刘敏, 韩琬, 窦兆婷, 等. 两种产酶酵母菌对契达干酪成熟期间挥发性风味物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 318−326. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070269

LIU Min, HAN Wan, DOU Zhaoting, et al. Effects of Two Enzyme-producing Yeasts on Volatile Flavor Substances during Cheddar Cheese Maturation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 318−326. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070269

· 分析检测 ·

两种产酶酵母菌对契达干酪成熟期间挥发性风味物质的影响

刘　敏, 韩　琬, 窦兆婷, 郭京先

（内蒙古农业大学职业技术学院, 内蒙古包头 014109）

摘　要: 为研究马克斯克鲁维酵母（M19）和发酵毕赤酵母（M26）两种产酶酵母菌对干酪风味的影响，本实验采用 SPME-GC-MS 和电子鼻检测技术对不添加（空白对照）和添加马克斯克鲁维酵母（M19）和发酵毕赤酵母（M26）制作的契达干酪成熟期间挥发性化合物种类进行鉴定。结果表明，3 组干酪样品中共检测出挥发性化合物 64 种，其中酸类 10 种、醇类 16 种、酯类 19 种、醛类 6 种、酮类 8 种、内酯类 2 种和其他类 3 种，将测得的挥发性化合物含量及种类进行 PCA 与聚类分析发现，添加 M26 干酪组主要挥发性物质为酸类、醇类、酯类以及酮类，添加 M19 干酪组主要挥发性物质为醇类，空白对照组主要挥发性物质为醇类，通过 ROAV 对干酪成熟期间关键风味物质进行比较分析，发现添加 M19 干酪组在成熟期 20 d 时的挥发性风味化合物最多，包括乙酸、异戊醇、正戊醇、乙醇、己酸乙酯、乙酸乙酯、乙酸苯乙酯、癸酸乙酯、丁酸乙酯和苯甲醛。而添加 M26 干酪组在成熟期 30 d 挥发性风味化合物主要包括乙酸、异戊醇、正戊醇和己酸乙酯。其中己酸乙酯在两组干酪中 ROAV 最大，是产酶酵母菌发酵后的干酪中最重要的风味物质，使干酪呈现水果香和酒香。其中以成熟期为 20 d 时 M19 发酵干酪实验组的气味最强烈，说明 M19 发酵干酪能更高效地促进干酪风味形成，缩短成熟周期至 20 d，有助于降低生产成本、提升效率。而 M26 发酵干酪风味开发能力较弱，可能导致产品风味单一、成熟周期长。研究结果为干酪生产中酵母菌的使用提供参考。

关键词: 马克斯克鲁维酵母, 发酵毕赤酵母, 契达干酪, SPME-GC-MS, 电子鼻, 风味物质

中图分类号: TS252.53　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0318−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070269

本文网刊:

Effects of Two Enzyme-producing Yeasts on Volatile Flavor Substances during Cheddar Cheese Maturation

LIU Min, HAN Wan, DOU Zhaoting, GUO Jingxian

（Vocational and Technical College of Inner Mongolia Agricultural University, Baotou 014109, China）

Abstract: In order to study the effects of two enzyme-producing yeasts, *Kluyveromyces marxianus* (M19) and *Pichia fermentans* (M26) on the flavor of cheese, SPME-GC-MS and electronic nose detection were used to identify the volatile compounds in Cheddar cheese produced without (control) and with *Kluyveromyces marxianus* (M19) and *Pichia fermentans* (M26). The results showed that a total of 64 volatile compounds were detected across the three groups of cheese samples, including 10 acids, 16 alcohols, 19 esters, 6 aldehydes, 8 ketones, 2 lactones and 3 others. Principal component analysis (PCA) and cluster analysis of the detected volatile compound content and types revealed that the main volatile substances in the cheese group with M26 addition were acids, alcohols, esters, and ketones. The main volatile substances in the cheese group with M19 addition were alcohols, while the main volatile substances in the control group were alcohols. Comparative analysis of key flavor substances based on relative odor activity value (ROAV) during cheese ripening showed that the M19 group exhibited the highest number of volatile flavor compounds at 20 days of ripening, including acetic acid, isoamyl

收稿日期: 2025−07−23

基金项目: 内蒙古农业大学职业技术学院院级青年科研项目（2024QNZX09）。

作者简介: 刘敏（1975−）, 女, 硕士, 教授, 研究方向: 农畜产品贮藏加工, E-mail: minliu0000@163.com。

alcohol, n-amyl alcohol, ethanol, ethyl hexanoate, ethyl acetate, phenethyl acetate, ethyl decanoate, ethyl butyrate, and benzaldehyde. In contrast, the M26 group at 30 days of ripening primarily contained acetic acid, isoamyl alcohol, n-amyl alcohol, and ethyl hexanoate. Among these, ethyl hexanoate showed the highest ROAV in both treatment groups, indicating it as the most critical flavor compound in cheeses fermented with enzyme-producing yeasts, imparting distinct fruity and wine-like aromas. The odor of the M19 fermented cheese experimental group was strongest when the maturity period was 20 days, indicating that M19 fermented cheese could more efficiently promote cheese flavor formation, shorten the maturation period to 20 days, and help reduce production costs and improve efficiency. However, the flavor development ability of M26 fermented cheese was relatively weak, which might lead to a single flavor and a long maturation cycle of the product. These findings provide a valuable reference for the application of yeast in cheese production.

Key words: *Kluyveromyces marxianus*; *Pichia fermentans*; Cheddar cheese; SPME-GC-MS; electronic nose; flavor substances

近年来，干酪在我国的消费量逐渐增长，但其独特风味主要形成于成熟阶段[1−2]。其成熟过程分为初级和次级代谢[3−4]；初级代谢决定基本风味；次级代谢形成特有风味。国内干酪市场需求持续增长，然而本土产能低下，大多依赖进口。目前，进口干酪的发展受价格偏高、其较为浓烈的风味与国内消费者的饮食习惯不符，以及成熟时间周期过长等因素制约。尽管在生乳干酪的微生物群落中，乳酸菌（LAB）占据主导地位，但酵母菌对风味形成与生化进程具有关键作用[5]，酵母菌通过与乳酸菌互作形成协同效应，既促进乳酸菌生长，也显著提升干酪的感官品质。此外，添加产酶酵母菌可大幅缩短成熟时间，在保证干酪品质的同时降低生产成本。近年来，国际干酪研究聚焦于风味解析、新型发酵剂与益生菌开发、减脂干酪质构优化及功能性成分强化；国内研究则紧跟国际前沿，着力于本土特色乳源干酪开发、工艺创新以适配国人消费习惯，并深入探索其营养与功能特性，推动产业向多元化、功能化与本地化方向发展。因此，研究两种产酶酵母菌对干酪成熟期间风味的影响，对提高契达干酪风味稳定性方面进行研究，为开发干酪新型风味发酵剂或附属发酵剂奠定理论基础。研究成果对于提升干酪产品生产与消费，推动我国干酪产业的快速发展具有重要意义。

