

黏性米制品品质提升措施研究进展

齐文, 杨春华, 张娜*

(哈尔滨商业大学食品工程学院, 哈尔滨 150028)

摘要: 黏性米制品在储藏过程中会发生一系列的老化现象, 如质地硬化、弹性减小和风味丧失, 这是其在运输、储存和销售时不可避免的难题。本文以提升黏性米制品的品质为出发点, 针对目前黏性米制食品的微生物霉变、水分迁移、淀粉老化带来的产业化难题提出改进方案。从微生物多样性和淀粉改性方向总结黏性米制品的发展现状和研究进展, 归纳了目前直投发酵剂的制备、更高效的抗老化剂及新型老化调控技术等研究方向, 并对未来开发即食型、预烤型和预制型黏性米制品做出了展望。

关键词: 黏性米制品; 微生物多样性; 淀粉老化; 淀粉改性

Research progress on measures to improve the quality of sticky rice products

QI Wen, YANG Chun-Hua, ZHANG Na*

(College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

ABSTRACT: Sticky rice products will experience a series of aging phenomena such as texture hardening, reduction of elasticity and loss of flavor during storage, which is an inevitable problem during transportation, storage and sales. For the purpose of improving the quality of sticky rice products, this article proposed an improvement plan for the industrialization problems caused by microbial mildew, water migration, and starch aging. We summarized the development status and research progress of sticky rice products from the direction of microbial diversity and starch modification, summarized the current research directions of direct-invested starter preparation, more efficient anti-aging agents and new aging control technologies, and forecasted the development of ready-to-eat, pre-roasted and pre-made sticky rice products in the future.

KEY WORDS: sticky rice products; microbial diversity; starch aging; starch modification

0 引言

我国黏性米制品主要是以糯米、大黄米和黏玉米为主要原料制作而成的黏豆包、打糕和汤圆等传统食品, 所以提升黏性米制品品质对于避免传统食品消失于大众视野有积极作用。

黏性米制品最难解决的就是安全和老化问题, 如2020年酸汤子中毒事件重新把发酵食品安全问题带回大众视野。谷物食品中淀粉在运输、储存和销售过程中发生的老化回生影响着食品的硬度、口感、凝胶强度、黏弹性等理化性质。糯米制品放置一段时间后, 质地会由软变硬, 弹性减小, 且伴随着风味和香气的消失。因此, 抑制淀粉

基金项目: 国家自然科学基金项目(32072258)、黑龙江省科技重大专项资助项目(2019ZX08B02、2020ZX08B02)、中央财政支持地方高校发展专项资金优秀青年人才支持计划项目、哈尔滨商业大学“青年创新人才”支持计划项目(2019CX06、2020XC26)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32072258), the Major Science and Technology Program of Heilongjiang (2019ZX08B02, 2020ZX08B02), the Central Financial Support for the Development of Local Colleges and Universities Special Fund Outstanding Young Talent Support Program, and the Harbin University of Commerce “Young Innovative Talents” Support Program (2019CX06, 2020XC26)

*通信作者: 张娜, 教授, 主要研究方向为植物蛋白质。E-mail: foodzhangna@163.com

*Corresponding author: ZHANG Na, Professor, College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China. E-mail: foodzhangna@163.com

老化是使黏性米制品获得良好食用品质和较长货架期的关键手段。

本文以提升黏性米制品的品质为出发点,概述了黏性米酸面团的微生物多样性和老化调控技术,在菌种水平上阐述了酸面团发酵过程中的微生物组成,以期为黏性米制品开发、品质安全和规模化生产提供参考。

1 黏性米分类

黏性米主要分为大黄米、蜡质玉米和糯米。大黄米属于禾本科黍属(*Panicum miliaceum*)^[1],古人说:谓黍为禾属而黏者,故呈糯性。黍是干旱地区最重要的农作物之一,抗旱性强、病虫害少,在我国有三千多年的栽培历史,西北、华北、西南、东北、华南和华东等地区都有栽培。大黄米营养丰富,含有丰富的膳食纤维、粗蛋白、脂肪、维生素 E 和钾,膳食纤维含量为大米的大米 4 倍,脂肪多为不饱和脂肪酸,铁和磷的含量也比大米高,具有调养脾胃的功效。蜡质玉米也叫黏玉米、糯玉米,所含淀粉几乎全为支链淀粉,呈糯性,与普通玉米相比具有更高的食用消化率和更丰富的营养物质,尤其赖氨酸含量比普通玉米高 30%~60%^[2]。糯玉米有白色、黄色、紫色、花彩色多种颜色,但制作黏豆包常用金黄色糯玉米。糯米又叫江米,呈乳白色,多为不透明,分为粳糯米和籼糯米 2 种类型,粳糯米呈长椭圆形或细长形,籼糯米一般形状圆短。糯米是做粽子、酒酿、汤圆、米饭等食品的理想原料,含有大量氨基酸、支链淀粉、矿物质、维生素 B 族等营养成分,具有补益中气的作用^[3],但较难被人体消化吸收。

