

谭斌研究员主持“国粮院粮食加工 30 年历程与发展”专栏文章之三

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.05.010

吴娜娜, 乔聪聪, 田晓红, 等. 鲜湿糙米线品质劣变机理及调控技术研究进展[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(5): 83-92.

WU N N, QIAO C C, TIAN X H, et al. The current progress in research on the mechanism and control techniques of quality deterioration of fresh brown rice noodles[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(5): 83-92

鲜湿糙米线品质劣变机理及 调控技术研究进展

吴娜娜, 乔聪聪, 田晓红, 谭斌✉

(国家粮食和物资储备局科学研究院 粮油加工研究所, 北京 100037)

摘 要: 全谷物以其对营养健康的重要作用在全世界得到了广泛关注。鲜湿糙米线作为营养健康的全谷物主食食品存在更易腐败、老化变硬、易断条、蒸煮损失率高等问题。系统阐述了鲜湿米线品质影响因素, 鲜湿糙米线在储藏过程中的水分含量、pH 值、蒸煮品质、水分迁移、质构、微观结构等品质变化规律, 分析了鲜湿糙米线品质劣变机理; 并进一步对选择糙米原料、外源添加物、糙米全籽粒磨粉及回填法制备工艺等鲜湿糙米线品质调控技术 2016—2023 年最新研究进展进行了综述, 为鲜湿糙米线的品质调控和品质提升提供参考。

关键词: 鲜湿糙米线; 品质劣变; 调控技术; 质构; 回生; 蒸煮品质

中图分类号: TS212; S-1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2023)05-0083-10

网络首发时间: 2023-09-08 14:11:52

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20230907.1823.002>

The Current Progress in Research on the Mechanism and Control Techniques of Quality Deterioration of Fresh Brown Rice Noodles

WU Na-na, QIAO Cong-cong, TIAN Xiao-hong, TAN Bin✉

(Institute of Cereal and Oil Science and Technology, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: Whole grains have gained great attention due to their important roles in nutrition and health. Fresh brown rice noodles, which have been considered as a nutritious and healthy whole grain staple food, are more prone to be spoiling, aging, hardening and easy broken with high cooking loss rate. The factors affecting the quality of fresh brown rice noodles were systematically described, and the changes in water content, pH value, cooking quality, water migration, texture and microstructure of fresh brown rice noodles during storage were also summarized. The mechanism of quality deterioration of fresh brown rice noodles was

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31772009); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(ZX2221)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (No. 31772009); Fundamental Research Funds of the Central Research Institutes (No. ZX2221)

作者简介: 吴娜娜, 女, 1981 年出生, 博士, 研究员, 研究方向为谷物碳水化合物结构功能关系及其食品品质控制。E-mail: wnn@ags.ac.cn

通讯作者: 谭斌, 男, 1972 年出生, 博士, 首席研究员, 研究方向为健康谷物加工与营养。E-mail: tb@ags.ac.cn。作者详细介绍见 PC23。

elaborated and analyzed. Furthermore, the latest research progress (from the year 2016 to 2023) on the quality control technology of fresh brown rice noodles was reviewed, including the selection of raw materials for brown rice, the addition of exogenous additives, the whole grain grinding of brown rice, and the backfilling method of rice bran for preparing brown rice noodles. This review could provide the references for the quality control and improvement of fresh brown rice noodles.

Key words: fresh brown rice noodles; quality deterioration; control techniques; texture; retrogradation; cooking quality

米线, 又名米粉条、米粉、米丝, 是以大米为原料, 经过浸泡、粉碎、糊化、挤丝或切条、老化等一系列工序制成的细条状或扁宽状的米制品, 在中国、泰国、斯里兰卡等国家有广阔的市场。鲜湿米线口感良好, 在我国广东、广西、湖南、湖北、云南、贵州等南方地区广受欢迎, 常被作为主食消费。米线是目前我国消费量和消耗大米量最大的大米深加工产品, 其市场潜力巨大。

在我国供给侧改革的背景下, 食品产业新需求转向了营养健康升级、消费需求升级、产业升级。其中, 在大宗米面制品消费过程中, 由于全谷物在人体营养健康方面的独特作用, 全谷物及其制品成为国际和国内食品产业发展的主流方向之一^[1-2]。鲜湿米线作为我国传统大宗食品, 是全谷物营养健康食品的良好载体, 鲜湿糙米线具有广阔的市场应用前景。发展鲜湿糙米线产业, 扩大全谷物糙米的消费利用途径, 有利于节约粮食资源、调整国民膳食营养结构、改善国民健康状况。尤其是目前我国 II 型糖尿病、高血压、高血脂等慢性病高发的情况下, 营养健康的鲜湿糙米线产业发展对我国社会和经济的发展具有至关重要的意义。

然而, 与鲜湿精白米线相比, 鲜湿糙米线更易腐败、老化变硬、易断条、蒸煮损失率高。国家“十三五”时期, 包括笔者所在研究团队在内的国内相关高校、研究机构等在鲜湿糙米线品质劣变机理及调控技术方面做了一些工作, 部分研究成果实现了转化应用。本文从鲜湿米线品质劣变原因、鲜湿糙米线品质劣变规律、机理及调控方面进行综述, 为鲜湿糙米线加工关键技术研发和品质提升提供指导。

1 鲜湿米线品质劣变原因

鲜湿米线的品质劣变主要表现在两个方面, 一是鲜湿米线因水分含量较高(大于 60%), 米线成品保存后存在芽孢杆菌属、枯草芽孢杆菌、葡萄球菌属、霉菌等微生物腐败^[3]; 二是鲜湿米线淀粉回生, 也称“老化”, 导致鲜湿米线变硬、易断条、口感差、蒸煮损失率高。目前, 通过浸渍保鲜剂和缓冲溶液、结合真空包装和巴氏杀菌等方法可有效抑制或延缓微生物生长, 防止米线腐败, 鲜湿米线的保质期可达到 8 个月以上^[4]; 关于米线淀粉老化回生, 国内外学者进行了大量的研究, 主要侧重于淀粉组成、水分含量、控制温湿度条件, 采用淀粉酶、非淀粉多糖等方式抑制淀粉的老化及品质劣变^[5-11]。米线储藏过程中的淀粉老化回生是品质控制的难点, 在储藏过程中控制米线淀粉的老化程度, 如何促进有效的短期回生并有效控制不需要的长期回生是米线加工的研究重点。

