状研究所用的群体类型很多, 常用的有 F₂、重组自交系(RIL)以及双单倍体(DH)群体等, 利用这些群体研究控制某些性状的 QTL 数目、染色体上的位置及遗传效应等取得了很好的结果。但是这些群体的遗传背景复杂, 在进行分析时存在一定的遗传“噪音”, 不适宜用于复杂的遗传性状研究^[62]。染色体片段代换系是指一套代换系的供体插入片段相互重叠, 可以覆盖整个基因组, 每个系与背景亲本只有 1 个或少数几个供体片段的差异, 遗传背景相近, 是研究复杂遗传性状的理想群体。明确稻米陈化的遗传机理, 可以从遗传上改良水稻的贮藏特性, 培育耐储藏的水稻品种, 这是

一条经济有效的途径。

参考文献

- [1] Zhou Z, Robards K, Helliwell S, et al. Composition and functional properties of rice [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2002, 37: 849-869.
- [2] 闵绍楷. 稻米品质的鉴定与改良 [J]. 国外农学-水稻, 1981(3): 113-123.
- [3] 江川, 李书柯, 李清华, 等. 水稻耐储藏性研究进展[J]. 江西农业学报, 2011(10): 39-43.
- [4] 张淑娟, 秦礼谦. 不溶性直链淀粉与米饭的质变[J]. 郑州粮食学院学报, 1988(2): 13-22.
- [5] 邱明发, 金铁成. 米谷蛋白与淀粉组分在大米陈化过程中的变化[J]. 中国粮油, 1998, 13(1): 12-15.
- [6] Rehman Z U. Storage effects on nutritional quality of commonly consumed cereals [J]. *Food Chem*, 2006, 95: 53-57.
- [7] Cao Y H, Wang Y, Chen X L, et al. Study on sugar profile of rice during ageing by capillary electrophoresis with electrochemical detection [J]. *Food Chem*, 2004, 86: 131-136.
- [8] Patindol J, Wang Y J, Jane J L. Structure-functionality changes in starch following rough rice storage [J]. *Starch/Stärke*, 2005, 57: 197-207.
- [9] Huang Y C, Lai H M. Characteristics of the starch fine structure and pasting properties of waxy rice during storage [J]. *Food Chem*, 2014, 152: 432-439.
- [10] Khush G S. Origin, dispersal, cultivation and variation of rice [J]. *Plant Mol Biol*, 1997, 35: 25-34.
- [11] Kawakatsu T, Yamamoto M P, Hirose S, et al. Characterization of a new rice glutelin gene GluD-1 expressed in the starchy endosperm [J]. *J Exp Bot*, 2008, 59: 4 223-4 245.
- [12] Zhou Z, Robards K, Helliwell S, et al. Rice ageing. I. Effect of changes in protein on starch behaviour [J]. *Starch/Stärke*, 2003, 55: 162-169.
- [13] Gerrard J A. Protein-protein crosslinking in food: methods, consequences, applications [J]. *Trends in Food Sci Technol*, 2002, 13: 391-399.
- [14] Teo C H, Abd A, Cheah P B, et al. On the roles of protein and starch in the aging of non-waxy rice flour [J]. *Food Chem*, 2000, 69(3): 229-236.
- [15] Chrastil J, Zarins Z M. Influence of storage on peptide subunit composition of rice Oryzenin [J]. *J Agric Food Chem*, 1992, 40(6): 927-930.
- [16] 谢新华, 李晓方, 肖昕. 蛋白质中二硫键对稻米淀粉黏滞性的影响[J]. 核农学报, 2009(1): 114-117.
- [17] 伍金娥, 常超. 稻谷储藏过程中主要营养素变化的研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2008(1): 5-6.
- [18] Takano K. Advances in cereal chemistry and technology in Japan [J]. *J Cereal Foods World*, 1993, 38: 695-698.
- [19] Zhou Z, Robards K, Helliwell S, et al. Ageing of stored rice: Changes in chemical and physical attributes [J]. *J Cereal Sci*, 2002, 35: 65-78.
