

人工陈化方式对大米品质的影响

吴莹莹¹, 施嘉城¹, 沈存宽¹, 凌建刚²,
竺丹栋³, 张慧恩¹, 杨华¹
(浙江万里学院生物与环境学院¹, 宁波 315100)
(宁波市农业科学研究院², 宁波 315100)
(宁波梁桥米业有限公司³, 宁波 315100)

摘要:人工陈化技术通过调控储藏条件可显著缩短研究周期,已成为大米陈化机理研究的重要手段。本文综述了温湿度调控、微波辅助干燥、高温流化床-回火联用、超声波处理和射频加热等人工加速陈化方式的研究进展,并分析了不同方式对大米加工特性和品质成分的影响。针对陈化程度评价,系统总结了近红外光谱法、挥发性特征物质分析、蛋白质组学和脂质组学陈化程度评价方法的应用现状,并分析了各方法的有效性与局限性。通过梳理大米陈化机制及评价技术,可为稻谷储藏技术开发提供参考。

关键词:陈化;大米品质;理化特性;鉴别方法

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001298

中图分类号:S511;TS213.3 文献标识码:A 文章编号:1003-0174(2026)01-0029-07

网络首发时间:2026-01-04 11:33:12

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251231.1445.008

Effects of artificial aging methods on rice quality

Wu Yingying¹, Shi Jiacheng¹, Shen Cunkuan¹, Ling Jiangang², Zhu Dandong³, Zhang Huien¹, Yang Hua¹
(College of Biological & Environmental Sciences, Zhejiang Wanli University¹, Ningbo 315100)
(Ningbo City Academy of Agricultural Sciences², Ningbo 315100)
(Ningbo Liangqiao Rice Industry Co., Ltd.³, Ningbo 315100)

Abstract: Artificial aging technology can significantly shorten the research cycles by the regulation of storage conditions and has been established as an important tool for studying rice aging mechanisms. In this review, the research progress in artificial accelerated aging methods was summarized; including temperature and humidity control, microwave-assisted drying, combined high-temperature fluidized bed-tempering process, ultrasonic treatment, and radio frequency heating, the effects of different methods on rice processing characteristics and quality components were analyzed. For the evaluation of aging degree, the application status of evaluation methods is systematically summarized, such as near-infrared spectroscopy, volatile characteristic compounds analysis, proteomics, and lipidomics and the effectiveness and limitations of each method were analyzed, and the mechanisms and evaluation technologies of rice aging were systematically described. This review provides reference for the development of rice storage technologies.

Key words: aging; rice quality; physicochemical properties; identification methods

基金项目:宁波市揭榜挂帅项目(2022Z182),宁波市特派员团队项目(2025S202),宁波市农业技术推广项目(2023NT003),浙江海曙水稻科技小院项目(2025)

收稿日期:2025-09-28

第一作者:吴莹莹,女,1999年出生,硕士,生物技术与工程,875641908@qq.com

通信作者:张慧恩,男,1981年出生,高级工程师,食品科学与工程,zhanghuien@zwu.edu.cn

杨华,男,1978年出生,教授,水产资源综合利用,yanghua@zwu.edu.cn

水稻作为我国第一大主粮作物,我国有超过 70% 人口将其作为膳食主体^[1]。稻谷在储藏过程中发生的品质劣变现象被称为陈化作用,陈化的本质是淀粉-脂质-蛋白复合体系的不可逆劣变。陈化过程涉及物理结构改变、化学组分氧化及生物代谢活动等,陈化会导致稻谷蒸煮特性劣变、营养组分流失及商品价值降低^[2],甚至还可能引发食品安全问题。自然陈化实验周期长,影响因素众多,给大米陈化机制研究带来了困难。人工加速陈化通过调控环境条件,实现大米品质的加速变化,使研究周期大大缩短^[3]。目前,人工陈化方式主要包括温度与湿度调控处理、微波处理、高温流化床协同回火处理、超声波处理、射频加热等。此外,随着技术的进步,针对陈化程度的评价已从传统理化指标检测发展为全维度鉴定评价方式,如近红外光谱快速分析、特征挥发性物质指纹图谱、脂质组-蛋白组多维联用技术等。这些技术方法有效提升了大米品质劣变表征的精准度。因此本文总结了当前大米人工陈化的方式以及陈化程度的评价方法,可为推动大米陈化机理的研究提供参考。

