DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251231003
引用格式: 陈科环, 杨树婷, 国冉, 等. 气相色谱-质谱/嗅闻法分析不同烹饪方式对乳扇风味的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(7): 305–314.
CHEN KH, YANG ST, GUO R, *et al*. Analysis of the influences of different cooking methods on the flavor of rushan by gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(7): 305–314. (in Chinese with English abstract).

气相色谱-质谱/嗅闻法分析不同烹饪方式对乳扇风味的影响

陈科环, 杨树婷, 国　冉, 赵心月, 李佳霓, 段友琴, 刀筱芳, 陈　娟*
(西南民族大学药学与食品学院, 成都　610225)

摘　要: 目的　探究不同的烹饪方式对乳扇挥发性风味的影响。**方法**　以生食及微波、油炸、煎烤 3 种烹饪方式对乳扇进行加工处理, 利用气相色谱-质谱/嗅闻法(gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry, GC-MS/O)和感官评价进行综合分析。**结果**　微波处理后的乳扇酸类和酯类物质含量明显增加, 丁酸、己酸、己酸乙酯等化合物的香气活力值(odour activity value, OAV)和香气稀释因子(flavor dilution factor, FD)较高, 是微波处理后产品中的气味活性化合物, 增加了其酸味和水果香气; 油炸处理促使乳扇发生美拉德反应等, 增加了顺-2,4-癸二烯醛等 OAV 和 FD 较高的化合物, 感官评价结果表明油脂香和焦香风味突出; 煎烤处理后的乳扇中反-2-十二烯醛、2-庚醇等化合物的 OAV 和 FD 因子较高, 增加了产品的油脂香和酒香味。**结论**　不同烹饪方式改变了乳扇的感官特征与挥发性风味物质, 研究结果为消费者选择喜欢的加工方式提供了参考, 同时为乳扇的深加工及即食乳扇的开发提供了理论依据。

关键词: 乳扇; 烹饪方式; 风味; 气相色谱-质谱/嗅闻法; 感官评价

Analysis of the influences of different cooking methods on the flavor of rushan by gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry

CHEN Ke-Huan, YANG Shu-Ting, GUO Ran, ZHAO Xin-Yue, LI Jia-Ni,
DUAN You-Qin, DAO Xiao-Fang, CHEN Juan*
(*College of Pharmacy and Food*, *Southwest Minzu University*, *Chengdu* 610225, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate the effects of different cooking methods on the volatile flavor of rushan. **Methods**　Raw rushan was processed by 3 kinds of cooking methods, including microwave irradiation, deep-frying, and pan-roasting, and analyzed by gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry (GC-MS/O) combined with sensory evaluation. **Results**　The content of acids and esters in rushan treated with microwave irradiation increased

收稿日期: 2025-12-31
基金项目: 四川省自然科学基金面上项目(2025ZNSFSC0226); 2025 年中央高校基本科研业务费专项资金研究类项目(ZYN2025115, ZYN2025247)
第一作者: 陈科环(2003—), 女, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: 1834428730@qq.com
***通信作者:** 陈娟(1980—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为食品微生物与食品安全。E-mail: chenj1221@126.com

significantly increased. Compounds including butyric acid, hexanoic acid and ethyl hexanoate exhibited high odor activity values (OAV) and flavor dilution factors (FD), which were identified as the odor-active compounds in microwaved rushan, contributing to enhanced sour and fruity notes. In deep-fried rushan, compounds such as *cis*-2,4-decadienal were generated via processes like the Maillard reaction, with high OAV and FD factors; sensory evaluation indicated prominent oily and roasted notes. For pan-roasted rushan, compounds including *trans*-2-dodecenal and 2-heptanol showed high OAV and FD factors, imparting increased oily and wine-like aromas to the product. **Conclusion** Sensory attributes and volatile flavors of rushan were altered by different cooking methods. The findings provide a reference for consumers to select preferred cooking methods, and also lay a theoretical foundation for the further processing of rushan and the development of ready-to-eat rushan products.

KEY WORDS: rushan; cooking method; flavor; gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry; sensory evaluation

0 引 言

乳扇是云南大理白族人民的特色风味食品[1]，根据其工艺可分类为传统拉伸型干酪[2]。乳扇在发酵过程中，多种微生物对乳扇的成熟及其独特风味的形成有着重要作用，主要包括乳杆菌属、乳球菌属、醋杆菌属等细菌[3–4]，同时还包括红酵母属、路德酵母属、德巴利酵母属等真菌[5]对其特征风味物质的形成也有着重要贡献，这些微生物通过其复杂的代谢途径和相互作用产生多种多样的香气物质，共同促进了乳扇独特风味的形成。乳扇富含蛋白质、钙、磷、镁等矿物质以及多种维生素，尤其是钙含量较高，对补充钙质、增强体质有一定益处，适合缺钙人群食用，且对于有乳糖不耐症的人群来说，也是一种不错的奶制品选择[6]。

对于乳扇的研究目前集中在其加工工艺、菌种特性等方面。加工工艺方面，黄艾祥等[7]研究了凝乳条件对乳扇品质的影响，得出凝乳方式和凝乳 pH 对乳扇的感官、理化指标、拉伸性、油脂析出性和烹饪性均具有显著影响。窦玉萍等[8]研究了工艺条件对传统乳扇出品率和加工特性的影响，得到乳扇的最佳工艺条件为凝乳温度 65 ℃、凝乳时间 60 s、热烫 pH 4.8、热烫拉伸温度 70 ℃、热烫拉伸时间 3 min。杨绍芬等[9]在乳扇传统加工工艺的基础上，结合意大利干酪加工技术，研究出了乳扇加工新工艺。肖梦林等[10]探究了巴氏杀菌和涂抹保鲜剂两种工艺处理对乳扇贮藏品质的影响。王亚东等[11]探究了新鲜乳扇贮存过程中香气组成变化。菌种分离鉴定方面，黄柯等[12]通过分离鉴定乳扇中的产香优势菌株植物乳杆菌和胶红酵母，制备香气强化发酵剂，有效改善了乳扇香气品质。张以芳等[13]对乳扇制品中乳杆菌分离鉴定及其发酵性能进行了研究，确认干酪乳杆菌、德氏乳杆菌、发酵乳杆菌及植物乳杆菌等 4 种乳杆菌是乳扇制品中的优势种群。上述研究为乳扇在加工与贮藏过程中特定品质的形成奠定了基础。

