

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250115006

引用格式: 王亚东, 徐昕莹, 王颖, 等. 箭型固相微萃取-气相色谱-质谱法结合智能电子感官技术分析红纹奶酪的风味品质[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(8): 152-160.

WANG YD, XU XY, WANG Y, *et al.* Analysis of flavor quality of red cheese by solid phase microextraction arrow-gas chromatography-mass spectrometry combined with intelligent electronic sensory techniques [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(8): 152-160. (in Chinese with English abstract).

# 箭型固相微萃取-气相色谱-质谱法结合智能电子感官技术分析红纹奶酪的风味品质

王亚东, 徐昕莹, 王颖, 王喜然, 王蓓\*

(北京工商大学食品与健康学院, 北京 100048)

**摘要:** **目的** 通过比较多种食品风味品质测定方法, 深入解析红纹奶酪成熟过程中的风味感官品质。**方法** 采用箭型固相微萃取-气相色谱-质谱法(solid phase microextraction arrow-gas chromatography-mass spectrometry, SPME arrow-GC-MS)、电子鼻、电子舌以及定量描述分析(quantitative descriptive analysis, QDA)方法对不同成熟时期红纹奶酪中的挥发性成分及感官品质进行分析。**结果** 电子鼻可快速识别不同成熟时期红纹奶酪。GC-MS在红纹奶酪中共鉴定得到85种挥发性气味化合物, 其中酸类、醇类、醛类化合物和酮类化合物的总含量先升高后降低, 酯类的总含量则持续升高。结合相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)分析, 确定28种特征挥发性化合物。QDA得到酸奶味、酒香味和酸味会在奶酪成熟期间显著增强( $P < 0.05$ )。此外, 电子舌结果显示不同成熟时期的红纹奶酪在酸味和苦味回味上存在显著差异( $P < 0.05$ )。**结论** 本研究通过结合多种食品风味品质测定方法, 多方位解析和对比了红纹奶酪成熟过程中的风味感官品质。研究结果不仅提高了对红纹奶酪风味感官品质的认识, 还为新型发酵乳制品的开发、品质控制和风味改良提供参考。

**关键词:** 红纹奶酪; 红曲霉; 气相色谱-质谱法; 电子鼻; 电子舌

## Analysis of flavor quality of red cheese by solid phase microextraction arrow-gas chromatography-mass spectrometry combined with intelligent electronic sensory techniques

WANG Ya-Dong, XU Xin-Ying, WANG Ying, WANG Xi-Ran, WANG Bei\*

(School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

**ABSTRACT: Objective** To deeply analyze the sensory quality of flavor during the ripening process of red cheese through various methods for measuring food flavor quality. **Methods** The volatile flavor compounds and sensory quality of red cheese at different ripening periods were analyzed by solid phase microextraction arrow-gas

收稿日期: 2025-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(3272345)

第一作者: 王亚东(1998—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为乳制品风味调控。E-mail: wyd2020bgs@163.com

\*通信作者: 王蓓(1981—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为食品风味与感知技术。E-mail: wangbei@th.btbu.edu.cn

chromatography-mass spectrometry (SPME arrow-GC-MS), electronic nose, electronic tongue, and quantitative descriptive analysis (QDA). **Results** The results showed that there were differences in the flavor profiles of red cheeses at different ripening periods. A total of 85 kinds of volatile flavor compounds were identified in red cheese by GC-MS. The total content of acids, alcohols, aldehydes, and ketones first increased and then decreased, while the total content of esters continued to increase. Combined with the relative odor activity value (ROAV) analysis, 28 kinds of characteristic volatile flavor compounds were identified. QDA yielded that yogurt flavor, wine flavor, and sour flavor would enhance significantly ( $P < 0.05$ ) during cheese ripening. In addition, electronic tongue analysis demonstrated significant differences in sourness and bitter aftertaste among red cheeses at different ripening periods ( $P < 0.05$ ). **Conclusion** This study analyzes and compares the sensory quality of flavor during the ripening process of red cheese from multiple perspectives by combining various methods for measuring food flavor quality. This study not only improves the understanding of the sensory qualities of red cheese but also provides a reference for the development, quality control, and flavor improvement of novel fermented dairy products.

**KEY WORDS:** red cheese; *Monascus*; gas chromatography-mass spectrometry; electronic nose; electronic tongue

## 0 引言

红纹奶酪是一种新型发酵乳制品, 内外有红色纹路, 风味品质独特。其红色外观来源于制作过程中加入的红曲霉菌, 这种真菌能代谢碳水化合物并分泌酯化酶, 提高奶酪中酯酶含量<sup>[1]</sup>, 对风味形成至关重要。当前工艺研发主要借鉴表面霉菌成熟型(如卡门贝尔奶酪)<sup>[2-5]</sup>与内部霉菌成熟型(如蓝纹奶酪)<sup>[6-7]</sup>两类传统工艺, 但红曲霉的最适生长温度与传统工艺后熟条件存在兼容性瓶颈<sup>[8]</sup>。针对此矛盾, 本研究通过菌株筛选与工艺优化, 成功制备出具有酒香和果香特征的红纹奶酪, 红曲霉菌在奶酪内外均有生长。

奶酪风味感官品质对于提升产品品质、满足消费者需求和推动产业发展具有重要意义。目前, 红纹奶酪的风味品质已经展开了初步研究。王童等<sup>[9]</sup>以卡门贝尔奶酪的加工工艺为基础, 制作红曲霉类卡门贝尔奶酪, 通过气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)发现调控有机酸代谢网络, 可改变醇、酮、酯类挥发性物质合成路径。JIAO 等<sup>[10]</sup>研究了红曲霉在半软质奶酪中的新应用。研究表明可通过重塑微生物群落结构, 干预蛋白质水解与脂肪降解进程从而影响奶酪风味品质的形成。徐杏敏等<sup>[11]</sup>采用非靶向代谢组学方法初步鉴定得到了红曲霉奶酪中 23 个特征代谢产物。然而, 对这些组学技术可以精确定风味化合物, 但是往往实验时间较长、成本较高, 不适用于快速识别样品的风味品质。

电子感官技术, 包括电子鼻和电子舌等, 在奶酪风味研究中有多种应用。这些技术能够提供快速、客观、准确的风味品质分析结果, 有助于更好地理解奶酪的风味特性。电子鼻因其成本效益、快速性、灵敏度和无损检测而成为通过嗅觉评估食品质量的首选工具。高佳嘉等<sup>[12]</sup>根据电子鼻测定的 5 种不同植物基配比如酪的风味轮廓优化了植物基奶酪的配方。王琳等<sup>[13]</sup>通过电子鼻分析不同凝固方

