

# 复热方式对车前子壳粉—未漂洗鱼糜凝胶薄饼品质特性的影响

杨菁<sup>1,2</sup> 郑万源<sup>3</sup> 仪淑敏<sup>1,2</sup> 励建荣<sup>1,2</sup> 刘英丽<sup>4</sup>

(1. 渤海大学食品科学与工程学院, 辽宁 锦州 121013; 2. 渤海大学生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 辽宁 锦州 121013; 3. 浙江兴业集团有限公司, 浙江 舟山 316000; 4. 北京工商大学食品与健康学院, 北京 100000)

**摘要:** [目的] 探索适合车前子壳粉—未漂洗鱼糜凝胶薄饼的加热方法。[方法] 分别采用汽蒸(SR)、烘烤(GR)、空气煎炸(AR)、微波(MR)、煎制(FR)对车前子壳粉—未漂洗鱼糜凝胶薄饼进行复热处理, 考察复热方式对凝胶薄饼品质及质构特性的影响。[结果] 复热会加深凝胶薄饼的色泽, 使白度降低, 其中FR对 $a^*$ 值、 $b^*$ 值影响显著( $P < 0.05$ ), 相较于CK分别增加了4.50, 1.43倍。MR和GR对凝胶薄饼的水分损失影响较大, 复热后的水分含量分别为53.07%, 56.67%; SR、AR、FR对水分损失影响较小, 与CK相比分别减少了2.16%, 3.60%, 4.06%。除FR外, 其他复热处理均会提高凝胶薄饼的水分自由度。复热增加了凝胶薄饼的硬度和滋味的丰富性, 提升了凝胶薄饼的咸味值和鲜味值, MR、SR和FR的苦味值显著增加, MR、SR、GR和FR的酸味值降低。复热可以丰富凝胶薄饼中风味物质的种类和相对含量, SR会造成风味物质的稀释, MR和FR会增加凝胶薄饼风味物质的种类, 使其本身的风味更加浓郁。[结论] 凝胶薄饼较为适合的复热方式为煎制, 其次为微波。

**关键词:** 未漂洗; 鱼糜; 车前子壳粉; 凝胶薄饼; 复热特性

## Effects of different reheating methods on the quality characteristics of psyllium husk powder-unrinsed surimi gel pancakes

YANG Jing<sup>1,2</sup> ZHENG Wanyuan<sup>3</sup> YI Shumin<sup>1,2</sup> LI Jianrong<sup>1,2</sup> LIU Yingli<sup>4</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Bohai University, Jinzhou, Liaoning 121013, China; 2. Food Safety Key Lab of Liaoning Province, National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Bohai University, Jinzhou, Liaoning 121013, China; 3. Zhejiang Xingye Group Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang 316000, China; 4. School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100000, China)

**Abstract:** [Objective] This study aimed to evaluate the effects of different reheating methods on the quality characteristics of psyllium husk powder-unrinsed surimi gelatinous pancakes. [Methods] Gelatinous pancakes were reheated using steaming (SR), baking (BR), air frying (AR), microwave reheating (MR) and decoction (FR). Changes in color, moisture content, textural properties and flavor characteristics were analyzed. [Results] Reheating deepened the color of the pancakes and reduced the whiteness. Frying (FR) significantly ( $P < 0.05$ ) increased  $a^*$  and  $b^*$  values by 4.50 and 1.43 times, respectively, compared to the control (CK). Moisture loss was highest in MR (53.07%) and GR (56.67%) but minimal in SR (2.16%), AR (3.60%), and FR (4.06%). Except for FR, reheating treatments increased moisture freedom. Hardness and flavor richness increased across all methods, with bitterness significantly elevated in MR, SR and FR, while sourness decreased in MR, SR, BR and FR by approximately 38.74%. Reheating enhanced the diversity and relative content of flavor compounds, with SR causes diluting flavor substances, while MR and FR intensified flavor variety and richness. [Conclusion] Frying (FR)

基金项目: 国家自然科学基金(编号: U20A2067)

通信作者: 仪淑敏(1980—), 女, 渤海大学教授, 博士。E-mail: yishumin@163.com

收稿日期: 2024-04-16 改回日期: 2024-12-06

was the most suitable reheating method for gelatinous pancakes, followed by microwave reheating (MR).