1 陈化类型

1.1 自然陈化

自然陈化是指稻谷在收获后储存期间因物理、化学和酶促反应导致的自发品质劣变现象,主要涉及籽粒内部淀粉回生、脂质氧化、蛋白质变性与交联等一系列理化性质变化。自然陈化导致米饭的清香味减弱消失,且米饭黏度降低,松散易碎,食用品质下降。

1.2 温湿度调控处理

温湿度调控处理是一种高效的人工陈化技术,可通过调控储藏环境的温湿度加速大米劣变,缩短处理时间并避免变色问题。研究表明,将稻谷在 90~120 °C 下密闭热处理 2~8 h,其品质相当于常温储藏 14 个月的水平^[4];不同湿度条件下的热处理会显著影响种子生理生化指标,随处理时间延长,发芽率下降、脂质过氧化水平升高、抗氧化酶活性降低^[5];高温高湿处理导致发芽率下降、丙二醛含量上升及不饱和脂肪酸被氧化。此外,烤箱加热湿处理在改善米粉外观和质地方面表现更优^[6]。

1.3 微波辅助干燥处理

微波辅助干燥处理可通过电磁波引起分子振动

产生热量,实现加热、干燥和杀菌等功能,工业应用中常采用 915 MHz 频率^[7]。微波处理可显著改变大米的理化特性,其回复黏度、米饭硬度、糊化度、峰值黏度及固形物损失率均降低,且工业级 915 MHz 微波系统可在保持整米率的同时实现一次性干燥^[8]。研究表明,微波加热方法可显著加速大米陈化,其作用机制不同于自然陈化,主要体现在游离酚酸含量增加,游离脂肪酸含量降低。Zhong 等^[9]利用短时间(2 min)微波处理可使新收割的稻谷快速达到自然陈化一年的工艺特性,从而降低米制品吸收性,提高加工稳定性并延长储存期;而微波辅助感应加热(MAIH)技术也有效延缓即食米饭颜色、pH 值和硬度的变化^[10]。

1.4 高温流化床与回火的联用处理

高温流化床干燥利用热空气快速降低谷物水分;回火则通过静置使谷物内部水分重新分布并向表面迁移,进而减少水分梯度和应力裂纹,提高干燥均匀性^[11]。研究表明,高温流化床与回火联用可显著提升谷物干燥效率,但为确保稻谷品质,干燥温度应控制在 50 °C 以下,且时间不宜超过 60 min^[12]。Zhang 等^[13]研究发现,高温干燥可加速糙米陈化,使其烹饪和质构特性与自然陈化 7 个月的大米相近,并因直链淀粉-脂质复合物的形成而降低 GI 值。Kam 等^[14]研究发现,高温干燥和长时间陈化虽然增加米粒的黄度,但可显著提高稻谷的整精米率并减少裂纹。

1.5 超声波处理

超声波处理是一种利用高频声波(20 kHz~500 MHz)处理物质的技术,其通过空化效应和机械效应改变物质结构和性质,具有加工快速、低能耗和提高稳定性的优点^[15]。超声波处理可改变精米的烹饪特性,如缩短蒸煮时间、增加峰值黏度和吸水性等,因浸泡米粒在超声作用下变得柔软破碎,更易糊化并产生更高的黏度^[16]。超声波处理的时间与温度对整米率、碾磨效率、蒸煮时间、吸水率、体积膨胀率及蒸煮损失率均有显著影响。随着处理温度升高,整米率下降而碾磨效率增加,这是由于超声处理在米粒表面形成裂痕和裂缝所致。Kaur 等^[17]利用响应面模型优化得到最佳的超声温度为 35.46 °C、超声时间为 88 min。此外,超声波处理可用于改善储藏过程中品质劣变的大米,经 120 min 处理后,可改善凝胶质构、提高水分结合能力并促进淀粉颗粒解聚^[18]。