式加工的硬质奶酪的香气特征, 结果表明在相同发酵菌种的条件下, 通过不同凝乳方式可以开发风味差异化的奶酪产品。电子舌凭借其快速响应特性、高灵敏度传感器阵列、非破坏性检测模式及多变量统计分析算法, 已构建多维度感知体系, 为食品风味组学中呈味物质的动态表征与代谢产物互作机制解析提供基础数据。HAYASHIDA 等<sup>[14]</sup>使用电子舌系统测量了使用 5 种曲霉菌与商业卡门培尔奶酪相比成熟的奶酪样品的味道值。与卡门培尔奶酪样品相比, 所有曲霉菌奶酪样品都表现出较低的酸味和更大的苦味、涩味、咸味和鲜味浓郁度。每种味道特征的强度因曲霉菌株而异。但是目前, 关于红纹奶酪风味品质的研究主要集中于传统 GC-MS, 而基于电子感官技术的多源数据融合分析体系在该领域的应用仍有待系统探索。将电子感官技术与 GC-MS 相结合, 可以更加全面的了解红纹奶酪的风味特性。

本研究采用电子鼻、电子舌、箭型固相微萃取-气相色谱-质谱技术(solid phase microextraction arrow-gas chromatography-mass spectrometry, SPME arrow-GC-MS), 定量描述分析(quantitative descriptive analysis, QDA)结合相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV), 对不同成熟时期红纹奶酪中的挥发性化合物及感官品质进行分析。研究结果有助于促进新型发酵乳制品产品的开发及乳品品质判别。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

生牛乳[内蒙古蒙牛乳业(集团)股份有限公司]。

2-甲基戊酸、2-甲基-3-庚酮、正己烷、正构烷烃( $C_7-C_{33}$ )(色谱纯, 美国 Sigma-Aldrich 公司); 乳酸菌基础发酵剂 CHOOZIT MM100[丹尼斯克(中国)有限公司]; CHY-MAX 凝乳酶(平均活力 1400 IMCU/g, 丹麦科汉森公司); 氯化钠(食品级, 中国盐业股份有限公司); 氯化钙(食品级, 上海鑫

泰实业有限公司); 氯化钾、酒石酸(分析纯, 上海麦克林生化科技股份有限公司)。

## 1.2 仪器与设备

PEN3 电子鼻(德国 Airsense 公司); 7890B-5977A 气相色谱质谱联用仪、色谱柱 DB-Wax 毛细管柱(60 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国 Agilent 公司); SA402B 电子舌(日本 INSENT 公司); ME204/02 电子天平[精度 0.1 mg, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 红纹奶酪制备方法

实验中使用的生牛乳由内蒙古蒙牛乳业(集团)股份有限公司旗下的牧场提供。生牛乳中的乳糖、蛋白质、脂肪和 pH 分别为 4.65%、3.35%、3.81% 和 6.56。红纹奶酪的制备方案如下。标准化后的牛奶在 65 °C 下巴氏杀菌 30 min。在凝乳之前, 牛奶在 31 °C 下接种商业乳酸菌发酵剂(CHOOZIT MM100)和紫色红曲霉 M1 孢子菌悬液(5.0×10<sup>7</sup> 个/mL), 发酵 30 min。然后, 在 31 °C 下加入商业凝乳酶(CHY-MAX 凝乳酶, 0.2 g/L 牛奶), 凝乳 45 min。然后, 将凝乳块切成约 3 cm×3 cm×3 cm 的立方体。排出乳清后, 向凝乳中加入氯化钠(2.00 g/100 g 凝乳)。最后, 将奶酪转移到 26 °C, 相对湿度为 80% 的恒温恒湿培养箱中成熟 5 d, 然后转到 10 °C 成熟 90 d。在 4 个不同的成熟期(0、30、60 和 90 d) 取样用于进一步分析。取样一式 3 份。

### 1.3.2 电子鼻实验方法

参考王姣等<sup>[15]</sup>研究方法, 准确称取 6 g 红纹奶酪置于 40 mL 顶空瓶, 并将顶空瓶用封口膜密封, 在 60 °C 水浴平衡 30 min 后用电子鼻系统通过吸取顶空气体进行检测分析, 每个样品测 5 次平行, 电子鼻设置检测时间 180 s, 清洗时间 120 s, 气体流速 1 L/min, 其他参数取其默认值。获得电子鼻香气指纹图谱后, 利用电子鼻自带的 WinMuster 软件对不同红纹奶酪样品进行主成分分析(principal component analysis, PCA)和线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)。最终结果以雷达图呈现。

### 1.3.3 GC-MS 实验方法

参考文献[16–17]研究方法, 将 6 g 红纹奶酪研磨粉碎, 装入 40 mL 顶空瓶中。加入 1 μL 2-甲基戊酸和 1 μL 2-甲基-3-庚酮作为内标溶液(内标溶液使用正己烷稀释)。将红纹奶酪样品在 50 °C 水浴中平衡 30 min, 然后将萃取头插入顶空瓶中进行吸附, 注意竖直插入, 吸附涂层不要接触瓶壁, 吸附时间为 30 min。

GC 条件: DB-Wax 毛细管柱(60 m×0.25 mm, 0.25 μm); 高纯度氦气(99.99%)用作 GC-MS 分析的载气, 流速 1 mL/min; 升温程序: 溶剂延迟 4 min, 烤箱温度保持在 40 °C 下 5 min, 并以 3 °C/min 的速度升至 230 °C。采用不分流模式, 进样口温度 250 °C。

MS 条件: 电子电离源; 电离能量 70 eV; 离子源温度

230 °C; 接口温度 250 °C; 四极杆温度 150 °C; 检测器温度 250 °C; 全扫描模式; 质量扫描范围 *m/z* 20~350。

### 1.3.4 挥发性化合物的定性定量

参考 WANG 等<sup>[18]</sup>研究方法, 采用 3 种方法对化合物定性。首先在美国国家标准与技术研究院质谱数据库(National Institute of Standards and Technology, NIST) 14 中进行检索对比; 其次, 计算化合物的保留指数(retention index, RI)并与文献中的 RI 进行对比; 最后, 比对嗅闻结果。将正构烷烃 C<sub>7</sub>~C<sub>33</sub> 与在相同的色谱条件下得出 GC 保留时间按下式计算待测化合物的 RI。根据内标半定量法计算各挥发性成分的含量。

### 1.3.5 ROAV 分析

参考于明等<sup>[19]</sup>和毛红艳等<sup>[20]</sup>研究方法, 利用 ROAV 定义对样品风味贡献最大的挥发性风味物质, 即 ROAV<sub>max</sub>=100, 其他挥发性成分 ROAV 按式(1)计算。

$$\text{ROAV}_A = \frac{C_A}{T_A} \times \frac{C_{\text{stan}}}{T_{\text{stan}}} \times 100 \quad (1)$$

式中:  $T_A$  为各组分感觉阈值, μg/kg;  $T_{\text{stan}}$  为贡献最大组分感觉阈值, μg/kg;  $C_A$  为各组分相对含量, %;  $C_{\text{stan}}$  为贡献最大组分相对含量, %。