**Keywords:** unrisins; surimi; psyllium husk powder; gel pancakes; reheating characteristics

当前主食工业的快速发展对健康主食以及预制主食的需求非常高,而传统面团制成的主食多为高碳水食品,长期大量食用此类食品易诱发糖尿病及肥胖症<sup>[1]</sup>。薄饼是中国北方地区日常面食之一,如杂粮煎饼、榆林筋饼、盛京春饼、山东烙馍和手抓饼等均属于薄饼。但熟制的薄饼放凉、冷冻后,口感相较于新鲜薄饼有一定差距,需要通过复热来恢复其品质。

汽蒸、烘烤、空气煎炸、微波、煎制为常见的复热方法。由于加热原理不同,各种复热方法伴随着物理和化学差异,包括颜色、质地、风味和感官属性<sup>[2]</sup>。赵颖颖等<sup>[3]</sup>研究显示,复热后糖醋排骨的产品质量会降低,其中通过水浴的方式进行复热的损耗最低,且对口感的影响轻微,因此建议采用水浴来复热糖醋排骨。王源渊等<sup>[4]</sup>研究表明,烤鱼产品的最佳复热方式为微波,其水分含量、TBARS值及感官评价均较好,鲜嫩程度最高,且所需的时间最少,整体来看,微波是一种理想的预制烤鱼制品复热方式。

前期研究<sup>[5]</sup>表明,添加质量分数为6%的车前子壳粉对未漂洗鱼糜的凝胶特性具有良好的改善作用。研究拟选择添加量为6%的车前子壳粉与鱼糜、全麦粉等原辅料进行配方优化,制成一种凝胶薄饼,并分析复热方式(汽蒸、烘烤、空气煎炸、微波、煎制)对凝胶薄饼品质的影响,为消费者合理选择复热方式提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

冰鲜鲷鱼(*Scomber japonicus*):质量为(300±50)g,运回实验室后立即采背部肉,分装后于-80℃冷冻备用,市售;

车前子壳粉(PHP):蛋白质、脂肪含量未检出,多糖相对分子质量为 $3.5 \times 10^{-4} \sim 3.8 \times 10^{-6}$ ,美国Now Foods公司;

全麦粉、鸡蛋、胡萝卜、料酒、香辛料、柠檬汁、白砂糖、食盐、味精等:市售。

### 1.2 仪器与设备

绞肉机:I17A-300型,浙江苏泊尔生活电器有限公司;

低场核磁共振仪:NMI20型,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;

色差计:CR-400型,日本Konica Minolta公司;

质构仪:TA-XT Plus型,英国SMS公司;

电子鼻:PEN3型,德国Air Sense公司;

电子舌:SA402B型,日本INSENT公司;

气相色谱—质谱联用仪:790A-5975C型,美国Agilent公司;

微波炉:X3-233A型,广东美的厨房电源制造有限公司;

空气炸锅:MF-KZ120Q7-400GXM型,广东美的厨房电源制造有限公司;

烤箱:NB-HM3810型,上海松下微波炉有限公司;

薄饼机:JJ20A817-70型,浙江苏泊尔生活电器有限公司。

### 1.3 方法

**1.3.1 凝胶薄饼的制备** 根据表1配方进行凝胶薄饼的制备,鲷鱼鱼糜流水解冻,切碎,将香辛料用滤网包裹置于20倍体积的温水中浸泡2h以上,制成复合香辛料汁备用。将除食盐外的所有干性材料与湿性材料预先水合。混匀后放置10min,用搅拌机搅打30s,重复2次,备用。鱼糜空斩1~2min,盐斩1~2min,将上述配料加入混斩1~2min,斩拌全过程控制温度为0~10℃。取20g物料置于硅油纸之间,用擀面杖擀成2mm左右的薄饼,使用成型模具(直径为15cm的圆形刻模具)成型,于-18℃冷冻2h,取出正反煎制2min,冷却,真空包装,121℃恒温杀菌15~20min。

**1.3.2 凝胶薄饼的复热** 分别取冷冻3d的凝胶薄饼进行微波复热(MR)、汽蒸复热(SR)、空气炸复热(AR)、烘烤复热(GR)和煎制复热(FR),加热至食品中心温度>70℃(复热终点)。

**1.3.3 颜色测定** 根据Yi等<sup>[6]</sup>的方法。

**1.3.4 水分含量测定** 根据GB 5009.3—2016。

**1.3.5 水分分布测定** 根据杨菁等<sup>[7]</sup>的方法。

**1.3.6 质构特性测定** 根据米红波等<sup>[8]</sup>的方法。

**1.3.7 气味测定** 根据刘新然等<sup>[9]</sup>的方法。

**1.3.8 滋味测定** 根据李双艳等<sup>[10]</sup>的方法。

**1.3.9 挥发性风味分析** 根据张琦梦等<sup>[11]</sup>的方法。对化合物进行分析时,数据由计算机检索并与图谱库美国国家标准技术研究所(NIST)20.S的标准质谱图进行检索和

表1 凝胶薄饼配方表(以鱼糜质量计)

