黄玉莹, 陈芷涵, 金伟平, 等. 微波复热对冷冻大米饭团品质与风味成分的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 83−92. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070054

HUANG Yuying, CHEN Zhihan, JIN Weiping, et al. Effect of Microwave Reheating on the Quality and Flavor Compounds of Frozen Rice Balls[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 83−92. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070054

· 研究与探讨 ·

微波复热对冷冻大米饭团品质与风味成分的影响

黄玉莹[1], 陈芷涵[1], 金伟平[1,2], 沈汪洋[1,2], 张红建[3], 贾喜午[1,2,*]

（1.武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430048;
2.大宗粮油精深加工省部共建教育部重点实验室, 湖北武汉 430048;
3.海南省粮油科学研究所, 海南琼海 571400）

摘　要: 为研究微波复热对大米饭团品质与风味成分变化的影响规律，采用低场核磁共振仪、物性分析仪、X 射线衍射仪、傅里叶红外光谱仪和气相离子迁移谱联用等检测手段分析饭团在不同微波功率（140、280、420、560、700 W）条件下复热后物化性质、微观结构和挥发性成分的变化规律。结果表明：随着微波功率增大，大米饭团各部位温度均匀性存在差异，在 420 W 功率条件下，大米饭团的温度均匀性最佳，此时的温度均匀系数最小为 0.013；同时，微波复热对大米饭团水分分布产生影响，大米饭团内层自由水含量降低，外层自由水含量升高；560 W 功率条件下，大米饭团内层和外层硬度和咀嚼性差异值最小，分别为 2.92 N、16.09 mJ；与冷冻饭团相比，冷冻复热后的大米饭团中淀粉有序性增大、B 型晶体结构被破坏、结晶度减少；随着微波功率的增大，大米饭团外层淀粉结晶度呈现增大趋势，而内层无显著变化（P>0.05），短程有序度仅在微波功率较高时减小。在所有微波功率条件下，560 W 微波功率的大米饭团呈现出的内外层风味浓度差异最小。综上，微波复热冻藏大米饭团时，应优先选择的复热条件为功率 560 W、复热时间 110 s。

关键词: 饭团, 冷藏, 淀粉精细结构, 理化特性, 微波复热

中图分类号: TS213.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0083−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070054　　本文网刊:

Effect of Microwave Reheating on the Quality and Flavor Compounds of Frozen Rice Balls

HUANG Yuying[1], CHEN Zhihan[1], JIN Weiping[1,2], SHEN Wangyang[1,2], ZHANG Hongjian[3], JIA Xiwu[1,2,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430048, China;
2.Key Laboratory of the Deep Processing of Bulk Grain and Oil Authorized by Ministry of Education, Wuhan 430048, China;
3.Hainan Institute of Grain and Oil Science, Qionghai 571400, China）

Abstract: To investigate the effects of microwave reheating on the quality and flavor components of rice balls, low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR), texture analyzer, X-ray diffractometer (XRD), fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) were employed to analyze changes in physicochemical properties, microstructure, and volatile compounds under different microwave power levels (140, 280, 420, 560, and 700 W). The results indicated that temperature uniformity varied across different parts of the rice balls as microwave power increased. The most uniform heating was achieved at 420 W, with the lowest temperature uniformity coeffi-

收稿日期: 2025−07−08

基金项目: 湖北省科技人才服务企业项目（2024DJC056）; 湖北省教育厅科学研究计划重点项目（D20231604）。

作者简介: 黄玉莹（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 谷物新资源开发, E-mail: 476409740@qq.com。

*** 通信作者:** 贾喜午（1989−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 谷物新资源开发, E-mail: jiaxiwu212@126.com。

cient of 0.013. Microwave reheating also affected water distribution: The free water content decreased in the inner layer but increased in the outer layer. At 560 W, the differences in hardness and chewiness between the inner and outer layers were minimized, with values of 2.92 N and 16.09 mJ, respectively. Compared to frozen rice balls, reheated samples showed increased starch ordering, disruption of B-type crystal structures, and reduced crystallinity. As microwave power increased, the crystallinity of starch in the outer layer increased, while no significant change was observed in the inner layer (P>0.05). Short-range molecular order decreased only at higher power levels. Among all tested conditions, rice balls reheated at 560 W exhibited the smallest difference in flavor concentration between the inner and outer layers. In conclusion, the optimal reheating conditions for frozen rice balls are a microwave power of 560 W and a reheating time of 110 s.

Key words: rice balls; refrigeration; starch microstructure; physical and chemical properties; microwave reheating

近年来,随着人们生活节奏日益加快、生活水平的显著提高以及“懒人经济”的兴起,预制食品市场需求呈现出快速增长的态势,方便食品主食化、主食食品便捷化已成为趋势。大米饭团作为一种常见的预制米制食品,通常将米饭置于模具中压制而成,也可根据需要加入各种配料以丰富口感[1]。大米饭团的分类方式多样,按形状可分为三角形、圆柱形、球形等;按口味可分为外沾、包裹、混拌、烧烤、油炸等类型[2]。凭借其营养美味、食用便捷的特点,大米饭团在市场中展现出广阔的发展前景。然而,目前饭团的市场发展仍相对局限,主要以现做现售的形式出现在餐饮店,或以短保食品的形式出现在便利店,通常保质期在 24~48 h;冷冻饭团是近年来逐渐兴起的一种形式,具有较长的保质期,通常可达数周甚至数月。

冷冻饭团在生产后通过冷链运输配送到便利店,消费者购买后通过复热食用,而不同复热方式直接影响其口感、风味等品质。因此,采用合适的复热方式对于减少食品品质损失、最大程度恢复其原有品质至关重要。微波复热作为便利店一种常见的复热方式,其原理是通过高频电磁场使食品中的极性分子(尤其是水分子)发生旋转和振动,分子间的碰撞产生摩擦热量,从而使冷冻食品吸收热能并升温[3]。该方法具有复热效率高、节约能源、易于操作等优点,特别适用于饭团这类方便米制品的复热处理。然而在微波复热过程中,温度不均匀性以及水分迁移的现象会对食品的品质产生一定的影响。以面制品馒头为例,在冷冻后进行微波复热的过程中会存在外部失水、内部水分向外层转移的情况,所以复热后的馒头会呈现出外层柔软,内部干硬的质构特性,而且不同的微波功率条件和复热时长同样会影响其品质[4]。在对浆果微波加热的研究中显示,微波加热产生的局部过热效应是引起温度不均匀性的主要原因,且越小的微波功率对温度均匀性的改善程度越大,不过太小的微波功率同样也会导致加热效率低[5]。针对微波复热过程中水分迁移和温度不均匀性的问题,通过采取食品外表包裹保鲜膜或控制微波复热功率、微波复热时间等方法,可以得到一定的改善;因此,在实际应用中选择合适的微波复热条件尤为重要。

本研究以冷冻 24 h 的大米饭团为对象,探究不同微波复热条件对大米饭团品质及风味的影响,通过选择合适的微波复热条件来缓解其局部过热现象以及其他不利影响,为冷冻大米饭团流通过程中终端消费品质的维持提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