1.1 米线淀粉回生机理

米线的形成过程主要是淀粉的糊化和回生形成凝胶的过程^[10]。大米主要由 75%左右的淀粉组成, 大米淀粉主要由直链淀粉和支链淀粉组成, 在糊化过程中, 淀粉形成了由游离出来的直链淀粉和低分子量的支链淀粉构成的连续相^[12], 淀粉分子由紧密的有序排列状态变成散乱的无序排列状态, 结晶或非结晶的淀粉分子间的氢键缔合被破坏。淀粉糊化后在降温储存过程中, 发生脱水使部分分子重新变成有序排列状态, 淀粉分子氢键发生再度结合重新结晶, 这就是大米淀粉的回生或老化。

关于淀粉老化回生的机理, 目前普遍的观点

是, 直线型的直链淀粉和高度分支的支链淀粉都参与了淀粉的回生过程, 直链淀粉主要参与回生的最初阶段且不可逆, 而支链淀粉由于其分子结构的刚性在回生中所需时间较长, 支链淀粉的回生是可逆的, 支链淀粉的变化是引起回生的主要原因^[13-16]。丁文平等研究发现, 大米淀粉的短期回生与直链淀粉的含量正相关, 而长期回生主要由支链淀粉的重结晶引起, 重结晶的完形程度和热稳定性比原淀粉晶体差, 随着支链淀粉重结晶逐步增大, 从而使淀粉体系的凝胶强度和硬度变大, 弹性降低^[10]。直链淀粉成分与支链淀粉的回生有相互协同作用^[17], Bulikin 的晶体动力学阐述了回生的分子过程, 直链淀粉首先形成晶核, 支链淀粉以此为中心生长形成晶体^[18]。直链淀粉含量对支链淀粉的最终结晶程度影响并不显著, 但对支链淀粉重结晶成核有显著影响, 对支链淀粉重结晶的生长没有影响, 直链淀粉通过参与支链淀粉晶核的形成来影响支链淀粉的重结晶过程, 但不参与支链淀粉后期晶体的生长和稳定^[10]。

1.2 大米原料性质和储藏条件对米线回生及品质的影响

影响淀粉回生的因素主要有直链淀粉与支链淀粉的比例、支链淀粉的聚合度、蛋白质、无机盐和脂质的含量等。此外, 淀粉形成凝胶后与水分子形成一个混合体系, 水分含量、储藏条件都对其回生有影响。目前国内外针对关于控制米线淀粉老化回生的研究主要集中在原料组成性质、无机盐、储藏条件等方面。丁文平研究了生产鲜湿米线的原料标准及储藏温度对米线品质的影响, 结果表明, 直链淀粉含量在 23%~25%, 25 °C 储藏, 及 β -淀粉酶可以显著抑制米线品质劣变^[10]。鲁战会、易翠平、罗文波、魏玉翠、王宁、徐晓辉、袁蕾蕾、梅小弟、汪晓鸣等分别研究了不同品种稻米原料特性、储藏条件、米线水分含量、加工工艺、添加其他类型淀粉等对米线品质的影响^[3-9,19-23]。Chen 等^[24]研究了在水稻灌浆期籽粒遮光条件下对米线品质的影响, 结果发现, 米粉粘度显著降低, 而硬度显著增加, 大米的凝胶稠度和糊化质量降低, 严重限制了米线的加工和生

产。阿根廷、泰国、新加坡、印度、韩国等国的学者通过选择合适的原料、添加无机盐 NaCl、脱脂豆粉、马铃薯淀粉、多酚类植物化学素、木薯淀粉等用以提升米线的品质^[25-32]。通过这些条件的控制, 可以有效抑制或延缓米线的老化过程, 达到调控米线品质的目的, 并且这些方法目前已经运用到了米线实际生产过程中, 例如, 在泰国, 大米粉与木薯淀粉以 7:3 的比例混合制作米线。

1.3 磨粉影响淀粉回生及米线品质

磨粉方式是影响大米粉及米线品质的重要因素之一。目前主要有干法、半干法和湿法三种磨粉方式, 磨粉方式不同, 大米粉粒度和损伤淀粉含量不同, 因此导致加工制成的米线品质有很大差异。Heo 等的研究表明, 干法磨粉比湿法磨粉制备的米线有较高的蒸煮损失率, 这可能是因为干法磨粉损伤淀粉含量高导致淀粉的水溶性较高^[33]。李里特团队研究了干法和湿法磨粉对米粉老化性质、硬度的影响, 结果表明, 磨粉方式对大米粉团的特性具有决定性的影响作用, 磨粉机械也是一个重要的影响因素^[22-23]。Tong 等研究了半干法磨粉对大米粉性质及米线品质的影响, 结果表明, 半干法磨粉和湿法磨粉制备得到的米线品质相似, 均比干法磨粉得到的米线品质好^[34]。磨粉方式影响米粉性质乃至米线品质, 主要是由于米粉颗粒细度和损伤淀粉含量的差异导致的吸水或持水性质的差异, 造成淀粉糊化和回生性质的改变。

1.4 外源添加物对米线回生的影响

研究表明, 脂类、糖类、蛋白等也是米线淀粉糊化回生的重要影响因素。脂类, 包括脂肪酸、乳化剂与部分油脂, 可与直链淀粉分子形成螺旋配合体, 并产生凝聚, x-射线衍射谱显示 V 型结晶, 当热的糊化含脂质淀粉冷却时, V 型结晶首先形成^[35]。脂类对淀粉回生的抑制作用, 由于脂类的不同也会有所不同, 单甘酯对支链淀粉的回生有一定的抑制作用, 而硬脂酸单甘酯和硬脂酸乳酸钠对蜡质玉米淀粉的回生没有明显的作用^[36]。