鱼糜	全麦粉	车前子壳粉	冰水	蛋清	料酒	复合香辛料汁	胡萝卜	柠檬汁	白砂糖	食盐	味精
100	35	6	20	30	20	12.5	9	4	1.5	1	0.3

匹配,筛选出匹配度>80%的物质,并确认其化学结构和名称。相对含量则通过峰面积归一化法进行确定。

1.3.10 感官评价 采用模糊数学法。随机取 20 份凝胶薄饼,由 20 位具备食品专业知识的人员(男女各半)按表 2

进行评分。质地、滋味、气味和色泽组成因素集  $U$ ,即  $U=($ 质地,滋味,气味,色泽)。确定样品质量级别分别为优秀、良好、较差,即评语集  $V=($ 优秀,良好,较差),各因素的权重集  $K=(K_1,K_2,K_3,K_4)$ 。

表 2 凝胶薄饼的感官评分标准  
Table 2 The sensory scoring of gel pancake

等级	质地	滋味	气味	色泽
优秀	口感细腻、无砂粒感、有嚼劲	味道纯正、口味咸淡适中	有混合香味	颜色均匀、表面明亮、无焦糊
良好	口感较细腻、无砂粒感、较有嚼劲	口味咸淡适中	肉香味不足、略有腥味	颜色均匀、深浅适中、轻微焦糊
较差	口感粗糙、有砂粒感	口味不佳	有不良气味	颜色不均匀、过深或过浅、有焦糊

1.3.11 数据分析 结果以平均值±标准差表示,使用 SPSS 27.0 软件进行统计分析,采用 Origin 2022 绘图;使用单因素方差分析、平均多重比较检验和 Duncan 多重极差检验对数据进行统计学意义分析,显著性水平为  $P<0.05$ 。所有试验至少重复 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 凝胶薄饼的复热

试验发现,MR 的复热速率显著快于其他 4 种复热方式,700 W 复热 20 s 可使凝胶薄饼的中心温度达到 70 °C。MR 的升温速度显著高于其他方法是因为其独特的加热方式。微波透入凝胶薄饼内,可引起凝胶薄饼中的极性分子和导电离子的快速摩擦、碰撞,以响应发生的电场反转,使凝胶薄饼内各部分瞬间受热升温<sup>[12]</sup>。微波作用下的凝胶薄饼中,水分子、 $Na^+$ 和  $Cl^-$ 的激烈运动导致内部产生的热量增加,使温度上升。这种加热方式与传统方法有显著差异,其热量由内向外扩散<sup>[13]</sup>。

AR 于 130 °C 预热 1 min 后,复热 50 s 可使凝胶薄饼的中心温度达到 70 °C,共用时 110 s。空气炸是一种利用空气代替热油,通过较高流速的热空气快速将食物表面水分带走,并对食物进行均匀加热,使复热后的食物具有类似于油炸效果的复热方法。FR 是食物在煎锅中加热时,热量从煎锅传导到食物表面,使食物表面温度升高。电煎锅预热 30 s,正反面煎制 60 s 可使凝胶薄饼中心温度达到 70 °C,共用时 90 s。GR 是通过热力使食物进行重新加热熟化或者烘干的过程。烤箱于 180 °C 预热 2 min,复热 90 s 可使凝胶薄饼的中心温度达到 70 °C,共用时 210 s。SR 是利用水蒸气作为媒介,在持续高温和较大压力的环境下,逐渐渗透到原料内部,使得原料变熟或者变酥软的一种方法。蒸锅上汽后(5 min),复热 7 min 可使凝胶薄饼的中心温度达到 70 °C,共用时 12 min。

### 2.2 对凝胶薄饼颜色的影响

由表 3 可知,复热可显著降低凝胶薄饼的  $L^*$  值,其中 MR、SR 的变化较小,FR 的变化最大。复热对凝胶薄饼的

$a^*$  值、 $b^*$  值影响不同,其中 FR 对  $a^*$  值、 $b^*$  值影响显著( $P<0.05$ ),相较于 CK 分别增加了 4.50、1.43 倍,该凝胶薄饼的颜色变红变黄。除 SR 外,其他复热方式均会降低凝胶薄饼的白度,推测是 SR 过程中凝胶薄饼吸收水分使其表面的反射增加, $L^*$  值增加。其他 4 种方法在加热过程中可能会加快凝胶薄饼内鱼肉肌红蛋白氧化的速率和美拉德反应的程度<sup>[14]</sup>,引发褐变,从而加深凝胶薄饼的颜色。