1.6 射频加热处理

射频加热处理(RFH)是一种快速高效的食品加热技术,具有能耗低、加热均匀、渗透力强的优点,可与其他加热方法结合以提升处理效果^[19]。Hussain等^[20]研究发现,射频处理会显著影响大米品质特性:随处理时间延长,吸水性和凝胶一致性增加,而体积膨胀率和黏附性下降;在26.25 min处理时间和16.25%水分质量分数条件下,可快速实现到稻米加速老化。此外,射频处理还可提高米粉抗性淀粉含量并改善高支链淀粉米粉的糊化性能^[21]。

2 大米陈化期间品质的变化

大米储存过程中,自然陈化条件下淀粉和蛋白质含量变化较小,这与其分子结构的稳定性密切相关。而人工陈化因高温、高湿等外界干预,导致物理和化学变化更加显著^[22]。分析这些变化的动态特性,可为大米储存工艺优化提供参考。

2.1 陈化对大米加工特性的影响

陈化对大米的加工特性具有显著影响,会直接影响成品米的加工效率、食用品质和外观品质。随着陈化时间延长,大米皮层与胚乳结合力减弱,水分含量下降,导致碾米时糙米破碎率增加,整精米率显著下降^[23]。蒸煮后饭粒松散、黏弹性降低,这与糊化特性改变密切相关,糊化温度、峰值黏度、崩解值和回生值随陈化时间延长呈协同增长趋势,进而加剧米饭硬化^[24]。此外,陈化过程中大米因脂肪氧化和美拉德反应导致色泽变差,表现为发黄、发暗,影响外观品质和消费者接受度^[25]。通过合理的储藏和加工技术(如温湿度调控处理或微波辅助干燥处理),可在一定程度上优化大米的加工特性,从而满足不同加工需求^[26]。

2.2 陈化对淀粉性质的影响

淀粉是大米中含量最丰富的成分,由直链淀粉和支链淀粉组成。大米储藏过程中淀粉成分和性质的变化对蒸煮及食用品质有重要影响。陈化过程中直链/支链淀粉比例会发生显著变化,同时伴随糊化温度升高和峰值黏度下降等特性改变^[27]。直链淀粉含量随陈化时间延长而增加,这源于内源酶作用导致部分支链淀粉水解^[28]。直链淀粉含量与糊化温度呈正相关、与峰值黏度呈负相关,因此可通过增强氢键抑制淀粉颗粒膨胀,延缓糊化进程。同时,淀粉溶解度和膨胀度随陈化时间下降,这是由于晶束结构强化限制了水分渗透和颗粒膨胀^[29]。从淀粉微观结

构角度分析,大米陈化过程伴随着胚乳细胞壁破裂、淀粉颗粒裸露及排列疏松化。扫描电子显微镜观察发现淀粉颗粒表面出现凹坑、裂纹和破碎。Wang等^[30]采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)和X射线衍射(XRD)技术研究了大米储藏过程中淀粉结构的变化。FTIR分析显示,1 045 cm^{-1} (结晶区)与1 022 cm^{-1} (无定形区)峰强度比值显著下降,表明糖苷键发生断裂,分子有序度降低;XRD分析则表明晶体衍射峰强度减弱,相对结晶度下降。上述结果表明大米在储藏过程中淀粉的结构完整性呈现逐步退化趋势,适度陈化可提升米粉品质。

2.3 陈化对蛋白质理化性质的影响

大米中蛋白质的质量分数为8%~10%,是决定营养价值的关键指标,其含量和组成比例显著影响蒸煮食用品质、加工和外观品质。储存过程中蛋白质结构改变会影响其与淀粉的相互作用,进而改变糊化特性^[31]。研究表明,陈化过程中游离巯基(-SH)含量下降,蛋白质 α -螺旋含量减少,巯基被氧化为二硫键(-S-S-),蛋白质总量保持稳定,但高分子量亚基增加、低分子量亚基减少。巯基氧化导致谷蛋白分子间交联增强,从而形成更大分子量聚合物,最终降低蛋白质溶解度和淀粉膨润性,因此游离巯基转化为二硫键被视为大米陈化的标志^[32]。