小分子糖对淀粉回生的抑制作用与糖的浓度、类型有关, 糖高于 7.5% 时, 加速支链淀粉回

生, 低于7.5%时则显示回生抑制作用。六碳糖比五碳糖可更有效地抑制回生^[37]。关于小分子糖对淀粉分子的作用机理, 目前普遍认为是糖-水分子相容性理论, 糖分子与水分子间的相容性较好, 则可起到类水作用, 因水化层薄, 而可以尽量接近淀粉分子, 这事实上起到了对分子链的稀释作用, 同时又提高了分子链周围的微区粘度, 从而延缓了分子链的迁移速率, 所以降低了回生速率。相反, 若糖分子与水的相容性不好, 则不但不能起到类水作用, 反而会导致淀粉分子的微观浓度升高, 从而加速回生^[36]。多糖对淀粉回生的抑制作用, 除与分子量有关外, 多糖的结构及在淀粉体系中的构象对其与淀粉分子间的相互作用有重要影响。Kasunmala 等^[38]研究了黄原胶、瓜尔豆胶、决明子叶提取物对米线质构性质的影响, 结果表明添加黄原胶的米线蒸煮和质构品质最好。关于脂类、糖类、蛋白等对淀粉回生的影响机理并不明晰, 甚至不同研究者得出的结论完全相反, 可能的原因是原料来源及实验条件等不同所致。

2 鲜湿糙米线品质劣变机理及调控技术

相对于精白米, 糙米中含有更丰富的可溶与不溶性膳食纤维、脂肪、维生素、酶类等, 其营养价值更为全面。但这些物质给鲜湿糙米线的加工造成了一定困难, 鲜湿糙米线口感粗糙, 及更容易氧化酸败和微生物腐败等。因此, 鲜湿糙米线口感差与酸败腐败等问题是需要解决的关键科学技术问题。

糙米不溶性膳食纤维含量高, 导致在加工碾磨过程中颗粒细度控制困难, 如果粉碎程度低, 颗粒细度大, 会造成鲜湿糙米线口感粗糙; 如果粉碎程度过高, 较高含量的淀粉损伤同样会造成鲜湿糙米线蒸煮损失率高、质构品质差等问题。鲜湿糙米线中的脂肪酶、脂肪、水分等含量高, 造成鲜湿糙米线更容易氧化酸败, 导致微生物腐败变质。包括笔者研究团队在内的很多学者研究鲜湿糙米线的品质变化规律, 以及研发关键技术提升了鲜湿糙米线的品质, 以期鲜湿糙米线产业发展提供技术基础。

2.1 鲜湿糙米线品质变化规律及影响因素

2.1.1 鲜湿糙米线储藏过程中水分含量、pH 值和硬度的变化

笔者所在研究团队研究了鲜湿糙米线在不同储藏条件下的品质变化规律^[39]。随着储藏时间的延长, 鲜湿糙米线在-18、4、25、37℃储藏过程中水分含量均有不同程度的降低。其中, 鲜湿糙米线在37℃储藏过程中水分含量下降最快, 在-18℃储藏过程中水分含量下降幅度最大。鲜湿糙米线在常温储藏时, pH 值下降显著, 冷冻储藏时, pH 值则无显著变化。据报道, 鲜面条的 pH 值与菌落总数之间存在显著相关性^[40-41]。冷冻储藏(-18℃)可以抑制鲜湿糙米线中微生物的生长, 从而阻碍酸的产生。鲜湿糙米线水分高, 营养丰富, 初始 pH 值适宜, 这为微生物生长提供了有利条件。25℃和37℃适合微生物的生长和代谢。因此, 鲜湿糙米线在25℃和37℃储藏过程中 pH 值迅速下降。鲜湿糙米线的硬度随着储藏时间的延长而增加。鲜湿糙米线在4℃储藏过程中硬度最大, 其次是-18、25、37℃。鲜湿糙米线中的淀粉在4℃时易发生老化, 导致其硬度增大。硬度可以直观地反映鲜湿糙米线的回生情况。

2.1.2 鲜湿糙米线储藏过程中蒸煮品质的变化

鲜湿糙米线的蒸煮品质主要包括蒸煮损失率、断条率、复水率、蒸煮后硬度等, 其显著影响鲜湿糙米线的食用品质。笔者所在研究团队研究表明, 在不同温度储藏过程中, 鲜湿糙米线的吸水率呈现下降趋势, 蒸煮损失率则逐渐升高, 蒸煮后硬度逐渐降低。蒸煮损失率对于评估米线在蒸煮过程中保持结构完整性的能力很重要, 过高的蒸煮损失是不可取的^[42]。鲜湿糙米线蒸煮损失率的增加与米线凝胶结构的解体、水分迁移和固体浸出显著相关^[43]。高质量的面条或米线既不能太硬也不能太软, 并且应该具有高弹性和耐嚼性^[44]。一般来说, 硬度越高, 面条或米线口感越硬^[45]。

2.1.3 鲜湿糙米线储藏过程中微观结构的变化

结构是影响鲜湿糙米线质地的重要因素之一。在不同温度条件下储藏过程中, 鲜湿糙米线的表面和横截面结构存在显著差异。刚制备的鲜

湿糙米线的横截面呈比较规则的圆形，横截面周边的多孔结构比较规则，表面光滑，无孔隙和裂纹，具有完整的凝胶结构（图 1）。根据 Srikaeo 等^[46]的报道，规则的多孔结构可以提高米线的质量，从而提高米线的吸水率和降低蒸煮损失。随着不同温度条件下储藏时间的延长，鲜湿糙米线的横截面结构受到不同程度的破坏，横截面外围的孔隙率明显变大，直至整个横截面变得松散甚至塌陷；鲜湿糙米线的表面出现孔隙和塌陷结构，孔隙较大。这导致鲜湿糙米线较高的蒸煮损失^[39]。

用激光扫描共聚焦显微镜（CLSM）分析鲜湿糙米线的微观结构，淀粉标记为绿色，蛋白质标记为红色（图 2）。刚制备的鲜湿糙米线表面呈亮黄色，为红色和绿色的混合，无法区分淀粉和蛋白质。这表明蛋白质在淀粉凝胶中分布均匀。不同温度储藏结束时，鲜湿糙米线表面出现明显的空心、多孔和大孔径塌陷结构，表面出现大量红色区域和少量绿色区域。这表明鲜湿糙米线的完整结构被破坏，蛋白质从淀粉凝胶中解离出来，损失发生在规则的基质外观中。结构劣变是鲜湿糙米线蒸煮品质差的主要原因。