表 3 复热方式对凝胶薄饼颜色的影响†

Table 3 Effects of reheating method on the color of gel pancakes

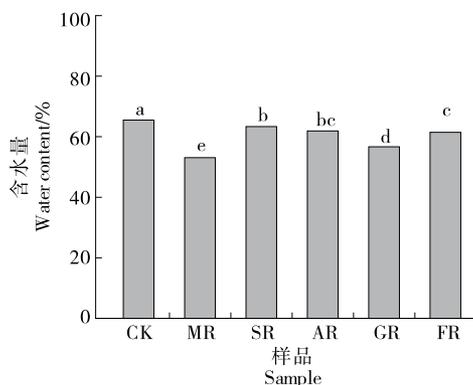
复热方式	$L^*$	$a^*$	$b^*$	白度
CK	70.86±0.84 <sup>a</sup>	0.72±0.31 <sup>b</sup>	16.20±0.67 <sup>c</sup>	72.69±0.72 <sup>ab</sup>
MR	69.08±0.43 <sup>bc</sup>	0.80±0.17 <sup>b</sup>	19.05±1.29 <sup>b</sup>	71.67±0.61 <sup>bc</sup>
SR	69.67±1.31 <sup>ab</sup>	0.68±0.16 <sup>b</sup>	21.97±1.54 <sup>a</sup>	73.08±0.82 <sup>a</sup>
AR	68.49±1.27 <sup>bc</sup>	1.33±0.30 <sup>b</sup>	19.20±1.46 <sup>b</sup>	71.15±1.14 <sup>c</sup>
GR	68.50±1.36 <sup>bc</sup>	1.40±0.29 <sup>b</sup>	19.45±1.07 <sup>b</sup>	71.23±1.17 <sup>c</sup>
FR	67.64±1.80 <sup>c</sup>	3.24±1.39 <sup>a</sup>	23.19±4.00 <sup>a</sup>	71.70±0.85 <sup>bc</sup>

† 字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.3 对凝胶薄饼水分含量的影响

凝胶薄饼的食用品质与水分含量关系密切<sup>[15]</sup>。由图 1 可知,MR、GR 对凝胶薄饼水分损失的影响显著( $P<0.05$ ),复热后的水分含量分别为 53.07%、56.67%。MR 损失水分的原因是微波加热时凝胶薄饼内部产生热量并向外散发,导致温度迅速上升,加速内部的水分向外流失,因此水分流失较多。GR 的水分含量最低,归因于烘烤加热导致非极性氨基酸与四周的保护性半结晶水结构崩塌后形成疏水键,大大降低了鱼肉的持水性,导致凝胶薄饼水分迅速流失<sup>[16]</sup>,且还会通过空气对流带走鱼肉表皮的水分。SR、AR 和 FR 对水分损失影响较小,与 CK 相比分别减少了 2.16%、3.60%、4.06%。SR 的凝胶薄饼在蒸制过程中与水汽接触,但凝胶薄饼本身已熟化,内部微观结构

已建立,这种相对平稳的加热方式对水分含量的影响较小。AR利用较高温度的热空气会带走凝胶薄饼表面的水分,但其复热时间较短,凝胶薄饼只失去较少部分水分。FR的凝胶薄饼与预热的煎锅直接接触会造成凝胶薄饼表面水分流失,但由于复热速度快,蛋白质与多糖受热后可形成保护层,阻止凝胶薄饼内部水分的流失,因此水分含量损失较少。



字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ )

图1 复热方式对凝胶薄饼含水量的影响

Figure 1 Effects of reheating method on the moisture content of gel pancakes

#### 2.4 对凝胶薄饼水分分布的影响

由图2可知,SR的核磁信号面积最大,AR的核磁信号面积最小。除FR外,经其他复热方式处理后的凝胶薄饼的 $T_{21}$ 和 $T_{22}$ 向右迁移,表明凝胶薄饼中水分的自由度升高,向不易流动水和自由水转变。原本存在于MR中的两个结合水峰转变为以 $T_{22}$ 为主导的峰, $T_{21}$ 强结合水(0.1~1.0 ms)大部分已被转换成弱结合水(1~10 ms)。推测是MR的温度上升及其对部分结合水的激活所导致,同时凝胶薄饼内外温差引发的蒸气压也会推动水分子的移动<sup>[17]</sup>。因此,MR具有小的结合水面积和大的自由水面积。SR引起凝胶薄饼自身水分的损失较少,所以凝胶薄饼的结合水和不易流动水较多。SR能够为凝胶薄饼提供额外的水分补充,主要是因为一些水分子会结合到多糖分子的周围,同时还有一部分水分子被吸附至凝胶薄饼表面<sup>[18]</sup>。AR的高温风循环会破坏凝胶薄饼中水分子与其他分子的氢键导致水分蒸发和较小的峰面积<sup>[19]</sup>。FR过程中凝胶薄饼表面直接接触煎锅,凝胶薄饼表面的水分挥发且表面糊化成膜,内部水分难以逸出,因此结合水的相对含量较高。