目前，加入辅助发酵剂已被大量应用于干酪生产以改变其风味和加速成熟过程[6]。关于酵母菌发酵干酪，国内外已有大量的研究，主要集中于成熟过程中干酪的理化和风味变化。de Freitas 等[7] 研究 Cantal 干酪发酵过程中发现，添加乳酸克鲁维酵母菌（*Kluyveromyces lactis*）作辅助培养物能引起一些挥发性气味化合物浓度的较大变化，这种影响对于乙醇、乙酯、一些醛、支链醇、支链酸和 1-辛烯-3-醇尤其明显，能够显著影响 Cantal 干酪风味。Sevinc-Demircan[8] 等将 *Yarrowia lipolytica*、*Debaryomyces hansenii* 和 *Kluyveromyces lactis* 分别掺入四批奶酪中，含有 *Y. lipolytica* 的奶酪最受欢迎，它含有更多的短链脂肪酸，尤其是丁酸。Bertuzzi 等[9] 将汉逊德巴利酵母 DPC6258 与一些细菌涂抹于成熟的切达干酪，酵母菌和细菌培养物都能够在奶酪表面较好生长并成为奶酪表面的主要微生物群，生产出具有可接受的外观和新颖风味及香气特征的奶酪品种。

GC-MS、电子鼻被广泛应用于食品风味评价[10]，电子鼻是基于传感器阵列，快速简便但缺乏定性及定量方法[11−13]。GC-MS 凭借高效分离与高灵敏度可实现挥发性成分的精确定鉴定[14]。两者联合，可以构建一个既快速高效又科学准确的挥发性物质分析体系，广泛应用于多个领域。

目前，大多数关于干酪产品的研究主要集中在乳酸菌上[15]，而酵母在塑造整体产品质量方面的研究仍然有限。传统发酵乳制品中富含优质的自然菌株，能提供丰富的菌系和酶系，多元化产品的功能成分。因此，首次尝试将产酶酵母菌作为辅助发酵剂用于契达干酪的制作，本研究将筛选得到的 2 株产酶酵母菌 M19 和 M26 应用于契达干酪加工中，通过 SPME-GC-MS 技术确定不同成熟时期干酪中的关键风味化合物，并对其进行主成分分析与聚类分析。采用雷达图对电子鼻检测干酪中气味差异进行分析，发现添加产酶酵母菌有助于改善契达干酪在成熟后期出现的不良气味，缩短成熟时间，从而降低干酪的生产成本。本文旨在探讨两种产酶酵母菌对干酪成熟过程中关键挥发性风味物质生成种类的影响，为其后续在干酪工业化生产中的应用提供理论支持。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

产酶酵母菌 M19 和 M26　内蒙古农业大学职业技术学院实验室筛选（从赤峰市、锡林郭勒盟、通辽市和兴安盟市采集酸奶、马奶酒、干酪）；生牛乳　内蒙古自治区包头市萨拉齐牧区；商业乳酸菌发酵剂（R-707）、凝乳酶（890 IMCU/g）　科汉森（北京）贸易有限公司；YDP 固体培养基、YDP 液体培养基　青岛海博生物技术有限公司；食盐　中国盐业股份有限公司。

SHHY-38 小型干酪槽　上海顺仪实验设备有限公司；Trace1300-ISQ 气相色谱-质谱联用仪　美国 Thermo Fisher 科技公司；751 微米 CAR/PDMS 萃取头　美国 Supelco 公司；PH/T16MM 台式高速离心机　湖南赫西仪器装备有限公司；KG-SX-700 立式压力蒸汽灭菌锅　上海莱睿科学仪器有限公司；

HWS-250B 恒温生化培养箱　北京恒诺利兴科技有限公司; HHS-11-1 恒温水浴锅　上海博迅实业有限公司医疗设备厂; DL-CJ-2ND1 洁净工作台　北京东联哈尔仪器制造有限公司; 837FT0921 电子鼻　上海瑞玢智能科技有限公司;

1.2　实验方法

1.2.1　干酪的制作　生牛乳→过滤杀菌(65 ℃)→冷却(30 ℃)→添加乳酸菌发酵剂(2%(v/v))→调整酸度加凝乳酶→凝乳(pH 为 4.4)→切割→排出乳清→添加 M19 和 M26 发酵剂(2%(v/v))→堆酿→切块→压榨→成型→包装→成熟。

生牛乳: 全脂生鲜奶。

过滤杀菌: 利用纱布进行过滤并于 65 ℃ 进行杀菌。

冷却: 通过排水对奶酪槽中的牛乳进行冷却至 30 ℃。

添加乳酸菌发酵剂: 乳酸菌商业发酵剂以 2%(v/v)添加量接种至牛乳中。

调整酸度加凝乳酶: 将凝乳酶与 1% 的食盐水混合置于 37 ℃ 水浴锅中活化 1 h 待用, 凝乳酶添加量为 0.01%~0.02%, 且凝乳时间控制在 40±5 min。

凝乳: 凝乳过程保持 35℃ 恒温静置, 待 pH 降至 4.4±0.05 时, 辅以切割确认凝乳程度。

切割及排乳清: 用切割器对干酪进行切割, 升温等待乳清析出后用滤网排出。

添加酵母菌发酵剂: 酵母菌发酵剂 2%(v/v)的添加量, 将产酶酵母菌菌悬液倒入凝乳中。

堆酿及切块: 每 15 min 反转堆积一次, 共反转 7 次, 将干酪切成 1 cm 方块并加盐搅拌。

压模成型: 将空白对照组和实验组干酪放入模具内, 用纱布分别包好, 在加压模具下继续排乳清 3 h, 然后缓慢升压, 继续压榨 3 h 效果更佳。

包装: 将干酪用无菌袋包装。

成熟: 将压榨成型的干酪置于 5 ℃ 无菌环境中发酵 40 d, 每间隔 48 h 在干酪表面用纱布均匀擦拭 5% 的无菌盐水, 保证干酪湿度, 并有效预防和抑制干酪表面有害微生物的生长繁殖。

根据以上方法, 制得三种干酪, 空白对照组为仅接种商业乳酸菌发酵干酪、实验组为接种 M19 和商业乳酸菌以及接种 M26 和商业乳酸菌发酵干酪。三种干酪的成熟期均为 30 d, 在成熟期的第 0、10、20、30 d 分别对干酪进行取样, 探究其风味随成熟时间的变化情况。

1.2.2　固相微萃取-气相色谱-质谱联用测定挥发性风味物质　参照王蓓等[16] 的方法加以改进。固相微萃取基本条件: 将 2.0 g 干酪样品装入到 20 mL 萃取瓶, 于 60 ℃ 水浴加热 30 min 后, 将预先活化好的固相微萃取纤维头插入瓶内顶空部位进行 50 min 的挥发性成分富集, 萃取结束后取出纤维头并插入到气相色谱汽化室中进行 GC-MS 分析。

气相色谱条件: 色谱柱为 DB-WAX 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm), 载气为氦气, 柱温箱初始温度 35 ℃, 进样口温度 250 ℃, 不分流进样, 载气流速 1 mL/min, 柱温箱升温程序为 35 ℃ 保持 4 min, 4 ℃/min 升至 100 ℃, 6 ℃/min 升至 150 ℃, 5 ℃/min 升至 230 ℃, 保持 5 min。

质谱条件: 电子电离源, 电离能量 70 eV, 离子源温度为 230 ℃, 接口温度 250 ℃, 质量扫描范围为 20~350 amu。

挥发性物质定性及定量分析: 由安捷伦质谱数据处理系统与 NIST 11 标准库结合自动检索各组分质谱数据, 根据定性分析报告中各物质的峰面积和总面积的百分比计算出每种物质的相对含量。