### 1.3.6 电子舌实验方法

参考丛艳君等<sup>[21]</sup>和 LIPKOWITZ 等<sup>[22]</sup>研究方法, 称取红纹奶酪 40 g 加入 200 mL 纯净水搅拌均匀 1 min, 8000 g 离心 10 min 后过滤去留清液待测。SA402B 电子舌配备了 6 个测试传感器和两个用于味道属性分析的参考传感器, 用于评估 6 种基本味道和 2 种回味, 即酸味、涩味和涩味回味、苦味和苦味回味、咸味、鲜味和甜味。在分析之前, 对传感器进行校准、诊断, 并在清洁溶液(30 mmol/L KCl+0.3 mmol/L 酒石酸, 90 s) 和参考溶液(30 mmol/L KCl+0.3 mmol/L 酒石酸, 120 s+120 s) 中洗涤。接下来, 将传感器浸入样品溶液中 30 s 以确定味道值。最后, 使用电子舌附带的味觉分析应用程序将电子舌结果转换为味觉值。采用软件 Oringin 2022 进行数据处理。

### 1.3.7 感官评价

参考 ZENG 等<sup>[1]</sup>研究方法, 10 人组成奶酪感官评价专家小组(8 女 2 男, 平均年龄 24 岁, 均接受过初级感官评定训练), 可以进行初级感官评估, 具有良好的感官感知能力和对感官疲劳的高度耐受性。试验采用描述性感官评价分析, 感官描述词见表 1 所示, 评分区间设置为 0~9 分, 最终汇总得分并计算各项指标的平均值。

表 1 红纹奶酪感官评价描述词及对应标准品

Table 1 Sensory evaluation descriptors and corresponding standards of red cheese

描述词	定义	参考
酸奶味	与双乙酰相关的芳香	2,3 丁二酮(5 mg/L)
奶油味	与乳脂相关的芳香	多美鲜稀奶油
花果香	与水果相关的芳香	己酸乙酯水溶液(20 mg/L)
奶臭味	与短链脂肪酸相关的芳香	丁酸水溶液(1.2 mg/L)
酸味	与醋酸相关的芳香	乙酸水溶液(2.0 mg/L)
酒香味	与酒精相关的芳香	乙醇(350 mL/L)

## 1.4 数据处理

利用 SPSS 23.0 分析软件对数据进行显著性分析 ( $P < 0.05$ )。电子鼻、电子舌根据传感器采集的原始数据进行统计学分析(实验设置 6 次平行), 利用 Origin 2022 进行主成分分析和雷达色谱图分析。

## 2 结果与分析

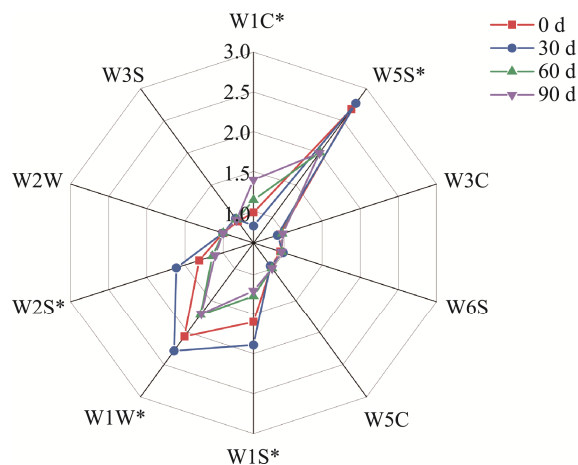
### 2.1 红纹奶酪电子鼻实验结果

不同成熟时期红纹奶酪电子鼻检测雷达图结果如图 1 所示, 其挥发性有机化合物的组成随成熟时间发生显著变化。10 个传感器中, W1C(芳香成分)、W5S(氮氧化物)、W1S(甲烷)、W1W(硫化物)和 W2S(醇、醛、酮类)的响应值差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。这些变化可能反映了奶酪成熟过程中复杂的生化反应和微生物代谢的动态特征。

W1C 传感器(芳香成分)的响应值在 30 d 之后随成熟时间延长呈上升趋势, 表明芳香化合物(如酯类、萜烯类)的积累。此类化合物通常来源于脂质氧化和蛋白质降解, 尤其在 60 d 至 90 d 阶段显著增加, 可能与后期乳酸菌的代谢活动增强有关。W5S 传感器(氮氧化物)在 30 d 时响应值达到峰值, 随后逐渐下降, 暗示氮氧化物的生成可能与成熟早期的氧化反应相关。W1S 传感器(甲烷)的响应值在 0 d 至 30 d 阶段显著升高, 可能与奶酪内部微环境从有氧向厌氧过渡有关。甲烷的产生通常与产甲烷菌的活动相关, 这类微生物在低氧条件下分解短链脂肪酸, 其活性在成熟初期较为活跃。W1W 传感器(硫化物)的变化则呈现两阶段性: 0 d 至 30 d 响应值呈增加趋势, 30 d 后开始下降, 60 d 和 90 d 基本保持一致。硫化物(如甲硫醇、二甲基硫醚)的形成主要源于含硫氨基酸(如蛋氨酸、半胱氨酸)的降解, 前期微生物蛋白酶活性增强可能导致其释放, 而后期可能因挥发性损失或进一步转化为其他化合物导致浓度降低。W2S 传感器(醇、醛、酮类)的响应值在成熟过程中呈波动性变化, 其中 30 d 时显著高于其他阶段。这类化合物是脂质氧化和碳水化合物发酵的典型产物, 其波动可能反映了不同阶段优势微生物群落的演替。例如, 乳酸菌在中期主导产酸发酵, 而红曲菌在后期可能通过酯化反应生成更多酯酮类物质。电子鼻研究结果为进一步解析红纹奶酪风味形成机制提供了数据支持, 但无法对差异化合物进行定性定量分析, 需结合 GC-MS 等定量分析技术, 以更全面地揭示挥发性成分动态变化<sup>[23]</sup>。

### 2.2 红纹奶酪的挥发性化合物

通过 SPME arrow-GC-MS 对 4 个不同成熟时期的红纹奶酪进行检测, 共鉴定得到 85 种挥发性风味化合物, 包括酸类(13 种)、酯类(45 种)、醇类(14 种)、酮类(8 种)、醛类(4 种)和烯炔类化合物(1 种)。



注: \*表示差异显著( $P < 0.05$ ), 图2、3、5同。

图1 不同成熟时期红纹奶酪电子鼻检测雷达图

Fig.1 Radar map of red cheese at different ripening time detected by electronic nose

酸类化合物在奶酪的风味形成中发挥着重要的作用, 通常来源于脂肪分解<sup>[24]</sup>。如图 2 所示, 红纹奶酪的酸类化合物的含量随着成熟时间的延长而逐渐积累, 在成熟的第 30 d 奶酪的酸类化合物总含量最高, 含量最高的酸类化合物为己酸、丁酸和辛酸, 分别为 544438.705、275078.319、270713.192  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。这些短链酸在低浓度时能呈现奶香味, 而高浓度时则可能给奶酪带来汗臭味、刺鼻味和腐臭味<sup>[25]</sup>。因此, 酸类化合物的含量与奶酪的成熟过程和感官品质控制密切相关。