#### 2.5 对凝胶薄饼质构特性的影响

由表4可知,复热方式对凝胶薄饼质构特性影响显著( $P < 0.05$ )。CK的硬度最低,复热凝胶薄饼的硬度均有不同程度的增加,其中MR的增加程度最大,为CK的

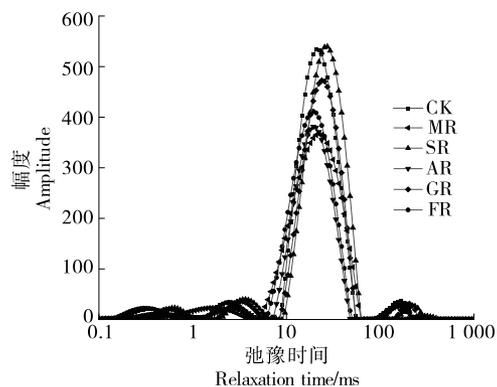


图2 复热方式对凝胶薄饼 $T_2$ 弛豫时间的影响

Figure 2 Effects of reheating mode on  $T_2$  relaxation time of gel pancakes

1.05倍,SR的最小,可能是因为CK未经过二次加热,水分保留最多。SR的胶着度最大,可能是因为SR为一种烹饪过程中拥有水分补充的方式,凝胶薄饼接触水分,其中的多糖具有强吸水性,会增加SR的胶着度,过多的水分又使得SR的弹性和咀嚼性降低。AR、GR对凝胶薄饼的质构影响较为相似,与CK相比,其硬度和胶着度有所增加,但弹性和咀嚼性无显著性变化( $P > 0.05$ )。

表4 复热方式对凝胶薄饼质构特性的影响<sup>†</sup>

Table 4 Effects of reheating method on the TPA of gel pancakes

复热方式	硬度/N	弹性	胶着度	咀嚼性
CK	0.20±0.01 <sup>b</sup>	97.69±16.72 <sup>b</sup>	17.81±0.96 <sup>b</sup>	17.44±3.44 <sup>b</sup>
MR	0.21±0.02 <sup>a</sup>	90.96±7.87 <sup>b</sup>	18.13±0.87 <sup>ab</sup>	17.11±2.11 <sup>b</sup>
SR	0.20±0.01 <sup>ab</sup>	89.28±8.83 <sup>b</sup>	18.79±1.04 <sup>a</sup>	16.20±1.90 <sup>b</sup>
AR	0.21±0.01 <sup>ab</sup>	94.03±6.12 <sup>b</sup>	18.53±1.31 <sup>ab</sup>	17.47±2.13 <sup>b</sup>
GR	0.21±0.02 <sup>a</sup>	95.20±8.06 <sup>b</sup>	18.71±1.32 <sup>a</sup>	17.81±2.03 <sup>b</sup>
FR	0.21±0.01 <sup>a</sup>	108.12±20.31 <sup>a</sup>	18.76±0.88 <sup>a</sup>	20.34±4.36 <sup>a</sup>

<sup>†</sup> 字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ )。

#### 2.6 对凝胶薄饼气味的影响

由图3可知,第一、第二主成分所占的总体贡献度高达98.77%,表明通过PCA分析能较全面地描述凝胶薄饼的风味特征。PCA分析对于识别出CK及复热组的效果良好,MR、SR、GR、AR均能清晰地被区分出来,且GR与AR、MR有部分区域存在交集,FR与CK有部分区域重叠。

#### 2.7 对凝胶薄饼滋味的影响

电子舌技术可以模仿人类的味蕾系统以评估食品的味道特性<sup>[20]</sup>。相较于传统的感官评价方法,电子舌技术可避免人为主观判断和外部环境条件对食物味道感知产

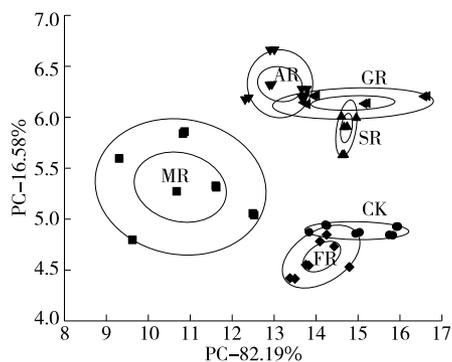


图3 复热方式对凝胶薄饼气味的影响

Figure 3 Effects of reheating method on the odor of gel pancakes

生的影响,能更准确地识别出酸、苦、涩、咸、鲜、甜六大基础口味及其对应的3种回味<sup>[21]</sup>。由表5可知,不同复热方式对凝胶薄饼的酸味、咸味、鲜味、苦味和涩味影响显著( $P < 0.05$ ),从酸味上分析,MR、SR、GR和FR的酸味值减低。从咸味上分析,复热后凝胶薄饼的咸味均显著增加,与CK相比,MR的咸度值显著增加至0.85,可能是MR的水分损失较大,导致凝胶薄饼咸味值增加,与水分含量结果一致。从苦味上分析,MR、SR和FR的苦味值显著增加( $P < 0.05$ ),其中SR的苦味值最大,AR、GR的苦味值分别为6.17,5.93,与CK相比有所降低,GR的苦味值最低。从鲜味上分析,所有复热方式均能增加凝胶薄饼的鲜味。