1.2.3　相对气味活度值　依据相对气味活度值(ROAV)法定量分析不同成熟阶段化合物对契达干酪风味的贡献程度[17]。

ROAV 计算公式如下:

$$ROAV = 100 \times \frac{C_i}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_i}$$

式中: C_i: 各挥发性物质的相对含量, %; T_i: 各挥发性物质的感觉阈值, μg/L; C_{max}: 对样品总体风味贡献最大组分的相对含量, %; T_{max}: 对样品总体风味贡献最大组分的感觉阈值, μg/L。

1.2.4　电子鼻检测　准确称取 6 g 不同成熟期契达干酪置于 30 mL 专用进样瓶瓶后, 加盖密封, 60 ℃ 水浴锅富集 30 min 后进行测试, 插入电子鼻探头吸取顶端空气进行检测分析, 电子鼻参数设置: 检测时间 60 s, 预进样 5 s, 清洗时间 120 s, 气体流速 1 L/min, 每个样品测 5 次平行。

1.3　数据处理

实验均重复 3 次, 数据以平均数±标准差表示。采用 SPSS22.0 进行方差分析和差异性显著分析, $P<0.05$ 表示差异显著。并采用 Origin2021 对挥发性化合物进行主成分分析(PCA)、相关性和聚类分析。

2　结果与分析

2.1　契达干酪挥发性风味化合物占比分析

将三组干酪(空白对照组、M19 发酵干酪实验组、M26 发酵干酪实验组)进行 GC-MS 检测, 挥发性化合物种类以及各类物质在样品中的占比见图 1。由图 1 可知, 空白对照组中共检测出 7 类挥发性化合物, 分别为: 酸(53.41%)、醇(32.43%)、酯(2.54%)、醛(1.66%)、酮(6.19%)、内酯(1.54%)、其他(2.23%), 其中酸类为主要风味物质; M19 发酵干酪中共检测出 7 类挥发性化合物, 分别为酸(2.84%)、醇(61.52%)、酯(13.68%)、醛(2.83%)、酮(5.22%)、内酯(0.25%)、其他(13.66%), 其中醇类为主要风味物质; M26 发酵干酪中共检测出 7 类挥发性化合物, 分别为酸(25.15%)、醇(47.27%)、酯(8.83%)、醛(5.24%)、酮(4.26%)、内酯(0.99%)、其他(8.26%), 其中醇类为主要风味物质。结果表明添加产酶酵母

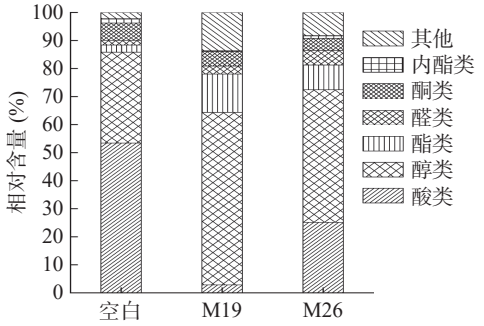


图 1　契达干酪各类挥发性化合物占比

Fig.1　Proportion of various volatile compounds in Cheddar cheese

菌的契达干酪在成熟后期的挥发性风味物质主要以醇类为主。

2.2　不同成熟阶段契达干酪挥发性化合物相对含量分析

由表 1 可知，在不同成熟期三组干酪（空白对照组、M19 发酵干酪实验组、M26 发酵干酪实验组）中共检测出 64 种挥发性风味化合物，其中酸类 10 种、醇类 16 种、酯类 19 种、醛类 6 种、酮类 8 种、内酯类 2 种和其他类 3 种。

酸类物质的种类和数量对干酪的风味具有重要贡献，也是酮、醛类物质的前体[18]。随着成熟期的延长，在 10~30 d 时，空白对照组中乙酸含量显著高于实验组（M19 和 M26 发酵干酪）的乙酸含量（$P<0.05$），可能是因为产酶酵母菌的添加减少了酸类物质的形成，同时改善乙酸浓度偏高所导致的刺鼻气味与尖酸味[19]。酮类物质主要通过脂肪酸和氨基酸的降解或多不饱和脂肪酸的氧化反应生成，这些化合物能赋予干酪独特的风味特征；其中 2-壬酮呈现花香味和蘑菇味，3-羟基-2-丁酮则产生奶油香气[20]。仅在 M26 发酵干酪实验组中检测出羟基丙酮，赋予干酪焦糖味[21]；醛类物质主要来源于不饱和脂肪酸降解、氨基酸转氨作用或 Strecker 降解[22]，醛类主要在发酵毕赤酵母 M26 组中检出，空白组与马克斯克鲁维酵母 M19 实验组中检出的含量较少，可能是由于醛类物质在产生后被迅速氧化还原为相应的醇和酸。且在成熟期 20 d 时，仅有 M19 发酵干酪实验组中检测出苯甲醛，该物质能为干酪带来坚果味[23]。在 M26 发酵干酪实验组中，2-苯基乙醛为主要醛类物质，呈现风信子香气，低浓度时有杏仁和樱桃香味。其含量与其他两组具有显著性差异（$P<0.05$）。

醇类物质分别通过乳糖降解过程、氨基酸转化反应以及甲基酮的还原作用三种代谢途径生成。由于其感官识别阈值相对较高，对干酪主体风味的直接贡献度较低，主要承担着风味修饰功能[24]。醇类在空白对照组、M19 发酵干酪和 M26 发酵干酪中相对含量分别为 32.43%、61.52%、47.27%。在干酪成熟 10 d 时，二己二醇、异戊醇为三组干酪共有物质，其中异戊醇为三组干酪中相对含量最高的挥发性化合物，分别为空白对照组（3.72%）、M19 发酵干酪实验组（10.30%）、M26 发酵干酪实验组（7.80%）。实验组中异戊醇含量与空白组异戊醇含量差异显著（$P<0.05$），它可以赋予契达干酪类似于发酵面包和酵母味[25]。

酯类物质是干酪中重要的风味成分[26]，由乳脂肪水解产生的脂肪酸与乳糖代谢生成的醇类经酯化反应形成[27]。在干酪成熟 20 d 时，空白对照组酯类物质相对含量为 0.37%、M19 发酵干酪实验组相对含量为 9.78%、M26 发酵干酪实验组相对含量为 0.85%，并且 M19 发酵干酪实验组中酯类物质相对含量显著高于其他两组干酪（$P<0.05$）。其中，乙酸乙酯贡献菠萝甜香和苹果香味[28]；辛酸乙酯具有杏仁味和香蕉味[29]；癸酸乙酯赋予干酪葡萄酒的芳香特征[30]；乙酸苯乙酯赋予干酪玫瑰、蜂蜜和苹果的混合

表 1　不同成熟阶段干酪中挥发性风味化合物相对含量

Table 1　Relative contents of volatile flavor compounds in cheese at different maturation stage