然而，对于不同烹饪方式对乳扇风味变化影响方面的研究还较少。乳扇的烹饪方式多样，包括生食、煎、烤、炸以及和其他食材一起炒、烩等[14]，其口感独特，生吃时，味道鲜醇清香，原汁原味，奶香气十足，但味道偏淡；经过煎、烤、炸等烹饪方式后，外皮变得酥脆，内部则保持柔软，香甜可口，同时增加了坚果、焦糖等香味。目前有陈臣等[15]利用顶空固相微萃取/气相色谱-质谱仪(headspace solid microextraction/gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME/GC-MS)、气相色谱-嗅闻技术(gas chromatography-olfactometry, GC-O)及电子鼻研究了大理杨记乳扇生食与微波、油炸和焙烤对乳扇风味的影响；廖紫玉等[16]采用 HS-SPME/GC-MS 分析并比较了大理陶记乳扇生食、油炸、空气煎炸的风味品质。

近年来，中央厨房产品理念日益加强，各种预制菜、即食食品层出不穷，对于传统食品的规模化、工业化、深加工要求不断提高。大理的传统美食已经打破地域限制，走出产地，走向各地，受到越来越多消费者的喜爱。乳扇作为云南大理特色食品的重要代表之一，深受广大消费者欢迎，但生乳扇口味独特，消费者对其风味适应性较低，而烹饪乳扇不仅可以改善食物口感，提高食品适口性，而且可以提高消费者接受度和购买欲，同时即食乳扇的开发也极大程度上方便了消费者的食用，促进其市场发展。然而，乳扇产品的深加工正是当下面临的主要难题之一。精准且系统的风味评价是解决这个难题的重要手段之一，是实现乳扇产品“工业化、标准化”的基础。

本研究探究了乳扇的 4 种食用方式(生食与微波、油炸、煎烤加工)对其感官风味的影响，利用 GC-MS 技术分析不同加工方式加工的乳扇中的风味物质，通过 GC-O 技术分析香气物质稀释因子(flavor dilution factor, FD)，然后结合香气活力值(odour activity value, OAV)确定特征香气物质，同时采用感官评价对不同加工样品进行区分与验证，分析乳扇感官特性与特征香气物质之间的关联性。研究结果可为乳扇产品的深加工和即食乳扇的开发提供理论依据与数据支撑，也可为消费者选择更合适的乳扇食用方式提供参考依据。

1　材料与方法

1.1　材料、试剂与仪器

乳扇(云南大理杨记乳扇)。

环己酮(分析纯, 成都化夏化学试剂有限公司); 丙酮(分析纯, 成都科隆化学品有限公司); 食用油(金龙鱼 1:1:1 调和油); C7-C40 正构烷烃标准品(色谱纯, 上海安普实验科技股份有限公司)。

ME403E 分析天平(精度 0.001 g, 瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司); TRACE-1600 型气相色谱仪、ISQ 7610 单四极杆质谱仪、Tril Plus RSH SMART 二合一自动进样器、TR-FFAP 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国赛默飞世尔科技有限公司); ODP4 嗅闻仪(德国哲斯泰贸易有限公司)。

1.2　实验方法

1.2.1　样品制备

将同一批次生产的乳扇样品于–20 ℃冷冻保藏。将预先解冻好的乳扇进行切分(4 cm×5 cm), 分别取 200 g 切分好的乳扇样品于 4 ℃保存备用。

(1)生食处理。不做处理, 直接切碎混合均匀。

(2)微波处理。将切分好的乳扇不重叠地摆放于瓷盘中, 放入微波炉内, 于 100 ℃加热 1 min, 成品充分切碎后混合。

(3)油炸处理。锅中倒入适量的菜籽油, 小火加热, 控制油温在 150 ℃左右(用红外测温枪测定温度)。将切分好的乳扇放入锅中炸 1 min 至两面呈金黄色即可, 捞出控油, 成品充分切碎后混合。

(4)煎烤处理。平底锅加热, 控制温度在 130 ℃左右(用红外测温枪测定温度), 将切分好的乳扇不重叠地放入锅中, 烤制 1 min, 成品充分切碎后混合。

1.2.2　HS-SPME/GC-MS 分析

采用 HS-SPME/GC-MS 技术测定生食与 3 种烹饪方式处理后乳扇样品中的挥发性化合物, 每个样品平行测定 3 次。定性与定量分析方法参照 CHEN 等[17]报道的方法, 修改之处包括: 采用热电 TRACE-1600 型气相色谱串联 ISQ 7610 单四极杆质谱, 配制 TriPlus RSH SMART 二合一自动进样器。采用 TR-FFAP 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm), 升温程序: 初始温度设置为 40.0 ℃, 保持温度 3 min, 然后以 5 ℃/min 的升温速率升温至 230 ℃, 保持 5 min。物质的定性分析通过将检测到的化合物的质谱图与 NIST 14 谱库中标准化合物的质谱图进行比较, 并结合保留指数; 物质的定量分析采用内标半定量法计算。

1.2.3　GC-O 分析

采用稀释至阈值法进行 GC-O 分析, 除色谱分离条件中分流比外, 样品的提取条件、色谱分离条件和质谱检测条件与 HS-SPME/GC-MS 条件一致。采用香气提取物稀释分析(aroma extraction dilution analysis, AEDA)[18–19], 将样品按照 2^n 的梯度进行梯度稀释, 按照稀释梯度调整分流比稀释提取到的香气成分, 然后从 GC-O 端输出, 不断稀释直至无法闻到气味化合物的香气为止, 此时的稀释倍数即为该化合物的 FD, 通常用 FD 来表征香气活性成分的贡献大小, FD 越大, 则香气特征作用越大, 其对整体风味的贡献越大。

1.2.4　气味活性化合物风味贡献度分析

化合物在样品中的阈值大小与浓度高低共同决定了其对整体风味的贡献程度[20–21], 由此提出了气味活性值(odor activity value, OAV)的概念, OAV 即为挥发性成分在样品基质中的浓度与其阈值的比值, 计算见公式(1)。

$$\mathrm{OAV}=\frac{C}{T} \tag{1}$$

式中: C 为测定挥发性风味物质的质量浓度, μg/kg; T 为相同物质的风味阈值, μg/kg。OAV>1 且能够通过 GC-O 端嗅闻到的化合物即为气味活性化合物。

1.2.5　风味感官评价分析

参照陈臣等[15]报道的定量描述感官评价法, 对 4 种乳扇样品进行感官分析, 评价小组由 11 名成员组成, 包括 5 名男性和 6 名女性, 平均年龄为 23 岁。实验前评价人员均依据 ISO 4121《Sensory analysis-guidelines for the use of quantitative response scales》进行专业的感官培训且合格。选取 10 种参考物, 描述 10 种香气特征, 包括水果味、硫味、干酪味、坚果味、腐臭味、酸味、脂肪味、焦香味、牛奶味、酒味。评价结果采用 10 分制打分(0 分表示未嗅闻到, 10 分表示气味极强, 如表 1 所示), 每个样品重复评价 3 次, 记录各评价人员的评分结果, 最后取平均值即为香气强度值。