黏性米制品中还常添加玉米面或大米来调节黏豆包的产品性状,目的是防止产品塌锅、松散,添加量一般在 20%。还有学者对黏豆包的原材料进行了杂粮主食化的改革创新,向其添加了马铃薯粉和薏米粉等杂粮,提升了黏豆包的营养价值和研发空间。董小涵等^[4]研制出以 10% 马铃薯全粉替代部分大黄米粉的营养预制黄米豆包,产品的感官评价和物性分析指标均良好,颜色鲜黄、口感黏糯。张春芝等^[5]以糯米面、玉米粉和薏米粉为原料开发出营养丰富的杂粮黏豆包,以糯米粉 100% 计,玉米粉和薏米粉的添加量分别是 20% 和 5%,成品表皮金黄有光泽、内部组织结构均匀,具有玉米、酵母和薏米的风味。

2 黏性米酸面团的微生物多样性

酸面团的品质影响着黏豆包的质地、适口性、香气和保质期,酸面团发酵过程中的微生物组成对于酸面团品质尤为重要。酸面团中微生物群落的建立和稳定性取决于原料的微生物群落和化学成分,以及微生物与发酵参数之间的相互作用^[6]。常用于传统酸面团或者其他物质的细菌和真菌菌群结构的研究技术为高通量测序技术、聚合酶链式

反应-变性梯度凝胶电泳技术(polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis, PCR-DGGE)或者两者结合的方式^[7-10]。

姚笛等^[11]利用 PCR-DGGE 技术对大黄米酸面团进行微生物菌群多样性的研究,发现其细菌中优势发酵菌属为乳杆菌属,与多位学者研究结果一致^[12-15];优势真菌为酿酒酵母,与刘同杰等^[13]结果一致。赵炬影等^[16]采用 PCR-DGGE 技术分析了大黄米面团和江米面团的微生物群落结构及其多样性,两者的优势菌种均为食蜜魏斯氏菌、肠膜明串珠菌和涎沫假丝酵母,其中融合魏斯氏菌是大黄米发酵面团的特有菌种。韩雨茜等^[17]收集了 16 份以江米、大米、黏玉米和黄米组合配对的原料的酸面团,利用高通量测序技术结合 PCR-DGGE 研究酸面团中真菌菌群的构成,其中真菌种类最丰富的为江米和小米(5:4, m:m)混合制备的酸面团,此面团含有 4 株酵母菌,汉逊氏德巴利酵母为其优势酵母。PARK 等^[18]利用 PCR-DGGE 技术研究发现糯米酸面团的优势真菌为酿酒酵母。

酸面团中主要存在的菌属为乳酸菌和酵母菌。乳酸菌是发酵食品中广泛使用的益生菌,对酸面团的品质、风味、保质期均有影响,可以改善面团质地、产生包括挥发酸在内的各种风味成分、增添营养功能、抑制支链淀粉结晶、延缓面团老化。REN 等^[19]证实了乳酸菌可以抑制某些细菌和真菌。MOORE 等^[20]发现植物乳杆菌 FST 1.7 可以减缓霉菌的生长速度,延长无麸质面包的货架期。乳酸菌复合发酵剂的应用也证实了其对于黏豆包质量及风味的改善作用^[21]。而酵母菌通过代谢糖类在厌氧环境产生大量 CO₂,可增加面团的体积。酿酒酵母是所有菌株中产生 CO₂ 最多的酵母菌^[22],对于提高面团的体积起到了关键作用。

目前,国外对于小麦酸面团或面包酸面团中微生物菌群的研究结果较多,而国内集中于研究馒头、面包和小麦酸面团发酵过程中微生物的组成,对于糯米和黏玉米酸面团的研究较匮乏。酸面团中各种微生物的共同作用赋予了米制品独特的风味和口感,研究黏性米酸面团的微生物多样性不但是探寻发酵机制和制备发酵剂的前提,还是保障黏性米制品品质安全和规模化生产的重要措施。为加快黏性米制品在激烈竞争中的发展,一些学者通过制备酸面团直投发酵剂推进产业现代化,既增添了产品的风味,又将生产工艺与发酵工艺结合,为实现中国传统食品标准化奠定了基础。

3 黏性米制品抗老化

3.1 淀粉老化机制

淀粉主要有支化程度较低的直链淀粉和支化程度较高的支链淀粉 2 种,前者是由 D-六环葡萄糖经 α -1,4-糖苷键连接组成的、含几百个葡萄糖单元;后者由 α -1,4-糖苷键连接

的D-葡萄糖短链和 α -1,6-糖苷键连接的支链组成,含几千个葡萄糖单元。淀粉通常含有20%~30%的直链淀粉,其余的则为支链淀粉,而糯性谷物淀粉几乎全部为支链淀粉。