序号	化合物	相对含量(%)											
		K-0	M19-0	M26-0	K-10	M19-10	M26-10	K-20	M19-20	M26-20	K-30	M19-30	M26-30
A1	甲基丙二酸	–	0.9±0.10^{b}	1.70±0.05^{a}	–	–	0.20±0.03	2.40±0.04^{a}	–	2.02±0.05^{b}	2.40±0.05^{a}	–	0.22±0.02^{b}
A2	正戊酸	–	–	1.38±0.08	–	–	0.21±0.01	–	–	–	0.33±0.03^{b}	–	6.34±0.04^{a}
A3	正己酸	–	–	1.38±0.02	–	–	–	–	–	–	–	–	–
A4	乙酸	–	–	6.79±0.09	14.36±0.06^{a}	–	7.66±0.06^{b}	19.22±0.02^{a}	1.68±0.08^{c}	8.13±0.03^{b}	7.50±0.02^{a}	–	4.35±0.05^{b}
A5	辛酸	–	–	1.22±0.02	–	–	–	–	–	–	–	–	–
A6	3-羟基月桂酸	–	–	0.42±0.02	–	–	–	–	–	–	–	–	–
A7	3-甲基戊酸	–	0.23±0.03	–	–	–	0.16±0.03	–	–	–	0.10±0.01	–	–
A8	7-酮基辛酸	–	–	–	–	–	0.14±0.02	–	–	0.18±0.05	0.12±0.02	–	–
A9	丙二酸	–	–	–	–	–	–	19.22±0.02^{a}	–	8.13±0.03^{b}	4.35±0.05	–	–
A10	乳酸	–	–	0.58±0.08	–	–	–	–	–	–	–	–	–
B1	二乙二醇	–	0.93±0.03^{a}	0.41±0.01^{b}	2.15±0.05^{a}	0.69±0.09^{b}	0.28±0.04^{c}	2.44±0.04^{a}	–	2.01±0.01^{b}	2.48±0.08	–	–
B2	2-氨基乙醇	–	–	6.56±0.06	–	–	1.11±0.01	–	0.70±0.05^{b}	9.07±0.07^{a}	8.40±0.03^{a}	–	2.26±0.02^{b}
B3	异戊醇	–	–	4.66±0.06	3.72±0.02^{c}	10.30±0.05^{a}	7.80±0.02^{b}	3.53±0.03^{b}	11.98±0.03^{a}	–	2.94±0.04^{b}	–	6.28±0.08^{a}
B4	正戊醇	–	–	4.66±0.06	–	10.30±0.02^{a}	7.80±0.10^{b}	–	11.98±0.04^{a}	11.31±0.06^{b}	–	–	6.28±0.04
B5	2,3-丁二醇	–	–	0.27±0.07	–	–	–	–	–	–	–	–	–

续表 1

序号	化合物	相对含量(%)											
		K-0	M19-0	M26-0	K-10	M19-10	M26-10	K-20	M19-20	M26-20	K-30	M19-30	M26-30
B6	2-辛醇	–	–	0.16±0.06	–	–	–	–	–	–	–	–	–
B7	3-甲基-2-庚醇	–	–	0.24±0.04	–								
B8	6-甲基-2-庚醇	–	–	0.24±0.02	–	–	–	–	–	–	–	–	–
B9	2-乙基己醇	–	–	0.68±0.08	–	–	–	2.27±0.07^{a}	–	0.62±0.02^{b}	–	–	–
B10	苯乙醇	–	–	4.21±0.01	–	1.35±0.05^{b}	5.09±0.09^{a}	–	4.93±0.03^{b}	11.52±0.02^{a}	–	–	3.25±0.05
B11	2-十六醇	–	–	0.30±0.05	0.46±0.06	–	–	–	–	–	–	–	–
B12	十六醇	–	0.63±0.03	–	–	–	–	–	–	0.12±0.02	0.12±0.02	–	–
B13	环癸醇	1.20±0.02^{a}	0.82±0.02^{b}		–	–	–	–	–	–	–	–	–
B14	1-苯基-2-丙醇	–	–	–	0.25±0.05	–	–	0.21±0.01	–	–	–	0.32±0.02	–
B15	2-丙基-1-戊醇	–	–	–	–	–	–	2.27±0.05	–	–	–	–	–
B16	乙醇	–	–	–	–	–	–	–	36.59±0.04	–	–	–	–
C1	乙酸甲酯	–	–	2.94±0.04	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C2	甲氧基乙酸乙酯	–	–	3.88±0.08	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C3	异己酸乙酯	–	0.16±0.06	–	–	0.32±0.02^{a}	0.36±0.06^{a}	0.37±0.02^{b}	0.36±0.06^{b}	0.53±0.03^{a}	0.58±0.03^{a}	0.49±0.09^{ab}	0.39±0.09^{b}
C4	乙酸壬酯	–	–	–	0.33±0.03	–	–	–	–	0.32±0.02	–	–	–
C5	己酸乙酯	–	–	–	–	–	–	–	0.36±0.02	–	–	–	0.39±0.01
C6	邻苯二甲酸正丁异辛酯	–	–	–	0.26±0.06	–	–	–	–	–	–	–	–
C7	顺式-7-十六碳烯酸甲酯	–	–	–	0.22±0.02	–	–	–	–	–	–	–	–
C8	丙酸壬酯	–	–	–	0.19±0.04	–	–	–	–				
C9	邻苯二甲酸二异丁酯	–	–	–	0.33±0.03	–	–	–	–	–	–	–	–
C10	棕榈酸甲酯	–	–	–	0.26±0.06^{a}	0.13±0.03^{b}	–	–	–	–	–	–	–
C11	乙酸乙酯	–	–	–	–	1.30±0.05	–	–	2.60±0.10	–	–	–	–
C12	2-乙基丁酸烯丙酯	–	–	–	–	0.32±0.02	–	–	0.12±0.07	–	–	–	–
C13	辛酸乙酯	–	–	–	–	0.26±0.06	–	–	0.95±0.05	–	–	–	–
C14	乙酸苯乙酯	–	–	–	–	0.48±0.08	–	–	1.62±0.02	–	–	0.50±0.05	–
C15	癸酸乙酯	–	–	–	–	–	–	–	0.95±0.05	–	–	–	–
C16	异丁酸2-苯乙酯	–	–	–	–	–	–	–	1.62±0.02	–	–	–	–
C17	3-氧丁基乙酸酯	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.30±0.05	
C18	碳酸甲乙酯	–	–	–	–	–	–	–	0.62±0.02	–	–	–	–
C19	丁酸乙酯	–	–	–	–	–	–	–	0.22±0.02	–	–	–	–
D1	丁二醛	–	–	0.13±0.03	–	–	–	–	–	–	–	–	–
D2	2-苯基乙醛	0.26±0.06^{b}	–	2.43±0.03^{a}	0.53±0.03^{a}	0.33±0.03^{b}	–	–	1.34±0.04^{b}	2.51±0.01^{a}	0.37±0.07^{a}	0.31±0.01^{a}	0.15±0.05^{b}
D3	正壬醛	–	–	–	0.49±0.01	–	–	–	–	–	–	–	–
D4	苯甲醛	–	–	–	–	–	–	–	0.32±0.02	–	–	–	–
D5	十三醛	–	0.41±0.01	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
D6	L-(-)-甘油醛	–	–	–	–	0.12±0.02	–	–	–	–	–	–	–
D6	L-(-)-甘油醛	–	–	–	–	0.12±0.02	–	–	–	–	–	–	–
E1	2-甲基四氢呋喃-3-酮	–	–	0.67±0.07	–	–	–	–	–	–	–	–	–
E2	羟基丙酮	–	–	2.94±0.04	–	–	–	–	–	–	–	–	–
E3	3-羟基-2-丁酮	–	–	0.24±0.04	–	–	–	–	–	–	–	–	–
E4	4-羟基-2-丁酮	–	–	–	–	–	–	–	2.60±0.05	–	–	–	–
E5	4-甲基-2-己酮	1.01±0.01^{a}	0.45±0.05^{b}	–	0.62±0.02^{a}	0.13±0.03^{c}	0.24±0.04^{b}	0.63±0.03	–	–	0.62±0.02	–	–
E6	5-苯基戊烷-2-酮	–	–	–	–	–	–	–	1.62±0.02	–	–	0.42±0.04^{a}	0.18±0.01^{b}
E7	2-壬酮	1.73±0.03	–	–	–	–	–	0.63±0.01	–	–	0.62±0.02	–	–
E8	8-羟基-2-辛酮	–	–	–	0.33±0.03	–	–	–	–	–	–	–	–
F1	丁位壬内酯	0.19±0.04	–	–	–	–	–	0.28±0.08^{a}	–	0.29±0.01^{a}	0.60±0.05^{a}	–	0.31±0.06^{b}
F2	Γ-二甲基丁内酯	0.23±0.03	–	–	0.38±0.08^{a}	0.13±0.03^{b}	–	0.28±0.03^{a}	0.12±0.02^{b}	0.29±0.05^{a}	–	–	0.12±0.02
G1	L-丙氨酰甘氨酸	–	–	6.56±0.06	3.64±0.04^{a}	1.40±0.05^{c}	1.95±0.01^{b}	2.27±0.03^{a}	2.05±0.02^{b}	0.20±0.03^{c}	1.67±0.07^{b}	–	5.97±0.07^{a}
G2	肌氨酸	–	–	6.56±0.01	2.52±0.02^{a}	–	1.95±0.05^{b}	2.30±0.05^{b}	2.05±0.05^{b}	21.69±0.01^{a}	2.22±0.02^{b}	–	5.97±0.02^{a}
G3	乳酰胺	–	–	–	–	45.05±0.05^{a}	16.78±0.08^{b}	34.07±0.07^{a}	14.47±0.07^{c}	26.60±0.01^{b}	2.85±0.05^{b}	–	28.47±0.07^{a}