综上,复热能够显著增加凝胶薄饼滋味的丰富性。

### 2.8 对凝胶薄饼挥发性风味的影响

由图4可知,凝胶薄饼中检出醛类、醇类、酮类、酯类、酸类、烯烃类、酚类、吡嗪、醚类、芳香族类及其他类共113种挥发性成分。CK、MR、SR、AR、GR和FR中分别检出45,62,50,53,56,63种挥发性成分。CK中检出的挥发性成分种类最少,复热凝胶薄饼中挥发性成分种类均有不同程度的增加,如MR、GR、FR中的醛类物质;复热凝胶薄饼中的醇类物质有所增加;除SR外,复热凝胶薄饼中酯类物质的相对含量均有所提升。

SR中检出的挥发性成分相对含量最低,可能是因为汽蒸时间较长,导致部分水蒸气渗入凝胶薄饼中,气味物质被稀释,但其风味成分与CK的最为接近。MR的挥发性成分的相对含量最高,可能与其特殊的加热特性有关。MR不仅能丰富凝胶薄饼风味物质的种类,还能使其风味更加浓郁。FR的挥发性成分种类最多(63种),可能是煎制过程中直接与煎锅接触,所产生的美拉德反应产物较多。

### 2.9 对凝胶薄饼感官品质的影响

复热凝胶薄饼的质地、滋味、气味、色泽各项评估结果见表6。通过模糊矩阵计算,进一步得出模糊数学感官评价表,权重集 $K=(0.2, 0.3, 0.3, 0.2)$ 。

将4个因素中各级别的票数转化为认同比例得到模糊矩阵 $A_j$ ,即第 $j$ 个样品的模糊矩阵。根据模糊矩阵变换理论 $R = K \times A$ 得到 $j$ 样品的评价结果为

表5 复热方式对凝胶薄饼滋味的影响<sup>†</sup>

Table 5 Effects of reheating method on the flavor of gel pancakes

复热方式	酸味	咸味	鲜味	苦味	涩味
CK	$-39.14 \pm 0.00^d$	$0.17 \pm 0.00^e$	$9.78 \pm 0.00^c$	$6.78 \pm 0.00^d$	$-0.39 \pm 0.00^d$
MR	$-38.74 \pm 0.05^b$	$0.69 \pm 0.04^c$	$9.79 \pm 0.03^c$	$8.81 \pm 0.12^b$	$0.11 \pm 0.03^b$
SR	$-38.31 \pm 0.03^a$	$1.21 \pm 0.04^a$	$9.88 \pm 0.02^b$	$13.75 \pm 0.29^a$	$0.57 \pm 0.04^a$
AR	$-39.16 \pm 0.09^d$	$0.61 \pm 0.04^d$	$9.94 \pm 0.07^{ab}$	$6.17 \pm 0.08^c$	$0.01 \pm 0.06^c$
FR	$-38.74 \pm 0.04^b$	$0.85 \pm 0.02^b$	$9.91 \pm 0.02^{ab}$	$7.40 \pm 0.03^c$	$0.02 \pm 0.06^c$
GR	$-38.95 \pm 0.03^c$	$0.72 \pm 0.04^c$	$9.96 \pm 0.03^a$	$5.93 \pm 0.10^e$	$0.13 \pm 0.05^b$

<sup>†</sup> 字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ )。

表6 复热凝胶薄饼的感官评价结果

Table 6 Sensory evaluation results of gel pancakes after reheating

复热方式	质地 $U_1$			滋味 $U_2$			气味 $U_3$			色泽 $U_4$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
MR	13	5	2	11	5	4	10	7	3	13	6	1
SR	11	5	4	12	4	6	12	5	3	10	5	5
AR	14	4	2	12	6	2	13	5	2	11	5	4
GR	13	5	2	11	6	3	11	5	4	12	6	2
FR	13	6	1	10	7	3	12	6	2	13	6	1