淀粉老化是淀粉糊化后分解的直链淀粉和支链淀粉重新结合形成有序结构的过程,分为短期老化和长期老化2大类^[23]。淀粉颗粒在水中加热时由于双螺旋解离、氢键断裂,颗粒结构崩塌会产生水合、膨胀现象,并转化为糊状,分子由有序结晶态转变为无序非结晶态,此时称为淀粉的糊化过程^[24]。而淀粉的老化是淀粉糊化后在自然冷却的状态下,被破坏的淀粉分子链重新趋于平行,通过氢键相连,由无序态转向有序态,形成大于胶体的质点而析出沉淀的过程。淀粉的短期老化归因于直链淀粉部分的快速凝胶化和重结晶,体系降温时淀粉的弹性和强度上升,分子之间通过氢键形成双螺旋结构,继而建立起三维网络结构,发生不可逆的结晶现象^[25]。长期老化是导致淀粉回生的关键原因,主要归因于支链淀粉缓慢的重结晶。由于支链淀粉的支化程度高,分子不能排成一条直线,故回生速度比线性的直链淀粉缓慢很多。支链淀粉的重结晶是其外层短链以双螺旋为基质,通过氢键堆积而成的。WURSCH等^[26]认为当支链淀粉的外链含有少于或等于11个葡萄糖单位时,几乎不会形成双螺旋结晶体,而低于10个葡萄糖单位的短链会阻碍长外链的重新结合。CHANG等^[27]认为淀粉的回生特性不仅取决于支链淀粉的外链长短,与支链的分布也有很大关系。对于支链聚合度和淀粉回生关系的相关研究极少,张雨桐等^[28]证明了支链淀粉的聚合度影响样品的冻融稳定性、热特性和糊化特性等理化性质。因此,淀粉老化的速度取决于支链的外链长短和分布,支链淀粉的结晶化是淀粉凝胶在储存过程中硬度长期变化的原因。

3.2 影响淀粉老化因素

影响淀粉老化的因素分为内在因素和外在因素,内在因素包括直链淀粉与支链淀粉、蛋白质、水分、糖类和脂类等,外在因素包括储藏温度和pH等。

3.2.1 组成成分

(1)直链淀粉与支链淀粉

短期老化与直链淀粉含量有关,长期老化与支链淀粉含量有关。此外,支链淀粉的分子量、链长和分子结构也影响老化效果。

(2)蛋白质

添加蛋白质可以延缓淀粉的重结晶速率,降低米制品硬度。但将蛋白质作为抗老化剂添加进黏性米的研究极少,结果有待探究。

(3)脂类

脂质也可以抑制直链分子和支链分子的老化,脂肪酸链越短,抑制淀粉老化的效果越好。脂质可以包埋在直链淀粉的螺旋腔中,从而与淀粉形成包含复合物。ZHU

等^[29]研究了大豆油脂交换调和性速冻特殊脂肪对冷冻面团品质的影响,发现其存在提高了面团的糊化焓和糊化温度,降低了面团的回生程度。

(4)糖类

糖类会在淀粉糊化时随水分进入到淀粉颗粒内部,并与淀粉分子相互作用。单糖、低聚糖等小分子糖类与淀粉的相容性影响淀粉老化进程,如果与淀粉结构相容,则淀粉微相区的淀粉含量降低,淀粉的老化受到抑制;如果两者结构不相容,则淀粉微相区的淀粉含量升高,淀粉老化速率加快。

(5)无机盐

无机盐阻碍淀粉链的有序化取向,从而抑制结晶区的形成。盐离子的性质和浓度都影响淀粉的老化程度。如高质量分数(>2%) NaCl抑制淀粉老化的程度大于低质量分数NaCl,因为低质量分数的盐离子影响不了聚集的淀粉链段。二价盐比一价盐抑制淀粉老化的效果显著;质量分数大的盐离子比质量分数小的盐离子效果显著。因此,对于以下4种常见的氯盐,抑制淀粉老化效果的强弱排序为:CaCl₂>MgCl₂>NaCl>KCl^[23]。

(6)水分

水分不仅影响糊化后淀粉分子链的迁移,还可以参与支链淀粉分子的重结晶。水分含量过高或者过低都可以抑制淀粉重结晶,使淀粉老化速率减慢^[23]。水分含量在28%~50%时,淀粉老化速率与温度呈正比。

3.2.2 储藏温度

2~4℃是淀粉老化速率最快的温度^[30]。米制品的储藏温度在淀粉冻结温度和糊化温度中间时,最易发生老化回生,在此温度区间内,老化速率及程度与温度呈反比^[25]。温度过高或过低都会延缓淀粉老化回生,当食品在冷冻储藏条件下,体系内的自由水呈结晶状态,进而阻碍淀粉分子之间的缔合延缓老化;食品在高温条件下老化速率也减慢,但易导致水分丧失和霉变。

3.2.3 食品pH

淀粉制品在pH 5~7时最易老化回生,在酸性和碱性条件下都不易老化。陈俊芳等^[31]发现板栗淀粉在强碱性条件下糊化更明显。曹清明等^[32]发现蕨根淀粉在碱性条件下具有良好的加工特性,且糊化温度降低。毛迪锐等^[33]发现经酸性酒精水解15d的玉米淀粉糊化温度从61.6℃下降至58.6℃,改性后淀粉的焓值降低,糊化范围从12.2℃上升为23.9℃。

3.3 老化调控技术

既然无法回避已糊化淀粉体系的老化趋势,那么通过食品体系来抑制淀粉老化。淀粉经过改性处理后,大大增加其应用功能和利用率,常用酶法修饰、物性修饰和化学修饰等调控技术。

3.3.1 酶法修饰

酶处理由于其安全、纯天然、高效和作用条件温和等优势,在馒头、面包和米粉的抗老化领域备受关注。利用酶处理抑制食品老化的研究已有大量报道,最常用有 α -淀粉酶和 β -淀粉酶。

α -淀粉酶是通过抑制淀粉分子双螺旋结构和结晶的形成降低淀粉凝胶的回生速率和程度^[34]。李家豪等^[35]利用 α -淀粉酶、分支酶的复合酶水解供体(不同直链淀粉或麦芽糖)和受体(糯米淀粉),以提高糯米淀粉的物化特性和加工性能,改性后的糯米淀粉易于糊化、分支度高、短链比高,且不易老化回生。