北大荒珍珠米 北大荒食品集团有限公司提供,基本理化指标:水分 13.20%±0.13%,蛋白质 7.94%±0.05%,脂肪 0.75%±0.05%,总淀粉 77.80%±0.99%,直链淀粉 17.23%±0.03%,膳食纤维 1.63%±0.07%,灰分 0.39%±0.03%。

SR-DB071-W 电饭煲 杭州松下厨房电器有限公司;GL840 数据采集器 日本图技 GRAPHTEC 有限公司;MF500L2F 速冻冰箱 半度斯雅有限公司;BCD-602WGHSS5EDYU1 冷藏冷冻冰箱 海尔智家股份有限公司;P70F20EN3P-ZSB 微波炉 广东格兰仕微波生活电器制造有限公司;LGJ-20G 冷冻干燥机 四环福瑞科仪科技发展有限公司;MicroMR-CL-I 低场核磁共振仪 苏州纽迈电子科技有限公司;TMS-Pro 物性分析仪 美国 FTC 公司;Bruker D8 Advance X 射线衍射仪 德国布鲁克公司;Frontier 傅里叶红外光谱仪 英国 PerkinElmer 公司;FlavourSpec® 1H1-00053 气相离子迁移谱联用仪 德国 G.A.S 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 大米饭团样品制备 工艺流程:称取大米→洗米→浸泡→常压蒸煮→保温→制作大米饭团。

浸泡:米水比例为 1∶1.3,常温浸泡 30 min;常压蒸煮:选择蒸煮模式(400 W),蒸煮时间为 40 min;保温:蒸煮完毕后,保温 15 min;制作大米饭团:称取 90 g 米饭放入模具中,压制成饭团,并用保鲜膜包裹。此样品为“新鲜饭团”。经测定“新鲜饭团”中,外、中、内层水分含量分别为 62.95%±0.85%、63.13%±1.09%、62.69%±0.51%。

将冷却至室温(25 ℃)的大米饭团于−40 ℃ 的速冻冰箱中进行速冻处理,将数据采集器感温探头尖端插入饭团中心监测其中心温度,待大米饭团中心温度降至−18 ℃ 后(90 min)放入−18 ℃ 的冰箱中放置 24 h,此样品为“冷冻饭团”。

1.2.2 微波复热处理 将冷冻饭团于−18 ℃ 冰箱中取出后进行微波复热,微波复热功率分别为 140、280、420、560、700 W,将数据采集器感温探头尖端

插入饭团内部探测其中心温度，加热时间以大米饭团中心达到 90 ℃ 左右所需要的时间为准，分别记录不同功率对应的复热时间，此样品为冷冻-微波复热饭团。以新鲜饭团为对照，研究不同微波复热条件对大米饭团品质的影响。

1.2.3　大米饭团不同部位温度及温度均匀系数（COV_T）测定　待大米饭团经不同微波功率复热后，立即将热电偶感温线插入大米饭团外、中、内层进行温度测量，并通过数据记录仪读取温度。

为定量评价微波复热大米饭团的温度均匀性，引入温度均匀系数（COV_T）来评价温度均匀度[6]。大米饭团外、中、内层取点如图 1A 所示，插入大米饭团的深度如图 1B 所示，为 15 mm。

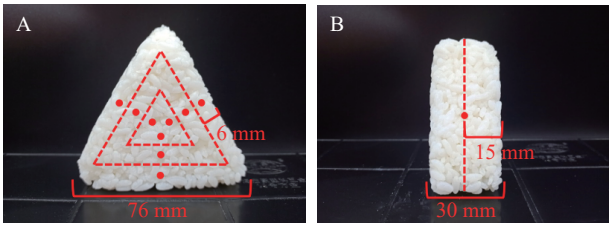


图 1　大米饭团取样点示意图

Fig.1　Sample point patterns of rice ball

注：A：正面；B：侧面。

大米饭团的温度均匀系数由下式计算可得：

$$COV_T = \frac{1}{\overline{T}}\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(T_i-\overline{T})^2}$$

式中：COV_T 为大米饭团的温度均匀系数；N 为大米饭团内温度取点位置的数量；T_i 为大米饭团内各取点位置的温度值，℃；$\overline{T}$ 为大米饭团内各取点位置的平均温度值，℃。

1.2.4　大米饭团水分分布状态测定　水分分布状态的测定参照沙文轩等[7] 的方法稍作修改：取 5 g 样品置于直径 4 cm 的核磁管底部，再放入核磁共振仪中，采用 CPMG 序列对样品中自旋-自旋弛豫时间 T2 进行测定。参数条件为：主频 SF 为 20 MHz，偏移频率 O1 为 679381.68 Hz，采样频率 SW 为 200 kHz，采样点数 TD 为 79996 个，采样间隔时间 TW 为 2000 ms，回波个数 NECH 为 4000 个，回波时间 TE 为 0.100 ms，累加次数 NS 为 8 次。

1.2.5　大米饭团质构特性测定　质构特性的测定参考张馨允[8] 的方法并稍作修改。取 15 g 米饭于铝盒中，使用 500 g 圆柱形砝码镇压米饭 15 s，使得米饭表面平整、内部密度大体一致。将装有米饭的铝盒放置在质构仪载物台上，使用 P/36R 探头进行 TPA 测试，感应元为 1000 N，测定参数为测前速度 1.00 mm/s，测试速度 1.00 mm/s，测后速度 2.00 mm/s；触发力 1.5 N，压缩比为 50.0%；2 次压缩间隔时间为 5.00 s。

1.2.6　大米饭团短程有序结构测定　短程有序结构的测定参照 Tu 等[9] 的方法，将冷冻干燥后的样品粉碎后过 100 目筛，再与溴化钾以 1∶100（w/w）的比例混合，研磨均匀后用压片机压片，采用傅里叶红外光谱仪进行分析。样品测试前，进行空气背景扫描，去除干扰因素。光谱扫描范围为 4000~400 cm^{-1}。以 1049/1022 cm^{-1} 处的吸光度比值来代表大米饭团中米饭的短程有序度。

1.2.7　大米饭团结晶性质测定　结晶性质的测定参照 Zhang 等[10] 的方法并略作改动，将所制得的样品进行冷冻干燥后粉碎，过 200 目筛，得米粉样品。用 X 射线衍射仪对米粉样品进行扫描，衍射角范围为 5°~40°，扫描速率为 5°/min。

1.2.8　大米饭团挥发性成分测定　挥发性成分的测定参照 Fu 等[11] 的方法并略作修改。使用气相离子迁移谱联用仪（GC-IMS）对大米饭团复热后的挥发性成分进行测定。称取样品 2 g 置于 20 mL 顶空瓶中，孵化温度为 80 ℃，孵化转速为 500 r/min，孵化时间为 20 min。顶空进样针温度为 85 ℃，进样体积为 500 μL。载气/漂移气为氮气，分析时间为 30 min。具体程序如下：0~2 min，2 mL/min；2~10 min，2~10 mL/min；10~20 min，10~100 mL/min；20~30 min，100~150 mL/min。IMS 探测器温度为 45 ℃，分析时间为 30 min。

1.3　数据处理

所有图表均以 Origin 2021 绘制。采用 IBM SPSS Statistics 26 软件 Duncan 检验在 5% 的显著性水平下对数据进行方差分析（$P<0.05$）。采用 GC×IMS Library Search（内置 NIST2014、IMS 数据库）对挥发性成分进行定性分析，图谱采用仪器配套软件（LAV）进行基线校正及峰对齐。