注: A1~A10为酸类; B1~B16为醇类; C1~C19为酯类; D1~D6为醛类; E1~E8为酮类; F1~F2为内酯类; G1~G3为其他; K-0为空白对照组0 d成熟期; K-10为空白对照组10 d成熟期; K-20为空白对照组20 d成熟期; K-30为空白对照组30 d成熟期; M19-0为M19实验组0 d成熟期; M19-10为M19实验组10 d成熟期; M19-20为M19实验组20 d成熟期; M19-30为M19实验组30 d成熟期; M26-0为M26实验组0 d成熟期; M26-10为M26实验组10 d成熟期; M26-20为M26实验组20 d成熟期; M26-30为M26实验组30 d成熟期; 同行不同小写字母表示同一成熟期不同样品组间差异显著(P<0.05)。

香气[31]，这些酯类物质共同作用，改善契达干酪在成熟后期出现的不良风味。

根据对三组干酪中挥发性化合物的分析可以推测得出加入产酶酵母菌使契达干酪在成熟过程中挥发性化合物的种类变得更加全面，同时在风味方面也得到了一定改善。

2.3　电子鼻对不同成熟阶段干酪传感器响应值分析

对三组干酪（空白对照组、M19 发酵干酪实验组、M26 发酵干酪实验组）的电子鼻数据作雷达图，对比结果如图 2 所示。电子鼻每个传感器对 3 种干酪均有明显的响应，且响应值均不相同，其中 M26 实验组 10 d 在传感器 S2 上响应值强烈，S2 传感器分别对醇类和烷烃类物质敏感，赋予干酪甜味；空白对照组成熟期在 20 d 时，传感器 S11 响应值最大，响应值为 1.0892；实验组干酪在 0~30 d 时在传感器 S9 上的响应值强烈，表明不同成熟期干酪中醇类、酮类和苯类物质风味特征明显，赋予干酪甜味和焦糖味，此外，空白对照组在 20 d 时，在这 8 个传感器（S5、S7、S8、S10、S11、S12、S16、S17）上的响应值要高于实验组，说明含有较多的氮气、天然气、液化气、烷烃、硫化物，主要表现为硫化物和烷烃类化合物，是空白对照组后期所产生的不良风味；M19 发酵干酪实验组和 M26 发酵干酪实验组在传感器 S4、S9、S14、S15、S18 响应值要高于空白对照组，风味主要表现为甲烷、乙醇、丙酮和甲苯，为干酪贡献了甜味、焦糖味和黄油味。由此可见，3 组干酪的香气特性有较大差异，且 M19 和 M26 发酵干酪实验中香气物质最丰富，特别是酮类和醇类，这与 GC-MS 检测结果基本一致。

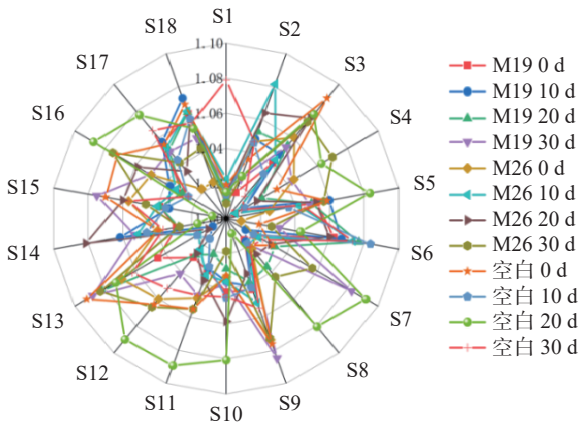


图 2　不同成熟期契达干酪的电子鼻雷达图

Fig.2　Electronic nose radar diagram of Cheddar cheese at different ripening stages

2.4　不同成熟阶段契达干酪挥发性风味物质 PCA

PCA 是一种多元统计分析方法，对三组干酪（空白对照组、M19 发酵干酪实验组、M26 发酵干酪实验组）所测得的 64 种挥发性物质相对含量进行 PCA。如图 3、图 4 所示，PC1 的贡献率为 23.3%，PC2 的贡献率为 20.0%。两个主成分的累计贡献率为 43.3%，说明此模型有效。空白对照组、M19 发酵干酪实验组以及 M26 发酵干酪实验组总体上分别处于不同象限，由此可以说明产酶酵母菌发酵后的干酪中的化合物存在显著性差异。总体看来，样品组内散点分布集中，说明组内差异较小，样本数据具有良好的重复性。所以采用 GC-MS 测定三组干酪中的挥发性物质能够很好地证明产酶酵母菌发酵后的干酪在挥发性组分方面存在差异。PC1 与 3-甲基-2-庚醇（B7）、6-甲基-2-庚醇（B8）、2,3-丁二醇（B5）、甲氧基乙酸乙酯（C2）等物质呈正相关。PC2 与己酸乙酯（C5）、乙酸苯乙酯（C14）、乙酸乙酯（C11）、苯甲醛（D4）等物质呈正相关。根据物质分布来看，M26 发酵干酪实验组中挥发性化合物数量相较其他两组样品更为丰富，包括酸类、醇类、酯类以及酮类，这说明经过成熟后的契达干酪在风味方面发生了明显变化，而且酸类物质也可以为后续其他物质的形成提供前体物质。M19 发酵干酪实验组的挥发性化合物中酯类物质占据主导地位，主要由醇类与酸类进一步发生反应生成，这些物质为干酪本身提供了果香，并且酸和醛在后期发酵过程中也为其他香气物质的形成奠定了基础。而空白对照组中的挥发性化合物主要以醇类物质为主，为干酪贡献酒香。