表 1　不同烹饪方式后乳扇气味感官评价表
Table 1　Sensory evaluation table of the odor of Rushan after different cooking methods

项目	评分标准	分值
气味	气味极强、非常浓郁、特别明显	10
	气味强、浓郁、明显	7~9
	气味较强、较明显	4~6
	有气味、但不明显	1~3
	未嗅闻到气味	0

1.3　数据处理

采用 WPS Office 2025 绘制表格和分析平均值与标准偏差, 采用 Origin 2021 绘制感官评价雷达图。HS-SPME/GC-MS 分析、GC-O 分析及风味感官评价实验均重复测定 3 次。

2 结果与分析

2.1 挥发性化合物结果分析

生食与 3 种加工处理后乳扇的挥发性物质的含量、阈值及其 OAV 如表 2 所示。从表 2 可以看出, 生食与微波、油炸、煎烤 3 种加工方式处理后的乳扇样品分别检出 61、64、61、64 种挥发性化合物, 以酮类、酯类、酸类、醛类以及醇类物质为主, 同时含有少量的呋喃、烷烃、烯烃、内酯等其他物质。食品在加工过程中会发生多种反应, 包括美拉德反应、脂肪氧化、蛋白质分解和焦糖化反应等, 这些生化反应会产生多种芳香化合物, 能够很大程度上丰富食品的风味体系, 因此在改善食品风味方面有很重要的作用[22]。

由表 2 可以看出, 未经过加工的生食乳扇, 通过 GC-MS 检出的挥发性化合物主要包括 22 种酸类、25 种酯类、6 种酮类和 2 种醛类物质, 这些挥发性风味物质主要来自乳扇发酵过程中发生的一系列生化反应, 包括脂质、蛋白质等营养物质的氧化反应及乳扇中各种微生物的代谢反应等, 其代谢产物及其衍生物共同构成了乳扇独特的整体风味。生食乳扇中酸类和酯类物质的数量和含量较其他物质更高, 这是因为乳扇中的优势微生物如乳酸菌和酵母菌在乳扇特征风味形成过程中具有重要贡献[23−24]。JIANG 等[25]通过对原料乳、酸乳清、乳酪乳清和乳扇中微生物多样性和风味物质分析, 发现生食乳扇中优势乳杆菌属(*Lactobacillus*)相对丰度的变化与癸酸、十二烷酸和十四烷酸等多种脂肪酸的积累呈正相关。CHEN 等[26]对酸汁发酵和乳扇干燥过程进行分析, 发现乳扇在制作过程中乳球菌属(*Lactococcus*)相对丰度变化与丁酸、乙酸乙酯等物质产量呈显著正相关。同时, CHEN 等[5]分析了来自 6 个不同地区的 18 个乳扇样品的微生物菌群及其对挥发性风味特征的影响, 相关性分析表明优势红酵母属(*Rhodotorula*)、路德酵母属(*Lodderomyces*)和德巴利酵母属(*Debaryomyces*)分别与多种挥发性成分呈正相关, 这些物质构成了乳扇的特征挥发性风味; 其中, 红酵母属与庚酸、辛酸、癸酸和丁酸乙丁酯呈正相关。其次, 生食乳扇中酮类物质的数量也较多, 有 2-庚酮、2-壬酮、2-十一酮等, 这些物质是由乳扇中的脂质在 β-氧化过程中产生的, 虽然含量较低, 但对整体风味也有重要作用。生食乳扇中还检出 2 种醛类物质, 没有检出醇类物质。酯类和酮类物质具有独特的风味和较低的阈值, 通常能够赋予奶酪香、花香、水果香以及甜味等, 是乳扇特征风味组成的重要来源。

微波、油炸、煎烤 3 种加工方式处理后的乳扇样品中生成了多种美拉德反应、焦糖化反应和脂肪氧化的产物, 这些物质通常能够为乳扇提供烘烤香、焦香、坚果香、爆米花香等芳香气味, 提升乳扇的整体风味[27]。微波处理后的乳扇样品酸类、酯类、酮类和醇类物质含量均明显增加, 尤其是酸类物质含量大幅度提升, 如己酸含量从生食的 194.16 μg/g 增加到 247.79 μg/g, 辛酸含量从生食的 242.94 μg/g 增加到 283.79 μg/g, 月桂酸含量从生食的 136.79 μg/g 增加到 153.05 μg/g。陈臣等[15]研究也发现微波处理后的乳扇中酸类物质含量明显增加, 与本研究结果一致。同时, 除少数酯类物质外, 微波处理使大部分酯类物质含量有所增加, 如辛酸乙酯含量从生食样品的 21.24 μg/g 升高至 34.11 μg/g, 癸酸乙酯含量从生食样品的 50.80 μg/g 增加到 90.40 μg/g, 乙基-9-癸烯酸酯含量从生食样品的 6.15 μg/g 增加到 11.64 μg/g。结果表明微波处理能够使传热更快更强, 促使乳扇内部发生反应, 生成更多的酸类和酯类等挥发性物质, 这些物质通常能够散发果香、花香和酸甜味等气味, 所以微波处理能够丰富乳扇的果香、酸甜香等风味, 使乳扇整体风味更加清新。GULZAR 等[28]采用描述性感官分析方法评价了 Mozzarella 和 Cheddar 干酪经微波和传统加热后的感官属性变化, 结果表明与传统加热改善干酪的质构特征相比, 微波加热能够赋予干酪更好的风味特征。该研究结果与本研究所得结果均证明微波加热是一种改善干酪风味特征的理想加工方式。

油炸处理由于高温使大部分挥发性物质有所损失, 但仍有部分醛类和酯类等挥发性物质含量增加, 如反-2-癸烯醛含量从生食的 0.29 μg/g 增加到 2.04 μg/g, 丁酸乙酯从生食的 6.33 μg/g 增加到 7.48 μg/g; 而且还产生了一些新的挥发性化合物, 如 2,3-二氢-3,5 二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮(又名麦芽酚), 它具有甜香、焦糖香、水果香和烤香等气味[29]; 以及顺-2,4-癸二烯醛和反-2,4-癸二烯醛, 这些物质通常与油脂氧化相关, 呈现出油脂香味[30]。这些酮类和醛类物质赋予了乳扇特殊的风味, 使乳扇带有一些焦香和特殊的油脂香气, 风味更加浓郁、厚重。