酯类化合物为奶酪贡献了花香和水果香气, 当浓度较高时, 还会产生发酵香气<sup>[26]</sup>。短链酯类化合物在常温下挥发性较强, 且具有较低的阈值, 可以抑制酸类化合物产生的腐臭气味, 在奶酪中起到风味修饰作用, 尤其是一些含有中短链脂肪酸的乙酯<sup>[27]</sup>。红纹奶酪的酯类总含量在成熟过程中逐渐升高, 在第 90 d 时达到最大值。其中含量最高的是辛酸乙酯(42874.402  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )、己酸乙酯(25469.521  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )、癸酸乙酯(27074.699  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )和丁酸乙酯(17495.127  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )。辛酸乙酯具有柔和、愉快而持久的白兰地酒香味, 己酸乙酯具有菠萝的香甜味, 而丁酸乙酯、和癸酸乙酯都具有奶香味、果香味以及奶油味。这些脂肪酸乙酯类化合物含量的持续升高与奶酪成熟后期酸类化合物含量的降低密切相关。

酮类、醇类、醛类和烯炔类化合物也在红纹奶酪的风味形成中也发挥着至关重要的作用。红纹奶酪中的酮类化合物多为甲基酮, 包括 2-庚酮、2-辛酮、2-壬酮、2-癸酮和 2-十一酮。这些甲基酮类化合物在奶酪成熟的中后期逐渐增加, 通常会赋予奶酪果香味和奶香味。醇类化合物在红纹奶酪的成熟过程中逐渐产生, 整体含量是先升高后降低的。它们为奶酪提供了柔和、甜美的风味背景<sup>[28]</sup>。醛类化合物为红纹奶酪带来了果香、花香或脂肪香气, 这些香气使得奶酪的风味更加复杂和多样化<sup>[15]</sup>。烯炔类化合物为奶酪带来了清新的香气, 如青草香或草本香气<sup>[29]</sup>。

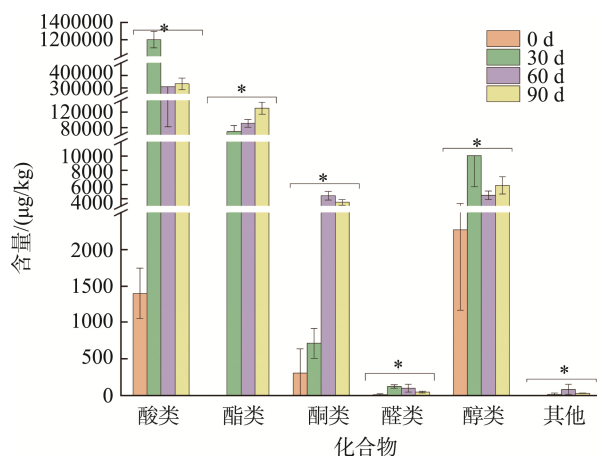


图2 不同成熟时期红纹奶酪各类挥发性化合物总含量统计图

Fig.2 Statistical chart of total volatile compounds in red cheese at different ripening time

### 2.3 红纹奶酪的特征挥发性化合物

通过计算 ROAV 值来确定红纹奶酪的特征风味化合物。由于丁酸乙酯的高含量和低阈值。因此,将丁酸乙酯定义为对红纹奶酪风味贡献最大的挥发性风味物质,即  $ROAV_{max}=100$ 。其余挥发性化合物的 ROAV 值计算结果如表 2 所示。所有样品 ROAV 值大于 1(对红纹奶酪的气味有重要贡献)的化合物有 28 个,包含 8 个酸类化合物(丁酸、己酸、异戊酸、辛酸、壬酸、2-甲基丁酸、癸酸和 9-癸烯酸),6 个酯类化合物(丁酸乙酯、己酸丁酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、十四酸乙酯和棕榈酸乙酯),11 个醇类化合物(乙醇、2-庚醇、异丙醇、异丁醇、己醇、庚醇、辛醇、2,3-丁二醇,2-十二醇、苯乙醇和 2-乙基己醇),2 个酮类化合物(丙酮和 2,3-二酮)和 1 个醛类化合物(苯甲醛)。成熟 0、30、60 和 90 d 的红纹奶酪分别有 10 种、10 种、13 种和 16 种 ROAV 值大于 1 的化合物。奶酪成熟前期的主要特征风味化合物是酸类和醇类,后期特征风味化合物逐渐转变为酸类、酯类和酮类化合物。

表 2 不同成熟时期红纹奶酪挥发性风味物质的香气阈值及 ROAV

Table 2 Aroma thresholds and ROAV of volatile flavor compounds in red cheese at different ripening times

序号	化合物名称	阈值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) <sup>[30-32]</sup>	ROAV			
			0 d	30 d	60 d	90 d
1	乙酸	30	$1.51 \times 10^{-1}$	$3.18 \times 10^{-1}$	$7.24 \times 10^{-2}$	$2.61 \times 10^{-2}$
2	异丁酸	5	-	$8.07 \times 10^{-2}$	-	$6.66 \times 10^{-4}$
3	丁酸	50	$1.81 \times 10^{-2}$	$1.86 \times 10^0$	$4.23 \times 10^{-1}$	$1.82 \times 10^{-1}$
4	戊酸	24	$2.20 \times 10^{-3}$	$2.72 \times 10^{-2}$	$2.90 \times 10^{-2}$	$1.10 \times 10^{-2}$
5	己酸	2.9	$1.38 \times 10^0$	$6.35 \times 10^1$	$8.13 \times 10^0$	$3.87 \times 10^0$
6	异戊酸	0.33	$5.89 \times 10^0$	-	-	-
7	庚酸	22	-	$7.51 \times 10^{-2}$	$3.50 \times 10^{-2}$	$1.62 \times 10^{-2}$
8	辛酸	0.065	$1.00 \times 10^2$	$1.42 \times 10^3$	$2.16 \times 10^2$	$1.05 \times 10^2$
9	壬酸	3000	-	$1.77 \times 10^{-4}$	$8.31 \times 10^0$	$3.98 \times 10^0$
10	2-甲基丁酸	100	-	-	$1.26 \times 10^0$	-
11	癸酸	5	$3.58 \times 10^{-1}$	$4.53 \times 10^0$	$1.35 \times 10^0$	$6.72 \times 10^{-1}$
12	9-癸烯酸	4300	-	$9.56 \times 10^0$	$9.29 \times 10^0$	$4.82 \times 10^0$
13	十一酸	100	-	-	$3.64 \times 10^{-4}$	-
14	乙酸乙酯	600	-	$7.34 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{-4}$	$1.43 \times 10^{-4}$
15	丁酸乙酯	0.017	-	$1.00 \times 10^2$	$1.00 \times 10^2$	$1.00 \times 10^2$
16	丁酸丙酯	18	-	-	$9.54 \times 10^{-2}$	-
17	乙酸异戊酯	15	-	$2.57 \times 10^{-2}$	$4.55 \times 10^{-3}$	-
18	戊酸乙酯	15	-	$2.94 \times 10^{-3}$	$4.46 \times 10^{-3}$	$4.85 \times 10^{-3}$
19	丁酸异丁酯	100	-	$1.27 \times 10^{-3}$	$5.12 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-4}$
20	己酸甲酯	10	-	$4.47 \times 10^{-2}$	-	-
21	己酸乙酯	40	-	$1.65 \times 10^{-1}$	$1.35 \times 10^{-1}$	$6.19 \times 10^{-2}$
22	丁酸异戊酯	15	-	$2.79 \times 10^{-2}$	$3.39 \times 10^{-2}$	$4.59 \times 10^{-3}$
23	异丁酸异戊酯	87	-	-	$4.47 \times 10^{-3}$	-
24	庚酸甲酯	4	-	$5.12 \times 10^{-3}$	-	-
25	己酸丙酯	-	-	-	-	-
26	庚酸乙酯	18	-	$1.23 \times 10^{-2}$	$1.42 \times 10^{-2}$	$1.39 \times 10^{-2}$
27	乳酸丙酯	-	-	-	-	-
28	己酸异丁酯	-	-	-	-	-
29	异戊酸异戊酯	460	-	-	$1.71 \times 10^{-4}$	$3.10 \times 10^{-1}$
30	辛酸甲酯	200	-	$5.23 \times 10^{-3}$	-	-