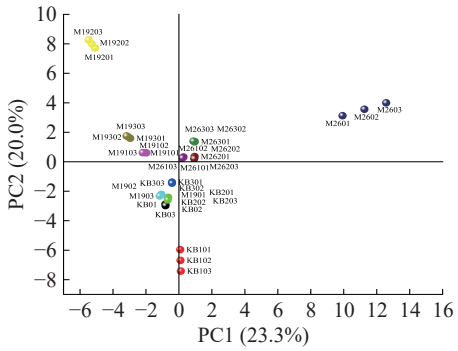


图 3　不同成熟期契达干酪风味物质 PCA

Fig.3　PCA of flavor compounds of Cheddar cheese at different maturation stages

注：01~03 表示成熟期 0 d 时的结果；101~103 表示成熟期 10 d 时的结果；201~203 表示成熟期 20 d 时的结果；301~303 表示成熟期 30 d 时的结果。

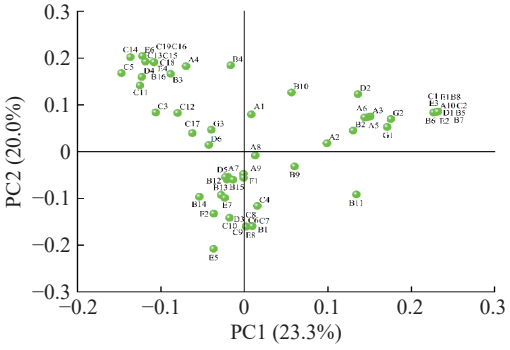


图 4　不同成熟期契达干酪风味物质载荷图

Fig.4　Flavor material load diagram of Cheddar cheese at different maturation stages

2.5 不同成熟阶段契达干酪风味物质组成分析

聚类热图与动态 Circos 图结合和深度解析数据聚类及关联模式，以渐进色带对应颜色标签的占比形式将检测得到的各挥发性化合物与三组干酪的相关性直观地展现出来。结合图 5 和图 6 分析可知，在 0~20 d 时，M26 发酵干酪实验组中酸类（A）和醇类（B）物质相对含量及种类较多，其中包括正己酸（A3）、辛酸（A5）、3-羟基月桂酸（A6）、乳酸（A10）、2,3-丁二醇（B5）、2-辛醇（B6）和 3-甲基-2-庚醇（B7）、6-甲基-2-庚醇（B8）等物质，它们为契达干酪增添了奶香味、肥皂味、水果香气和一定的保鲜作用。在 10~20 d 时，M19 发酵干酪实验组中酯类（C）占据主导地位，主要包括己酸乙酯（C5）、乙酸乙酯（C11）、辛酸乙酯（C13）、乙酸苯乙酯（C14）、癸酸乙酯（C15）、异丁酸 2-苯乙酯（C16）等物质，这些物质共同作用为契达干酪增添了甜味、奶香味、水果味及花香味等，使其在香气方面更加丰富。在 0~10 d 时，空白对照组中酯类（C）为主要香气贡献物质，其中邻苯二甲酸正丁异辛酯（C6）、顺式-7-十六碳烯酸甲酯（C7）、丙酸壬酯（C8）、邻苯二甲酸二异丁酯（C9）、棕榈酸甲酯（C10）等物质共同为契达干酪贡献了奶香味。这一结果与表 1 及 PCA 一致。

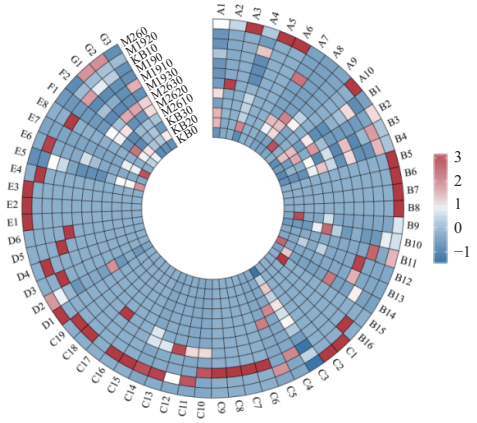


图 5 不同成熟期契达干酪风味物质环状热图

Fig.5 Cyclic heat map of flavor substances of Cheddar cheese at different maturation stages

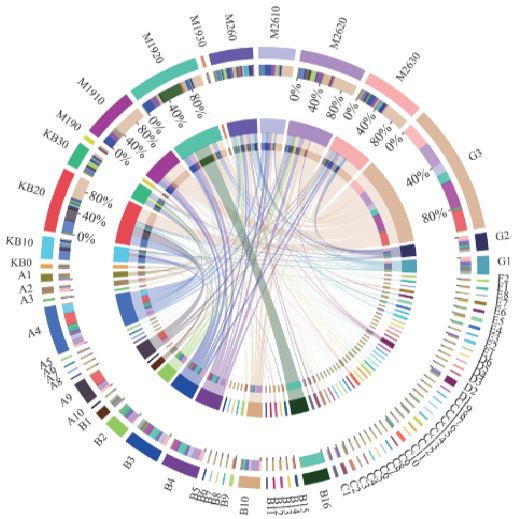


图 6 不同成熟期契达干酪风味物质动态 Circos 图

Fig.6 Circos diagram of the dynamic flavor compounds of Cheddar cheese at different maturation stages

2.6 产酶酵母菌在不同成熟时期对契达干酪关键风味物质的确定与分析

在产酶酵母菌发酵后的契达干酪中检测到多种挥发性物质，但其中只有部分物质对 3 组干酪（空白对照组、M19 发酵干酪实验组、M26 发酵干酪实验组）风味具有贡献，其余物质只是起到风味修饰作用。ROAV 是评价挥发性物质对食品风味贡献的常用方法，一般认为 ROAV≥1 时对样品风味贡献较大，并且与食品的风味贡献呈正相关，当 0.1≤ROAV<1 时在样品中只是对风味起到了修饰作用，ROAV<0.1 则对样品风味影响甚微[32]。由表 2 可知，M19 发酵干酪实验组在 20 d 成熟期中的关键风味物质最多，根据 ROAV 大小顺序，分别为己酸乙酯>丁酸乙酯>乙酸乙酯>乙酸苯乙酯>癸酸乙酯>苯甲醛>乙醇>正戊醇>异戊醇>乙酸，共 10 种，因此己酸乙酯呈现的

表 2 不同成熟时期契达干酪关键风味物质 ROAV 分析结果

Table 2 ROAV analysis results of key flavor compounds in Cheddar cheese at different maturation periods