- [20] Tsuzuki W, Suzuki Y, Yamada S, et al. Effect of oxygen absorber on accumulation of free fatty acids in brown rice and whole grain wheat during storage [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, 58: 222-229.
- [21] 唐为民, 呼玉山. 稻米陈化机理研究的新进展[J]. 西部粮油科技, 2002(6): 30-33.
- [22] Suzuki Y, Matsukura U. Lipoygenase activity in maturing and germination rice seeds with and without lipoygenase-3 in mature seeds [J]. *Plant Sci*, 1997, 125: 119-126.
- [23] Hatanaka A. The biogenesis of green odour by green leaves [J]. *Phytochemistry*, 1993, 34(5): 1 201-1 218.
- [24] Feussner I, Wasternack C. The lipoygenase pathway [J]. *Annu Rev. Plant Biol*, 2002, 53: 275-297.
- [25] Umate P. Genome-wide analysis of lipoygenase gene family in Arabidopsis and rice [J]. *Plant Signaling Behavior*, 2011, 6 (3): 335-338.
- [26] Wang R, Shen W, Liu L, et al. A novel lipoygenase gene from developing rice seeds confers dual position specificity and responds to wounding and insect attack [J]. *Plant Mol Biol*, 2008, 66 (4): 401-414.
- [27] Long Q Z, Zhang W W, Wang P, et al. Molecular genetic characterization of rice seed lipoygenase 3 and assessment of its effects on seed longevity [J]. *J Plant Biol*, 2013, 56 (4): 232-242.
- [28] Huang J X, Cai M H, Long Q Z, et al. OsLOX2, a rice type I lipoygenase, confers opposite effects on seed germination and longevity [J]. *Transgenic Res*, 2014, 23(4): 643-55.
- [29] Mizuno K, Iida T, Takano A, et al. A new 9-lipoygenase cDNA from developing rice seeds [J]. *Plant Cell Physiol*, 2003, 44(11): 1 168 - 1 175.
- [30] Zhou G, Ren N, Qi J, et al. The 9-lipoygenase Osr9-LOX1 interacts with the 13-lipoygenase-mediated pathway to regulate resistance to chewing and piercing-sucking herbivores in rice [J]. *Physiologia Plantarum*, 2014, 152(1): 59-69.
- [31] Xu H, Wei Y, Zhu Y, et al. Antisense suppression of LOX3 gene expression in rice endosperm enhances seed longevity [J]. *Plant Biotechnol J*, 2015, 13(4): 526-540.
- [32] Zhou Z, Chen X, Zhang M, et al. Phenolics, flavonoids, proanthocyanidin and antioxidant activity of brown rice with different pericarp colors following storage [J]. *Stored Prod Res*, 2014, 59: 120-125.
- [33] Juliao B, Perez C, Chang T. Varieties differences in longevity of tropical rough rice stored under ambient conditions [J]. *Seed Sci Technol*, 1990, 18: 361-369.
- [34] Khov Kuong, Arnaud Laillou, Chantum Chea, et al. Stability of vitamin A, iron and zinc in fortified rice during storage and its impact on future national standards and programs—case study in Cambodia [J]. *Nutrients*, 2016, 8(1): 51-60.
- [35] Shibuya N, Iwasaki T, Chikubu S. Studies on deterioration of rice during storage. III. On the changes of rice starch during storage of