表 2(续)

序号	化合物名称	阈值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) <sup>[30-32]</sup>	ROAV			
			0 d	30 d	60 d	90 d
31	己酸丁酯	700	-	$9.73 \times 10^0$	$5.45 \times 10^0$	$2.53 \times 10^0$
32	己酸异戊酯	320	-	$1.81 \times 10^{-3}$	$1.83 \times 10^{-3}$	$3.88 \times 10^{-4}$
33	辛酸乙酯	2	$8.46 \times 10^{-3}$	$2.82 \times 10^0$	$2.42 \times 10^0$	$2.08 \times 10^0$
34	壬酸甲酯	40	-	$1.99 \times 10^{-4}$	-	-
35	壬酸乙酯	9	$1.77 \times 10^{-3}$	$1.20 \times 10^{-2}$	$1.77 \times 10^{-2}$	$1.99 \times 10^{-2}$
36	正辛酸异丁酯	-	-	-	-	-
37	庚酸-3-甲丁酯	-	-	-	-	-
38	癸酸甲酯	4.3	-	$7.50 \times 10^{-2}$	$3.42 \times 10^{-3}$	$1.05 \times 10^{-3}$
39	癸酸乙酯	1.2	-	$2.38 \times 10^0$	$2.04 \times 10^0$	$2.19 \times 10^0$
40	正辛酸异戊酯	70	-	$1.21 \times 10^{-3}$	$4.10 \times 10^{-3}$	$2.61 \times 10^{-4}$
41	苯甲酸乙酯	0.6	-	$3.99 \times 10^{-2}$	$2.30 \times 10^{-2}$	$1.60 \times 10^{-2}$
42	3-羟基己酸乙酯	45	-	$3.23 \times 10^{-4}$	$2.12 \times 10^{-4}$	$1.70 \times 10^{-4}$
43	9-癸烯酸乙酯	-	-	-	-	-
44	乙酸庚酯	3200	-	$3.02 \times 10^{-1}$	-	-
45	十一烷酸乙酯	0.3	-	$7.96 \times 10^{-2}$	$8.33 \times 10^{-2}$	$1.19 \times 10^{-1}$
46	癸酸异丁酯	-	-	-	-	-
47	苯乙酸乙酯	3.3	-	$2.70 \times 10^{-3}$	$1.71 \times 10^{-3}$	$9.32 \times 10^{-4}$
48	月桂酸甲酯	1.5	-	$2.13 \times 10^{-2}$	-	-
49	乙酸苯乙酯	6.7	-	$1.38 \times 10^{-1}$	$4.31 \times 10^{-3}$	$4.56 \times 10^{-4}$
50	十二酸乙酯	2	-	$1.81 \times 10^{-1}$	$6.92 \times 10^{-1}$	$1.07 \times 10^{-1}$
51	癸酸异戊酯	50000	-	$4.71 \times 10^{-1}$	$3.21 \times 10^{-1}$	$1.18 \times 10^{-1}$
52	丁酸苯酯	3760	-	$2.37 \times 10^{-1}$	$6.65 \times 10^{-1}$	-
53	苯甲酸异戊酯	250	-	-	-	$4.20 \times 10^{-1}$
54	十三酸乙酯	-	-	-	-	-
55	丁酸苯乙酯	-	-	-	-	-
56	十四酸乙酯	500	-	$1.28 \times 10^{-4}$	$7.76 \times 10^0$	$1.23 \times 10^{-4}$
57	十五酸乙酯	-	-	-	-	-
58	棕榈酸乙酯	10000	-	$2.10 \times 10^0$	$7.40 \times 10^0$	$9.22 \times 10^0$
59	丙酮	40	-	$1.31 \times 10^{-3}$	$8.10 \times 10^{-4}$	$7.59 \times 10^0$
60	2,3-丁二酮	0.3	$2.51 \times 10^0$	-	-	-
61	2-庚酮	1	$2.71 \times 10^{-1}$	$6.59 \times 10^{-2}$	$4.05 \times 10^{-1}$	$1.53 \times 10^{-1}$
62	2-辛酮	5	-	-	$2.70 \times 10^{-3}$	$7.55 \times 10^{-4}$
63	3-羟基-2-丁酮	14	$2.26 \times 10^{-1}$	$7.97 \times 10^{-3}$	-	-
64	2-壬酮	100	$1.68 \times 10^{-3}$	-	$5.01 \times 10^{-3}$	$1.51 \times 10^{-3}$
65	2-癸酮	3	-	-	$1.04 \times 10^{-3}$	-
66	2-十一酮	7	-	$1.46 \times 10^{-3}$	$8.15 \times 10^{-3}$	$4.45 \times 10^{-3}$
67	异戊醛	5.4	-	$6.07 \times 10^{-3}$	-	-
68	壬醛	0.94	$2.17 \times 10^{-1}$	$9.83 \times 10^{-3}$	$8.52 \times 10^{-3}$	$5.30 \times 10^{-3}$
69	糠醛	8	$1.99 \times 10^{-4}$	-	-	-
70	苯甲醛	0.1	-	-	$8.65 \times 10^0$	-
71	乙醇	170	$7.95 \times 10^0$	$3.22 \times 10^{-1}$	$1.55 \times 10^{-1}$	$1.20 \times 10^{-1}$
72	异戊醇	4	-	$6.24 \times 10^{-2}$	$1.23 \times 10^{-2}$	$1.67 \times 10^{-3}$
73	2-庚醇	10	-	$7.75 \times 10^{-4}$	$1.01 \times 10^{-4}$	$5.60 \times 10^0$
74	异丙醇	250	$1.88 \times 10^0$	-	-	-
75	异丁醇	200	-	$3.58 \times 10^{-3}$	$3.42 \times 10^{-4}$	$8.02 \times 10^0$
76	己醇	10	$7.16 \times 10^0$	-	-	-
77	庚醇	54	$2.31 \times 10^0$	-	-	-
78	2-壬醇	58	-	$3.54 \times 10^{-2}$	$6.13 \times 10^{-3}$	$4.30 \times 10^{-3}$
79	辛醇	5	$3.54 \times 10^0$	-	-	-
80	2,3-丁二醇	20000	$4.16 \times 10^{-3}$	$4.73 \times 10^{-4}$	-	$3.62 \times 10^0$
81	2-十二醇	41	-	-	-	$3.91 \times 10^0$
82	苯甲醇	270	$5.29 \times 10^{-2}$	-	-	-
83	苯乙醇	0.35	-	$2.70 \times 10^{-4}$	$1.12 \times 10^{-4}$	$1.87 \times 10^0$
84	2-乙基己醇	100	$2.60 \times 10^0$	$1.72 \times 10^{-3}$	$3.45 \times 10^{-4}$	$6.67 \times 10^0$
85	苯乙烯	600	$1.89 \times 10^{-2}$	$6.99 \times 10^{-2}$	$1.96 \times 10^{-1}$	$3.28 \times 10^{-2}$