淀粉长期老化的主要原因是支链淀粉外侧短链的重结晶,而支链的长短与分布对支链淀粉的重结晶有重要影响。 β -淀粉酶抑制淀粉老化回生的原因是其可以缩短支链淀粉的外链长度^[36]。孙玲玲等^[37]发现 β -淀粉酶处理后的糯米支链淀粉中麦芽糖含量上升,样品硬度显著降低,说明由于支链淀粉部分酶解为还原糖所导致的支链淀粉侧链的长度和聚合度均降低,使直链淀粉与支链淀粉难以形成双螺旋结构,从而抑制淀粉老化,与熊柳等^[38]研究结果一致。

3.3.2 添加食品添加剂

向淀粉中添加一些亲水胶体、乳化剂、脂类、非淀粉糖类、变性淀粉等食品添加剂会增强产品的抗老化功能,最常添加的就是亲水胶体和乳化剂,或者复配不同类别的抗老化剂,起到协同增效的作用。

王明明等^[39]对糯米粽子进行抗老化配方的研究,确定产品的最佳抗老化工艺配方为:可溶性大豆多糖 0.8%、海藻糖 7.0%、米面改良剂(β -淀粉酶、转移葡萄糖苷酶) 0.4%,此条件下的粽子感官评分较高,且储存 3 d 后粽子硬度的上升幅度显著变小。任宇航等^[40]从亲水胶体、乳化剂、变性淀粉中各选取一个对糯米粉抗老化效果较好的添加剂进行复配,使糯米黏豆包硬度最小的配方比例为:瓜尔豆胶 0.10%、单甘脂 0.15%、木薯羟丙基淀粉 0.20%。与空白样品相比,使用此配方制作的黏豆包硬度降低了 55.27%。张玉荣等^[41]研究了食用胶(瓜尔豆胶、黄原胶)、乳化剂(单甘脂、蔗糖酯)和 β -淀粉酶对糯米淀粉凝胶硬度的影响,复配改良剂的最佳配方比例为:黄原胶 0.53%、单甘酯 0.43%、 β -淀粉酶 0.18%,能明显降低糯米淀粉凝胶的硬度、胶着性、红外吸光度比值、融化焓值和峰值温度,其对抑制糯米淀粉老化效果的强弱顺序为: β -淀粉酶 > 黄原胶 > 单甘酯。

3.3.3 物性处理

物性处理包括挤压膨化、超高压、超微粉碎、微波等技术手段。

(1) 挤压膨化

挤压膨化在现代谷物工业中发挥着核心作用^[42],是一种集混合、搅拌、破碎、加热、蒸煮、杀菌、膨化、成型于一体的多功能、高产量、高品质现代食品加工技术。

挤压膨化的优点有:提高膳食纤维可溶性、改善产品适口性^[43]、提升产品溶解性能、提高营养物质的保存率和消化率等^[44]。刘超等^[45]选择粳米、小麦、玉米、糯米、小米和燕麦共 6 种谷物原料进行挤压膨化处理,发现糯米在膨胀度、体积密度、水溶性指数、糊化度、硬度和脆度方面表现最好,挤压后糯米的硬度和脆度显著低于其他原料。翟广玉等^[46]在水分含量 18%、温度 180 °C、压力 0.7 MPa 的条件下挤压膨化糯米淀粉以制备黏合剂,发现糯米淀粉经挤压后更易操作,且增强了糊化程度、水溶性和黏结强度。

(2) 超高压

食品超高压技术是一项非热能加工技术,被认为是潜在的食品和生物制品保鲜技术^[47]。经超高压处理后,食品中的酶、淀粉、蛋白质等高分子物质会产生失活、改性或变性现象^[48],从而起到抑菌、延长货架期和改善食品品质等作用^[49]。田晓琳^[50]对普通玉米淀粉、糯玉米淀粉和糜子淀粉进行 300、450、600 MPa 3 种不同压力的超高压处理,发现其中老化速率最慢的是糯玉米淀粉,经 600 MPa 处理后 3 种淀粉均完全糊化。而且超高压处理使 3 种淀粉在储藏过程中的峰值黏度、低谷黏度和最终黏度显著降低;溶解度和膨胀势显著增大。超高压处理淀粉的变化与淀粉类型、压力条件、保压时间等均有关系。超高压会提高多种淀粉糊化度、冻融稳定性^[48];降低淀粉凝胶的黏度、回生值、硬度、老化速率^[51]。超高压会提升淀粉中的直链淀粉含量^[52],这可能是抑制谷物淀粉老化回生的原因之一。

(3) 超微粉碎

超微粉碎是为适应现代高新技术发展而产生的物料加工高新技术。经超微粉碎处理后的粉体叫作超微粉,其分散性、吸附性、溶解性、化学反应活性、生物活性等理化性质会发生改变^[53]。傅茂润等^[54]利用超微粉碎处理糯米粉发现,随着糯米粉粒径的减小,其冻融稳定性、酶解性质、高温持水能力、透明度、沉降性能和流动性均得到了显著改善。王立东等^[55]以蜡质玉米淀粉、普通玉米淀粉和高直链玉米淀粉为原料进行气流超微粉碎处理,处理后淀粉的粉碎效果、微观结构和性质影响并不完全相同,说明直链淀粉与支链淀粉比例影响超微粉碎对淀粉的结构和性质影响不同。而且超微粉的糊化温度、热吸收焓和老化速率下降,有益于延缓淀粉的回生。