2.4 陈化对酶活性的影响

酶活性与大米品质密切相关。抗氧化酶包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)等关键酶,在储藏初期通过清除活性氧自由基(ROS)发挥品质保护作用。然而,随着储藏时间延长,抗氧化酶的活性呈现显著下降趋势,促使ROS积累,进而引发脂质过氧化反应加剧,最终导致稻米品质衰退。然而,并非所有酶类在陈化过程中均呈现活性下降。研究表明,磷脂酶C在储藏18个月后出现活性轻微上升的现象,表明陈化过程可能对某些特定酶类具有激活效应^[33]。基于抗氧化酶系统在品质维持中的关键作用,低温储藏是延缓大米品质损失的有效途径^[34]。

2.5 陈化对脂质理化性质的影响

大米陈化过程中的脂质变化对其品质影响显著,主要表现为脂质水解产生游离脂肪酸(FFAs)和脂质氧化生成醛类、酮类等羰基化合物。储藏条件可显著影响脂质降解速率,高温高湿条件下降解速率更快;储藏温度为5 $^{\circ}\text{C}$ 时总脂质含量相对稳定,而35 $^{\circ}\text{C}$ 时总脂质显著降低且游离脂肪酸大量

积累^[35]。

储藏期间油酸和亚油酸含量增加,甘油三酯降解导致过氧化值升高,脂肪酸值常被用于评价大米品质^[36]。脂质变化产生的羰基化合物(特别是己醛)是大米在储藏过程中产生异味的主要来源,而游离脂肪酸与直链淀粉形成的复合物会抑制糊化,导致米饭硬度增加、黏度下降^[37],因此脂质变化可同时影响大米的风味和食用品质。

3 大米陈化程度的鉴定评价方法

稻谷在储藏过程中发生的物理和化学变化会影响其质量、安全性及营养成分,因此测定新陈度对保障粮食质量具有重要意义。传统方法基于浸液酸碱度变化判断陈化程度:将大米浸出液加入 NaOH 溶液,显色液颜色呈现由紫→蓝绿→灰绿→黄色变化,黄色出现越早陈化度越重;或通过测定浸泡液透光率推算储藏时间,储藏时间越长透光率越高;pH 值也随储藏时间延长而降低^[3]。

3.1 近红外光谱法鉴别大米陈化程度

近红外光谱法是一种基于分子振荡的光谱技术,能够快速、无损、高效地分析物质的化学成分和物理特性^[38]。其核心原理是利用特征化学键(如 C—H、O—H、N—H 等)在近红外区域(780~2 500 nm)的吸收峰差异,反映大米中淀粉、脂类、蛋白质等成分的分子结构变化。在陈化度测定方面,通过结合独立成分分析(ICA)、偏最小二乘判别分析(PLS-DA)与支持向量机(SVM)等算法,可实现大米新鲜度的高准确度判别。Pedro 等^[39]以 pH 值与脂肪酸度为核心评价体系,通过构建校准曲线并结合 ICA,成功建立了米汤 pH 值的线性回归预测模型。Shi 等^[40]采用原始光谱数据结合 PLS-DA 于 SVM,实现了大米新鲜度的准确判别。在成分定量分析方面,改进的偏最小二乘回归(PLSR)算法可显著提高直链淀粉含量的精准测定^[41];将小波变换(WT)、主成分分析(PCA)和人工神经网络(ANN)相结合,可实现大米储藏年限的无损鉴别^[42],证明 NIRS 技术结合机器学习算法在大米品质动态监测中的高效性。

3.2 挥发性特征物质分析

3.2.1 检测原理与技术

大米储藏过程中,脂类、蛋白质和碳水化合物的降解会产生醇类、酯类、酮类、醛类等挥发性物质。随储存时间延长,这些物质的组成和比例发生变化,从而导致大米气味和风味改变,可作为判断新

鲜度和陈化程度的依据。电子鼻和气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)是 2 种主要检测手段。电子鼻通过处理信号,可区分不同样品的整体挥发性气味特征,操作简便、检测快速,适合大量样品的初步筛选,但无法确定挥发性物质的具体化学结构和精确含量^[43]。GC-MS 具备强大的定性定量分析能力,Hu 等^[44]采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)确定 2-(E)-辛烯醛为通用标记物,其含量的增加表明稻谷已发生陈化。