2　结果与分析

2.1　微波复热时间

表 1 为不同微波功率条件下冷冻大米饭团中心温度达到目标温度（90 ℃）所需的复热时间。由表可知，随着微波功率的增加，冷冻大米饭团中心温度升至 90 ℃ 左右所需的复热时间依次变短。基于此规律，本研究以表 1 中各功率对应的复热时间作为依据，进一步对冷冻大米饭团进行微波复热样品制备。

表 1　微波复热功率对应的复热时间

Table 1　Reheating time corresponding to microwave reheating power

微波功率（W）	复热时间（s）
140	480
280	240
420	150
560	110
700	90

2.2　微波复热对大米饭团不同部位温度及 COV_T 的影响

微波复热是通过电磁波使冷冻食品中的水分子

高速振荡并剧烈摩擦，将微波能转化为热能，温度升高，从而实现冷冻食品的复热[12]。图 2 是不同微波条件下大米饭团不同部位温度以及大米饭团 COV_T 的变化。

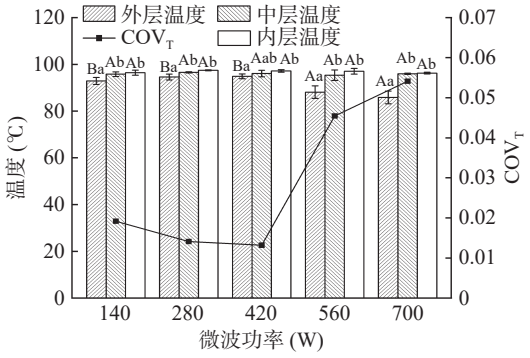


图 2 不同微波功率条件下大米饭团不同部位温度及 COV_T 变化

Fig.2 Changes of temperature and COV_T in different parts of rice ball under different microwave power

注：不同大写字母表示相同部位不同微波功率之间差异显著（P<0.05），不同小写字母表示相同微波功率不同部位之间差异显著（P<0.05）。

由图 2 中柱形图可以看出，在相同微波条件下，大米饭团不同部位的温度具有一定差异，不同部位温度高低排序为：内层>中层>外层；同时可以看出外层温度与其他部位温度存在显著差异（P<0.05），但中层温度与内层温度差异不显著（P>0.05）。随着微波功率的增大，各功率条件下的大米饭团中层、内层的温度无显著变化（P>0.05），但当微波功率从 420 W 升至 560 W 后，大米饭团外层的温度从 94.88 ℃ 显著减小到 88.10 ℃（P<0.05），从而导致大米饭团内外层的温差增大，这一结果表明微波功率过高会导致大米饭团温度的不均匀性变大，与图中 COV_T 折线图呈现的趋势一致；此现象同时表明，微波复热会使大米饭团内部存在一定的温度梯度。在复热初期大米饭团外层吸收的微波能量较多，升温较快；加热到后期时冰已全部融化成水，由于外层温度升高后水分蒸发，对微波的吸收减少，而内层水分在吸收微波时具有更高的能量密度且热量不容易散失，因此导致大米饭团内层温度比外层温度高；这一研究结果与陈卫等[13] 对于冷冻馒头的研究结果一致。赵学伟等[14] 对 100 g 馒头采用 100% 微波炉功率复热时，发现在复热过程中外层升温速度先快后慢，中心温度升温速度先慢后快，在复热后期馒头中心温度最高，而外层温度最低，本研究结果与之一致。

温度均匀性系数是一种用来描述温度场均匀性和离散度的指标；温度均匀性系数等于特定空间区域内温度的变化幅度与该区域内平均温度之比；温度均匀系数越小，表示经微波复热后样品的温度均匀性越好[15]，样品各部位温度差异小，其内部水分迁移速率低，对复热样品影响越小[16]。从图 2 中 COV_T 折线图可以看出，随着微波功率的增大，大米饭团 COV_T 呈现先降低后升高的趋势；当微波功率为 420 W 时，COV_T 值（0.013）达到最低，当微波功率增大至 560、700 W 时，COV_T 值升至 0.045、0.054，大米饭团温度均匀性变差。由于使用高功率复热时，微波输出是连续性的，大米饭团吸收的微波能量更多，中心温度上升更快，热点区域集中更明显；而使用低功率档进行复热时，微波输出是间歇性的，大米饭团内部的热传导效应增加，因此加热比较均匀[5,13,17]。微波功率为 420 W 时，大米饭团的 COV_T 最小，表明其整体的温度均匀性最好。

由于大米饭团内外层温度具有显著差异（P<0.05），因此后续研究将以大米饭团外层和内层为对象进行性能表征，研究不同微波功率对大米饭团内外层品质的影响规律。

2.3 微波复热对大米饭团水分分布状态的影响

图 3 为不同微波功率处理后的大米饭团内外层的横向弛豫时间（T_2）分布图，所有样品的 T_2 分布图中均出现了代表强结合水、弱结合水和自由水三种水分状态特征峰。表 2 为不同微波功率对大米饭团内外层水分分布的影响。由表可以看出，新鲜大米饭团中内外层的自由水比例差异不显著（P>0.05），随着微波功率从 140 W 增大到 700 W，大米饭团外层的 T_{21}、T_{22}、T_{23} 值整体呈现增大的趋势，说明水分子的自由度升高；大米饭团内层的 T_{21}、T_{22}、T_{23} 值整体呈现减小的趋势，说明水分子的自由度降低。另外，大米饭团外层的 A_{21}、A_{22} 值整体呈现减小的趋势，而 A_{23} 值从 81.94% 显著增大到 83.28%（P<0.05）；大米饭团内层则与之相反，A_{21}、A_{22} 值整体呈现增大的趋势，而 A_{23} 值从 81.50% 显著减小到 79.77%（P<0.05）。

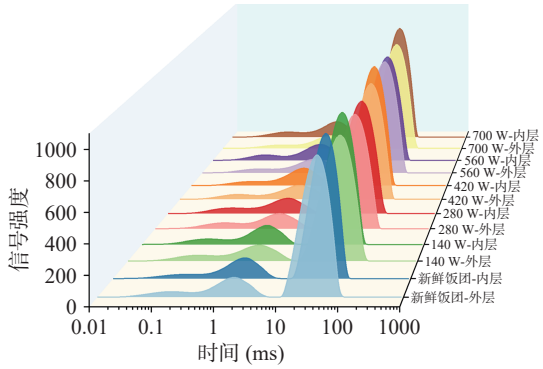


图 3 不同微波功率下大米饭团内外层横向弛豫时间（T_2）分布图

Fig.3 Distribution of transverse relaxation time (T_2) of the inner and outer layers of rice ball under different microwave power

以上现象表明，随着微波功率增大，大米饭团外层的自由水比例上升，而大米饭团内层的自由水比例下降。这是因为在微波作用下大米饭团内层蒸汽压高于外层，内层水分沿蒸汽压梯度向外层迁移；微波复热的过程中，电磁波使水分子高速振荡并剧烈摩

表 2　不同微波功率对大米饭团内外层水分分布的影响

Table 2　Effects of different microwave power on the water distribution in the inner and outer layers of rice ball