煎烤处理后的乳扇, 酮类、醛类等挥发性物质含量明显增加, 如 2-庚酮、2-壬酮、2-十一酮、2-十三酮经煎烤处理后含量比生食乳扇均有所提高, 反-2-癸烯醛和反-2-十二烯醛在煎烤样品中的含量也大幅提高且明显高于其他处理方式, 说明煎烤促进了这些物质的生成。同时, 煎烤后的乳扇还产生了很多醇类物质, 如 2-庚醇、辛醇等仅在煎烤样品中出现, 这些物质具有花香、酒香气味。可以看出, 煎烤不仅能丰富乳扇的果香、酸甜香, 产生焦香、油脂香等气味, 还生成了花香、酒香等气味, 使乳扇风味更加醇厚, 丰富了乳扇的风味层次。

2.2 气味活性化合物结果分析

为进一步得到乳扇中的气味活性化合物及其对乳扇整体风味的贡献度, 采用 AEDA 法对不同加工方式处理后的乳扇样品进行 GC-O 分析, 得到不同加工方式处理后乳扇中能够被嗅闻到的香气物质的稀释因子, 结果如表 3 所示。同时, 结合表 2 中各物质的 OAV, 根据 OAV 大于 1 且能够通过 GC-O 端嗅闻到的化合物即为气味活性化合物, 可得出在生食与微波、油炸、煎烤 3 种加工方式处理后的乳扇样品分别含有 10、12、14、12 种气味活性化合物。

表 2　不同加工方式乳扇中挥发性物质含量及其 OAV 值

Table 2　Content and OAV values of volatile compounds in rushan with different processing methods

挥发性物质		RI		含量/(μg/g)				阈值/	OAV			
		计算值	理论值	原味	微波	油炸	煎烤	(μg/kg)	原味	微波	油炸	煎烤
酮类 (7 种)	2-庚酮	1120	1181	1.38±0.03	1.10±0.03	1.44±0.04	1.52±0.05	0.1400	10	8	10	11
	2-壬酮	1393	1372	0.64±0.02	0.59±0.04	0.53±0.07	0.86±0.01	0.0041	157	143	130	211
	2-十一酮	1653	1579	1.67±0.10	1.84±0.12	1.21±0.09	1.78±0.18	0.0055	304	335	220	323
	2-十三酮	2095	2029	0.79±0.04	2.80±0.33	ND	2.79±0.12	-	-	-	0	-
	2-十五酮	1885	1818	2.28±0.14	1.14±0.08	0.36±0.00	0.84±0.03	-	-	-	-	-
	麦芽酚	2317	2311	ND	ND	0.85±0.04	ND	35.0000	0	0	<1	0
	甘油醇缩丙酮	1662	-	0.19±0.00	ND	ND	ND	-	-	0	0	0
酯类 (35 种)	丁酸乙酯	945	1048	6.33±0.50	7.96±0.01	7.48±2.83	13.41±3.21	0.0009	7037	8843	8309	14901
	丁酸-2-戊酯	1158	1214	0.15±0.05	0.83±0.22	ND	0.43±0.04	0.0440	3	19	0	10
	己酸乙酯	1185	1244	25.37±0.54	29.71±0.19	19.76±1.69	30.12±6.87	0.0050	5074	5942	3952	6024
	己酸丙酯	1299	1339	0.18±0.04	0.40±0.09	ND	ND	-	-	-	0	0
	庚酸乙酯	1320	1341	0.11±0.02	0.15±0.05	0.11±0.02	ND	0.0019	60	78	60	0
	2-甲基丁基己酸酯	1410	1418	0.91±0.14	ND	2.56±0.47	ND	0.0320	28	0	80	0
	辛酸乙酯	1450	1422	21.24±1.00	34.11±4.05	20.66±6.36	30.99±14.15	0.0193	1100	1767	1070	1605
	壬酸乙酯	1577	1526	0.38±0.08	0.53±0.27	0.38±0.17	0.66±0.26	0.3770	<1	1	1	2
	3-庚基己酸酯	1640	-	0.12±0.02	0.39±0.66	0.25±0.04	0.32±0.48	-	-	-	-	-
	己酸己酯	1666	1621	0.15±0.02	0.30±0.02	ND	0.23±0.04	6.4000	<1	<1	<1	0
	癸酸异丙酯	1691	1615	0.57±0.12	2.25±0.48	1.54±0.37	1.42±0.30	-	-	-	-	-
	癸酸乙酯	1697	1615	50.80±13.00	90.40±23.05	51.73±12.01	78.5±21.82	0.0050	10160	18079	10347	15699
	乙基-9-癸烯酸酯	1754	1675	6.15±2.09	11.64±4.24	5.84±2.20	9.17±3.25	-	-	-	-	-
	1,2-丙二醇丁酸酯	1775	-	0.81±0.21	2.06±0.48	0.99±0.22	1.21±0.32	-	-	-	-	-
	癸酸丙酯	1791	1725	0.36±0.06	0.73±0.13	0.29±0.05	0.67±0.11	-	-	-	-	-
	1,2-丙二醇丁酸酯	1816	-	0.29±0.07	0.69±0.21	0.43±0.12	0.41±0.11	-	-	-	-	-
	1,2-丙二醇二丁酸酯	1855	-	0.15±0.02	0.47±0.12	0.18±0.04	0.24±0.07	-	-	-	-	-
	1-甲基丁基癸酸酯	1878	-	0.82±0.23	1.78±0.61	0.71±0.19	0.90±0.24	-	-	-	-	-
	十三酸乙酯	2022	1943	0.42±0.08	0.76±0.33	ND	0.40±0.15	-	-	-	0	-
	十一酸乙酯	2076	-	0.35±0.06	ND	ND	ND	0.0003	1182	0	0	0
	肉豆蔻酸异丙酯	2117	2041	0.41±0.05	0.89±0.15	0.40±0.07	0.48±0.08	-	-	-	-	-
	9-十四烯酸乙酯	2155	-	8.22±0.79	4.79±0.53	2.20±0.19	3.39±0.51	-	-	-	-	-
	十五酸乙酯	2217	2179	2.27±0.40	1.54±0.64	0.66±0.21	1.03±0.43	-	-	-	-	-
	棕榈酸乙酯	2315	2261	11.64±1.90	13.80±2.01	5.59±1.17	10.54±3.11	2.0000	6	7	3	5
	邻苯二甲酸二甲酯	2347	2303	0.30±0.03	0.39±0.05	ND	0.40±0.03	-	-	-	0	-
	正己酸 3-戊酯	1413	-	ND	3.42±0.56	ND	2.78±0.38	-	0	-	0	-
	辛酸丙酯	1558	1526	ND	0.29±0.02	0.12±0.00	0.31±0.03	-	0	-	-	-
	辛酸-1-乙基丙酯	1655	-	ND	2.62±0.02	1.46±0.21	1.41±0.22	-	0	-	-	-
	月桂酸丙酯	2004	1927	ND	0.50±0.05	ND	ND	-	0	-	0	0
	十四酸乙酯	2076	2055	ND	0.72±0.21	10.96±3.51	ND	4.0000	0	<1	3	0
	15-甲基十六酸乙酯	2185	-	ND	0.79±0.30	ND	ND	-	0	-	0	0
	磷酸三乙酯	1720	1672	ND	ND	0.63±0.05	ND	-	0	0	-	0
	十二酸-1-甲基乙基酯	1914	1845	ND	ND	0.64±0.04	ND	-	0	0	-	0
	9-癸烯酸丁酯	1746	-	ND	ND	ND	0.19±0.03	-	0	0	0	-
	丁酸甘油酯	2398	-	ND	ND	ND	7.89±2.01	-	0	0	0	-
酸类 (24 种)	丙酸	1583	1534	0.19±0.02	0.13±0.01	0.13±0.01	0.28±0.05	2.1900	<1	<1	<1	<1
	丁酸	1676	1624	158.32±30.89	162.14±29.88	145.49±12.67	200.43±31.77	2.4000	66	68	61	84