3.3.4 化学修饰

化学修饰中的 2 种主要方式为取代和交联。

取代修饰常引入的功能基团为羟丙基和乙酰基。羟丙基淀粉和乙酰化淀粉具有改善糊化特性、流动性、稳定性和冻融稳定性等作用^[56],作为食品增稠剂应用于冷冻食品和方便食品。李丽莎^[57]发现糯米淀粉经羟丙基化和乙酰化修饰后,其老化焓值和老化率显著降低、冻融稳定性提高,且羟丙基化的抗老化效果更突出。代任任等^[58]向糯米粉中添加羟丙基木薯淀粉制作年糕,随着羟丙基木薯淀粉添加量

提高, 年糕的硬度随着储藏时间增加而升高的趋势变缓慢。

交联修饰是指淀粉与含有二元或多元官能团的交联剂发生羟基反应, 从而将 2 个或多个淀粉分子交叉连接起来的过程。交联淀粉具有更好的抗剪切性能、耐热性和耐酸碱稳定性^[59]。毛慧佳等^[60]研究了木薯基变性淀粉对汤圆耐煮性的影响, 发现羟丙基二淀粉磷酸酯表现出良好的抗回生效果。

4 结论与展望

黏性米制品的受众群体越来越广, 产品种类越来越多。黏性米制品最难解决的就是安全和老化问题, 研究酸面团的微生物多样性不但是探寻发酵机制和制备发酵剂的前提, 还是保障米制品品质安全和规模化生产的重要措施。目前国内外对于黏性米酸面团的研究较匮乏, 因此要将生产工艺与发酵工艺相结合, 继续探究其微生物菌群结构及其变化发展的规律。

淀粉的回生和老化备受关注, 因为淀粉老化不仅会对淀粉类食品的感官、风味、口感和储存品质造成不利的影响, 还会给企业造成巨大的经济损失。因此, 抗老化是解决米制品硬度高、货架期短的关键着手点。淀粉的改性技术现已广泛应用于食品行业, 常用的调控技术有酶法修饰、物性修饰和化学修饰。想更好地解决黏性米制品在抗老化方面遇到的困难, 必须在综合利用多种抗老化方法的同时, 积极开拓新方法, 为实现工业化奠定基础。

黏性米制品的研究方向除了直投发酵剂的制备、更高效的抗老化剂及新型老化调控技术外, 还可能出现新的食用形式, 比如开发即食型、预烤型、预制型, 适合烧烤、火锅等不同饮食方式的黏性米制品。预烤型黏性米制品是加工过的半成品, 可以将其直接进行蒸、烤、煎、炸、煮, 满足消费者方便快捷和速食的需求; 即食型黏性米制品可以在常温下保存较长时间, 解决了产品保存期短的问题, 从而降低冷链成本、摆脱地域限制; 预制型的形式可为冷冻面团, 在解冻后直接食用并且不改变其品质, 将会成为淀粉抗老化方面新的里程碑, 为黏性米制品的产业化生产提供更大的发展前景。