3.2.2 挥发性物质变化

挥发性物质类别主要包括醛、醇、酯、酮、酸、酚和杂环 7 类。其中醛类在陈化过程中的变化备受关注,其含量变化与储藏条件密切相关。在较高温湿度条件下,其含量变化通常较大,当醛类物质含量显著增加时,大米的风味品质会明显变差^[45]。这主要因为醛含量取决于脂肪酶和脂肪氧合酶活性的增加,Lee 等^[46]发现己醛的含量随着储存时间的增加先增加后减少。醇类被认为是不饱和脂肪酸氧化的副产物,可通过醛的进一步分解产生,其中,2-乙基-1-己醇可作为关键性物质,而 2-乙酰基-1-吡咯啉(2-AP)是香米的重要香气活性化合物,可用于区分芳香和非芳香大米,但其含量随着储存时间延长会急剧下降^[47]。

3.3 蛋白质组学分析

蛋白质组学通过分析蛋白质的种类、表达水平、修饰状态等,揭示其功能和变化规律,可构建特异性蛋白质标志物用于评价大米陈化程度。Wang^[48]等研究发现,籼稻和粳稻在 20℃、相对湿度 27% 的环境中储存 540 天后,其蛋白质结构发生显著变化,包括游离巯基含量降低、二硫键含量和表面疏水性增加,蛋白质二级结构也发生明显改变。不同温度和品种对蛋白质表达的影响存在显著差异。基因本体富集分析(GO)显示,30℃时蛋白质主要参与蛋白质翻译、糖酵解和氨基酸代谢等过程;而在 70℃时则主要涉及脂质转运、脂肪酸合成和氧化应激反应^[49]。通过结合京都基因与基因组百科全书(KEGG)分析,能够深入揭示这些蛋白质在稻米储存过程种的功能。蛋白质组学研究通常包括样品制备、蛋白质分离、质谱鉴定及统计分析和功能富集分析等关键步骤,可为大米贮藏陈化机制提供新的研究视角。

3.4 脂质组学分析

脂质组学作为代谢组学的重要分支,通过分析

生物体内脂质的组成和含量变化,为研究其生理状态或品质变化提供重要技术手段^[50]。不同储存温度显著影响大米脂质代谢物的组成和含量。Qu等^[51]将糙米分别在15、20、25℃条件下储存90 d后发现,在正离子模式下,甘油三酯(TG)的含量最高,而在负离子模式下,神经酰胺(Cer)和磷脂酰甲醇(PMe)占主导。通过多元统计分析(如PCA和OPLS-DA)和火山图筛选,不同温度组间的脂质代谢物呈现显著差异。与20℃组相比,15℃组的27种代谢物显著增加,40种代谢物显著减少。通过代谢途径分析发现,低温能够有效减缓甘油酯代谢、甘油磷脂代谢及鞘脂代谢,从而抑制脂质氧化,维持大米品质。Zhang等^[52]研究表明,脂肪酸生物合成、不饱和脂肪酸合成及亚油酸代谢是大米陈化过程中最活跃的代谢通路。脂肪酸的生物合成始于乙酰辅酶A羧化酶(ACCase)催化乙酰辅酶A形成丙二酰辅酶A,随后通过缩合反应合成脂肪酰基链^[53]。植物中不饱和脂肪酸的生物合成则通过脂肪酰基CoA去饱和酶使饱和脂肪酸去饱和^[54]。亚油酸的氧化过程则通过LOX(脂肪氧合酶)途径生成氢过氧化物等初级产物,并进一步降解为醛类等次级氧化产物^[55]。低温储存通过抑制关键代谢通路的活性,有助于延缓脂质氧化、维持大米品质。