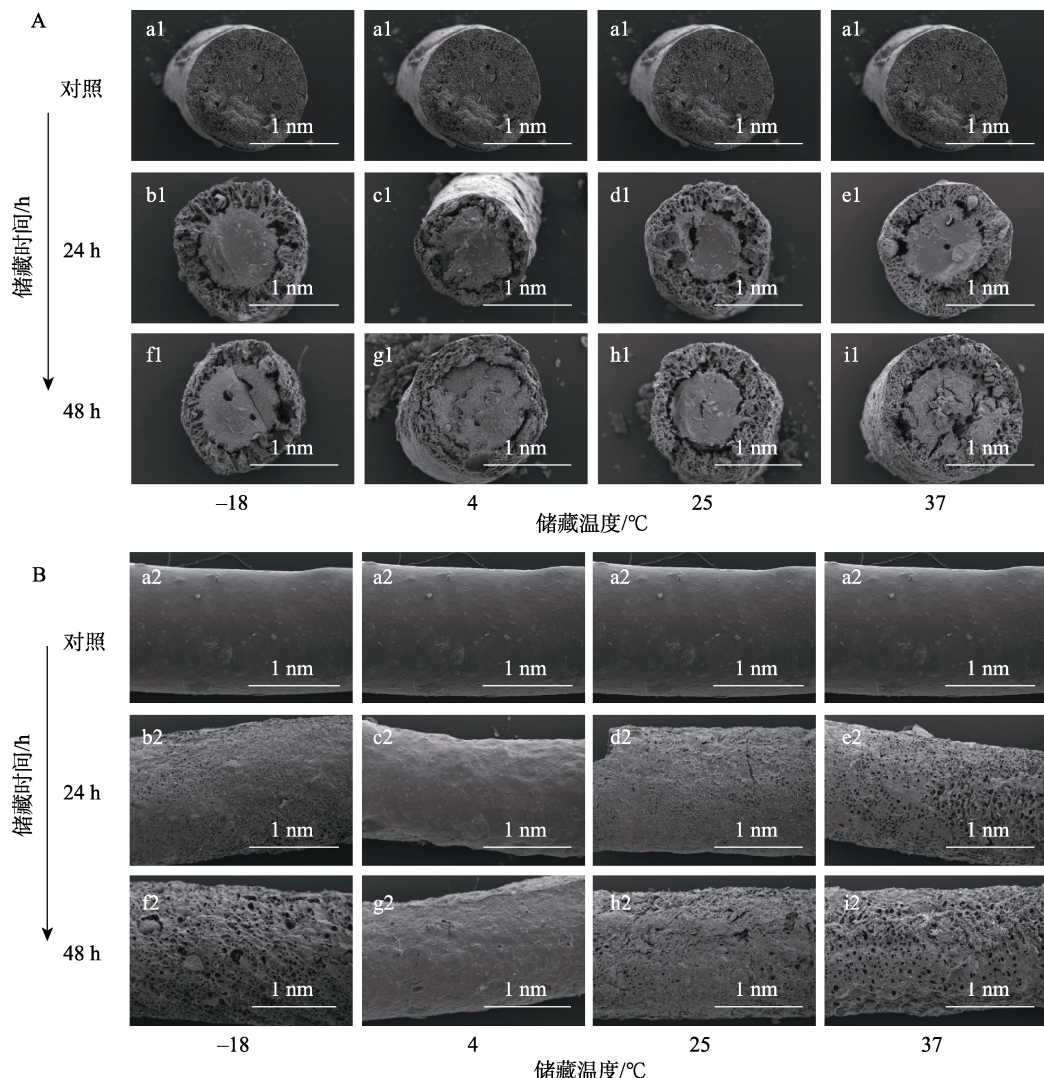


图 1 不同温度储藏过程中鲜湿糙米线横截面 (A) 和表面 (B) 的扫描电子显微照片 ($\times 50$)

Fig.1 Scanning electron micrographs of cross section (A) and surface (B) of fresh brown rice noodles during storage at different temperatures

注：a1、a2 分别是对照组鲜湿糙米线的横截面和表面的扫描电子显微照片（储藏 0 h）。鲜湿糙米线在 37 °C 下不能储藏 48 h，因此 i1 和 i2 是储藏 30 h 的鲜湿糙米线扫描电子显微照片。

a1, a2 are the scanning electron micrographs of cross section and surface of control FBRN (stored for 0 h), respectively. Fresh brown rice noodles cannot be stored for 48 h at 37 °C, therefore i1 and i2 are scanning electron micrographs of FBRN stored for 30 h.

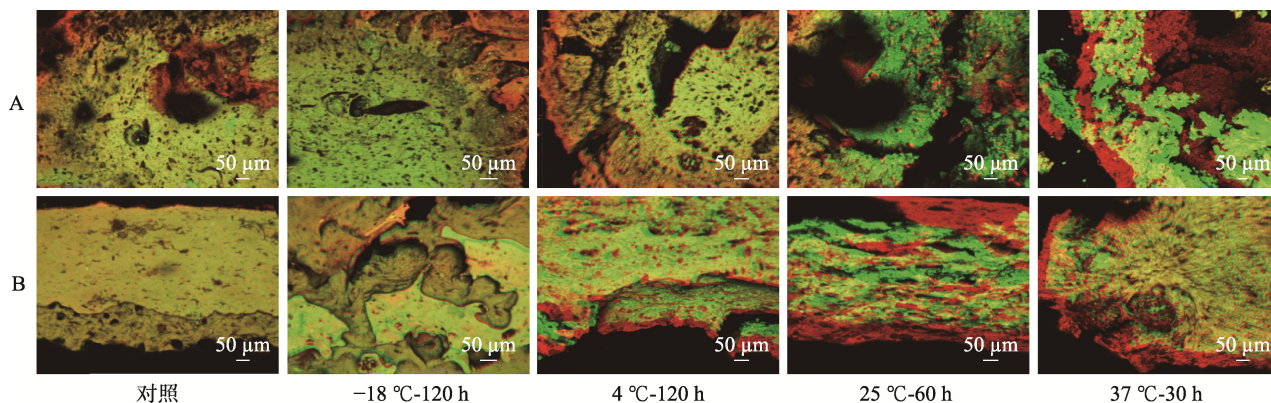


图 2 不同温度储藏过程中鲜湿糙米线横截面 (A) 和表面 (B) 的 CLSM 图

Fig.2 CLSM of cross section (A) and surface (B) of fresh brown rice noodles during storage at different temperatures