参考文献

- [1] YUE H, DENG PC, LIU SY, *et al.* Selection and evaluation of reference genes for quantitative gene expression analysis in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) [J]. *J Plant Biol*, 2016, 59: 435-443.
- [2] 赵久然, 卢柏山, 史亚兴, 等. 我国糯玉米育种及产业发展动态[J]. *玉米科学*, 2016, 24(4): 67-71.
ZHAO JR, LU BS, SHI YX, *et al.* Breeding and industrial development of waxy maize in China [J]. *Maize Sci*, 2016, 24(4): 67-71.
- [3] 韩雨茜, 党雪文, 郭鸽, 等. 谷物基质对东北黏豆包质构及化学性质的影响[J]. *食品工业*, 2019, 40(3): 168-172.
HAN YQ, DANG XW, GUO L, *et al.* Effect of cereal substrates on the texture and chemical properties of sticky bean bun in northeast China [J]. *Food Ind*, 2019, 40(3): 168-172.
- [4] 董小涵, 周茜, 牛佳卉, 等. 营养预制黄米豆包加工工艺研究[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(12): 221-227.
DONG XH, ZHOU Q, NIU JH, *et al.* Processing technology of nutritious-prepared millet bun [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2017, 33(12): 221-227.
- [5] 张春芝, 吴大伟, 胡亚光, 等. 杂粮黏豆包制作工艺研究[J]. *农产品加工*, 2019, 7(4): 31-33.
ZHANG CZ, WU DW, HU YG, *et al.* Process of making grains niandoubao [J]. *Acad Period Farm Prod Process*, 2019, 7(4): 31-33.
- [6] RODRÍGUEZ LR, PINGITORE EV, ROLLAN G, *et al.* Biodiversity and technological-functional potential of lactic acid bacteria isolated from spontaneously fermented quinoa sourdoughs [J]. *J Appl Microbiol*, 2016, 120(5): 1289-1301.
- [7] 韩雨茜. 酪蛋白水解物对江米酸面团的理化性质和细菌菌群结构的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
HAN YQ. Effects of casein hydrolysate on the physicochemical properties and bacterial flora in glutinous rice sourdough. [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [8] ZHAO Z, MU TH, SUN HN. Microbial characterization of five Chinese traditional sourdoughs by high-throughput sequencing and their impact on the quality of potato steamed bread [J]. *Food Chem*, 2019, 274(15): 710-717.
- [9] BORECZEK J, LITWINEK D, ZYLINSKA UJ, *et al.* Bacterial community dynamics in spontaneous sourdoughs made from wheat, spelt, and rye wholemeal flour [J]. *Microbiologyopen*, 2020, 9(4): 1-13.
- [10] FU WH, RAO H, YANG T, *et al.* Bacterial composition in sourdoughs from different regions in China and the microbial potential to reduce wheat allergens [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2020, 117(4): 1-6.
- [11] 姚笛, 孙大庆, 李洪飞. 东北粘豆包酸面团菌群多样性与自制酸面团中菌群变化规律的研究[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(5): 90-95.
YAO D, SUN DQ, LI HF. Microfloral diversity and dynamics in the sourdough of northeast sticky bean buns and homemade sourdough [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2015, 31(5): 90-95.
- [12] SIMONE L, LOREZO M, MATTEO R, *et al.* Antioxidant and anti-inflammatory properties of sourdoughs containing selected *Lactobacilli* strains are retained in breads [J]. *Food Chem*, 2020, 322(34): 159-168.
- [13] 刘同杰, 李云, 吴诗榕, 等. 传统酸面团中细菌与酵母菌的分离与鉴定[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(9): 114-120, 148.
LIU TJ, LI Y, WU SR, *et al.* Isolation and identification of bacteria and yeast from Chinese traditional sourdough [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2014, 30(9): 114-120, 148.
- [14] XING XL, SUO B, YANG Y, *et al.* Application of lactobacillus as adjunct cultures in wheat dough fermentation [J]. *J Food Sci*, 2019, 84(4): 15-22.
- [15] HAFIZ AS, HUANG WN, STAN K, *et al.* Comparison of bacterial communities in gliadin-degraded sourdough (Khamir) sample and non-degraded sample [J]. *J Food Sci Technol*, 2020, 57(1): 81-93.
- [16] 赵煜影, 苑秀娟, 郭鸽, 等. 传统自然发酵黏豆包面团微生物菌群结构分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(18): 67-72.
ZHAO XY, YUAN XJ, GUO L, *et al.* Microbial community composition of traditional spontaneously fermented sticky bean bun dough [J]. *Food*