注: -表示未检出。

## 2.4 红纹奶酪感官评价结果

不同成熟时期的红纹奶酪的香气强度和喜好度进行评价如图 3 所示。4 个不同成熟时期奶酪样品在 6 种属性的香气强度上均存在差异( $P<0.05$ )。其中成熟 0 d 的奶酪,酸味和酒香味尚不明显,红纹奶酪的主体气味为奶油味。随着成熟时间的延长,奶酪的酸奶味、酸味和酒香味等发酵气味逐渐增强,而奶油味逐渐下降。这与后期奶酪的酸类化合物和酯类化合物含量较高有关。成熟红纹奶酪的气味感官轮廓主要由酸奶味、酒香味、酸味和花果香组成。

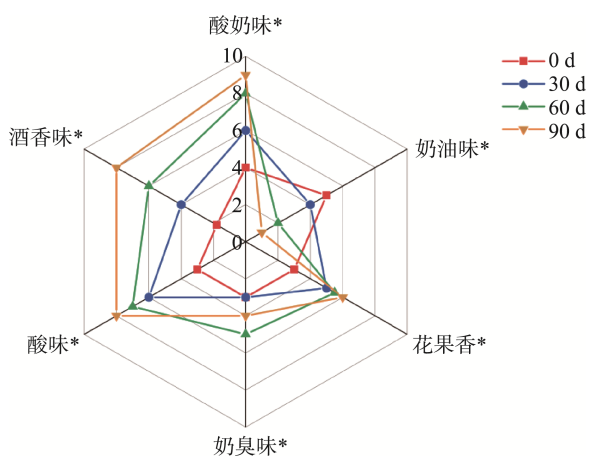


图3 不同成熟时期红纹奶酪感官评价雷达分析图谱  
Fig.3 Radar map of sensory evaluation of red cheese at different ripening times

## 2.5 红纹奶酪挥发性风味化合物和感官品质相关性

挥发性风味化合物和奶酪的感官品质随着奶酪成熟过程发生动态变化。对挥发性风味化合物和奶酪的感官品质进行相关性分析,以分析其潜在的相关性。皮尔逊相关系数显示,部分挥发性风味化合物与奶酪的气味强度显著相关( $|r|>0.80$ ,  $P<0.05$ )(图 4)。

酸奶味与 13 个挥发性化合物呈显著正相关,与 3 个化合物呈显著负相关。如图 4 所示,与酒香味呈正相关的主要是乙酯类化合物(丁酸乙酯、癸酸乙酯、辛酸乙酯等),其次还包括一些醇类化合物,例如己醇、庚醇、辛醇等。奶油味与 2 个挥发性化合物呈显著正相关,分别是 2,3-丁二酮和 2-乙基己醇,与 2 个化合物呈显著负相关,分别是十四酸乙酯和棕榈酸乙酯。2,3-丁二酮一直以来被认为是酸奶的特征风味物质,赋予酸奶奶油香气。花果香与 19 个挥发性化合物呈显著正相关,与 3 个化合物呈显著负相关。与花果香呈正相关的主要是酯类化合物(丁酸乙酯、癸酸乙酯和辛酸乙酯等)、酸类化合物(9-癸烯酸、癸酸和丁酸等)、醇类化合物(己醇、庚醇和辛醇等)。与花果香呈负相关的化合物是 2-乙基己醇、异戊酸和 2,3-丁二酮。奶臭味与 2 个挥发性化合物呈显著正相关,与 1 个化合物呈显著负相关。与奶臭味呈正相关的化合物有 2-甲基丁酸和苯甲醛等。与奶臭味呈负相关的化合物是 2,3-丁二醇。酸味与 18 个挥发性化合物呈显著正相关,与 3 个化合物呈显著负相关。与酸味呈正相关的主要是酸类化合物(9-癸烯酸、壬酸等),其次还包括酯类化合物(棕榈酸乙酯、十四酸乙酯等)、醇类化合物(己醇、庚醇等)等。与酸味呈

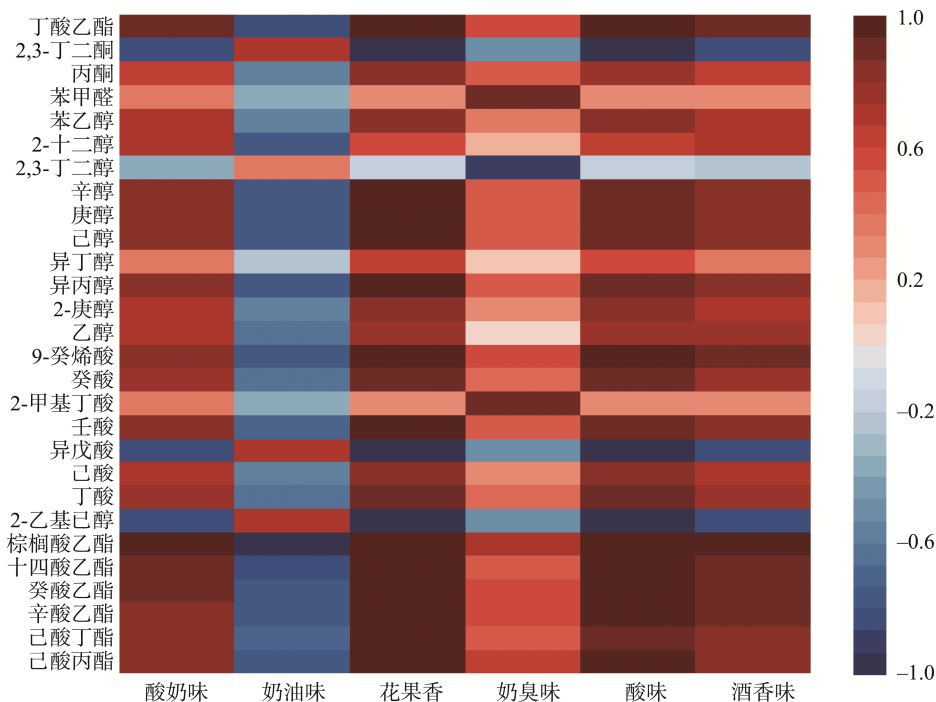


图4 红纹奶酪感官属性与特征挥发性化合物的相关性  
Fig.4 Correlation between sensory properties and characteristic volatile flavor compounds of red cheese