样品	部位	T_{21}(ms)	T_{22}(ms)	T_{23}(ms)	A_{21}(%)	A_{22}(%)	A_{23}(%)
新鲜饭团	外层	0.14±0.02^{a}	1.75±0.00^{a}	37.65±0.00^{a}	4.47±0.41^{a}	13.59±0.30^{a}	81.94±0.19^{a}
	内层	0.17±0.04^{a}	1.75±0.00^{a}	37.65±0.00^{ab}	3.49±0.41^{a}	15.01±0.47^{ab}	81.50±0.09^{de}
140 W	外层	0.14±0.02^{a}	1.75±0.00^{a}	43.29±0.00^{a}	4.82±0.37^{a}	12.92±0.20^{a}	82.24±0.21^{b}
	内层	0.14±0.02^{a}	1.75±0.00^{a}	37.65±0.00^{ab}	4.50±0.64^{abc}	13.94±0.63^{a}	81.56±0.18^{e}
280 W	外层	0.14±0.04^{a}	1.75±0.00^{a}	43.29±0.00^{a}	4.36±0.55^{a}	13.26±0.53^{a}	82.38±0.03^{bc}
	内层	0.14±0.02^{a}	1.75±0.00^{a}	41.41±3.26^{b}	4.83±0.36^{bc}	13.95±0.31^{a}	81.22±0.10^{d}
420 W	外层	0.14±0.02^{a}	1.84±0.15^{ab}	43.29±0.00^{a}	4.09±0.54^{a}	13.33±0.71^{a}	82.57±0.17^{c}
	内层	0.14±0.02^{a}	1.60±0.13^{a}	37.65±0.00^{ab}	3.61±0.58^{ab}	15.58±0.57^{b}	80.82±0.01^{c}
560 W	外层	0.16±0.03^{a}	1.75±0.00^{a}	43.29±0.00^{a}	3.77±0.71^{a}	13.30±0.72^{a}	82.93±0.20^{d}
	内层	0.15±0.03^{a}	1.60±0.13^{a}	36.01±2.83^{a}	4.76±0.85^{bc}	14.93±0.94^{ab}	80.31±0.10^{b}
700 W	外层	0.16±0.00^{a}	1.92±0.15^{b}	43.29±0.00^{a}	3.84±0.65^{a}	12.87±0.53^{a}	83.28±0.12^{e}
	内层	0.15±0.02^{a}	1.60±0.13^{a}	34.38±2.83^{a}	4.92±0.85^{c}	15.31±1.08^{ab}	79.77±0.33^{a}

注：不同小写字母表示相同部位不同微波功率之间差异显著（P<0.05），表3~表5同。

擦，将微波能转化为热能，温度升高，因此从热能影响水分分布的角度进行分析，大米饭团外层温度升高后，分子运动速度加快，一方面水分蒸发，向空气中扩散，一方面接收由内部迁移而来的水分获得补充，因此失水率相对较低，而越靠近大米饭团中心的位置，热量越不易散失，温度越高，此时水分逐渐向外迁移，当大米饭团内层水分向外迁移后，不会获得水分补充，导致其失水率相对较高[13]。

微波加热过程中存在水分流失和再分配的问题，可能的原因包括：第一是在冻结过程中饭团内部组织受到损坏，持水能力减弱，导致在微波加热时水分析出；第二是由于饭团的微波复热是一个与外界进行热量传递的过程，因此会产生饭团中水分蒸发的现象[18−19]。随着微波功率的增大，大米饭团内层温度上升更快，热点区域集中更明显，水分损失加快。林向阳等[20] 通过磁共振成像研究了冷冻馒头复热过程中的水分迁移，发现到复热后期馒头内层水分吸收的微波能量更高，温度迅速升高，随后热量从内层向外层扩散，促使水分向馒头的表层迁移，本研究结果与之相似。

2.4　微波复热对大米饭团质构特性的影响

表 3 为不同微波功率条件下大米饭团内外层质构特性差异。由表中数据可以看到，新鲜大米饭团的内外层样品质构特性无显著差异（P>0.05）。

随着微波功率的增大，大米饭团同一部位的硬度和咀嚼性呈现增大的趋势，微波功率在 140~560 W 之间时，大米饭团外、内层的硬度分别从 81.49、84.11 N 增大到 92.00、94.95 N，咀嚼性分别从 75.83、90.07 mJ 增大到 90.98、107.07 mJ。韩文芳等[21] 通过不同复热方式处理冷冻馒头，发现相较于蒸汽复热，微波-蒸汽复热引起馒头失水加重，从而导致硬度和咀嚼性增大，弹性和粘聚性减小；而王春霞等[4] 研究了不同微波功率加热对馒头质构特性的影响，结果表明微波加热功率越大，馒头硬度越大，弹性、回复性越差；在较低功率下，馒头硬度相对较小，弹性、回复性较高，本研究结果与之相似。

表 3　不同微波功率对大米饭团内外层质构的影响

Table 3　Effects of different microwave power on the texture of the inner and outer layers of rice ball

样品	部位	硬度(N)	粘附性(N·mm)	弹性	咀嚼性(mJ)
新鲜饭团	外层	80.20±2.29^{a}	14.63±3.69^{a}	3.52±0.12^{b}	82.41±2.96^{ab}
	内层	80.74±2.56^{a}	19.36±1.91^{a}	3.54±0.13^{a}	85.62±4.91^{a}
140 W	外层	81.49±1.35^{a}	18.06±1.29^{a}	3.38±0.04^{b}	75.83±0.50^{a}
	内层	84.11±0.18^{b}	19.03±0.20^{a}	3.53±0.17^{a}	90.07±9.54^{ab}
280 W	外层	87.83±2.77^{b}	17.19±2.82^{a}	3.42±0.06^{b}	84.33±3.57^{bc}
	内层	92.69±2.25^{c}	17.64±0.65^{a}	3.62±0.01^{a}	102.45±6.60^{ab}
420 W	外层	90.01±1.57^{bc}	15.37±1.04^{a}	3.47±0.04^{b}	88.65±3.35^{bc}
	内层	94.93±1.17^{c}	18.55±1.88^{a}	3.68±0.14^{a}	107.11±13.05^{b}
560 W	外层	92.00±2.00^{c}	16.51±1.06^{a}	3.45±0.04^{b}	90.98±2.51^{c}
	内层	94.95±0.74^{c}	19.61±1.50^{a}	3.64±0.22^{a}	107.07±15.00^{b}
700 W	外层	90.91±0.68^{bc}	18.91±2.13^{a}	3.22±0.14^{a}	82.44±8.18^{ab}
	内层	93.83±0.99^{c}	23.74±1.47^{b}	3.55±0.06^{a}	106.47±3.68^{b}

微波复热处理所有样品内层和外层的粘附性无显著差异（P>0.05），而硬度、弹性和咀嚼性在复热后均显著增大（P<0.05），且内层明细高于外层。这可能是由于在微波复热过程中，水分子高速剧烈摩擦将微波能转换为热能，导致大米饭团温度升高，并且大米饭团内外层温度分布不均，内层温度高于外层温度，形成内外层蒸气压差，促使内层水分子向外层迁移；且微波复热促使大米饭团水分重新分配，外层水分向空气中蒸发逸散，外层大米饭团在损失水分的同时，不断接收到内层水分迁移的水分补充，外层自由水含量比例升高，所以相对柔软，而此时内层水分向外层迁移的同时，无法获取新的水分来源，造成内层自由水含量比例降低，导致大米饭团内部变硬。基于此两点原因，大米饭团内层的硬度、弹性和咀嚼性始终大于外层。对比各功率条件下内外层硬度和咀嚼性的差值分析，随着微波功率的变化，大米饭团内外层硬度指标的差值分别为 2.62、4.86、4.92、2.95 和 2.92 N，内外层咀嚼性指标的差值分别为 14.24、