4 结论与展望

大米陈化期间淀粉、蛋白质、脂质等关键组分发生变化,可影响蒸煮品质、营养价值和风味。人工陈化技术(温湿度调控、微波辅助干燥、高温流化床-回火联用、超声波处理、射频加热等)可快速模拟自然陈化效果并提升加工效率,但不同方法对理化性质的调控存在差异,需结合品种特性优化工艺参数。陈化过程中,淀粉糊化特性与直链/支链比例改变导致蒸煮性能下降,蛋白质二级结构及酶活性减弱会影响营养价值,脂质氧化与水解会引发游离脂肪酸积累和“陈味”产生,低温储存可有效抑制脂质氧化进程。近红外光谱、挥发性物质分析及组学技术为精准鉴别陈化程度提供了手段,如2-辛烯醛可作为老化标志物,脂质组学揭示了低温通过调控脂肪酸合成途径维持品质的分子机制,这对解析陈化机理和调控大米品质具有重要意义。

陈化对大米的加工品质、食用品质及市场价值具有显著影响。然而,目前对陈化过程中的品质劣化机理及其分子调控网络的研究仍不够深入。未来

研究应采用多组学联合分析技术深入解析陈化的内在机制,建立陈化早期预警体系,并积极探索延缓稻米陈化的有效途径。

参考文献

- [1]刘悦,王馨怡,杜童申,等. 高效脉冲强光对稻谷中真菌杀菌工艺的研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(11): 59-65
Liu Y, Wang X, Du T, et al. The fungicidal process of fungi in rice grains by high-intensity pulsed light[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(11): 59-65
- [2]Wang Y, Wu C, Liu G, et al. Comparison of component and quality changes between soft rice and common rice during aging[J]. Frontiers in Nutrition, 2025, 12:1656432
- [3]Indiarto R, Nuramisa R L. Aging technique of rice and its characteristics[J]. 2021, 10(1)
- [4]Millati T, Pranoto Y, Utami T, et al. The effect of accelerated aging of rough rice with high-temperature storage on color and quality of milled rice[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 653(1):012053
- [5]Miao L, Chen L, Gao H, et al. Identification of hub genes regulating seed germination viability in soybean via comparative transcriptome analysis and WGCNA[J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1):861
- [6]Mustapha N A, Tang L, Ibadullah W Z W, et al. Microwave- and oven-heat moisture treatment of broken rice flour and the improvement in flat rice noodle quality[J]. Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology, 2024, 43(1):33-44
- [7]Kang S, Cho E R, Kang D H. Inactivation of foodborne pathogens in ground pork tenderloin using 915 MHz microwave heating depending on power level[J]. Food Research International, 2023, 173:113231
- [8]Song H, Li D, Zhang H, et al. Microwave treatment improves coarse cereals' texture and cooking quality[J]. Food Science & Nutrition, 2025, 13(10): e71082
- [9]Zhong Y, Xiang X, Chen T, et al. Accelerated aging of rice by controlled microwave treatment[J]. Food Chemistry, 2020, 323:126853
- [10]Lee Y C, Hwang C C, Huang Y T. Application of novel microwave-assisted induction heating technology for extending the shelf life of ready-to-eat rice through microbial, physical, and chemical quality preservation[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 93:103640
- [11]Chakraborty R, Kashyap P, Gadhave R K, et al. Fluidized bed drying of wheatgrass: effect of temperature on drying kinetics, proximate composition, functional properties, and