风味物质	香气描述[3,20]	感觉阈值（μg/L）	ROAV											
			K-0	M19-0	M26-0	K-10	M19-10	M26-10	K-20	M19-20	M26-20	K-30	M19-30	M26-30
乙酸	酸味	22000	–	–	1.70	34.65	–	0.48	1.18	0.11	0.35	0.30	–	0.25
辛酸	酸败味	500	–	–	13.25	–	–	–	–	–	–	–	–	–
异戊醇	–	30000	–	–	0.85	13.92	0.54	0.36	0.16	0.55	–	0.08	–	0.27
正戊醇	–	4000	–	–	6.35	–	4.02	2.71	–	4.16	2.67	–	–	2.01
乙醇	甜味	10000	–	–	–	–	–	–	–	5.08	–	–	–	–
己酸乙酯	果香味	5	–	–	–	–	–	–	–	100	–	–	–	100
乙酸乙酯	水果香	340	–	–	–	–	5.97	–	–	10.62	–	–	–	–
辛酸乙酯	苹果味	5	–	–	–	–	81.25	–	–	–	–	–	–	–
乙酸苯乙酯	花香味	250	–	–	–	–	3.00	–	–	9.00	–	–	2.05	–
癸酸乙酯	椰子味	200	–	–	–	–	–	–	–	6.60	–	–	–	–
丁酸乙酯	苹果味	20	–	–	–	–	–	–	–	15.28	–	–	–	–
苯甲醛	杏仁味	85	–	–	–	–	–	–	–	5.23	–	–	–	–

注：表中未出现物质均为未查到阈值物质；阈值通过网站https://www.vcf-online.nl/查询，以水中阈值为参考；–表示未检出该物质。

水果香和酒香是主要香气特征[26]。空白对照组中仅有 2 种关键风味物质，分别为乙酸>异戊醇，主要贡献酵母味、酸涩味[33]。M26 发酵干酪实验组在 30 d 成熟期中关键风味物质共有 4 种，分别为己酸乙酯>正戊醇>异戊醇>乙酸。其中己酸乙酯在两组实验组干酪中 ROAV 最大，是产酶酵母菌发酵后的干酪中最重要的风味物质，呈现水果香和酒香。综上，实验组共同气味特征为水果香和酒香，其中以成熟期为 20 d 时 M19 发酵干酪实验组的气味最强烈，说明 M19 发酵干酪能更高效地促进干酪风味形成，缩短成熟周期至 20 d，有助于降低生产成本、提升效率。而 M26 发酵干酪风味开发能力较弱，可能导致产品风味单一、成熟周期长。经由上述研究可以发现经过产酶酵母菌发酵的契达干酪在关键风味方面得到了很大的改善。

3　结论

本实验通过 SPME-GC-MS 结合电子鼻技术对空白对照组、M19 发酵干酪实验组和 M26 发酵干酪实验组中的挥发性化合物进行检测，共检测出挥发性化合物 64 种，其中酸类 10 种、醇类 16 种、酯类 19 种、醛类 6 种、酮类 8 种、内酯类 2 种和其他类 3 种。PCA 与聚类分析发现，M26 发酵干酪实验组中挥发性化合物数量更丰富，包括正己酸(A3)、辛酸(A5)、3-羟基月桂酸(A6)、乳酸(A10)、2,3-丁二醇(B5)、2-辛醇(B6)和 3-甲基-2-庚醇(B7)、6-甲基-2-庚醇(B8)物质；M19 发酵干酪实验组主要挥发性化合物为己酸乙酯(C5)、乙酸乙酯(C11)、辛酸乙酯(C13)、乙酸苯乙酯(C14)、癸酸乙酯(C15)、异丁酸 2-苯乙酯(C16)物质；空白对照组主要挥发性化合物为邻苯二甲酸正丁异辛酯(C6)、顺式-7-十六碳烯酸甲酯(C7)、丙酸壬酯(C8)、邻苯二甲酸二异丁酯(C9)、棕榈酸甲酯(C10)物质，为后续风味物质的形成奠定了基础。此外，电子鼻与 GC-MS 测定结果基本一致，均表明不同契达干酪间香气物质有较大差异，其中 M19 和 M26 发酵干酪实验中香气物质最丰富。通过 ROAV 对产酶酵母菌发酵后的契达干酪关键风味物质进行判定，发现 M19 发酵干酪实验组在 20 d 成熟期中关键风味物质最多，而 M26 发酵干酪实验组在 30 d 成熟期中关键风味物质相对较少，分别为 10 种和 4 种；说明 M19 发酵干酪能更高效地促进干酪风味形成，缩短成熟周期至 20 d，有助于降低生产成本、提升效率。而 M26 发酵干酪风味开发能力较弱，可能导致产品风味单一、成熟周期长。空白对照组中关键风味物质种类较少，仅有 2 种关键风味物质，说明经过产酶酵母菌发酵后的契达干酪在关键风味物质方面有显著性改善。

总体来说，产酶酵母菌发酵后的契达干酪挥发性化合物和关键风味物质种类方面均得到改善。由此可见，可利用 GC-MS 结合电子鼻技术对产酶酵母菌发酵后的契达干酪风味物质进行分析，旨在鉴别不同发酵剂对干酪风味特征的影响。电子鼻作为一项成熟的风味物质检测手段，在本研究中进一步验证了其在干酪风味区分中的适用性与有效性。

© 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] 陈洋, 何宁, 穆易君, 等. 瑞士乳杆菌对契达干酪成熟期间品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 122−125,131. [CHEN Yang, HE Ning, MU Yijun, et al. Effect of *Lactobacillus helveticus* on the quality of Cheddar cheese[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(7): 122−125,131.]

[2] 干酪将成为我国乳制品消费的新增长点[J]. 乳业科学与技术, 2019, 42(2): I0005. [Cheese will become a new growth point of dairy consumption in China[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2019, 42(2): I0005.]

[3] 程晶晶, 陈会民, 罗洁, 等. 不同成熟期切达干酪的组分及特征风味物质的解析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 231−237. [CHENG Jingjing, CHEN Huimin, LUO Jie, et al. Analysis of components and characteristic flavor substances of cheddar cheese at different maturation stages[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(15): 231−237.]

[4] 王静, 张伟博, 毛玲, 等. 切达干酪风味形成及影响因素研究进展[J]. 中国奶牛, 2024(8): 35−40. [WANG Jing, ZHANG Weibo, MAO Ling, et al. Research progress on formation and influence factors of flavor in cheddar cheese[J]. China Dairy Cattle, 2024(8): 35−40.]

[5] KURE C F, SKAAR I. The fungal problem in cheese industry[J]. Current Opinion in Food Science, 2019, 29: 14−19.

[6] 康优, 吕杨, 高磊, 等. 乳酸片球菌与马克斯克鲁维酵母混合附属发酵剂对切达干酪品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(10): 120−127. [KANG You, LÜ Yang, GAO Lei, et al. Effects of mixed adjunct culture of *Pediococcus acidilactici* and *Kluyveromyces marxianus* on the quality of cheddar cheese[J]. Food Science, 2025, 46(10): 120−127.]

[7] de FREITAS I, PINON N, BERDAGUÉ J L, et al. *Kluyveromyces lactis* but not *Pichia fermentans* used as adjunct culture modifies the olfactory profiles of cantalet cheese[J]. Journal of Dairy Science, 2008, 91(2): 531−543.

[8] SEVINC-DEMIRCAN B, OZTURKOGLU-BUDAK S. Use of yeast isolates of cheese origin as adjunct culture in Beyaz cheese: Influence on sensorial, textural and quality characteristics[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(10): 2670−2680.

[9] BERTUZZI A S, KILCAWLEY K N, SHEEHAN J J, et al. Use of smear bacteria and yeasts to modify flavour and appearance of Cheddar cheese[J]. International Dairy Journal, 2017, 72: 44−54.