2.1.4 鲜湿糙米线储藏过程中水分迁移

水对食品的质量和稳定性起着关键作用,表征食品中水的特性是了解决定食品稳定性、可接受性和质量的基本原因的非常重要的方法^[47]。鲜湿糙米线存在强结合水、弱结合水和游离水 3 种水分状态,其中游离水是鲜湿糙米线水分的最大组成部分。笔者所在研究团队的研究表明,鲜湿糙米线在储藏过程中,3 种水分的横向弛豫时间和相对比例发生变化。其中强结合水横向弛豫时间降低,表明该状态下的水分与非水成分的结合更紧密;而弱结合水横向弛豫时间无明显变化;游离水横向弛豫时间则呈上升趋势。鲜湿糙米线在常温储藏过程中,强结合水的相对比例呈下降趋势,弱结合水的相对比例呈先上升后下降趋势,游离水的相对比例呈先下降后上升趋势。鲜湿糙米线在 4 °C 储藏过程中,强结合水和游离水的相对比例降低,而弱结合水的相对比例升高。鲜湿糙米线中的大部分水分流失是由游离水引起的,这可能是由于储藏过程中水分迁移(水分蒸发)、微生物生长和淀粉回生^[43]。微生物的生长繁殖破坏了米线淀粉结构,降低了水与大分子的结合能力,使强结合水转变为弱结合水和游离水^[48]。

2.2 鲜湿糙米线品质劣变机理分析

鲜湿糙米线产品,在常温储藏十几个小时后,质地变硬、易断,口感变差等老化现象严重。相比鲜湿精白米线,鲜湿糙米线淀粉凝胶老化速率更快、米线质地硬、更易断条、风味不良等品质劣变现象更严重。糙米线与精白米线最大的不同

在于加入了糠层。糠层中含有脂类、可溶与不可溶膳食纤维(非淀粉多糖等)、维生素、谷维素、矿物质、植酸等。糠层中不可溶膳食纤维组分导致糙米线的口感粗糙,在生产实际中,降低颗粒细度,实现优质口感,因为引入了新物质的形态,糠层中非淀粉多糖等物质分子结构变化对米线淀粉老化的影响显著。

糠层物质显著影响米淀粉糊化、老化及糙米线凝胶的形成,对米线硬度、复水时间、口感等亦有显著影响。通过控制颗粒细度与损伤淀粉含量对糙米线的品质有一定的改良作用,引入糠层物质后,鲜湿糙米线品质劣变的原因及过程机制可能如下:糠层中的非淀粉多糖等大分子对淀粉的影响作用,在短期回生方面,糠层大分子物质与淀粉分子之间产生了竞争性吸水作用,引起淀粉分子较难糊化,进而直链淀粉形成晶核的时间较长,在制备糙米线过程中,形成一定硬度的糙米线较难;而在鲜湿糙米线储藏过程中,糠层中不溶性物质与水的相容性差,导致淀粉分子的微观浓度升高,从而加速支链淀粉的回生;另一方面,在糠层存在下,与精白米线相比,鲜湿糙米线凝胶网络结构松散或网络结构空隙较大,导致鲜湿糙米线水分迁移速率较快,从而加速老化回生。再次,鲜湿糙米线在储藏过程中微生物的生长、脂肪酶等导致米线腐败和酸败变质。糠层物质对米线老化及品质的影响机理、鲜湿糙米线的品质劣变机理还需要进行进一步深入研究,为鲜湿糙米线的品质改良提供理论依据。

2.3 鲜湿糙米线品质调控技术

糙米糠层中的物质是鲜湿糙米线品质劣变的主要原因。研究者从糙米原料、磨粉方式、鲜湿糙米线加工工艺及储藏条件等方面,对鲜湿糙米线品质改良技术进行了研究。

2.3.1 选择合适的糙米原料改良糙米线品质

笔者所在研究团队选取了 5 种直链淀粉含量 (15.96%~21.88%) 的糙米粉为原料,以凝胶质特性、动态流变特性和热机械性质 (Mixolab) 为分析指标研究了糙米粉的性质,并对糙米线的蒸煮品质、质构、体外消化率和感官特性进行了评价。研究发现,不同直链淀粉含量的糙米粉粉质特性差异性显著,直链淀粉含量越高,糙米粉凝胶回复性以及流变性质最大弹性模量和粘性模量均呈增长的趋势,凝胶内聚性、糙米粉吸水率和粘度谷值逐渐减小。直链淀粉含量越高的糙米线,吸水率越高,蒸煮损失越小,煮后糙米线断条率越小,质构性质越好。直链淀粉含量较高的糙米线体外消化率较低,抗性淀粉和慢消化淀粉含量较高,感官得分较高,但直链淀粉含量最高的糙米线的感官得分最低,表明制备品质较好的糙米线需要研究及选择最佳的直连淀粉含量的糙米。糙米直链淀粉含量差异对糙米粉质特性及糙米线品质影响较大,笔者所在团队的研究为加工糙米线选取合适的原料提供了依据^[49-50]。

2.3.2 外源添加物改良糙米线品质

与精白米线类似,蛋白质、羧甲基纤维素、瓜尔豆胶、黄原胶、玉米淀粉等被用于改善糙米线的品质。20% 的玉米淀粉加入到糙米粉中用于制备糙米线,研究发现 80~85 °C 加热 20~30 min 的糙米线具有较高的抗氧化活性,较高的消化性和较好的凝胶性质^[51]。瓜尔豆胶、羧甲基纤维素和黄原胶等食品胶体加入至红米粉中制备红米线,发现红米线的拉伸强度和延展性升高,蒸煮损失降低,感官可接受度增加,但这些食品胶体的加入不影响红米线的总酚含量和抗氧化活性^[52]。大豆蛋白也可用于改善全谷物糙米线的性质,Cao 等研究了白米线、全谷物糙米线、及添加大豆分离蛋白的全谷物糙米线三种米线的质构、水分含量和吸水性质、蒸煮损失和风味,发现添加大豆