- antioxidant activity[J]. *Foods*, 2023, 12(8):1576
- [12] Luthra K, Sadaka S, Atungulu G. Effects of ambient air dehumidification, air temperature, and drying duration on rough rice quality and pasting properties using fluidized bed and fixed bed dryers[J]. *Cereal Chemistry*, 2021, 98(4): 968 – 979
- [13] Zhang G, Xuan Y, Lyu F, et al. Microstructural, physicochemical properties and starch digestibility of brown rice flour treated with extrusion and heat moisture[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242: 124594
- [14] Chitsuthipakorn K, Thanapornpoonpong S N. Verification of rice quality during storage after drying with hot air and radio frequency heating[J]. *Food Chemistry*, 2023, 20:100882
- [15] 张兆丽, 曹静, 孟祥忍, 等. 超声波技术在中央厨房食品加工中的应用研究进展[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(11):333 – 341
- Zhang Z, Cao J, Meng X, et al. Applications and research progress of ultrasonic technology for food processing in central kitchen[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(11):333 – 341
- [16] Bonto A P, Tiozon R N, Sreenivasulu N, et al. Impact of ultrasonic treatment on rice starch and grain functional properties: a review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 71: 105383
- [17] Kaur R, Bobade H, Sharma S, et al. Accelerated aging of paddy through optimized ultrasonication parameters: a response surface methodology approach[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2024, 18(1):74 – 86
- [18] Guo Y, Song R, Zhu S, et al. Effects of ultrasonic treatment on the texture quality of aged rice flour[J]. *Journal of Cereal Science*, 2024, 117:103918
- [19] 刘曼, 南敬昌, 丛密芳, 等. 射频加热技术在农产品和食品加工中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(8):289 – 296
- Liu M, Nan J, Cong M, et al. Application of radio – frequency heating technology in agriproduct and food industry [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(8): 289 – 296
- [20] Hussain S Z, Iftikhar F, Naseer B, et al. Effect of radiofrequency induced accelerated ageing on physico – chemical, cooking, pasting and textural properties of rice[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2021, 139:110595
- [21] Zhang Z, Wang Y, Ling J, et al. Radio frequency treatment improved the slowly digestive characteristics of rice flour[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2022, 154:112862
- [22] 宋睿, 郭玉宝, 朱世民, 等. 大米陈化对淀粉颗粒间解聚和米胶质构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(9):238 – 243
- Song R, Guo Y, Zhu S, et al. Effects of rice aging on disaggregation of starch granules and gel texture[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(9):238 – 243
- [23] 谷月, 李新宇, 包劲松. 稻米陈化过程中品质及淀粉精细结构变化研究进展[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2024, 50(3):317 – 328
- Gu Y, Li X, Bao J. Recent advances regarding changes in quality and fine structure of starch during rice aging[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2024, 50(3):317 – 328
- [24] 张玉荣, 张婷婷, 王游游, 等. 加速陈化对稻谷储藏品质和糊化特性的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(3):85 – 92
- Zhang Y, Zhang T, Wang Y, et al. Effect of accelerated aging on storage qualities and gelatinization characteristics of rice[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 42(3):85 – 92
- [25] 叶佳琳, 杜京霖, 吴光玥, 等. 温度及水分含量对二氧化碳气调储藏稻谷品质的影响[J]. *中国稻米*, 2024, 30(6):60 – 65
- Ye J, Du J, Wu G, et al. Effects of storage temperature and rice moisture content on quality of rice in carbon dioxide atmosphere storage[J]. *China Rice*, 2024, 30(6):60 – 65
- [26] De Azevedo P A, De Lima Costa I H, Da Fonseca Antunes B, et al. Artificial aging of rice (*Oryza sativa* L.): a review of emerging technologies to enhance and monitor the aging process [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2025, 113:102676
- [27] Han Q, Chen Y, Liu X, et al. Quality attributes of paddy rice during storage as affected by accumulated temperature [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10:1337110
- [28] 卢紫君, 赵时珊, 蔡芳, 等. 陈化前后大米的淀粉结构及理化性质分析[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(6):126 – 135
- Lu Z, Zhao S, Cai F, et al. Analysis of the structure and physicochemical properties of rice starch before and after aging[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(6):126 – 135
- [29] Gu Y, Tong C, Hu Y, et al. Starch lysophospholipids contents affect storage quality of paddy rice[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 348:122818
- [30] Wang H, Wang Y, Wang R, et al. Impact of long – term storage on multi – scale structures and physicochemical properties of starch isolated from rice grains[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124:107255
- [31] Wu C, Gong X, Zhang J, et al. Effect of rice protein on the gelatinization and retrogradation properties of rice starch