[10] 巨玉佳, 梁琪, 张炎, 等. 电子鼻联合 GC—MS 分析不同牦牛乳干酪中特征挥发性成分[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 14−17. [JU Yujia, LIANG Qi, ZHANG Yan, et al. Analysis of volatile components in yak milk cheese with GC-MS assisted by electronic nose technology[J]. Food and Machinery, 2014, 30(4): 14−17.]

[11] 王宠, 梁琪, 甘伯中, 等. 电子鼻在干酪风味检测中的应用[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 250−253. [WANG Chong, LIANG Qi, GAN Bozhong, et al. Application of electronic nose in detecting cheese flavor[J]. Food & Machinery, 2012, 28(2): 250−253.]

[12] 李璐, 尹礼国, 陆安霞, 等. GC-MS 结合电子鼻技术对不同

茶区茉莉花茶香气的差异比较[J]. 现代食品科技, 2024, 40(2): 302−311. [LI Lu, YIN Liguo, LU Anxia, et al. Comparison of jasmine tea aroma in different tea regions by GC-MS and electronic nose[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(2): 302−311.]
[13] 刘格格, 毕金峰, 苟敏, 等. 基于 GC-MS 及电子鼻技术结合化学计量法表征 8 种白桃关键香气的差异[J]. 食品科学, 2023, 44(18): 277−285. [LIU Gege, BI Jinfeng, GOU Min, et al. Gas chromatography and electronic nose combined with chemometrics to investigate differences in key aroma components in eight white-fleshed peach cultivars[J]. Food Science, 2023, 44(18): 277−285.]
[14] 王铁儒, 郭丽, 马曼, 等. SPME-GC-MS 与电子鼻结合分析不同酵母混菌发酵猕猴桃酒的挥发性香气物质[J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 119−128. [WANG Tieru, GUO Li, MA Man, et al. Analysis of volatile aroma compounds in kiwi wine co-fermentation with different yeasts by SPME-GC-MS combined with electronic nose[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 119−128.]
[15] 杨睿. 高产脂肪酶乳酸菌的筛选及其对干酪内酯类风味化合物形成的贡献[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023. [YANG Rui. Screening of high esterase-producing lactic acid bacteria and its contribution to the formation of lactone flavor compounds in cheese[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2023.]
[16] 王蓓, 张国华, 王娟, 等. SPME-GC-MS 分析内蒙古地区传统奶豆腐中挥发性风味组分[J]. 现代食品科技, 2015, 31(12): 378−386. [WANG Bei, ZHANG Guohua, WANG Juan, et al. Analysis of volatile compounds in traditional hurood from Inner Mongolia region by SPME-GC-MS[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(12): 378−386.]
[17] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370−374. [LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinglian. "ROAV" method: A new method for determining key odor compounds of Rugao ham[J]. Food Science, 2008, 29(7): 370−374.]
[18] 卢灏泽, 吕嘉伟, 杨帆, 等. 西藏牦牛奶酪的微生物群落结构与风味物质分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(6): 179−185, I0001. [LU Haoze, LÜ Jiawei, YANG Fan, et al. Microbial community structure and flavor analysis of Tibetan yak cheese[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(6): 179−185, I0001.]
[19] 代敏. 保鲜乳挥发性风味物质的分析与调控[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006. [DAI Min. Analysis and control of volatile flavor compounds in fresh milk[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2006.]
[20] 郑晓吉. 新疆哈萨克族奶酪微生物菌群结构及特征风味解析[D]. 无锡: 江南大学, 2018. [ZHENG Xiaoji. Microbial community flora in Kazak artisanal cheese and analysis on the formation of flavor compounds[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.]
[21] 杨秉坤, 剧柠, 丁雨红, 等. 沙棘酸奶挥发性风味物质的 GC-IMS 表征[J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 308−315. [YANG Bingkun, JU Ning, DING Yuhong, et al. Characterization of volatile flavors of fermented sea-buckthorn yoghurt using gas chromatography-ion mobility spectroscopy[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(13): 308−315.]
[22] 郑晓吉, 刘飞, 任全路, 等. 基于 SPME-GC-MS 法比较新疆哈萨克族不同居住区奶酪风味差异[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 83−89. [ZHENG Xiaoji, LIU Fei, REN Quanlu, et al. Comparative analysis of volatile compounds in Kazak cheeses from different regions of Xinjiang by SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2018, 39(8): 83−89.]
[23] DRAKE M A, MIRACLE R E, McMAHON D J. Impact of fat reduction on flavor and flavor chemistry of Cheddar cheeses[J]. Journal of Dairy Science, 2010, 93(11): 5069−5081.
[24] 李志国, 宗学醒, 闫清泉等. 干酪风味形成的研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2019, 42(1): 51−54. [LI Z G, ZONG X X, YAN Q Q, et al. Research progress on the formation of cottage cheese flavor[J]. Dairy Science and Technology, 2019, 42(1): 51−54.]
[25] 王磊, 莫蓓红, 刘振民, 等. 8 种典型成熟干酪挥发性风味差异性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 33−38. [WANG Lei, MO Beihong, LIU Zhenmin, et al. Study on the differences of volatile flavor of eight typical mature cheeses[J]. Food & Machinery, 2017, 33(4): 33−38.]
[26] 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 Jiao, XU Lingyun, ZHANG Jinhua, et al. Cheddar cheese with different ripening times: Analysis of volatile aroma components and electronic nose discrimination[J]. Food Science, 2020, 41(20): 175−183.]
[27] MOLIMARD P, SPINNLER H E. Review: Compounds involved in the flavor of surface mold-ripened cheeses: Origins and properties[J]. Journal of Dairy Science, 1996, 79(2): 169−184.
[28] 王姣. 不同成熟度契达干酪中特征风味组分及其感官特征研究[D]. 北京: 北京工商大学, 2023. [WANG J. Study on characteristic flavor components and their sensory characteristics in different maturity levels of cheda cheese[D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2023.]
[29] PU Dandan, ZHANG Huiying, ZHANG Yuyu, et al. Characterization of the key aroma compounds in white bread by aroma extract dilution analysis, quantitation, and sensory evaluation experiments[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(5): e13933.
[30] CLARKE H J, FITZPATRICK E, HENNESSY D, et al. The influence of pasture and non-pasture-based feeding systems on the aroma of raw bovine milk[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 841454.
[31] CONDE-BÁEZ L, CASTRO-ROSAS J, VILLAGÓMEZ-IBARRA J R, et al. Evaluation of waste of the cheese industry for the production of aroma of roses (phenylethyl alcohol)[J]. Waste and Biomass Valorization, 2017, 8(4): 1343−1350.
[32] 焦昱玮, 窦兆婷, 田硕, 等. HS-SPME-GC-MS 技术分析马铃薯浓汁发酵过程中挥发性物质的变化[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 318−324. [JIAO Yuwei, DOU Zhaoting, TIAN Shuo, et al. HS-SPME-GC-MS-based profiling of volatile metabolite variations during potato thick juice fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 318−324.]
[33] 张兰俊, 张岩, 陈炼红. Edam 牦牛干酪工艺优化及成熟过程中微观结构、挥发性风味物质的变化[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 116−123. [ZHANG Lanjun, ZHANG Yan, CHEN Lianhong. Optimization of Edam yak cheese process, the changes of its microstructure and volatile flavor substances during ripening[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(5): 116−123.]