表 2(续)

挥发性物质		RI		含量/(μg/g)				阈值/	OAV			
		计算值	理论值	原味	微波	油炸	煎烤	(μg/kg)	原味	微波	油炸	煎烤
	丙二酸	1474	-	8.09±1.68	5.92±0.89	3.94±0.50	7.89±0.10	-	-	-	-	-
	戊酸	1807	1733	2.73±0.35	2.14±0.05	1.83±0.08	2.98±0.41	17.0000	<1	<1	<1	<1
	己酸	1920	1839	194.16±23.47	247.79±41.79	183.12±28.79	246.32±33.45	0.8900	218	278	206	277
	庚酸	2028	1946	3.81±0.09	5.37±1.01	3.19±0.67	5.42±0.89	0.6400	6	8	5	8
	辛酸	2134	2068	242.94±20.89	283.79±19.66	247.91±21.57	303.31±29.93	3.0000	81	95	83	101
	壬酸	2230	2165	8.52±1.76	7.81±0.98	4.66±0.65	7.62±1.22	4.6000	2	2	1	2
	癸酸	2328	2270	294.80±5.54	309.20±67.90	222.30±26.65	292.56±26.65	10.0000	29	31	22	29
	9-癸烯酸	2377	2357	81.94±20.88	81.90±23.44	53.92±10.34	76.28±16.66	4.3000	19	19	13	18
	十一烷酸	2414	2398	18.27±1.34	25.55±4.34	13.71±1.79	17.32±5.98	10.0000	2	3	1	2
	月桂酸	2503	2475	136.79±36.88	153.05±45.67	129.68±20.84	116.83±23.56	10.0000	14	15	13	12
	10-十一烯酸	2551	-	4.39±1.89	2.39±1.21	ND	3.85±1.64	2.3000	2	1	0	2
	十三酸	2585	2651	1.32±0.21	1.37±0.30	0.69±0.27	1.18±0.13	10.0000	<1	<1	<1	<1
	8-甲基壬酸	2627	-	1.77±0.16	1.68±0.15	0.80±0.14	1.59±0.28	0.6600	3	3	1	2
	肉豆蔻酸	2666	2708	80.80±29.10	86.09±29.19	53.86±18.74	81.90±26.01	10.0000	8	9	5	8
	E-11-十四烯酸	2700	-	18.85±1.65	20.03±3.78	ND	14.56±1.60	-	-	-	0	-
	十五酸	2743	2809	5.77±0.92	5.68±0.89	0.86±0.18	5.02±0.79	10.0000	<1	<1	<1	<1
	棕榈酸	2829	2940	22.28±3.91	24.97±3.11	8.88±0.67	27.24±3.61	10.0000	2	2	<1	3
	棕榈油酸	2862	2960	4.27±0.67	6.32±0.71	ND	5.33±2.00	11.0000	<1	<1	0	<1
	油酸	3111	3184	3.10±0.52	4.22±0.34	1.32±0.13	2.87±0.31	1.5000	2	3	<1	2
	3-甲基戊酸	1732	1762	0.16±0.00	ND	ND	ND	0.0460	3	0	0	0
	顺-5-十二碳烯酸	2550	-	ND	4.92±2.28	2.49±1.30	ND	-	0	-	-	0
	顺-9-十六烯酸	2861	2950	ND	ND	1.92±0.30	ND	-	0	0	-	0
醛类 (5 种)	反-2-癸烯醛	1702	1648	0.29±0.03	ND	2.04±0.16	2.82±0.17	0.0170	0	0	120	166
	反-2-十二烯醛	1822	1835	0.33±0.08	0.55±0.29	ND	1.03±0.29	0.0014	233	393	0	733
	2-十一烯醛	1821	1736	ND	ND	0.42±0.04	ND	-	0	0	-	0
	反-2,4-癸二烯醛	1837	1821	ND	ND	0.44±0.67	ND	0.0001	0	0	5667	0
	顺-2,4-癸二烯醛	1885	1844	ND	ND	3.06±0.49	ND	0.0003	0	0	10205	0
醇类 (5 种)	2,2-二甲基-1,3-二氧戊环-4-甲醇	1661	-	ND	0.43±0.06	ND	ND	-	0	-	0	0
	异丙醇	852	950	ND	ND	ND	0.21±0.05	9.7879	0	0	0	<1
	3-甲基-2-丁醇	1042	1118	ND	ND	0.09±0.01	0.11±0.01	0.4100	0	0	<1	<1
	2-庚醇	1305	1300	ND	ND	ND	0.24±0.12	0.0652	0	0	0	4
	辛醇	1602	1567	ND	ND	ND	0.10±0.01	0.1258	0	0	0	<1
烷类 (5 种)	辛烷	795	-	0.14±0.02	ND	0.16±0.02	ND	10.0000	<1	0	<1	0
	十五烷	1539	-	0.11±0.02	ND	ND	0.16±0.03	13.0000	<1	0	0	<1
	(S)-甲基环氧乙烷	844	-	ND	0.69±0.14	ND	ND	-	0	-	0	0
	三碳酸四氢烷	1539	-	ND	0.13±0.01	ND	ND	-	0	-	0	0
	十四烷	1538	-	ND	ND	0.21±0.02	ND	1.0000	0	0	<1	0
呋喃 (1 种)	2-戊基呋喃	1177	1244	0.07±0.01	ND	ND	ND	0.0058	12	0	12	0
内酯 (2 种)	γ-壬内酯	2102	2044	0.25±0.04	0.64±0.12	0.19±0.03	0.36±0.07	0.0097	26	66	19	37
	δ-癸内酯	2254	2189	2.44±0.32	1.12±0.21	0.84±0.07	1.07±0.10	0.0660	37	17	13	16
烯烃类 (1 种)	1,4-二氧杂-2-己烯	891	-	ND	0.37±0.02	0.62±0.05	0.86±0.07	-	0	-	-	-
醚类 (2 种)	乙烯基甲醚	800	832	47.95±20.89	34.74±16.72	38.73±17.67	35.43±15.45	-	-	-	-	-
	甲醚	856	-	ND	ND	ND	0.53±0.01	303.9670	0	0	0	<1
胺类 (1 种)	叔丁胺	843	729	ND	ND	0.78±0.06	ND	0.5100	0	0	2	0