18.12、18.46、16.09 和 24.03 mJ。结合大米饭团适口性要求和加热效率来考虑，560 W 时大米饭团内外层硬度和咀嚼性差值均相对较小，说明该微波功率下复热的大米饭团内外层口感均一，且加热时长较短，更符合快节奏生活的需求。

2.5 微波复热对大米饭团短程有序结构的影响

图 4(A)和图 4(C)分别展示了不同微波功率条件下大米饭团内层和外层傅里叶红外光谱图。从图中可以观察到，在不同微波功率复热处理后，大米饭团内外层的吸收光谱中均未出现新的吸收峰。这一结果表明，在所研究的微波功率范围内，大米饭团的内外层样品均未发生化学反应，也未形成新的化合物。为进一步深入分析大米饭团内外层样品的微观结构特征，本研究对吸收光谱进行了去卷积处理。通过去卷积处理，得到了大米饭团内层和外层的去卷积光谱图(图 4(B)和图 4(D))，得到了各复热样品在波数 1049 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 处的吸光度值。基于这两处吸光度值的比值，分析大米饭团在微波复热过程中内部结构的有序性变化，评估微波复热对大米饭团结构的影响(表 4)。

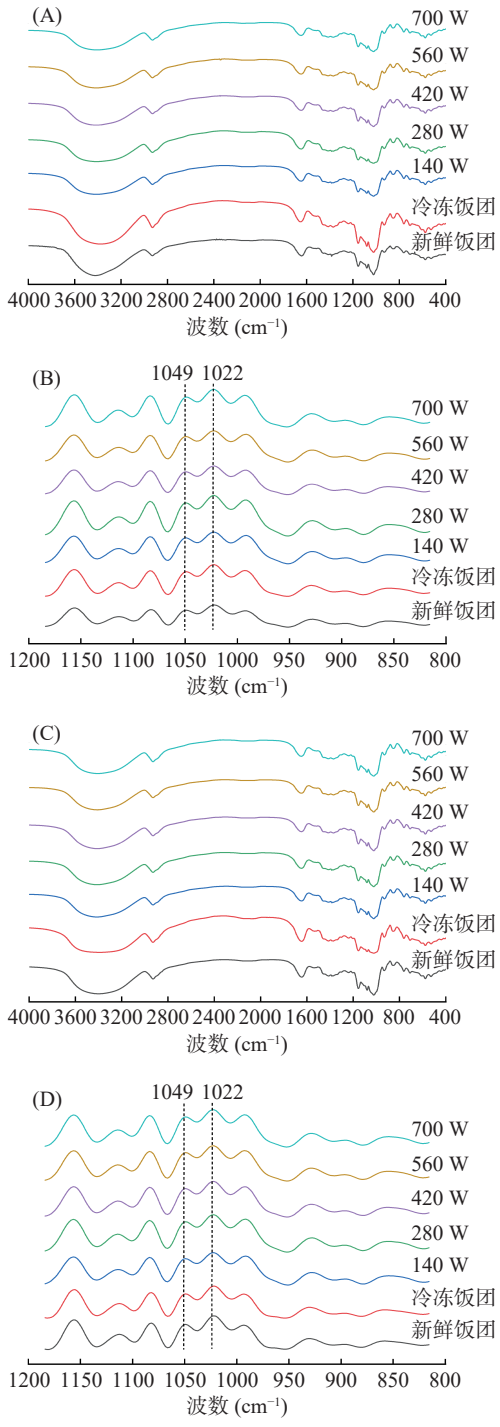


图 4 不同微波功率下大米饭团内外层傅里叶红外光谱图和去卷积图

Fig.4 Fourier transform infrared spectroscopy and deconvolution patterns of the inner and outer layers of rice ball under different microwave power

注：(A)、(C)分别为大米饭团外层、内层的红外光谱图；(B)、(D)分别为大米饭团外层、内层的去卷积图。

表 4 不同微波功率对大米饭团内层和外层短程有序度的影响

Table 4 Effects of different microwave power on the short-range order of the inner and outer layers of rice ball

样品	微波功率(W)	$R_{1049/1022}$	
		外层	内层
新鲜饭团	–	0.91±0.01^{a}	0.91±0.01^{a}
冷冻饭团	–	0.93±0.02^{a}	0.94±0.01^{b}
冷冻-微波饭团	140	1.04±0.00^{c}	1.03±0.00^{e}
	280	1.04±0.00^{c}	1.09±0.00^{f}
	420	1.05±0.04^{c}	0.99±0.00^{c}
	560	1.04±0.01^{c}	1.00±0.00^{d}
	700	0.97±0.00^{b}	1.01±0.00^{d}

如表 4 所示，经过微波复热后大米饭团内层和外层的短程有序度增大。微波处理可能导致大米饭团淀粉分子间或分子内的氢键发生相互作用，氢键的结合方式增多，从而淀粉结晶区的有序结构排列更加紧密[22]。郭卫芸等[23]也研究发现小麦淀粉经微波处理后有序化程度从原来的 1.25% 增至 2.08%。

当微波功率在 140~560 W 时，随着微波功率的增大，大米饭团外层的 $R_{1049/1022}$ 值无显著性变化(P>0.05)，当微波功率达到 700 W 时，大米饭团外层淀粉短程有序度显著减小(P<0.05)；当微波功率在 140~280 W 时，随着微波功率的增大，大米饭团内层的 $R_{1049/1022}$ 值增大，但微波功率达到 420 W 时，内层淀粉短程有序度显著减小(P<0.05)，表明微波功率足够高时会破坏淀粉短程有序结构，减少淀粉短程有序度，Liu 等[24]研究结果显示，在高含水量且微波功率足够高时，米饭的短程有序度会有一定的降低。

2.6 微波复热对大米饭团结晶性质的影响

图 5 为不同微波功率下大米饭团 X 射线衍射图谱，在 2θ=7°、13°和 20°处均呈现衍射峰，表现为 V 型晶体结构；在 2θ=17°左右出现的微弱衍射峰，表现为 B 型晶体结构，图谱中各样品的衍射峰无明显变化。Cheng 等[25]研究了微波加热对冷藏米饭的影响，结果表明与冷藏 1 d 后的米饭相比，微波加热后的米饭中 B 型晶体含量较低，V 型晶体含量基本不

变，说明微波加热破坏了部分 B 型晶体结构，但不影响 V 型晶体结构。但在该研究中，B 型晶体结构特征峰较弱，原因是米饭含水量较高时，过多的水可能会使淀粉链重排困难，难以形成 B 型结晶[24]。