- Sci, 2018, 39(18): 67–72.
- [17] 韩雨茜, 芦淋, 郭鸽. 不同原料组成对黏豆包酸面团的真菌菌群及流变学特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 101–108, 119.
HAN YQ, LU L, GUO L, *et al.* Effects of different compositions of raw materials on fungal flora composition and rheological properties of sticky bean bun sourdough [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(22): 101–108, 119.
- [18] PARK J, SEO JS, KIM SA, *et al.* Microbial diversity of commercial makgeolli and its influence on the organoleptic characteristics of Korean rice sourdough, Jeung-Pyun [J]. *J Microbiol Biotechnol*, 2017, 27(10): 1736–1743.
- [19] REN DY, ZHU JW, GONG SJ, *et al.* Antimicrobial characteristics of lactic acid bacteria isolated from homemade fermented foods [J]. *Biomed Res Int*, 2018, 2018: 1–9.
- [20] MOORE MM, BELLO FD, ARENDT EK. Sourdough fermented by *Lactobacillus plantarum* FST 1.7 improves the quality and shelf life of gluten-free bread [J]. *Eur Food Res Technol*, 2008, 226(6): 1309–1316.
- [21] 马佳歌, 徐丽, 倪春蕾, 等. 乳酸菌对糯玉米黏豆包品质的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(12): 155–163.
MA JG, XU L, NI CL, *et al.* Effect of lactic acid bacteria on the quality of waxy corn sticky bean buns [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2019, 19(12): 155–163.
- [22] XU D, ZHANG Y, TANG KX, *et al.* Effect of mixed cultures of yeast and lactobacilli on the quality of wheat sourdough bread [J]. *Front Microbiol*, 2019, 10: 2113–2131.
- [23] 王宏伟, 许可, 张艳艳, 等. 淀粉老化的影响因素及其检测技术研究进展[J]. 轻工学报, 2021, 36(1): 17–29.
WANG HW, XU K, ZHANG YY, *et al.* An review on the factors affecting starch retrogradation and related progress in detecting techniques [J]. *J Light Ind*, 2021, 36(1): 17–29.
- [24] RENZETTI S, HOEK I, SMAN R. Mechanisms controlling wheat starch gelatinization and pasting behaviour in presence of sugars and sugar replacers: Role of hydrogen bonding and plasticizer molar volume [J]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 119(6): 106880.
- [25] 乔聪聪, 吴娜娜, 陈辉球, 等. 谷物制品老化机理及其调控技术研究进展[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(4): 133–140.
QIAO CC, WU NN, CHEN HQ, *et al.* Research progress on the aging mechanism and control technology of cereal products [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2019, 34(4): 133–140.
- [26] WURSCH P, GUMY D. Inhibition of amylopectin retrogradation by partial beta-amyolysis [J]. *Carbohydr Res*, 1994, 256(1): 129–137.
- [27] CHANG YH, LIN JH. Effects of molecular size and structure of amylopectin on the retrogradation thermal properties of waxy rice and waxy cornstarches [J]. *Food Hydrocolloid*, 2007, 21(4): 645–653.
- [28] 张雨桐, 张彦军, 朱科学, 等. 支链聚合度对菠萝蜜种子淀粉理化特性的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 20–26, 51.
ZHANG YT, ZHANG YJ, ZHU KX, *et al.* Effect of the degree of amylopectin polymerization on physicochemical properties of jackfruit seed starch [J]. *Food Mach*, 2019, 35(3): 20–26, 51.
- [29] ZHU TW, ZHANG X, LI B, *et al.* Effect of interesterified blend-based fast-frozen special fat on the physical properties and microstructure of frozen dough [J]. *Food Chem*, 2019, 272(10): 76–83.
- [30] 赵萌, 聂刘畅, 沈群, 等. 乳化剂及保藏温度对小米馒头贮藏过程老化的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(6): 52–56.
ZHAO M, NIE LC, SHEN Q, *et al.* Effect of emulsifier and storage temperature on the aging of millet steamed bread during storage [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2017, 32(6): 52–56.
- [31] 陈俊芳, 周裔彬, 白丽, 等. 水分、温度、时间和 pH 对板栗淀粉颗粒形态的影响[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(3): 40–45.
CHEN JF, ZHOU YB, BAI L, *et al.* Effects of water content, temperature, time and pH on granule morphology of chestnut starch [J]. *Food Res Dev*, 2010, 31(3): 40–45.
- [32] 曹清明, 钟海雁, 李忠海, 等. pH 对蕨根淀粉加工特性的影响[J]. 食品与机械, 2007, 23(5): 41–44.
CAO QM, ZHONG HY, LI ZH, *et al.* Effect of pH on properties of pteridium squilinum starch [J]. *Food Mach*, 2007, 23(5): 41–44.
- [33] 毛迪锐, 张根生, 岳晓霞. 酸性酒精处理对玉米和马铃薯淀粉分子结构和物理化学组成的影响[J]. 食品与机械, 2004, 20(5): 36–39, 42.
MAO DR, ZHANG GS, YUE XX. Effect of acid-alcohol treatment on the molecular structure and physicochemical composition of maize and potato starches [J]. *Food Mach*, 2004, 20(5): 36–39, 42.
- [34] PALACIOS HR, SCHWARZ PB, D'APPOLONIA BL. Effect of α -amylases from different sources on the retrogradation and recrystallization of concentrated wheat starch gels: Relationship to bread staling [J]. *J Agric Food Chem*, 2004, 52(19): 5978–5986.
- [35] 李家豪, 桂一凡, 李慧, 等. 复合酶法修饰糯米淀粉分支结构及其物化性能研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(20): 6766–6770.
LI JH, GUI YF, LI H, *et al.* Physico-chemical properties and branch structure of the waxy rice starch modified by using compound enzymes [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(20): 6766–6770.
- [36] YAO Y, ZHANG JM, DING XL. Partial β -amyolysis retards starch retrogradation in rice products [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(14): 4066–4071.
- [37] 孙玲玲, 熊柳, 李凡飞, 等. 响应面法优化 β -淀粉酶抑制糯米支链淀粉回生工艺的研究[J]. 食品科技, 2009, 34(3): 154–158.
SUN LL, XIONG L, LI FF, *et al.* Optimization of process for beta-amyloaseon Anti-retrogradation of glutinous rice amylopectin by response surface methodology [J]. *Food Sci Technol*, 2009, 34(3): 154–158.
- [38] 熊柳, 南冲, 孙庆杰, 等. 酶法修饰抑制小麦淀粉回生工艺优化及机理探讨[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(1): 31–36.
XIONG L, NAN C, SUN QJ, *et al.* Techniques optimization and mechanism study on the inhibition of wheat starch retrogradation by enzyme modification [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2013, 28(1): 31–36.
- [39] 王明明, 董雪萌, 孙艳洁, 等. 响应面优化粽子抗老化工艺[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(3): 111–116.
WANG MM, DONG XM, SUN YJ, *et al.* Optimization of anti-aging process of rice dumplings by response surface [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(3): 111–116.
- [40] 任宇航, 郑明珠, 肖瑜, 等. 糯玉米黏豆包抗老化剂配方的优化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(13): 101–107.
REN YH, ZHENG MZ, XIAO Y, *et al.* Optimization of anti-retrogradation agent formula for waxy corn sticky bean bun [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(13): 101–107.
- [41] 张玉荣, 高佳敏, 周显青, 等. 改良剂延缓糯米淀粉制品老化特性的研究[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(5): 1–6.