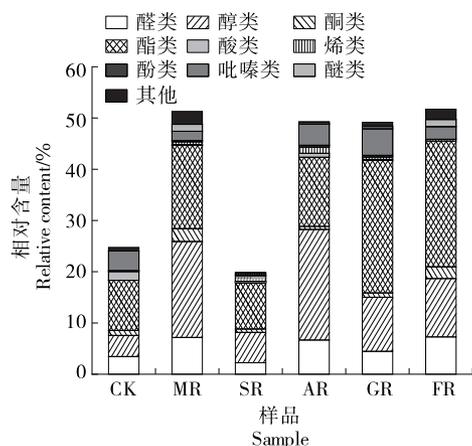


图4 复热方式对凝胶薄饼中挥发性风味物质成分相对含量的影响

Figure 4 Effects of reheating method on the relative percentage of volatile flavor components in gel pancakes

$$R_j = K \times A_j \quad (1)$$

对于优秀、良好、较差不同等级分别赋值5,3,1分,计算结果见表7。在一定程度上优秀比例反映凝胶薄饼的品质好坏,所有被测定的凝胶薄饼均具有超过50%的优秀比例,说明凝胶薄饼的食用品质至少得到1/2评定者的优秀评价认可。

表7 复热凝胶薄饼模糊数学感官评价表

Table 7 Fuzzy mathematical sensory evaluation scale for gel pancakes after reheating

复热方式	优秀比例/%	良好比例/%	较差比例/%	得分	排序
MR	57.50	29.00	13.50	3.88	3
SR	57.00	23.50	22.50	3.78	5
AR	62.50	25.50	12.00	4.01	2
GR	58.00	27.50	14.50	3.87	4
FR	60.00	31.50	9.50	4.04	1

AR的优秀率最高,为62.50%,其次为FR;SR的优秀比例最低且较差比例最高。不同复热凝胶薄饼感官评价得分排序为FR>AR>MR>GR>SR。

### 3 结论

试验表明,复热均会降低凝胶薄饼的L\*值,增加a\*值和b\*值,除汽蒸复热外,其他复热方式都会使凝胶薄饼的白度降低。微波复热和烘烤复热对凝胶薄饼的水分损失影响较大,复热后的水分含量分别为53.07%和56.67%,汽蒸复热、空气炸复热和煎制复热对水分损失影响较小,与CK相比分别减少了2.16%,3.60%,4.06%。除煎制复

热外,经其他复热方式处理的凝胶薄饼的结合水向右迁移,向不易流动水和自由水转变,水分的自由度升高。不同复热方式会不同程度地增加凝胶薄饼的硬度,其中微波复热的增加程度最大,汽蒸复热的最小。复热可增加凝胶薄饼滋味的丰富性,提升凝胶薄饼的咸味值和鲜味值,其中微波复热、汽蒸复热和煎制复热的苦味值显著增加,微波复热、汽蒸复热、烘烤复热和煎制复热的酸味值降低。复热可以丰富凝胶薄饼风味物质的种类和相对含量,其中汽蒸复热会造成风味物质的稀释,微波复热和煎制复热会增加凝胶薄饼风味物质的种类,且其风味更加浓郁。煎制复热的感官评分最高。综合考虑所有因素,凝胶薄饼使用煎制复热较为适合,其次为微波复热。试验仅对比了常见复热方式对薄饼宏观表征的影响,并未涉及复热方式对薄饼微观结构及内部变化的分析,后续可深入研究。

### 参考文献

[1] SPEAKMAN J R, HALL K D. Carbohydrates, insulin, and obesity[J]. Science, 2021, 372(6 542): 577-578.

[2] SONG Y, ZHANG H D, HUANG F, et al. Changes in eating quality and oxidation deterioration of pork steaks cooked by different methods during refrigerated storage[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2022, 29: 100576.

[3] 赵颖颖,李三影,闫路辉,等.不同复热方式对糖醋排骨品质的影响[J].中国调味品,2021,46(7):52-59.

ZHAO Y Y, LI S Y, YAN L H, et al. Effects of different reheating methods on the quality of sweet and sour pork ribs[J]. China Condiment, 2021, 46(7): 52-59.

[4] 王源溯,尚珊,丁若松,等.不同复热方式对预制烤鱼品质的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(1):248-255.

WANG Y Y, SHANG S, DING R S, et al. Effects of different reheating methods on quality of pre-roasted fish[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(1): 248-255.

[5] 杨菁,励建荣,李学鹏,等.车前子壳粉-未漂洗鱼糜模拟主食面团的流变及凝胶性质[J].食品科学技术学报,2024,42(3):114-125.

YANG J, LI J R, LI X P, et al. Rheology and gel properties of psyllium husk powder-unrinsed surimi imitative dough[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(3): 114-125.

[6] YI S M, LI Q, QIAO C P, et al. Myofibrillar protein conformation enhance gel properties of mixed surimi gels with Nemiapterus virgatus and Hypophthalmichthys molitrix[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 106: 105924.