负相关的化合物是 2-乙基己醇、异戊酸和 2,3-丁二酮。与酒香味呈正相关的化合物有 13 个, 主要包括(棕榈酸乙酯、十四酸乙酯等)、醇类化合物(己醇、庚醇等)等。负相关的化合物有 3 个(2-乙基己醇、异戊酸和 2,3-丁二酮)。

综上所述, 不同气味属性的相关性化合物大不相同。红纹奶酪的酸味、酸奶味、奶臭味和酒香味主要和酸类、醇类和酯类化合物相关。花果香和奶油味主要和酮类化合物相关。相关性结果可为奶酪风味品质判定和改善提供基础数据。

## 2.6 红纹奶酪电子舌实验结果

电子舌技术是一种先进的味觉分析工具, 广泛应用于食品科学领域, 用于检测和分析食品的味觉特征。在红纹奶酪的研究中, 电子舌技术被用于检测不同成熟时期红纹奶酪的味觉特征。图 5 展示了 4 个不同成熟时期红纹奶酪的电子舌区别指数雷达分析图谱。如图 5 所示, 不同成熟时期的红纹奶酪在酸味和苦味回味上存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 而其他味觉参数上的差异相对较小。这种显著差异可能是由于奶酪在成熟过程中游离脂肪酸类化合物的积累。游离脂肪酸是奶酪成熟过程中的重要代谢产物, 它们的积累会影响奶酪的风味和口感。此外, 苦味可能来源于氨基酸和肽类, 这些化合物在奶酪的成熟过程中通过蛋白质的水解而产生。氨基酸和肽类不仅影响奶酪的苦味, 还可能与其他风味化合物相互作用, 进一步影响奶酪的整体风味。为了更全面地理解红纹奶酪在不同成熟时期的味觉特征变化, 下一步需要结合红纹奶酪非挥发性代谢物的实验结果进行深入分析。非挥发性代谢物包括多种有机酸、氨基酸、肽类等, 这些化合物在奶酪的成熟过程中起着关键作用。通过综合分析电子舌数据和非挥发性代谢物的实验结果, 可以更准确地揭示红纹奶酪在不同成熟时期的风味变化机制, 为优化奶酪的生产工艺和提高产品质量提供科学依据。

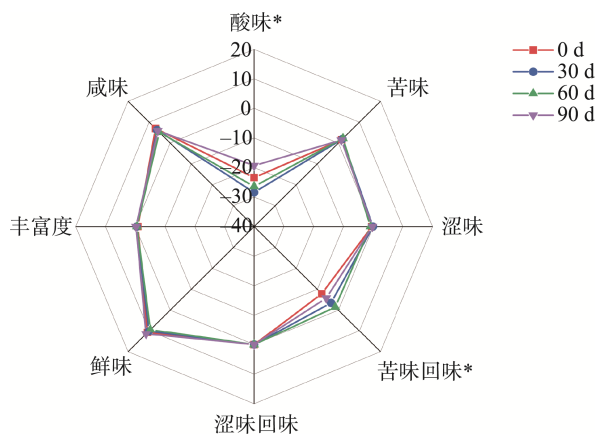


图5 电子舌检测不同成熟时期红纹奶酪的雷达分析图谱  
Fig.5 Radar map of red cheese at different ripening time detected by electronic tongue

## 3 结 论

通过电子鼻可以快速识别不同成熟时间红纹奶酪样本存在显著差异。进一步利用 SPME arrow-GC-MS 结合 ROAV 分析可以得到 ROAV 值大于 1 的 28 种特征风味物质, 包括己酸、辛酸、己酸丁酯、辛酸乙酯、2,3-丁二酮和 2,3-丁二醇等, 酸类、醇类和醛类化合物的总含量在成熟期内先升高后降低, 成熟后期奶酪的酯类和酮类化合物含量显著提高。QDA 分析确定成熟红纹奶酪的气味感官轮廓由酸奶味、酒香味、酸味和花果香组成, 且酸奶味、酒香味和酸味会在奶酪成熟期间显著增强 ( $P < 0.05$ )。皮尔逊相关性分析得到, 红纹奶酪的酒香味、酸奶味、奶臭味和酸味主要和酸类、醇类和酯类化合物相关。花果香和奶油味主要和酮类化合物相关。此外, 电子舌分析显示不同成熟时期的红纹奶酪在酸味和苦味回味上存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。基于不同分析检测技术对红纹奶酪风味物质与感官品质的深入理解, 未来会结合消费者需求和市场趋势, 开发具有独特风味和营养价值的红纹奶酪产品。

## 参考文献

- [1] ZENG H, WANG YD, HAN HY, *et al.* Changes in key aroma compounds and esterase activity of monascus-fermented cheese across a 30-day ripening period [J]. *Foods*, 2022, 11(24): 4026.
- [2] 王童. 红曲 Camembert 干酪加工及品质特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.  
WANG T. Research on processing and quality characteristics of red yeast Camembert cheese [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [3] 谢芳, 杨承剑, 韦升菊, 等. 红曲水牛乳软质干酪成熟特性的研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(11): 158-161, 166.  
XIE F, YANG CJ, WEI SJ, *et al.* Study on the maturation characteristics of red yeast milk soft cheese [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2017, 38(11): 158-161, 166.
- [4] 贾向飞, 郑远荣, 刘振民, 等. 红曲霉奶酪的成熟条件工艺优化及品质变化分析[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(7): 74-82.  
JIA XF, ZHENG YR, LIU ZM, *et al.* Optimization of maturation conditions, process and quality change analysis of *Monascus* cheese [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2024, 50(7): 74-82.
- [5] 徐杏敏, 郑远荣, 刘振民, 等. 奶酪发酵剂红曲霉的筛选及其对奶酪理化、质构和抗氧化性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(17): 127-135.  
XU XM, ZHENG YR, LIU ZM, *et al.* Screening of cheese fermenting agent *Monascus* and its effects on the physicochemical, textural, and antioxidant properties of cheese [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2023, 49(17): 127-135.
- [6] YU H, LIU Z, HANG F, *et al.* Effect of *Monascus* sp. as an adjunct starter on physicochemical properties and proteolysis in semi-hard cheeses during ripening [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2016, 25(3): 785-793.
- [7] YANG Y, XIA Y, LI C, *et al.* Metabolites, flavor profiles and ripening characteristics of *Monascus*-ripened cheese enhanced by *Ligilactobacillus salivarius* AR809 as adjunct culture [J]. *Food Chemistry*, 2024, 436: 137759.
- [8] HARUTO K, TAKERU O, YOH-HEY M, *et al.* Application of red pigment producing edible fungi for development of a novel type of functional cheese [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018,