注: 保留指数(retention index, RI); ND 表示此物质未检测到, -表示没有值。阈值参考化合物嗅觉阈值汇编(第二版)。

生食乳扇含有多种具有水果香气的物质, 如丁酸乙酯(菠萝味、香蕉味)、己酸乙酯(菠萝味、苹果味)、辛酸乙酯(杏仁味、香蕉味)等, OAV 和 FD 都较高, 为乳扇带来浓郁的果香风味, 使乳扇具有类似水果的清新风味。同时, 带有酸臭味、膻味、腐臭味的物质, 如丁酸、戊酸、己酸、辛酸、壬酸等, 它们的 OAV 和 FD 也较高, 使乳扇具有一定的酸味和腥味。陈臣等[15]研究结果也指出辛酸和己酸乙酯对整体香气贡献大, 这与本研究结果相同, 但陈臣等[15]提到的对整体香气贡献大的 2-庚酮、2-壬酮、己醛、辛醛和壬醛等物质并没有在本研究中得到。TIAN 等[20]采用 GC-MS 和 GC-O, 结合香味重组与缺失实验以及感官分析对中国传统乳扇的挥发性风味特征进行分析, 结果表明丙酸、丁酸、辛酸、辛醛、壬醛、2-壬酮和己酸乙酯是中国传统乳扇的关键风味物质。该结果与本研究确定的乳扇的气味活性化合物有相同的组分。

对于微波处理后的乳扇样品, 丁酸乙酯、己酸乙酯、庚酸乙酯、等带有水果香气的物质, 仍然有较高的 OAV 和 FD, 乳扇仍具有清新果香。且微波处理后的乳扇中呈脂肪味的棕榈酸乙酯的 FD 较高, 为乳扇增添了脂肪的醇厚风味, 丰富了乳扇整体风味。油炸处理后的乳扇样品虽仍存在丁酸乙酯、己酸乙酯等果味物质, 但其 FD 降低, 表明其在整体风味中的贡献度有所下降。顺-2,4-癸二烯醛等具有油脂味的物质的 OAV 和 FD 较高, 说明油炸后乳扇形成独特的油炸脂香。煎烤处理后的乳扇样品中既有丁酸乙酯(OAV=14901, FD=32)、己酸乙酯(OAV=6024, FD≥64)、辛酸乙酯(OAV=1605, FD≥64)等果香物质, 又有反-2-十二烯醛(OAV=733, FD=16)等油脂味物质, 它们共同作用, 使得乳扇在煎烤后既有果香的清新又有油脂的醇厚。而且煎烤后的乳扇还含有 2-庚醇(OAV=4, FD=16)等具有酒味的物质, 使乳扇产生酒味, 使得乳扇风味层次更加丰富。总体而言, 生食乳扇果香与异味并存, 微波烹饪增加了脂肪味和特色香气, 油炸突出了浓郁的油脂香和混合果香, 煎烤则是果香、油脂香与多种特色风味的融合。

表 3　不同加工方式乳扇的香气活性物质 GC-O 分析

Table 3　Odor-active compounds in rushan identified with different processing methods by GC-O

物质名称	RI 计算		气味描述	FD			
	计算值	理论值		生食	微波	油炸	煎烤
2-十三酮	2095	2029	甜果香、花香	16	≥64	-	32
2-十五酮	1885	1818	鸢尾香	-	1	16	≥64
丁酸乙酯	945	1048	菠萝味、香蕉味	16	16	32	32
己酸乙酯	1299	1339	菠萝味、苹果味	≥64	≥64	-	≥64
己酸丙酯	1320	1341	甜的水果香气	32	8	32	-
庚酸乙酯	1410	1418	菠萝味、香蕉味	-	≥64	8	-
2-甲基丁基己酸酯	1450	1422	水果香气	4	-	2	-
辛酸乙酯	1577	1526	杏仁味、香蕉味	≥64	4	32	≥64
壬酸乙酯	1640	-	玫瑰味、鸢尾香	4	4	16	16
3-庚基己酸酯	1666	1621	水果味、花香味	-	-	2	-
己酸己酯	1691	1615	玫瑰味、苹果味	4	8	-	-
癸酸异丙酯	1754	1675	果香	-	-	≥64	≥64
乙基-9-癸烯酸酯	1775	-	清淡果香	-	2	-	-
1,2-丙二醇丁酸酯	1791	1725	酯香、油脂味	-	1	-	-
癸酸丙酯	1816	-	果香	≥64	≥64	≥64	32
1-甲基丁基癸酸酯	1878	-	果香	-	-	1	-
十三酸乙酯	2022	1943	水果味、蜡味	-	-	4	-
γ-壬内酯	2102	2044	椰子味、奶油味、杏仁味	4	-	-	-
9-十四烯酸乙酯	2155	-	甜味、果味	-	2	-	4
十五酸乙酯	2217	2179	油脂味	-	-	4	-
棕榈酸乙酯	2315	2261	脂肪味	-	≥64	-	8
邻苯二甲酸二甲酯	2347	2303	刺激性气味	-	2	-	≥64
δ-癸内酯	2254	2189	果香、桃香	1	1	≥64	2
肉豆蔻酸乙酯	2076	2055	蜡味、脂味	-	16	-	-
15-甲基十六酸乙酯	2185	-	淡脂香	-	8	-	-

表 3(续)