分离蛋白可明显改善全谷物米线的弹性、内聚性、回复性和粘性,添加大豆分离蛋白的全谷物糙米线吸水性和持水能力增加,蒸煮损失较低。醛类化合物是全谷物糙米线和添加大豆分离蛋白的全谷物糙米线中的主要挥发性物质,添加大豆分离蛋白的全谷物糙米线比在全谷物糙米线中检测到的挥发性化合物多了 7 种。添加大豆分离蛋白的全谷物糙米线在感官上更容易接受。因此,大豆分离蛋白作为一种天然、安全的添加剂,可用于改善全谷物糙米线的品质,丰富其风味^[53]。

2.3.3 加工工艺及储藏条件改良鲜湿糙米线品质

糙米线的品质改良方面,除了选择合适的糙米原料及外源添加物外,还可以通过糙米线的制备工艺及储藏过程提升鲜湿糙米线的品质。在糙米线制备过程中,全籽粒磨粉和回填法都可以用以制备糙米线。

全籽粒磨粉方式对糙米粉性质及糙米线品质影响显著。笔者所在研究团队研究了干法粉碎强度 10~40 Hz,半干法调节含水量为 20%~35% 及湿法料液比为 1:1、1:2、1:3、1:4,3 种磨粉方式对糙米粉损伤淀粉含量、颗粒料细度、糙米粉理化性质及糙米线品质的影响,与干法磨粉相比,湿法和半干法磨粉的糙米粉损伤淀粉含量、吸水指数、水溶性和膨胀势较低,但其糙米粉平均粒径、凝胶最大弹性模量和最大黏性模量较高,磨粉颗粒细度越小及损伤淀粉含量越大,糙米线断条率越高。干法粉碎强度 10、半干法水分调节含量 20%、30% 和 35%、湿法粉碎料液比 1:3~1:4 时,糙米线的品质较好。糙米粉的损伤淀粉含量与磨粉的颗粒细度是影响糙米线断条率等品质的主要因素^[54-55]。

也有研究者分别采用轻碾结合酶解处理、超声结合酶解处理降低糙米中的不溶性膳食纤维含量和糙米粉的颗粒细度,增加可溶性膳食纤维含量,用以改善糙米线感官品质,研究结果表明,轻碾结合酶解处理以及超声结合酶解处理提高了糙米线中的膳食纤维、矿物质和维生素的保留率,降低了其血糖生成值,提高了其蒸煮和质构品质^[56-57]。

回填法,即将米糠层稳定化后,与白米粉均

匀混合后制备糙米线。笔者所在研究团队将米糠层进行挤压蒸煮处理后,回填至糙米粉制备了糙米线,研究了白米线、糙米线及挤压稳定化的糙米线总酚含量、抗氧化活性、蒸煮品质、消化性质,结果发现挤压稳定化糙米线 DPPH、ABTS 和 T-AOC 的抗氧化活性最高,抗性淀粉含量最高,淀粉水解率最低,与未进行挤压稳定化的糙米线相比,挤压稳定化糙米线蒸煮和质构品质得到了改善,其最佳蒸煮时间和蒸煮损失较低,硬度、抗拉强度和弹性较高^[58]。与未挤压蒸煮糙米线相比,在 37℃和 25℃下储藏的挤压蒸煮糙米线的保质期分别延长了 6 h 和 12 h,表明挤压蒸煮米糠在鲜湿糙米线储藏过程中可以抑制淀粉的老化,延缓鲜湿糙米线的变质^[59]。另外的研究也发现,采用挤压膨化米糠回填法制备的糙米粉、未处理米糠回填法制备的糙米粉与全粉碎法制备的糙米粉制作糙米线,挤压膨化米糠回填法制备的糙米粉制作的糙米线蒸煮损失率最低,硬度最大,具有较好的咀嚼性与回复性,且醛类物质含量增加,挥发性风味化合物类型增多,感官评价总分最高^[60-62]。

3 小结

综上所述,国内外学者在鲜湿糙米线品质劣变机理及调控技术方面做了很多工作,鲜湿糙米线的品质劣变机理及调控是食品加工技术领域难点和热点问题,其研究结果对鲜湿糙米线的品质提升具有重要的参考作用。但目前单一组分对鲜湿糙米线品质影响作用的研究有限,例如,糙米可溶膳食纤维、糙米不溶性膳食纤维、糙米酚、脂肪、酶类等单一组分对鲜湿糙米线品质的影响机理有待于深入研究;在鲜湿糙米线加工和储藏过程中,糙米组分分子间的相互作用对其品质的影响还有待于进一步研究和明确;鲜湿糙米线加工和储藏过程中的营养物质变化也需要进一步研究和明确。这些研究将对鲜湿糙米线的品质提升起到关键作用;成本较低、操作简便、便于产业化应用的鲜湿糙米线调控技术还有待于进一步研究形成。因此,鲜湿糙米线良好的食用口感品质和较高的营养价值是今后发展需要重点关注的方向。

参考文献:

- [1] SLAVIN J. Whole grains and human health[J]. Nutrition Research Reviews, 2004, 17: 99-110.
- [2] LIU R H. Whole grain phytochemicals and health[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 46: 207-219.
- [3] 陈志瑜. 鲜湿米粉保质保藏技术的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
CHEN Z Y. The study of the quality preservation technology of the fresh wet rice noodles[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013.
- [4] 袁蕾蕾. 鲜湿米粉保鲜储藏的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
YUAN L L. Studies on the preservation of wet-fresh rice noodles[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.
- [5] 刘壮. 鲜湿米粉条保鲜及品质改良研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2011.
LIU Z. Study on preservation and quality improvement of fresh rice noodle[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2011.
- [6] 魏玉翠. 米粉品质改良研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
WEI Y C. The research of improvement of rice noodles quality[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2011.
- [7] 罗文波. 鲜湿米粉的品质评价、原料适应性及保鲜研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
LUO W B. The Study on the quality evaluation, processing suitable and preservation of fresh rice noodles[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2012.
- [8] 王宁. 鲜湿米线食用品质控制研究[D]. 郑州: 河南工业大学硕士学位论文, 2013.
WANG N. The studies on edible quality control of rice noodles[D]. Zhengzhou, Henan university of technology, 2013.
- [9] 梅小弟. 常德米粉原料适应性及生产工艺研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
MEI X D. Study on raw material adaptability and production technology of changde rice flour[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.
- [10] 丁文平. 大米淀粉回生及鲜湿米线生产的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2003.
DING W P. Study on rice starch recovery and production of fresh and wet rice noodles[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2003.
- [11] KLINMALAI P, HAGIWARA T, SAKIYAMA T, et al. Chitosan effects on physical properties, texture, and microstructure of flat rice noodles[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 76: 117-123.
- [12] HERMANSSON A M, SVEGMARK K. Developments in the understanding of starch functionality[J]. Trends in Food Science & Technology, 1996, 7(11): 345-353.
- [13] YI C P, ZHU H, ZHANG Y, et al. The role of indica starch in the mechanism of formation of fresh rice noodles[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 99: 103212.

- [14] FREDRIKSSON H, SILVERIO J, ANDERSSON R, et al. The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches[J]. Carbohydrate Polymers, 1998, 35(3): 119-134.
- [15] LIU H, XIE F, YU L, et al. Thermal processing of starch-based polymers[J]. Progress in Polymer Science, 2009, 34(12): 1348-1368.
- [16] LE CORRE D, BRAS J, DUFRESNE A. Starch nanoparticles: a review[J]. Biomacromolecules, 2010, 11(5): 1139-1153.
- [17] RUSSELL P L. The ageing of gels from starches of different amylose/amylopectin content studied by differential scanning calorimetry[J]. Journal of Cereal Science, 1987, 6(2): 147-158.
- [18] BULKIN B J, KWAK Y, DEA I. Retrogradation kinetics of waxy corn and potato starches; a rapid, Raman-spectroscopic study[J]. Carbohydrate Research, 1987, 160: 95-112.
- [19] 汪晓鸣, 刘超, 张福生, 等. 保鲜湿米粉生产工艺的研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(20): 9639-9643.
- WANG X M, LIU C, ZHANG F S, et al. Study on the production technology of long-life rice noodle[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(20): 9639-9643.
- [20] 徐晓辉. 鲜湿米粉原料工艺特性的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- XU X H. Study on technological characteristics of fresh rice noodle[J]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [21] 易翠平, 任梦影, 周素梅, 等. 纯种发酵对鲜湿米粉品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(4): 20-25.
- YI C P, REN M Y, ZHOU S M, et al. Effect of pure fermentation on qualities of rice noodle[J]. Food science, 2017, 38(4): 20-25.
- [22] 鲁战会, 李永玉, 李里特, 等. 磨粉方式对大米粉团性质的影响及硬化防止实验研究(一)[J]. 食品科技, 2001(6): 6-7.
- LU Z H, LI Y Y, LI L T, et al. Effects of millings methods of rice dough and research on retrogradation prevention[J]. Food science and technology, 2001(6): 6-7.
- [23] 鲁战会, 李永玉, 李里特, 等. 磨粉方式对大米粉团性质的影响及硬化防止实验研究(二)[J]. 食品科技, 2002(1): 10-12.
- LU Z H, LI Y Y, LI L T, et al. Effects of millings methods of rice dough and research on retrogradation prevention[J]. Food science and technology, 2002(1): 10-12.
- [24] CHEN H, WANG T, DENG F, et al. Changes in chemical composition and starch structure in rice noodle cultivar influence Rapid Visco analysis and texture analysis profiles under shading[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100360.
- [25] LOUBES M A, FLORES S K, TOLABA M P. Effect of formulation on rice noodle quality: Selection of functional ingredients and optimization by mixture design[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 69: 280-286.
- [26] SANGPRING Y, FUKUOKA M, RATANASUMAWONG S. The effect of sodium chloride on microstructure, water migration, and texture of rice noodle[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64: 1107-1113.
- [27] SEREEWAT P, SUTHIPINITTHAM C, SUMATHALUK S, et al. Cooking properties and sensory acceptability of spaghetti made from rice flour and defatted soy flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60: 1061-1067.
- [28] SINGH S K, KAUR M, MUKESH. Studies on noodle quality of potato and rice starches and their blends in relation to their physicochemical, pasting and gel textural properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43: 1289-1293.
- [29] AN J S, BAE I Y, HAN S I, et al. In vitro potential of phenolic phytochemicals from black rice on starch digestibility and rheological behaviors[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 70: 214-220.
- [30] SRIKAEK K, SANGKHIAW J. Effects of amylose and resistant starch on glycaemic index of rice Noodles[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59: 1129-1135.
- [31] HAN H M, CHO J H, KOH B K. Processing properties of Korean rice varieties in relation to rice noodle quality[J]. Food Science and Biotechnology, 2011, 20(5): 1277-1282.
- [32] LU Z H, LI L T, MIN W H, et al. The effects of natural fermentation on the physical properties of rice flour and the rheological characteristics of rice noodles[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2005, 40: 985-992.
- [33] HEO S, LEE S M, SHIM J H, et al. Effect of dry- and wet-milled rice flours on the quality attributes of gluten-free dough and noodles[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116: 213-217.
- [34] TONG L T, GAO X X, LIN L Z, et al. Effects of semidry flour milling on the quality attributes of rice flour and rice noodles in China[J]. Journal of Cereal Science, 2015, 62: 45-49.
- [35] BILIADERIS C G, PAGE C M, MAURICE T J. Non equilibrium melting of amylose-V complexes[J]. Carbohydrate Polymers, 1986, 6: 269-288.
- [36] 姚远, 丁霄霖, 吴加根. 淀粉回生研究进展(II)脂类、糖类与淀粉酶对回生的影响[J]. 中国粮油学报, 1999, 14(3): 9-14.
- YAO Y, DING X L, WU J G. Progress on the research of starch retrogradation (II) effects of lipids, saccharides and amylases on retrogradation[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1999, 14 (3): 9-14.
- [37] KATSUTA K, MIURA M, NISHIMURA A. Kinetic treatment for rheological properties and effects of saccharides on retrogradation of rice starch gels[J]. Food Hydrocolloids, 1992, 6(2): 187-198.
- [38] KASUNMALA I G G, NAVARATNE S B, WICKRAMASINGHE I. Effect of process modifications and binding materials on textural properties of rice noodles. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2020, 21: 100217.
- [39] QIAO C C, TIAN X H, WANG L X, et al. Quality characteristics, texture properties and moisture migration of fresh brown rice noodles under different storage and temperatures