- 42(12): e13707.
- [9] 王童, 逢晓阳, 芦晶, 等. 红曲霉对类 Camembert 干酪成熟期质构和风味的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 1–11.  
WANG T, PANG XY, LU J, *et al.* The effect of *Monascus* on the texture and flavor of Camembert cheese during ripening [J]. Food Science, 2020, 41(3): 1–11.
- [10] JIAO J, LIU Z, ZHENG Y, *et al.* A novel application of *Monascus purpureus* in semi-soft cheese making [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(3): e15209.
- [11] 徐杏敏, 郑远荣, 刘振民, 等. 基于代谢组学研究红曲霉奶酪的代谢产物特征[J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 18–29.  
XU XM, ZHENG YR, LIU ZM, *et al.* Study on RW product characteristics of *Monascus* cheese based on metabolomics [J]. Science & Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 18–29.
- [12] 高佳嘉, 赵颖, 胡海玥, 等. 大豆杏仁植物基混合奶酪风味特征及理化性质[J/OL]. 天津科技大学学报, 1–11. [2025-03-21]. <https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20240096>  
GAO JJ, ZHAO Y, HU HY, *et al.* Flavor characteristics and physicochemical properties of soybean almond plant-based mixed cheese [J/OL]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 1–11. [2025-03-21]. <https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20240096>
- [13] 王琳, 王琼瑶, 李庆越, 等. 不同凝乳方式加工的硬质奶酪特性分析[J]. 食品工业, 2023, 44(3): 15–19.  
WANG L, WANG QY, LI QY, *et al.* Analysis of characteristics of hard cheese processed by different curdling methods [J]. Food Industry, 2023, 44(3): 15–19.
- [14] HAYASHIDA S, HAGI T, KOBAYASHI M, *et al.* Comparison of taste characteristics between koji mold-ripened cheese and Camembert cheese using an electronic tongue system [J]. Journal of Dairy Science, 2023, 106(10): 6701–6709.
- [15] 王姣, 许凌云, 张晋华, 等. 不同成熟时间切达奶酪中挥发性香气成分及其电子鼻判别分析[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 175–183.  
WANG J, XU LY, ZHANG JH, *et al.* Analysis of volatile aroma components and electronic nose discrimination in Cheddar cheese with different maturation times [J]. Food Science, 2020, 41(20): 175–183.
- [16] 王姣, 许凌云, 张晋华, 等. SPME-GC-MS 和 GC-O 鉴定 3 种不同生产工艺马苏里拉奶酪的特征香气物质[J]. 食品科学, 2020, 41(18): 210–217.  
WANG J, XU LY, ZHANG JH, *et al.* SPME-GC-MS and GC-O identification of characteristic aroma compounds in three different production processes of mozzarella cheese [J]. Food Science, 2020, 41(18): 210–217.
- [17] WANG J, YANG Z, XU L, *et al.* Key aroma compounds identified in Cheddar cheese with different ripening times by aroma extract dilution analysis, odor activity value, aroma recombination, and omission [J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(2): 1576–1590.
- [18] WANG J, YANG ZJ, WANG YD, *et al.* The key aroma compounds and sensory characteristics of commercial Cheddar cheeses [J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(7): 7555–7571.
- [19] 于明, 毛红艳, 祖力皮牙·买买提, 等. HS-SPME-GC-MS 结合电子感官技术分析新疆抓饭的挥发性物质[J]. 中国食品学报, 2023, 23(12): 311–322.  
YU M, MAO HY, ZULIPIYA MMT, *et al.* HS-SPME-GC-MS combined with electronic sensory technology analysis of volatile compounds in Xinjiang rice noodles [J]. Chinese Journal of Food Science, 2023, 23(12): 311–322.
- [20] 毛红艳, 祖力皮牙·买买提, 王佳敏, 等. 基于电子感官技术结合 HP-SPME-GC-MS 分析不同饅头的关键风味物质[J]. 中国粮油学报, 1–14. [2025-03-21]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001025>  
MAO HY, ZULIPIYA MMT, WANG JM, *et al.* Analysis of key flavor compounds in different naan based on electronic sensory technology combined with HP-SPME-GC-MS [J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 1–14. [2025-03-21]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001025>
- [21] 丛艳君, 易红, 郑福平. 基于电子舌技术不同超声处理时间的奶酪滋味区分[J]. 食品科学, 2015, 36(6): 114–118.  
CONG YJ, YI H, ZHENG FP. Cheese flavor differentiation based on electronic tongue technology with different ultrasonic treatment times [J]. Food Science, 2015, 36(6): 114–118.
- [22] LIPKOWITZ JB, ROSS CF, DIAKO C, *et al.* Discriminating aging and protein-to-fat ratio in Cheddar cheese using sensory analysis and a potentiometric electronic tongue [J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(3): 1990–2004.
- [23] 郝秋月, 岳旭良, 樊凡, 等. 发酵乳风味物质生成机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(20): 157–166.  
HAO QY, YUE XL, FAN F, *et al.* Research progress on the formation mechanism of flavor substances in fermented milk [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(20): 157–166.
- [24] 李志国, 宗学醒, 闫清泉, 等. 奶酪风味形成的研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2019, 42(1): 51–54.  
LI ZG, ZONG XX, YAN QQ, *et al.* Research progress on cheese flavor formation [J]. Dairy Science and Technology, 2019, 42(1): 51–54.
- [25] 王超, 高磊, 赵子健, 等. 益生菌附属发酵剂对切达干酪质构, 游离氨基酸和短链脂肪酸的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 136–142.  
WANG C, GAO L, ZHAO ZJ, *et al.* Effects of probiotic associated fermentation agents on the texture, free amino acids, and short chain fatty acids of Cheddar cheese [J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(8): 136–142.
- [26] LUO H, AKKERMANS S, VERHEYEN D, *et al.* Tuning and modeling cheese flavor [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 25(3): e13420.
- [27] 王梦松, 魏超昆, 范敏, 等. GC-MS、DSA 结合化学计量学分析稀奶油发酵过程中挥发性风味物质变化[J]. 食品科学, 2023, 44(16): 267–273.  
WANG MS, WEI CK, FAN M, *et al.* GC-MS, DSA combined with chemometric analysis of changes in volatile flavor compounds during the fermentation process of cream [J]. Food Science, 2023, 44(16): 267–273.
- [28] 范敏, 王梦松, 刘慧, 等. 不同成熟期稀奶油干酪中蛋白质降解及关键风味物质产生的研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(16): 174–181.  
FAN M, WANG MS, LIU H, *et al.* Study on protein degradation and key flavor compounds production in different maturity stages of cream cheese at different maturation stages [J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(16): 174–181.
- [29] 韩颖颖, 王亚东, 韩兆盛, 等. 基于 CATA 和 GC-MS/O 的不同牧场牛奶感官特性及香气活性物质分析[J]. 食品科学, 2024, 45(1): 143–149.  
HAN HY, WANG YD, HAN ZS, *et al.* Sensory characteristics and aroma active substances analysis of different pasture milk based on CATA and GC-MS/O [J]. Food Science, 2024, 45(1): 143–149.
- [30] GROSCH W. Detection of potent odorants in foods by aroma extract dilution analysis [J]. Trends in Food Science & Technology, 1993, 4(3): 68–73.
- [31] 王亚东, 韩颖颖, 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 during storage of fresh breast fans [J]. Food Science, 2022, 43(24): 202–209.
- [32] GROSCH W. Determination of potent odourants in foods by aroma extract dilution analysis (AEDA) and calculation of odour activity values (OAVs) [J]. Flavour & Fragrance Journal, 2010, 9(4): 147–158.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)