物质名称	RI 计算		气味描述	FD			
	计算值	理论值		生食	微波	油炸	煎烤
磷酸三乙酯	1720	1672	刺激性气味	-	-	2	-
丁酸	1676	1624	酸臭味，腐败味	≥64	≥64	8	8
壬酸	2230	2165	酸臭味	8	32	≥64	16
戊酸	1807	1733	酸臭味	16	≥64	32	≥64
己酸	1920	1839	膻味、臭味	≥64	32	16	16
庚酸	2028	1946	油脂味、臭味	1	-	-	-
辛酸	2134	2068	腐臭味、油脂味	≥64	16	16	16
月桂酸	2503	2475	淡油脂味	-	-	1	2
顺-5-十二烯酸	2550	-	酸味	-	≥64	32	32
反-2-癸烯醛	1702	1648	家禽味、花香、可可香	2	-	2	-
反-2-十二烯醛	1822	1835	油脂味、杏仁味、香草味	-	8	-	16
反-2,4-癸二烯醛	1837	1821	油脂味、柑橘味	-	-	1	-
顺-2,4-癸二烯醛	1885	1844	油脂味、柑橘味	-	-	≥64	-
2-庚醇	1305	1300	酒味、葡萄味、花香	-	-	-	16
十五烷	1539	-	汽油味	16	-	-	2
十四烷	1538	-	汽油味	-	-	4	-
叔丁胺	843	729	有强烈的氨臭和鱼腥味	-	-	4	-

注: -表示在不分流模式下未嗅闻到。

2.3 风味感官评价结果分析

图 1 是经不同烹饪方式加工后乳扇感官评价的结果，可以看出，微波和煎烤处理后乳扇的水果味和牛奶味评分相对较高，说明微波和煎烤处理后的乳扇在这两种风味上表现突出，可能使乳扇保留或增强了水果般的清新感以及牛奶的醇厚香气，此外，微波处理后乳扇的酸味评分也明显升高，可能是短时的微波处理促进了酸类物质的大量释放与生成。同时煎烤处理后乳扇的脂肪味和酒味评分明显增大，说明煎烤增加了乳扇的油脂味和酒味，使乳扇风味更加醇厚丰富。油炸处理后乳扇的脂肪味和焦香味评分较高，这是因为油炸过程中油脂的大量渗入，乳扇在高温条件下发生美拉德效应和脂质氧化，强化了乳扇的脂肪香和焦香味，但其他风味有所降低。

此外，感官评价结果表明微波乳扇的水果味、牛奶味突出，与 2.2 中具有水果味的香气物质贡献度高结果一致；油炸乳扇的脂肪味和焦香味明显，与 2.2 中油炸方式下具有油脂味的香气物质对风味影响突出相符合；煎烤乳扇焦香味、脂肪味和酒味突出，与 2.2 中煎烤方式下具有油脂味和酒味的香气物质作用结果也相符合。这些结果也表明，基于 GC-O 的气味活性成分分析与感官评价两种分析方法的结果能够相互印证。

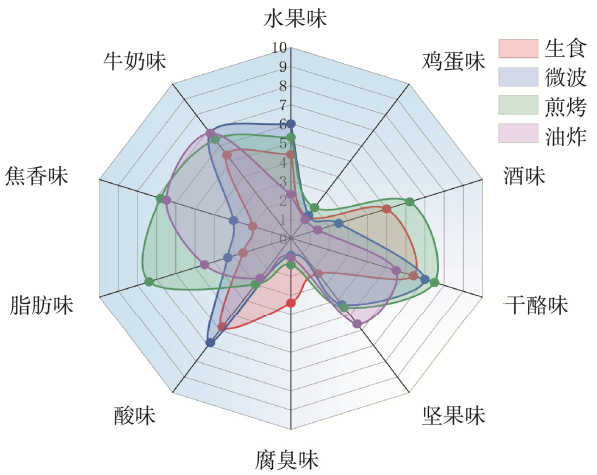


图 1 不同加工方式乳扇样品的感官评价雷达图

Fig.1 Radar chart of sensory evaluation of rushan samples with different processing methods

3 结 论

本研究探讨了生食与不同加工方式对乳扇挥发性风味的影响。结果表明，微波处理后的乳扇酸类和酯类物质含量明显增加，丁酸、己酸、丁酸乙酯、己酸乙酯等化合物的 OAV 和 FD 因子较高，是微波处理后乳扇中的气味活

性化合物, 增加了乳扇的酸味和水果香气。油炸处理后的乳扇风味有所受损, 原有风味减弱, 但发生美拉德反应等过程, 增加了顺-2,4-癸二烯醛等具有油脂味的物质, 其 OAV 和 FD 较高, 是油炸后乳扇中的气味活性化合物, 增加了乳扇油脂香和焦香风味, 使乳扇风味更加醇厚。煎烤处理后的乳扇增加了水果香、花香的酯类物质及酸味物质, 还增加了具有油脂味和酒味的醛类物质和醇类物质, 如 2-庚醇(OAV=4, FD=16)、反-2-十二烯醛(OAV=733, FD=16)等, 其 OAV 和 FD 较高, 是煎烤乳扇中的气味活性化合物, 能够使乳扇的风味层次更加丰富。不同加工方式通过影响挥发性物质的种类和含量, 造就了乳扇多样的风味特点。研究结果为消费者选择喜欢的加工方式提供了参考, 同时为乳扇的深加工及即食乳扇的开发提供了理论依据。

参考文献

[1] 王金梅, 杨远, 苗永旺. 白族乳扇加工制作历史与发酵探讨[J]. 乳品加工, 2019, 210: 69–72.
WANG JM, YANG Y, MIAO YW. Discussion on the history and development of Bai ethnic group's rushan processing and production [J]. Dairy Industry, 2019, 210: 69–72.

[2] 王姣, 王绒雪, 张晋华, 等. 乳扇加工工艺优化及其风味成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(23): 189–198.
WANG J, WANG RX, ZHANG JH, *et al*. Optimization of processing technology for Rushan and analysis of its flavor components [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(23): 189–198.

[3] WANG YJ, GUO J, HUANG AX. Study on bacterial diversity in traditional sour whey of Yunnan Province [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(3): e13613.

[4] LIU WJ, SUN ZH, ZHANG JC, *et al*. Analysis of microbial composition in acid whey for dairy fan making in Yunnan by conventional method and 16S rRNA sequencing [J]. Current Microbiology, 2009, 59(2): 199–205.

[5] CHEN C, HUANG K, YU HY, *et al*. The diversity of microbial communities in Chinese milk fan and their effects on volatile organic compound profiles [J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(3): 2581–2593.

[6] 窦玉萍, 苏亚文, 刘红娜. 云南传统拉伸型干酪—乳扇品质研究进展[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 70–77.
DOU YP, SU YW, LIU HN. Research progress on the quality of Yunnan traditional stretched cheese—Rushan [J]. Journal of Northwest Minzu University (Natural Science), 2017, 38(2): 70–77.

[7] 黄艾祥, 虎砚颖, 赵家明. 凝乳条件对我国传统拉伸型干酪——乳扇品质的影响[J]. 中国乳品工业, 2006, 34(11): 23–26.
HUANG AIX, HU YY, ZHAO JM. The influence of coagulation conditions on the quality of traditional stretched dry butterfly-milk fans in China [J]. China's Dairy Industry, 2006, 34(11): 23–26.