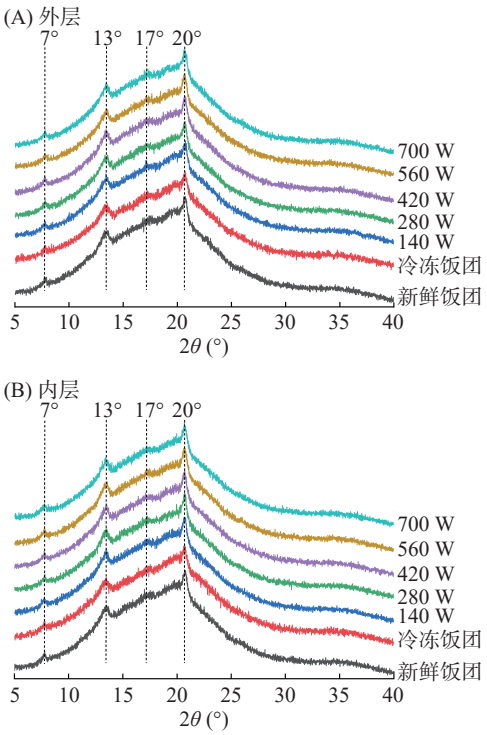


图 5　不同微波功率下大米饭团内外层 X 射线衍射图谱

Fig.5　X-ray diffraction patterns of the inner and outer layers of rice ball under different microwave power

不同微波复热后样品的相对结晶度如表 5 所示，相较于新鲜大米饭团，冷冻 24 h 的大米饭团的相对结晶度显著增大(P<0.05)，并且大米饭团外层相对结晶度大于内层的相对结晶度，主要原因是大米饭团冻藏过程中发生老化，淀粉重结晶，同时大米饭团外层的老化程度更大。经过微波处理后的大米饭团相较于冷冻大米饭团，其相对结晶度有一定程度的减小，说明淀粉颗粒结晶区与无定形区之间的比例发生变化，微波处理进一步破坏了 B 型晶体结构[25]，从而使结晶度降低。但是随着微波功率的增大，大米饭团内外层的淀粉相对结晶度无显著差异(P>0.05)，说明在不同微波功率水平下进行加热不会显著改变淀粉的晶体结构。

表 5　不同微波功率对大米饭团内外层相对结晶度的影响

Table 5　Effects of different microwave power on the relative crystallinity of the inner and outer layers of rice ball

样品	微波功率(W)	相对结晶度(%)	
		外层	内层
新鲜饭团	–	6.23±0.05^{a}	5.28±0.29^{a}
冷冻饭团	–	6.81±0.11^{c}	5.98±0.18^{b}
冷冻-微波饭团	140	6.44±0.10^{ab}	5.68±0.11^{ab}
	280	6.55±0.13^{bc}	5.57±0.19^{ab}
	420	6.51±0.02^{b}	5.59±0.13^{ab}
	560	6.59±0.07^{bc}	5.66±0.23^{ab}
	700	6.64±0.18^{bc}	5.50±0.20^{ab}

2.7　微波复热对大米饭团香气挥发性成分的影响

不同微波功率下大米饭团内外层 GC-IMS 指纹图谱和挥发性成分见图 6、表 6，大米饭团样品中一共鉴定出 28 种挥发性风味物质，包括醇类 8 种、醛类 6 种、酯类 3 种、酮类 7 种、吡嗪类 1 种、烃类 3 种，这些物质共同构成了大米饭团的典型风味特征[26]。指纹图谱中挥发性物质信号峰颜色的深浅代表各挥发性物质浓度的变化。醇醛类物质是大米饭团中起关键作用的风味物质之一，醛醇类化合物一般是脂质的降解产物，都具有香气，羰基化合物可以产生原生的、浓郁的香味，而挥发性醇产生品质较为柔和的气味，因此大米饭团整体风味为浓郁芳香[27]。醛类物质主要是由脂质氧化产生的，具有脂肪气味，其含量过高会产生酸败味；酮类物质主要来自不饱和脂肪酸的氧化或氨基酸降解，多数具有清香气味，包含花果香，香味优异持久；酯类物质主要是脂肪氧化产生的醇同游离脂肪酸发生酯化反应形成的；烃类物质主要由脂肪酸烷氧自由基的均裂产生，这些物质浓度的升高意味着微波复热过程中较高的温度加速了各种反应的进行[28−30]。

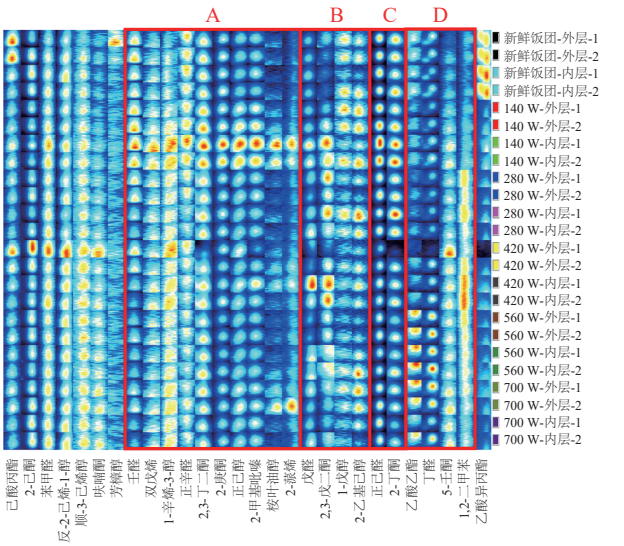


图 6　不同微波功率下大米饭团内外层 GC-IMS 指纹图谱

Fig.6　GC-IMS fingerprints of the inner and outer layers of rice ball under different microwave power

结合图 6 和表 6 进行分析，在新鲜大米饭团中，具有类似水果芳香气味的乙酸异丙酯浓度最大，而在微波复热后大米饭团样品中此挥发性物质的浓度出现大幅度降低，说明微波处理造成了乙酸异丙酯的损失。A 区域中部分挥发性风味物质在经 140 W 微波处理的大米饭团中浓度最大，而随着微波功率的增大，这些风味物质浓度会减少；其中这部分风味成分主要包含具有强烈油脂气味的壬醛，具有桉树、草药、樟脑味的桉叶油醇，具有坚果香、霉香、烤香、壤香味的 2-甲基吡嗪等，且在 140 W 时，这部分风味物质颜色深，此时这些物质浓度高，易产生令人不悦的