- [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242:125061
- [32] Geng L, Liu K, Zhang H Y. Lipid oxidation in foods and its implications on proteins [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10:1192199
- [33] Liu J, Guo J, Ye C, et al. Low temperature storage alleviates aging of paddy by reducing lipid degradation and peroxidation[J]. Food Chemistry, 2025, 465:142140
- [34] Pokkanta P, Yuenyong J, Mahatheerant S, et al. Microwave treatment of rice bran and its effect on phytochemical content and antioxidant activity [J]. Scientific Reports, 2022, 12:7708
- [35] Zhao Q, Guo H, Hou D, et al. Influence of temperature on storage characteristics of different rice varieties[J]. Cereal Chemistry, 2021, 98(4):935-945
- [36] Liu X, Wang W, Li Z, et al. Lipidomics analysis unveils the dynamic alterations of lipid degradation in rice bran during storage[J]. Food Research International, 2024, 184:114243
- [37] Li X, He Y, Xie Y, et al. Effect of catalase on lipid oxidation and flavor substances of α -instant rice during storage [J]. Food Science and Technology, 2022, 42: e46822
- [38] Zhou D, Yu Y, Hu R, et al. Discrimination of *Tetrastigma hemsleyanum* according to geographical origin by near-infrared spectroscopy combined with a deep learning approach [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 238:118380
- [39] S. Sampaio P, M. Brites C. Near-infrared spectroscopy and machine learning: analysis and classification methods of rice[M/OL]//HUANG M. Integrative Advances in Rice Research. IntechOpen, 2022[2025-11-30]
- [40] Shi S, Feng J, Yang L, et al. Combination of NIR spectroscopy and algorithms for rapid differentiation between one-year and two-year stored rice [J]. Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2023, 291:122343
- [41] Wan J, Ying L, Dai Y, et al. Establishment of rice freshness evaluation system and quick inspection method [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632(5):052040
- [42] Shi G, Zhang X, Qu G, et al. Classification of rice varieties using SIMCA applied to NIR spectroscopic data [J]. ACS Omega, 2022, 7(50):46623-46628
- [43] Xu J, Liu K, Zhang C. Electronic nose for volatile organic compounds analysis in rice aging [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109:83-93
- [44] Hu S, Ren H, Song Y, et al. Analysis of volatile compounds by GCMS reveals their rice cultivars [J]. Scientific Reports, 2023, 13:7973
- [45] Zhang X, Dai Z, Fan X, et al. A study on volatile metabolites screening by HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS for discrimination and characterization of white and yellowed rice [J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(2):496-504
- [46] Lee J C, Yang K, Wu C, et al. Discussion on the differences in aroma components in different fragrant rice varieties during storage [J]. Life, 2023, 13(10):2063
- [47] Zhang L, Pan Z, Lu Z, et al. Analysis of volatile compounds' changes in rice grain at different ripening stages via HS-SPME-GC-MS [J]. Foods, 2024, 13(23):3776
- [48] Wang Q, Zhang D, Liu J, et al. Storage drives alterations of proteomic and protein structural properties in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Foods, 2022, 11(21):3541
- [49] Zhao Q, Lin J, Wang C, et al. Protein structural properties and proteomic analysis of rice during storage at different temperatures [J]. Food Chemistry, 2021, 361:130028
- [50] Liu Y, Guo X, Wang N, et al. Evaluation of changes in egg yolk lipids during storage based on lipidomics through UPLC-MS/MS [J]. Food Chemistry, 2023, 398:133931
- [51] Qu L, Zhao Y, Li Y, et al. Effect of storage temperature on the quality of brown rice revealed by integrated GC-MS and lipidomics analysis [J]. Food Chemistry, 2025, 465:142107
- [52] Zhang D, Huang S, Wang Q, et al. Lipidomics and volatiles reveal the changes in lipids and their volatile oxidative degradation products of brown rice during accelerated aging [J]. Food Chemistry, 2023, 421:136157
- [53] Miray R, Kazaz S, To A, et al. Molecular control of oil metabolism in the endosperm of seeds [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(4):1621
- [54] Dyall S C, Balas L, Bazan N G, et al. Polyunsaturated fatty acids and fatty acid-derived lipid mediators: recent advances in the understanding of their biosynthesis, structures, and functions [J]. Progress in Lipid Research, 2022, 86:101165
- [55] Zhang Y, Zhang Y. Effect of lipoxygenase-3 on storage characteristics of peanut seeds [J]. Journal of Stored Products Research, 2020, 87:101589.