[7] 杨菁,励建荣,李学鹏,等.车前子壳粉-秘鲁鲷鱼鱼糜复合凝胶仿制面条的品质特性[J].食品工业科技,2024,45(10):40-48.

YANG J, LI J R, LI X P, et al. Quality properties of Psyllium husk powder-Dosidicus gigas surimi composite gel imitation

- noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 40-48.
- [8] 米红波, 王聪, 赵博, 等. 大豆油、亚麻籽油和紫苏籽油对草鱼鱼糜品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 60-64, 73.
- MI H B, WANG C, ZHAO B, et al. Effects of soybean, flaxseed and perilla seed oils on the quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) surimi gels[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(18): 60-64, 73.
- [9] 刘新然, 李海露, 李学鹏, 等. 杀菌方式对卤制风味四角蛤蜊产品贮藏品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8 210-8 218.
- LIU X R, LI H L, LI X P, et al. Effects of sterilization methods on the storage quality of Marinated *Macra quadrangularis*[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(22): 8 210-8 218.
- [10] 李双艳, 邓力, 汪孝, 等. 基于电子鼻、电子舌比较分析冷藏方式对小香鸡风味的影响[J]. 肉类研究, 2017, 31(4): 50-55.
- LI S Y, DENG L, WANG X, et al. Comparative analysis of the effect of different storage methods on the flavor of small fragrant chicken broth by electronic nose and electronic tongue [J]. Meat Research, 2017, 31(4): 50-55.
- [11] 张琦梦, 顾华蓉, 穆洪涛, 等. 基于 GC-MS 分析传统鱼露发酵过程中挥发性风味物质变化[J]. 中国酿造, 2022, 41(9): 242-251.
- ZHANG Q M, GU H R, MU H T, et al. Analysis of volatile flavor components of traditional Chinese fish sauce during fermentation by GC-MS[J]. China Brewing, 2022, 41(9): 242-251.
- [12] VOLLMER M. Physics of the microwave oven[J]. Physics Education, 2004, 39(1): 74-81.
- [13] WANG R, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Effect of salt and sucrose content on dielectric properties and microwave freeze drying behavior of re-structured potato slices[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(4): 290-297.
- [14] FERREIRA V C S, MORCUENDE D, MADRUGA M S, et al. Effect of pre-cooking methods on the chemical and sensory deterioration of ready-to-eat chicken patties during chilled storage and microwave reheating[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(6): 2 760-2 769.
- [15] 胡力, 王芳梅, 吕明珊, 等. 不同贮藏温度下真空包装鸡肉酱品质变化及货架期模型的建立[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 132-138.
- HU L, WANG F M, LU M S, et al. Quality changes during storage at different temperatures and establishment of shelf-life model of vacuum packaged chicken paste[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(10): 132-138.
- [16] 刘雅娜, 苏里阳, 魏小溪, 等. 不同复热方式对烤全羊食用品质及挥发性风味物质的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(6): 124-127.
- LIU Y N, SU L Y, WEI X X, et al. Effect of eating quality and the volatile flavor in roast whole lamb by different reheating ways[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(6): 123-127.
- [17] 齐力娜, 程裕东, 金银哲. 改善可微波预油炸食品脆性的研究进展[J]. 食品工业, 2014, 35(12): 199-203.
- QI L A, CHENG Y D, JIN Y Z. Research progress on improving the crispness of microwavable pre-fried product[J]. The Food Industry, 2014, 35(12): 199-203.
- [18] 王秋玉, 章海风, 朱文政, 等. 不同加热方式对冷冻豆沙包食用品质及挥发性物质的比较分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(6): 266-275.
- WANG Q Y, ZHANG H F, ZHU W Z, et al. Effects of heating methods on quality and volatile substance contents of frozen red bean paste buns[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(6): 266-275.
- [19] 王君, 王颖, 陈喆, 等. 空气煎炸技术应用于食品加工的研究进展[J]. 美食研究, 2021, 38(2): 49-53.
- WANG J, WANG Y, CHEN Z, et al. Research progress of air frying technology in food processing[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2021, 38(2): 49-53.
- [20] 黄嘉丽, 黄宝华, 卢宇靖, 等. 电子舌检测技术及其在食品领域的应用研究进展[J]. 中国调味品, 2019, 44(5): 189-193, 196.
- HUANG J L, HUANG B H, LU Y J, et al. Detection technology of electronic tongue and its application in food field [J]. China Condiment, 2019, 44(5): 189-193, 196.
- [21] 董蕴, 张一涵, 杨小丽, 等. 基于电子舌技术对甜面酱滋味品质的评价[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(1): 121-126.
- DONG W, ZHANG Y H, YANG X L, et al. Taste profile evaluation of wheat paste by electronic tongue analysis[J]. Storage and Process, 2019, 19(1): 121-126.