表 6 大米饭团中挥发性成分定性分析

Table 6 Qualitative analysis of volatile components of rice ball

类别	编号	化合物名称	CAS号	分子式	分子量	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)	风味描述
醇	1	正己醇	C111273	$C_6H_{14}O$	102.2	900	410.787	1.3266	果子香味
	2	反-2-已烯-1-醇	C2305217	$C_6H_{12}O$	100.2	867	351.546	1.1839	强烈的青香香味
	3	桉叶油醇	C470826	$C_{10}H_{18}O$	154.3	1026.6	682.498	1.2902	桉树、草药、樟脑味
	4	1-辛烯-3-醇	C3391864	$C_8H_{16}O$	128.2	996.4	630.151	1.1531	蘑菇、薰衣草、玫瑰和干草香味
	5	2-乙基己醇	C104767	$C_8H_{18}O$	130.2	1015.2	662.205	1.8061	甜味
	6	1-戊醇	C71410	$C_5H_{12}O$	88.1	744.7	180.401	1.5131	杂醇油气味
	7	芳樟醇	C78706	$C_{10}H_{18}O$	154.3	1110.7	852.263	1.2257	铃兰香味
	8	顺-3-己烯醇	C928961	$C_6H_{12}O$	100.2	895.5	402.776	1.2289	强烈的绿色嫩叶清香气味
醛	9	壬醛	C124196	$C_9H_{18}O$	142.2	1106.8	843.462	1.4748	强烈的油脂气味和甜橙香味
	10	正己醛	C66251	$C_6H_{12}O$	100.2	788.8	241.45	1.253	青草气味
	11	苯甲醛	C100527	C_7H_6O	106.1	968	555.512	1.1494	苦杏仁、樱桃及坚果香味
	12	戊醛	C110623	$C_5H_{10}O$	86.1	698.9	131.984	1.181	发酵味、酸奶味
	13	正辛醛	C124130	$C_8H_{16}O$	128.2	999.3	634.924	1.4048	强烈的水果香味
	14	丁醛	C123728	C_4H_8O	72.1	595	62.559	1.2912	刺激性气味
酯	15	己酸丙酯	C626777	$C_9H_{18}O_2$	158.2	1059.5	744.358	1.4042	菠萝香味
	16	乙酸异丙酯	C108214	$C_5H_{10}O_2$	102.1	647.7	91.516	1.1626	类似水果的芳香气味
	17	乙酸乙酯	C141786	$C_4H_8O_2$	88.1	581.7	56.855	1.3385	水果香味
酮	18	2-庚酮	C110430	$C_7H_{14}O$	114.2	895.3	402.408	1.2591	梨香味
	19	2-己酮	C591786	$C_6H_{12}O$	100.2	777.6	225.836	1.1824	果味
	20	5-壬酮	C502567	$C_9H_{18}O$	142.2	1080.7	787.391	1.3392	特殊香味
	21	2,3-戊二酮	C600146	$C_5H_8O_2$	100.1	688.6	122.971	1.2992	奶油、焦糖、坚果香味
	22	2-丁酮	C78933	C_4H_8O	72.1	591.3	60.93	1.2506	果香和清香味
	23	2,3-丁二酮	C431038	$C_4H_6O_2$	86.1	582.6	57.214	1.1824	奶油香味
	24	呋喃酮	C3658773	$C_6H_8O_3$	128.1	1093.6	814.68	1.2063	甜的水果和焦糖香味
吡嗪	25	2-甲基吡嗪	C109080	$C_5H_6N_2$	94.1	789.2	241.933	1.3954	坚果香、霉香、烤香、壤香味
烃类	26	2-蒎烯	C80568	$C_{10}H_{16}$	136.2	967.2	553.585	1.2217	松萜特有的气味
	27	双戊烯	C138863	$C_{10}H_{16}$	136.2	1042.8	712.225	1.2811	柠檬香味
	28	1,2-二甲苯	C95476	C_8H_{10}	106.2	924.5	457.939	1.074	芳香气味

注: 风味描述源于网站: http://www.perflavory.com/search.php。

气味。B 区域中的具有杂醇油气味的 1-戊醇和具有甜味的 2-乙基己醇在新鲜大米饭团及经过 280 W 微波功率处理的大米饭团中的浓度更大, 表明低功率微波处理可以减少部分香气成分的流失; 此外, 从 B 区域中可以明显看出, 大米饭团内层和外层之间的挥发性成分呈现出一定差异性, 且内层挥发性成分的浓度更高, 在微波复热过程中风味物质保留较好, 如具有发酵味和酸奶味的戊醛、奶油香味的 2,3-戊二酮在大米饭团内层中的浓度更高。大米饭团内外层挥发性成分的差异性变化表明, 复热过程中大米饭团温度的不均匀性会导致不同部位发生不同程度的氧化分解反应。随着微波功率的增大, C 区域中具有青草气味的正己醛、果香和清香味的 2-丁酮的浓度逐渐降低, 说明随着微波过程中温度的升高, 产生的蒸发效应可能导致部分挥发性物质含量降低[31]。560 W 微波功率下, D 区域具有水果香味的乙酸乙酯、刺激性气味的丁醛、特殊香味的 5-壬酮、芳香气味的 1,2-二甲苯的浓度与对照组相比显著增强。这可能与微波功率增大, 饭团整体升温速度快有关。在所有微波功率条件下, 560 W 微波功率的大米饭团在 A、C、D 区域中呈现出的内外层风味浓度差异最小, 含量较为接近。280、420 和 560 W 等微波功率条件下在 A 区域的挥发性成分与对照组较为接近, 说明这三个条件复热后的大米饭团中这一部分的挥发性成分最接近新鲜饭团。

3 结论

本研究以新鲜大米饭团作为对照组, 系统考察了不同微波复热功率对冷冻大米饭团品质特性的影响。在试验设计范围内, 420 W 时大米饭团内部温度均匀性最佳; 同时微波复热使大米饭团内外层硬度和咀嚼性差异变大, 在 560 W 微波功率下, 大米饭团内外层质构硬度和咀嚼性差异值相对较小, 口感较均一。淀粉结构分析显示, 冷冻复热后大米饭团中淀粉有序性增大、结晶度减少; 随着微波功率的增大, 大米饭团外层淀粉结晶度呈现增大趋势, 而内层无显著变化(P>0.05), 短程有序度仅在微波功率较高时减小。在所有微波功率梯度条件下, 560 W 微波功率的大米饭团呈现出内外层风味浓度差异最小, 挥发性成分含量较为接近。综合各指标, 为使大米饭团复热后的品质较好, 且符合现代快节奏生活的需求, 560 W 功率、110 s 复热时间可实现冷冻大米饭团品质的最优化平衡。本研究为冷冻大米饭团流通过程中终端

消费品质的维持提供理论依据与实践参考，然而在冷冻饭团的复热食用中，常常与贮藏紧密联系，本研究缺少微波复热对不同贮藏时间饭团品质影响的研究，这将对未来冷冻大米饭团的进一步研究提供实际性指导。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ 陈芷涵, 金伟平, 王展, 等. 饭团低温贮藏过程中不同部位品质变化规律[J]. 食品科学, 2024, 45(12): 253−260. ［CHEN Zhihan, JIN Weiping, WANG Zhan, et al. Quality changes in different parts of rice ball during low-temperature storage[J]. Food Science, 2024, 45(12): 253−260.］

［2］ 王云, 岳伟. 美味的寿司[J]. 中国食品, 2005(22): 36−37. ［WANG Yun, YUE Wei. Delicious sushi[J]. China Food, 2005(22): 36−37.］

［3］ 孙培清. 微波技术在肉类解冻中的应用[J]. 肉类工业, 2020(4): 49−50. ［SUN Peiqing. Application of microwave technology in meat thawing[J]. Meat Industry, 2020(4): 49−50.］

［4］ 王春霞, 周国燕. 微波加热对冷冻馒头品质特性的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(3): 11−15. ［WANG Chunxia, ZHOU Guoyan. Influence of microwave heating on quality characteristics of frozen steamed breads[J]. Food Science, 2013, 34(3): 11−15.］

［5］ 郑先哲, 高明, 张雨涵, 等. 功率输入模式对浆果微波加热均匀性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 303−314. ［ZHENG Xianzhe, GAO Ming, ZHANG Yuhan, et al. Effects of input power mode on the uniformity of berry pulp in microwave heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(21): 303−314.］

［6］ 王晓蕊. 微波复热方便米饭的温度分布研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019. ［WANG Xiaorui. Study on the temperature distribution of instant rice during microwave reheating[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.］

［7］ 沙文轩, 朱健, 章海风, 等. 浸泡时间对米饭短期回生的影响[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(1): 58−61. ［SHA Wenxuan, ZHU Jian, ZHANG Haifeng, et al. Effect of soaking time on short-term retrogradation of rice[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(1): 58−61.］

［8］ 张馨允. 银耳多糖对冷冻速食扬州炒饭品质特性及风味的影响研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2024. ［ZHANG Xinyun. Effect of *Tremella* polysaccharides on quality characteristics and flavor of frozen instant Yangzhou fried rice[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2024.］

［9］ TU Yuan, HUANG Shuangxia, CHI Chengdeng, et al. Digestibility and structure changes of rice starch following co-fermentation of yeast and *Lactobacillus strains*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 530−537.