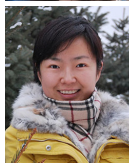
- ZHANG YR, GAO JM, ZHOU XQ, *et al.* Study on delaying the aging properties of glutinous rice starch products by additives [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2015, 23(5): 1–6.
- [42] CHAIYAKUI S, JANGCHUD K, JANGCHUD A, *et al.* Effect of extrusion conditions on physical and chemical properties of high protein glutinous rice-based snack [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2009, 42(3): 781–787.
- [43] LIU X, ZHAO JF, ZHANG X, *et al.* Enrichment of soybean dietary fiber and protein fortified rice grain by dry flour extrusion cooking: The physicochemical, pasting, taste, palatability, cooking and starch digestibility properties [J]. *RSC Adv*, 2018, 8(47): 26682–26690.
- [44] 叶琼娟, 杨公明, 张全凯, 等. 挤压膨化技术及其最新应用进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2013, 4(5): 1329–1334.
- YE QJ, YANG GM, ZHANG QK, *et al.* The new application and progress of extrusion technology [J]. *J Food Saf Qual*, 2013, 4(5): 1329–1334.
- [45] 刘超, 贺雅非, 李雪, 等. 谷物组成对挤压膨化产品品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(24): 105–110, 118.
- LIU C, HE ZF, LI X, *et al.* Effects of cereal composition on the quality of extruded products [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(24): 105–110, 118.
- [46] 翟广玉, 马海英, 林新平, 等. 膨化糯米淀粉粘合剂的制备研究[J]. *包装工程*, 2010, 31(13): 36–38, 70.
- ZHAI GY, MA HY, LIN XP, *et al.* Study on the preparation of expanded glutinous rice starch adhesive [J]. *Pack Eng*, 2010, 31(13): 36–38, 70.
- [47] SIMONIN H, MARZOUKI S, GUYON C, *et al.* Pasting properties of high-pressure-treated starch suspensions [J]. *High Pres Res*, 2009, 29(4): 726–731.
- [48] 郭泽铤, 曾绍校, 郑宝东. 超高压处理对莲子淀粉理化特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(11): 118–123.
- GUO ZB, ZENG SX, ZHENG BD. Effect of ultra high pressure processing on the physicochemical properties of lotus-seed starch [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2014, 14(11): 118–123.
- [49] 张建新, 杜双奎, 段旭昌, 等. 超高压处理对太白葛根淀粉理化特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 269–271.
- ZHANG JX, DU SK, DUAN XC, *et al.* Effects of ultra high pressure processing on the physicochemical characteristics of Taibai Kudzu starch [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2007, 23(4): 269–271.
- [50] 田晓琳. 高压糊化玉米、糯玉米和糜子淀粉重结晶过程中性质和结构变化研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- TIAN XL. Retrogradation properties of maize, waxy maize and proso millet starches gelatinized by ultra high pressure [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2014.
- [51] 张晶, 张美莉. 超高压处理对谷物淀粉影响的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(7): 172–179.
- ZHANG J, ZHANG ML. Research progress on the effect of high hydrostatic pressure treatment on cereal starch [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2020, 35(7): 172–179.
- [52] LIU H, FAN H, CAO R, *et al.* Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of sorghum starch altered by high hydrostatic pressure [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 92: 753–760.
- [53] 潘思轶, 王可兴, 刘强. 不同粒度超微粉碎米粉理化特性研究[J]. *食品科学*, 2004, 25(5): 58–62.
- PAN SY, WANG KX, LIU Q. Study on physical and chemical properties of different sizes rice powder [J]. *Food Sci*, 2004, 25(5): 58–62.
- [54] 傅茂润, 陈庆敏, 刘峰, 等. 超微粉碎对糯米理化性质和加工特性的影响[J]. *中国食物与营养*, 2011, 17(6): 46–50.
- FU MR, CHEN QM, LIU F, *et al.* Effects of superfine grinding on physical-chemical characteristics and processing properties of glutinous rice [J]. *Food Nutr China*, 2011, 17(6): 46–50.
- [55] 王立东, 侯越, 刘诗琳, 等. 气流超微粉碎对玉米淀粉微观结构及老化特性影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(1): 86–93.
- WANG LD, HOU Y, LIU SL, *et al.* Effect of jet milling on microstructure and aging characteristics of maize starch [J]. *Food Sci*, 2020, 41(1): 86–93.
- [56] SINGH N, CHAWLA D, SINGH J. Influence of acetic anhydride on physicochemical, morphological and thermal properties of corn and potato starch [J]. *Food Chem*, 2004, 86(4): 601–608.
- [57] 李丽莎. 食品级抗老化糯米变性淀粉的制备及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- LI LS. Study on preparation and application of food-grade modified waxy rice starch for anti-retrogradation [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [58] 代任任, 李文钊, 刘亚平, 等. 羟丙基木薯淀粉对糯米混粉特性及年糕品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(4): 59–64.
- DAI RR, LI WZ, LIU YP, *et al.* Effect of hydroxypropyl tapioca starch on glutinous rice flour blending characteristics and rice cake quality [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2021, 36(4): 59–64.
- [59] 李永锋, 赵光龙, 张志强, 等. 国内木薯淀粉化学改性的研究进展[J]. *热带农业科学*, 2007, 27(5): 64–67, 72.
- LI YF, ZHAO GL, ZHANG ZQ, *et al.* Advances on chemical modification of cassava starch [J]. *Chin J Trop Agric*, 2007, 27(5): 64–67, 72.
- [60] 毛慧佳, 刘月, 闫舒, 等. 变性淀粉对汤圆耐煮性的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2020, 38(4): 111–118.
- MAO HJ, LIU Y, YAN S, *et al.* Effect of modified starch on boiling resistance of rice dumpling [J]. *J Food Sci Technol*, 2020, 38(4): 111–118.

(责任编辑: 于梦娇 郑丽)

作者简介



齐文, 硕士研究生, 主要研究方向为食品粮食与油脂。
E-mail: 751065933@163.com



张娜, 教授, 主要研究方向为植物蛋白质。
E-mail: foodzhangna@163.com