- conditions[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 104: 103434.
- [40] LI M, MA M, ZHU K X, et al. Delineating the physico-chemical, structural, and water characteristic changes during the deterioration of fresh noodles[J]. *Food Chemistry*, 2017, 216: 374-381.
- [41] LI M, ZHU K X, GUO X N, et al. Effect of water activity (aw) and irradiation on the shelf-life of fresh noodles[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2011, 12: 526-530.
- [42] MA M, HAN C, LI M, et al. Inhibiting effect of low-molecular weight polyols on the physico-chemical and structural deteriorations of gluten protein during storage of fresh noodles[J]. *Food Chemistry*, 2019, 287: 11-19.
- [43] XUE W, ZHANG C N, WANG K, et al. Understanding the deterioration of fresh brown rice noodles from the macro and micro perspectives[J]. *Food Chemistry*, 2021, 342: 128321.
- [44] LUBOWA M, YEOH S Y, EASA A M. Textural and physical properties of retort processed rice noodles: Influence of chilling and partial substitution of rice flour with pregelatinized high-amylose maize starch[J]. *Food Science and Technology International*, 2018, 24: 476-486.
- [45] WENG Z J, WANG B J, WENG Y M. Preparation of white salted noodles using rice flour as the principal ingredient and the effects of transglutaminase on noodle qualities[J]. *Food Bioscience*, 2020, 33: 100501.
- [46] SRIKAEK K, LAOTHONGSAN P, LERDLUKSAMEE C. Effects of gums on physical properties, microstructure and starch digestibility of dried-natural fermented rice noodles[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 109: 517-523.
- [47] LI M, LUO L, ZHU K, et al. Effect of vacuum mixing on the quality characteristics of fresh noodles[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 110: 525-531.
- [48] ZHENG Y Y, WANG Z H, TUERSUNTUOHETI T, et al. Changes in shelf life and quality of fresh hull-less barley noodles during storage[J]. *Cereal Chemistry*, 2019, 96: 1148-1158.
- [49] 李莎莎, 吴娜娜, 谭斌, 等. 直链淀粉含量差异对糙米粉质特性影响研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(15): 86-95.
- LI S S, WU N N, TAN B, et al. Effect of differences of amylose content on the characteristics of brown rice flour[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(15): 86-95.
- [50] WU N N, TAN B, LI S S, et al. Quality characteristics of extruded brown rice noodles with different amylose contents[J]. *Food Science and Technology Research*, 2018, 24(2): 311-319.
- [51] HYUN J H, CHOI H W, SEO D H, et al. Optimization of thermal processing conditions for brown rice noodles[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2016, 59(4): 517-524.
- [52] KRAITHONG S, LEE S, RAWDKUEN S. The Influence of hydrocolloids on the properties organic red Jasmine Rice noodles, namely on antioxidant activity, cooking, texture, and sensory properties[J]. *Starch - Stärke*, 2019, 71: 1800145.
- [53] CAO Z F, LIU Y, ZHU H, et al. Effect of soy protein isolate on textural properties, cooking properties and flavor of whole-grain flat rice noodles[J]. *Foods*, 2021, 10(5): 1085.
- [54] 吴娜娜, 彭国泰, 谭斌, 等. 干法、半干法和湿法磨粉对糙米粉性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(1): 137-142.
- WU N N, PENG G T, TAN B, et al. Properties of brown rice flour prepared from dry, semi-dry and wet milling[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(1): 137-142.
- [55] 吴娜娜, 彭国泰, 谭斌, 等. 干法、半干法和湿法磨粉工艺制备的糙米米线品质研究[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(12): 1-7.
- WU N N, PENG G T, TAN B, et al. Quality of brown rice noodles prepared from dry, semi-dry and wet milling process[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(12): 1-7.
- [56] GENG D H, LIN Z X, LIU L, et al. Effects of ultrasound-assisted cellulase enzymatic treatment on the textural properties and in vitro starch digestibility of brown rice noodles[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2021, 146: 111543.
- [57] GENG D H, ZHOU S M, WANG L L, et al. Effects of slight milling combined with cellulase enzymatic treatment on the textural and nutritional properties of brown rice noodles[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 128: 109520.
- [58] WU N N, MA Z Q, LI H H, et al. Nutritional and cooking quality improvement of brown rice noodles prepared with extruded rice bran[J]. *Cereal Chemistry*, 2021, 98: 346-354.
- [59] TIAN X H, TAN B, WANG L X, et al. Effect of rice bran with extrusion cooking on quality and starch retrogradation of fresh brown rice noodles during storage at different temperatures[J]. *Cereal Chemistry*, 2022, 99: 1296-1307.
- [60] 孙周亮, 李斌, 周游, 等. 不同制粉方式制得的糙米粉性质及糙米米线品质研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(9): 61-67.
- SUN Z L, LI B, ZHOU Y, et al. Properties and quality of brown rice flour and brown rice noodles pulverized by different methods[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(9): 61-67.
- [61] SUN Z L, LYU Q Y, ZHUANG K, et al. Impact of different preparation methods on the properties of brown rice flour and the cooking stability of brown rice noodles and the underlying mechanism: Microstructure, starch-protein distribution, moisture migration[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 181: 114697.
- [62] SUN Z L, LYU Q Y, CHEN L, et al. An HS-GC-IMS analysis of volatile flavor compounds in brown rice flour and brown rice noodles produced using different methods[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2022, 161: 113358. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。