［10］ ZHANG Wei, LIU Yuxuan, LUO Xianli, et al. Pasting, cooking, and digestible properties of *Japonica*rice with different amylose contents[J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 936−947.

［11］ FU Tiantian, NIU Liya, LI Yun, et al. Effects of tea products on *in vitro* starch digestibility and eating quality of cooked rice using domestic cooking method[J]. Food & Function, 2020, 11(11): 9881−9891.

［12］ 吴小桥, 毛爽, 阴鑫烨, 等. 物理解冻技术在肉类及其制品中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(1): 6−11,16. ［WU Xiaoqiao, MAO Shuang, YIN Xinye, et al. Research progress on the application of physical thawing technology in meat and its products[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(1): 6−11,16.］

［13］ 陈卫, 张灏, 赵建新, 等. 冷冻馒头微波复热过程中温度和水分变化的研究[J]. 中国粮油学报, 2002, 17(5): 21−23. ［CHEN Wei, ZHANG Hao, ZHAO Jianxin, et al. Change of temperature and moisture within frozen steamed bread under microwave reheating[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2002, 17(5): 21−23.］

［14］ 赵学伟, 秦潭洋. 微波-蒸汽联合加热过程中冻结馒头温度和水分变化[J]. 粮食与油脂, 2009, 22(6): 23−25. ［ZHAO Xuewei, QIN Tanyang. Temperature and moisture content changes during microwave-steam reheating of frozen steamed breads[J]. Journal of Cereals & Oils, 2009, 22(6): 23−25.］

［15］ HOSSAN M R, BYUN D, DUTTA P. Analysis of microwave heating for cylindrical shaped objects[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(23-24): 5129−5138.

［16］ 禚秋辰, 李倩钰, 朱丹实, 等. 食品复热技术及其对速冻面制品品质的影响研究进展[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(6): 15−18,81. ［ZHUO Qiuchen, LI Qianyu, ZHU Danshi, et al. Research progress on food reheating technology and its impact on the quality of quick-frozen flour products[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(6): 15−18,81.］

［17］ 刘畅, 宋飞虎, 李润杰, 等. 微波-压力联合复热冷链米饭及其品质的研究[J]. 包装与食品机械, 2024, 42(4): 1−7. ［LIU Chang, SONG Feihu, LI Runjie, et al. Study on microwave-pressure combined reheating cold chain rice and its quality[J]. Packaging and Food Machinery, 2024, 42(4): 1−7.］

［18］ NI H, DATTA A K, PARMESWAR R. Moisture loss as related to heating uniformity in microwave processing of solid foods[J]. Journal of Food Process Engineering, 1999, 22(5): 367−382.

［19］ 徐侃. 冷冻米饭生产工艺及其品质特性的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2011. ［XU Kan. Studies on the production technology and quality characteristics of frozen cooked rice[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2011.］

［20］ 林向阳, 何承云, 阮榕生, 等. MRI 研究冷冻馒头微波复热过程水分的迁移变化[J]. 食品科学, 2005, 26(8): 82−86. ［LIN Xiangyang, HE Chengyun, RUAN Rongsheng, et al. Studies of water mobility in frozen steamed bread under microwave reheating using magnetic resonance imaging[J]. Food Science, 2005, 26(8): 82−86.］

［21］ 韩文芳, 王欢欢, 李江涛, 等. 复热方式对冷冻馒头质构和消化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(4): 93−96. ［HAN Wenfang, WANG Huanhuan, LI Jiangtao, et al. Influences of different reheating methods on the texture and digestion properties of frozen steamed bread[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(4): 93−96.］

［22］ 陈秉彦, 郭泽镔, 许丽宾, 等. 微波处理对莲子淀粉理化性质的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(3): 213−219. ［CHEN Bingyan, GUO Zebin, XU Libin, et al. Effect of physical and chemical properties of *Lotus seed* starch by microwave treatment[J]. Modern Food Science & Technology, 2015, 31(3): 213−219.］

［23］ 郭卫芸, 张珂珂, 李光辉, 等. 微波条件下小麦淀粉-绿原酸复合物的理化及结构特性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 60−66. ［GUO Weiyun, ZHANG Keke, LI Guanghui, et al. Physicochemical and structural properties of wheat starch-chlorogenic acid complex under microwave irradiation[J]. Science and Technology of

Food Industry, 2025, 46(8): 60−66.]
[24] LIU Ting, ZHANG Binjia, WANG Lili, et al. Microwave reheating increases the resistant starch content in cooked rice with high water contents[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 804−811.
[25] CHENG Zihang, LI Jiangnan, QIAO Dongling, et al. Microwave reheating enriches resistant starch in cold-chain cooked rice: A view of structural alterations during digestion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 208: 80−87.
[26] WANG Zongwei, ZHANG Yiman, YANG Xiao, et al. Effect of milling degree on volatile profiles of cooked rice determined by electronic nose and HS-SPME-GC-MS[J]. Cereal Chemistry, 2023, 100(6): 1301−1313.
[27] 苗菁, 苏慧敏, 张敏. 米饭中关键风味化合物的分析[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 82−86. [MIAO Jing, SU Huimin, ZHANG Min. Analysis of the key flavor compounds in cooked rice[J]. Food Science, 2016, 37(2): 82−86.]
[28] GUAN Lina, MI Yongjie, ZHANG Min, et al. Construction of aroma association network of cooked rice based on gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and sensory analysis[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2024, 39(1): 45−57.
[29] 凌胜男, 刘特元, 陈雪叶, 等. 不同解冻方式对鳀鱼鲜度及挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 322−330. [LING Shengnan, LIU Teyuan, CHEN Xueye, et al. Effect of different thawing methods on the freshness and volatile flavor compounds of anchovy (*Engraulis encrasicholus*)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 322−330.]
[30] 余力, 贺稚非, 王兆明, 等. 不同解冻方式对伊拉兔肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 95−101. [YU Li, HE Zhifei, WANG Zhaoming, et al. Effect of different thawing methods on volatile flavor compounds of Hyla rabbit meat[J]. Food Science, 2015, 36(22): 95−101.]
[31] ZHAO Qiyan, XI Jinzhong, XU Dan, et al. A comparative HS-SPME/GC-MS-based metabolomics approach for discriminating selected Japonica rice varieties from different regions of China in raw and cooked form[J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132701.