- rice [J]. *Denpun Kagaku*, 1977, 55-58.
- [36] Zhou Z, Robards K, Helliwell S, et al. Effect of rice storage on pasting properties of rice flour [J]. *Food Res Int*, 2003, 36(3): 625-634.
- [37] Zhou Z, Robards K, Helliwell S, et al. Effect of storage temperature on rice thermal properties [J]. *Food Res Int*, 2010, 43(3): 709-715.
- [38] Briffaz A, Mestres C, Escoute J, et al. Starch gelatinization distribution and peripheral cell disruption in cooking rice grains monitored by microscopy [J]. *J Cereal Sci*, 2012, 56(3): 699-705.
- [39] Wu J Y, Chen J, Liu W, et al. Effects of aleurone layer on rice cooking: a histological investigation [J]. *Food Chem*, 2016, 191: 28-35.
- [40] Baldiwn P M, Melia C D, Dvaies M C. The surface chemistry of starch granules studied by time-of-flight secondary ion mass spectrometry [J]. *J Cereal Sci*, 1997, 26(3): 329-346.
- [41] 姜培彦, 马晓军. 脂质与淀粉相互作用及其对淀粉性质影响[J]. 粮食与油脂, 2007(11): 7-9.
- [42] Adams A, Kimpe N D, Boekel M. Modification of casein by the lipid oxidation product malondialdehyde [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(5): 1 713-1 719.
- [43] Wu W, Zhang C M, Hua Y F. Structural modification of soy protein by the lipid peroxidation product malondialdehyde [J]. *J Sci Food Agric*, 2009, 89(8): 1 416-1 423.
- [44] Likittawattanasade T, Hongprabhas P. Effect of storage proteins on pasting properties and microstructure of Thai rice [J]. *Food Res Int*, 2010, 43(5): 1 402-1 409.
- [45] 徐民, 程旺大, 蔡新华, 等. 储藏对稻米淀粉结构及含量的影响 [J]. 中国农学通报, 2005(6): 13-115.
- [46] Tananuwoong K, Malila Y. Changes in physicochemical properties of organic hulled rice during storage under different conditions [J]. *Food Chem*, 2011, 125(1): 79-185.
- [47] Kong X L, Zhu P, Sui Z Q, et al. Physicochemical properties of starches from diverse rice cultivars varying in apparent amylose content and gelatinisation temperature combinations [J]. *Food Chem*, 2015, 172: 433-440.
- [48] Perdon A A, Siebenmorgen T J, Buescher R W, et al. Starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage [J]. *J Food Sci*, 2010, 64(5): 828-832.
- [49] Sowbhagya C M, Bhattacharya K R. Changes in pasting behaviour of rice during ageing [J]. *J Cereal Sci*, 2001, 34(2): 115-124.
- [50] Toyoshima H, Okadome H, Ohtsubo K, et al. Cooperative test on the small-scale rapid method for the gelatinization properties test of rice flours with a Rapid-visco-analyser (RVA) [J]. *J Jpn Soc Food Sci*, 1997, 44(8): 579-584.
- [51] Villareal R M, Resurreccion A P, Suzuki L B, et al. Changes in physicochemical properties of rice during storage [J]. *Starch/Stärke*, 1976, 28(3): 88-94.
- [52] 宋伟, 张明. 粳稻谷储藏期间品质变化的动力学研究[J]. 粮食储藏, 2014(2): 28-32.
- [53] Zhou Z, Robards K, Helliwell S, et al. Effect of rice storage on pasting properties of rice flour [J]. *Food Res Int*, 2003, 36(6): 625-634.
- [54] 周显青, 张玉荣. 储藏稻谷品质指标的变化及其差异性[J]. 农业工程学报, 2008(12): 238-242.
- [55] 许斌, 孙相荣, 靳钟江, 等. 稻谷脂肪酸值快速测定方法探讨[J]. 粮食储藏, 2010(4): 52-54.
- [56] 雷玲, 孙辉, 姜薇莉, 等. 稻谷储存过程中品质变化研究[J]. 中国粮油学报, 2009(12): 101-106.
- [57] GB/T20569-2006. 稻谷储存品质判定规则 [S]. 中华人民共和国国家标准, 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [58] 杨慧萍, 宋伟, 王素雅, 等. 三种测定粮食脂肪酸值标准方法的比较[J]. 粮食储藏, 2006(2): 43-46.
- [59] 陈信波, 罗泽民. 杂交水稻种子在贮藏过程中活力及生理生化变化的研究[J]. 杂交水稻, 1986(3): 32-37.
- [60] 王新其, 殷丽青, 卢有林, 等. 水稻储藏过程中淀粉黏度特性的变化[J]. 植物生理学报, 2011(6): 601-606.
- [61] 卞科, 路茜玉. 大米气调储藏保鲜流变学特性与疏基变化关系的研究(上)[J]. 中国粮油学报, 1992(1): 32-35.
- [62] 边建民. “C418/9311”染色体片段置换系群体的构建及产量相关性状的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.

Research Progress and Prospect on the Mechanism of Rice Grain Storage Quality Deterioration

FEI Yuexin, CAO Yujie, WU Min, WU Hongkai*

(College of Agriculture and Food Science, Zhejiang A & F University; *Corresponding author: hongkaiwu@163.com)

Abstract: Rice is a main food crop and is also important reserve food products. Stored rice tends to have poor quality, resulting in a great loss. This article firstly reviewed progresses in the chemically ageing mechanism of stored rice. Rice ageing is a complicated process. Although there were no significant differences in the gross contents of starch, proteins and lipids, the ageing process caused a shift in the components of a number of chemical groupings. And interactions between starch and non-starch components in rice grains during storage would play key roles on the changes of rice overall physicochemical and cooking properties. Then, due to research gap in genetically ageing mechanism of stored rice, a method is proposed to study genetically ageing mechanism of stored rice.

Key words: rice; storage quality; ageing