[8] 窦玉萍, 苏亚文, 孟丹, 等. 工艺条件对传统乳扇出品率和加工特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(7): 185–191.
DOU YP, SU YW, MENG D, *et al.* The Influence of process conditions on the yield and processing characteristics of traditional milk fans [J]. Food and Fermentation Industry, 2018, 44(7): 185–191.

[9] 杨绍芬, 黄艾祥, 段达松. 乳扇加工新工艺及品质的研究[J]. 中国乳品工业, 2011, 39(1): 30–33.
YANG SF, HUANG AIX, DUAN DS. Research on new processing technology and quality of milk fan [J]. China Dairy Industry, 2011, 39(1): 30–33.

[10] 肖梦林, 魏光强, 廖紫玉, 等. 2 种工艺处理对乳扇贮藏品质的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(5): 1922–1927.
XIAO ML, WEI GQ, LIAO ZY, *et al.* Study on the effects of two process treatments on the storage quality of milk fans [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(5): 1922–1927.

[11] 王亚东, 韩颢颖, 韩兆盛, 等. 新鲜乳扇贮存期间关键香气组分变化分析[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 202–209.
WANG YD, HAN HY, HAN ZS, *et al.* Analysis of changes in key aroma components of fresh milk fans during storage [J]. Food Science, 2022, 43(24): 202–209.

[12] 黄柯, 程臣, 田怀香, 等. 乳扇中产香优势菌的筛选、验证及其复配发酵剂的制备[C]. 上海: 第十六届益生菌与健康国际研讨会, 2021.
HUANG K, CHENG C, TIAN HX, *et al.* Screening, verification of the dominant aroma-producing bacteria in milk fan and preparation of the compound fermentation agent [C]. Shanghai: The 16th International Symposium on Probiotics and Health, 2021.

[13] 张以芳, 舒相华, 刘旭川. 乳扇制品中乳杆菌分离鉴定及其发酵性能试验[J]. 中国奶牛, 2000(2): 2.
ZHANG YF, SHU XH, LIU XC. Isolation, identification and fermentation performance test of *Lactobacillus* in milk fan products [J]. Chinese Dairy Cows, 2000(2): 2.

[14] 徐幸, 舒平, 张晓鸣. 偏最小二乘回归分析乳扇在贮藏期间挥发性物质与感官特性的关系[J]. 现代食品科技, 2016, 32(12): 314–320.
XU X, SHU P, ZHANG XM. Partial least squares regression analysis of the relationship between volatile substances and sensory characteristics of dairy fans during storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(12): 314–320.

[15] 陈臣, 刘政, 黄柯, 等. 基于 GC-MS、GC-O 及电子鼻评价不同加工方式对乳扇风味的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 108–117.
CHEN C, LIU Z, HUANG K, *et al.* The effects of different processing methods on the flavor of milk fan were evaluated based on GC-MS, GC-O and electronic nose [J]. Food Science, 2021, 42(16): 108–117.

[16] 廖紫玉, 魏光, 田洋, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析加工方式对即食乳扇风味品质的影响[J]. 中国乳品工业, 2022, 50(3): 14–21.
LIAO ZY, WEI G, TIAN Y, *et al*. Based on HS-SPME-GC-MS analysis of the effect of processing methods on the flavor quality of instant Reshan [J]. Dairy Industry, 2022, 50(3): 14–21.

[17] CHEN J, NIU Y, WANG J, *et al*. Physicochemcial property, bacterial diversity, and volatile profile during ripening of naturally fermented dry

mutton sausage produced from Jianzhou big-eared goat [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 961117.

[18] CHEN S, WANG CC, MICHAEL Q, *et al.* Characterization of the key aroma compounds in aged Chinese rice wine by comparative aroma extract dilution analysis, quantitative measurements, aroma recombination, and omission studies [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(17): 4876–4884.

[19] TIAN HX, XU XL, CHEN C, *et al*. Flavoromics approach to identifying the key aroma compounds in traditional Chinese milk fan [J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(11): 9639–9650.

[20] CHEN WC, CUI W, LI P, *et al*. Enhanced flavor and modified structure of Maillard reaction products from chicken liver protein hydrolysate through composite fermentation pretreatment [J]. Food Chemistry, 2026, 498: 147276.

[21] SHEN YCF, SHEN J, KANG N, *et al*. Effect of mixed fermentation with *Lacticaseibacillus paracasei* SMN-LBK and *Limosilactobacillus reuteri* LBK on the flavor precursor and flavor formation of Kazak cheese [J]. Food Chemistry: X, 2025, 30: 102938.

[22] TIAN HH, HUANG XH, QIN L. Insights into application progress of seafood processing technologies and their implications on flavor: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(33): 13259–13274.

[23] XUE J, YANG Y, WANG ZX, *et al*. Bacterial diversity in Chinese Rushan Cheese from different geographical origins [J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1920.

[24] 郭伟, 黄轲, 陈臣, 等. 乳酸菌和酵母菌在乳扇特征风味形成中的作用[C]. 上海: 第 15 届益生菌与健康国际研讨会会议论文, 2020. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.014010

GUO W, HUANG K, CHEN C, *et al*. Role of lactic acid bacteria and yeast in generation of milk fan characteristic flavor [C]. The 15th International Symposium on Probiotics and Health, 2020. DOI: 10.26914/c.cnkihy. 2020.014010

[25] JIANG Y, YU P, LIU XM, *et al*. Shifts in diversity and function of bacterial community during manufacture of Rushan [J]. Journal of Dairy Science. 2021, 104: 12375–12393.

[26] CHEN C, YAO WQ, YU HY, *et al*. Dynamics of microbial communities associated with flavor formation during sour juice fermentation and the milk fan drying process [J]. Journal of Dairy Science, 2023, 106: 7432–7446.

[27] SULLIVAN RC, MAKINWA F, FAGAN CC, *et al*. Characterization of cooked cheese flavor: Volatile components [J]. Journal of Food Science, 2024, 89: 6425–6442.

[28] GULZAR N, SAMEEN A, AADDIL RM, *et al*. Descriptive sensory analysis of pizza cheese made from Mozzarella and semi-ripened Cheddar cheese under microwave and conventional cooking [J]. Foods, 2020, 9: 214.

[29] WU TD, CADWALLADER KR. Identification of characterizing aroma components of roasted chicory “coffee” brews [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(50): 13848–13859.

[30] DOMINGUEZ R, PATEIRO M, GAGAOUA M, *et al*. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products [J]. Antioxidants, 2019, 8(10): 429.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)